

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie



Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Génie civil*

Spécialité : *Matériaux En Génie Civil*

Présentée par

BOUSSAA Nadia

Thème

**Influence des déchets agricoles (Cendres de bois)
sur le comportement des matériaux de
construction**

Devant le Jury composé de :

Nom	Prénom	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
MELBOUCI	Bachir	Professeur	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Président
TAOUCHE-KHELOUI	Fatma	Professeur	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Rapporteur
CHELOUAH	Nasser	Professeur	Université Mira Abderahmane	Co-Rapporteur
FEDAOUI-AKMOUSSI	Ourdia	Maitre de Conférences A	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Examinatrice
AIT TALEB	Souad	Maitre de Conférences A	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Examinatrice
LEKLOU	Nordine	Professeur	Université de Nantes- France	Examineur
MEZIANI	Faroudja	Maitre de conférences A	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Invitée

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie dieu, le Tout Puissant, qui m'a donné la capacité, la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser et d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes deux encadrants: ma directrice de thèse **Mme TAOUCHE-KHELOUI Fatma** et mon co-directeur de thèse **M. CHELOUAH Nasser**, pour avoir accepté de me proposer ce thème et de diriger cette thèse, et qui ont suivi de près mon travail avec beaucoup de patience. Leur soutien permanent et leur passion pour la recherche m'ont encouragée à surmonter les difficultés rencontrées durant la thèse. Sans leur aide précieuse, cette thèse n'aurait pas pu aboutir.

Je remercie très sincèrement **M. LEKLOU Nordine** pour avoir pris le temps de partager avec nous nos travaux et d'avoir accepté de faire partie de notre équipe pour la suite de cette recherche.

J'exprime mes sincères remerciements aux membres de jury, à **M. MELBOUCI Bachir** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à **Mme FEDAOUI-AKMOUSSI Ourdia**, **Mme AIT TALEB Souad**, **M. LEKLOU Nordine** et **Mme MEZIANI Faroudja** qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse et ont sacrifié leur temps précieux pour évaluer et commenter mes travaux.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes chers parents et mon cher mari qui m'ont soutenue, supportée et encouragée dans mes projets, ainsi qu'à mes deux frères, ma sœur et mes grands-parents et toute ma famille. Je remercie également mes deux chères amies **Djenad Sonia** et **Outayeb Sonia** qui m'ont beaucoup aidée. Merci pour leur amour et leur confiance; c'est grâce à eux que je suis ici aujourd'hui et je leur en serai éternellement reconnaissante.

Un grand merci à tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail:

À mes chers parents;

À mon cher mari Messaoud;

À mes chers frères Lyes et Sid Ahmed et ma chère sœur Leila;

À mes chers grands-parents;

À ma chère tante maternelle et sa famille;

À mes chers oncles maternels et leurs familles;

À mes chers oncles et tantes paternels et leurs familles;

À ma belle-mère, mes belles-sœurs et beaux-frères;

À toute ma famille, ma belle-famille et mes amis.

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Table de matières.....	III
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XVI

INTRODUCTION GÉNÉRALE..... page 1

CHAPITRE I: Synthèse bibliographiques

I.1. Introduction.....	page 6
I.2. Revue bibliographique.....	page 7
I.2.1. Généralités sur la terre.....	page 7
I.2.1.1. Les kaolinites.....	page 9
I.2.1.2. Les illites.....	page 10
I.2.1.3. Les smectites.....	page 11
I.2.2. Généralités sur la construction en terre crue.....	page 11
I.3. Stabilisation des briques en terre comprimées.....	page 15
I.3.1. Stabilisation des briques en terre comprimées aux liants minéraux.....	page 16
I.3.1.1. À l'échelle microscopique.....	page 16
I.3.1.2. À l'échelle macroscopique	page 18
I.3.1.3. Résistances mécaniques.....	page 18
I.3.1.4. Propriétés thermiques.....	page 22
I.3.1.5. Propriétés de durabilités.....	page 23
I.5. Stabilisation des briques en terre comprimées aux liants alternatifs.....	page 24
I.5.1. L'effet des liants alternatifs sur les résistances mécaniques.....	page 26
I.5.3. L'effet des liants alternatifs sur les propriétés de durabilités.....	page 29
I.6. Conclusion.....	page 30

CHAPITRE II: Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

II.1. Introduction.....	page 32
--------------------------------	----------------

II.2. Matériaux utilisés.....	page 32
II.3. Caractérisations des matières premières.....	page 33
II.3.1. Caractérisations chimiques et minéralogiques	page 33
II.3.1.1. Analyse chimique par spectrométrie de fluorescence des rayons X	page 33
II.3.1.2. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X (DRX)	page 35
II.3.2. Caractérisations physiques.....	page 38
II.3.2.1. Analyse granulométrique au laser.....	page 38
II.3.2.2. Mesure de la teneur en eau (NF P 94-050)	page 42
II.3.2.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)	page 43
II.3.2.4. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)	page 45
II.3.2.5. Surfaces spécifiques.....	page 46
II.3.2.6. Masses volumiques (apparentes et absolues) (NF P 94-053)	page 48
II.3.2.7. Mesure de pH.....	page 48
II.3.3. Caractérisations microstructurales (MEB/EDX)	page 49
II.3.4. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)	page 52
II.3.4.1. Calcul de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de la calcite (CaCO_3)	page 56
II.4. Confection des briques en terre comprimées.....	page 57
II.4.1. Production des éprouvettes	page 57
II.4.2. Optimisation de la teneur en eau	page 59
II.4.3. Compactages des briques en terre	page 61
II.5. Conditions de cures des éprouvettes	page 62
II.5.1. Milieu ambiant	page 62
II.5.2. Milieu hermétique	page 62
II.5.3. Milieu hygrothermique.....	page 62
II.6. Caractérisations des briques en terre comprimées.....	page 62
II.6.1. Résistances mécaniques.....	page 62
II.6.2. Propriétés thermiques	page 63
II.6.3. Durabilités à l'eau.....	page 64
II.7. Microcalorimétrie.....	page 65
II.8. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%).....	page 66
II.9. Porosimétrie par intrusion de mercure.....	page 67
II.11. Conclusion.....	page 67

CHAPITRE III: L'effet des cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée

III.1. Introduction.....	page 69
III.2. Caractérisation des propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois.....	page 70
III.2.1. Résistances mécaniques.....	page 70
III.2.1.1. Résistances à la flexion.....	page 70
III.2.1.2. Résistances à la compression.....	page 73
III.2.2. Propriétés thermiques.....	page 80
III.2.2.1. Conductivité thermique.....	page 80
III.2.2.2. Capacité thermique volumétrique.....	page 84
III.2.3. Durabilité des BWBA.....	page 87
III.2.4. Masses volumiques apparentes des briques en terre comprimée.....	page 94
III.3. L'effet de la teneur en cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée.....	page 97
III.3.1. Stabilisant physique et/ou chimique-Modification et rhéologie.....	page 97
III.3.2. Résistances mécaniques.....	page 98
III.3.3. Propriétés thermiques.....	page 100
III.3.4. Durabilité.....	page 101
III.3.5. Masses volumiques apparentes.....	page 101
III.3.6. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X des BWBA(20%).....	page 102
III.3.7. Caractérisations microstructurales (MEB et MEB/EDX) des BWBA(20%).....	page 104
III.3.8. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) des BWBA(20%).....	page 115
III.3.8.1. Calcul des pourcentages de calcite (CaCO_3), de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).....	page 120
III.3.9. Suivi du processus d'hydratation par microcalorimétrie isotherme.....	page 122
III.3.10. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%).....	page 124
III.3.11. Porosimétrie par intrusion de mercure.....	page 126
III.4. Conclusion.....	page 130

CHAPITRE IV: Impact du milieu de conservation sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

IV.1. Introduction.....	page 133
IV.2. L’impact du milieu de conservations sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois.....	page 134
IV.2.1. Propriétés mécaniques.....	page 134
IV.2.1.1. Résistances à la flexion.....	page 134
IV.2.1.2. Résistances à la compression.....	page 138
IV.2.2. Propriétés thermiques.....	page 143
IV.2.2.1. Conductivité thermique.....	page 143
IV.2.2.2. Capacité thermique volumétrique.....	page 148
IV.2.3. Propriétés de durabilité.....	page 150
IV.2.4. Masses volumiques apparentes des briques en terre comprimée.....	page 153
IV.3. L’impact du temps de cure (7, 28, 60 et 180 jours) sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois.....	page 156
IV.3.1. Propriétés mécaniques.....	page 156
IV.3.2. Propriétés thermiques.....	page 160
IV.3.3. Propriétés de durabilités.....	page 165
IV.3.4. Masses volumiques apparentes.....	page 166
IV.4. L’impact des conditions du milieu de conservation (température ambiante et humidité relative) sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois.....	page 167
IV.4.2. Milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR)	page 167
IV.4.2. Milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR)	page 170
IV.4.3. Milieu hygrothermique (40 °C, 100% HR)	page 171
IV.5. Caractérisation des briques en terre comprimée conservées dans différentes conditions de cure (ambiantes, hermétiques et hygrothermiques)	page 173
IV.5.1. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X des BWBA(20%).....	page 173
IV.5.2. Caractérisations microstructurales (MEB et MEB/EDX) des BWBA(20%).....	page 177
IV.5.3. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) des BWBA(20%).....	page 185
IV.5.3.1. Calcul des pourcentages de calcite, de portlandite et de brucite.....	page 188

Table des matières

IV.5.4. Suivi du processus d'hydratation par microcalorimétrie isotherme.....	page 192
IV.5.5. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%).....	page 194
III.5.6. Porosimétrie par intrusion de mercure.....	page 196
IV.6. Conclusion.....	page 199
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	page 201
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	page 205
ANNEXES.....	page 231

Liste des figures

Chapitre I: Synthèse bibliographiques

Figure I.1. Représentation schématique d'une structure phyllosilicatée de type T-O-T [18]	page 8
Figure I.2. Couches tétraédriques (a) et octaédriques (b) [20]	page 9
Figure I.3. Trois grandes familles d'argile [18, 22]	page 9
Figure I.4. (a) Unité structurale de la Kaolinite et des liaisons hydrogène, (b) Image MEB d'une kaolinite [23, 24]	page 10
Figure I.5. (a) Unité structurale d'une illite avec un cation potassium dans l'espace interfoliaire, (b) Image MEB d'une illite [23, 25]	page 10
Figure I.6. (a) Unité structurale de la smectite avec un cation échangeable, (b) Image MEB d'une Montmorillonite [26, 27]	page 11

Chapitre II: Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

Figure II.1. Matières premières; (a) Terre à l'état naturelle, (b) Terre utilisée.....	page 33
Figure II.2. Cendres de déchets de biomasses; (a) WBAa, (b) WBAb	page 33
Figure II.3. Dispositif de fluorescence X utilisé.....	page 34
Figure II.4. Diffractomètre modèle Malvern PANalytical Empyrean.....	page 36
Figure II.5. DRX des matières premières (a) terre, (b) WBAa et (c) WBAb.....	page 38
Figure II.6. Granulomètre laser de HORIBA.....	page 39
Figure II.7. Distributions granulométriques de la terre et WBA.....	page 40
Figure II.8. Classification de la terre utilisée selon le triangle des textures de l'INRA [124]	page 42
Figure II.9. Limites d'Atterberg; (a) Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande, (b) Limite de plasticité au rouleau.....	page 43
Figure II.10. Diagramme de plasticité de la terre.....	page 44
Figure II.11. Essai de bleu de méthylène.....	page 46
Figure II.12. BET Micromeritics ASAP 2020 Plus, V2.00.....	page 47
Figure II.13. Mesure de pH à l'aide d'un pH-mètre HANNA instrument.....	page 49
Figure II.14. Microscope électronique à balayage MEB de Thermo Scientific.....	page 50

Liste des figures

Figure II.15. Images MEB des matières premières (a) terre, (b) WBAa et (c) WBAb.....	page 52
Figure II.16. Dispositif de l'analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)	page 53
Figure II.17. ATG/DTG des matériaux utilisés; (a) terre, (b) WBAa et (b) WBAb...	page 56
Figure II.18. Résultats des pourcentages de $Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ et $CaCO_3$ contiennent dans les matériaux utilisés.....	page 57
Figure II.19. Confections des éprouvettes; (1) malaxage, (2) moulage, (3) avant démoulage, et (4) démoulage.....	page 59
Figure II.20. Densité sèche maximale et teneur en eau optimale de BWBA.....	page 60
Figure II.21. Dispositif de résistances mécaniques de marque Controls de type PILOT PRO.....	page 63
Figure II.22. Dispositifs thermique (CT-Mètre)	page 64
Figure II.23. Essai d'absorption d'eau capillaire.....	page 65
Figure II.24. Microcalorimètre TAM Air 8-channel de TA Instruments.....	page 66
Figure II.25. Micromeritics AutoPore 9500.....	page 67

Chapitre III: L'effet des cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée

Figure III.1. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans le milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 71
Figure III.2. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans le milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 72
Figure III.3. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 73
Figure III.4. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 74
Figure III.5. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 75
Figure III.6. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 76
Figure III.7. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 81

Liste des figures

Figure III.8. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 82
Figure III.9. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 83
Figure III.10. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 85
Figure III.11. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 86
Figure III.12. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 86
Figure III.13. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 88
Figure III.14. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 89
Figure III.15. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 90
Figure III.16. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu ambiant pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 91
Figure III.17. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu hermétique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 92
Figure III.18. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu hygrothermique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 93
Figure III.19. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 95
Figure III.20. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 96
Figure III.21. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.....	page 97
Figure III.22. DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu ambiant à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).....	page 103

Liste des figures

- Figure III.23.** DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hermétique à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase)..... page 103
- Figure III.24.** DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hygrothermique à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase)..... page 104
- Figure III.25.** Images MEB de BWBA conservées dans un milieu ambiant, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours..... page 106
- Figure III.26.** Images MEB de BWBA conservées dans un milieu hermétique, (a, b, c) BWBAa(20 %) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours... page 107
- Figure III.27.** Images MEB de BWBA conservées dans un milieu hygrothermique, (a, b, c) BWBAa(20 %) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours..... page 108
- Figure III. 28.** MEB/EDX des BWBA conservées en milieu ambiant, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours..... page 110
- Figure III. 29.** MEB/EDX des BWBA conservées en milieu hermétique, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours..... page 112
- Figure III. 30.** MEB/EDX des BWBA conservées en milieu hygrothermique, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours.... page 114
- Figure III.31.** Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu ambiant à 28, 60 et 180 jours..... page 116
- Figure III.32.** Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu hermétique à 28, 60 et 180 jours..... page 117
- Figure III.33.** Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu hygrothermique à 28, 60 et 180 jours..... page 118
- Figure III.34.** Résultats des pourcentages de $Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ et $CaCO_3$ contenus dans les BWBA(20%) après 28, 60 et 180 jours dans les différents milieux de conservations..... page 121
- Figure III.35.** Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres de bois (conditions ambiantes) page 123
- Figure III.36.** Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres de bois (conditions hermétiques et hygrothermiques) page 123

Liste des figures

Figure III.37. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu ambiant pendant 28, 60 et 180 jours.....	page 125
Figure III.38. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu hermétique pendant 28, 60 et 180 jours.....	page 125
Figure III.39. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu hygrothermique pendant 28, 60 et 180 jours.....	page 126
Figure III.40. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu ambiant après 180 jours.....	page 129
Figure III.41. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hermétique après 180 jours.....	page 129
Figure III.42. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hygrothermique après 180 jours.....	page 130

Chapitre IV: Impact du milieu de conservation sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

Figure IV.1. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant (A), hermétique (He) et hygrothermique (Hy) pendant 7 jours.....	page 136
Figure IV.2. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant (A), hermétique (He) et hygrothermique (Hy) pendant 28 jours.....	page 137
Figure IV.3. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.....	page 137
Figure IV.4. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.....	page 138
Figure IV.5. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.....	page 141
Figure IV.6. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.....	page 142
Figure IV.7. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.....	page 142
Figure IV.8. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.....	page 143

Figure IV.9. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.....	page 146
Figure IV.10. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.....	page 147
Figure IV.11. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.....	page 147
Figure IV.12. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.....	page 148
Figure IV.16. Capacités thermiques volumétriques des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.....	page 150
Figure IV.17. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.....	page 152
Figure IV.18. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.....	page 153
Figure IV.24. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.....	page 155
Figure IV.25. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).....	page 175
Figure IV.26. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).....	page 176
Figure IV.27. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).....	page 176
Figure IV.28. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 179
Figure IV.29. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 179

Figure IV.30. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 179
Figure IV.31. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.....	page 180
Figure IV.32. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique	page 189
Figure IV.33. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.....	page 180
Figure IV.34. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 182
Figure IV.35. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 182
Figure IV.36. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.....	page 183
Figure IV.37. Images MEB/EDX de BWBAb(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.....	page 183
Figure IV.38. Images MEB/EDX de BWBAb(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.....	page 184
Figure IV.39. Images MEB/EDX de BWBAb(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.....	page 184
Figure IV.40. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hygrothermique).....	page 187

Figure IV.41. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hygrothermique).....	page 187
Figure IV.42. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hygrothermique).....	page 188
Figure IV.43. Résultats des pourcentages de Mg(OH) ₂ , Ca(OH) ₂ et CaCO ₃ contenus dans les BWBA(20%) après 28 jours dans les différents milieux de conservations.....	page 190
Figure IV.44. Résultats des pourcentages de Mg(OH) ₂ , Ca(OH) ₂ et CaCO ₃ contenus dans les BWBA(20%) après 60 jours dans les différents milieux de conservations.....	page 191
Figure IV.45. Résultats des pourcentages de Mg(OH) ₂ , Ca(OH) ₂ et CaCO ₃ contenus dans les BWBA(20%) après 180 jours dans les différents milieux de conservations.....	page 191
Figure IV.46. Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres WBAA de bois à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique)	page 194
Figure IV.47. Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres WBAb de bois à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique)	page 196
Figure IV.48. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique) pendant 180 jours.....	page 75

Liste des tableaux

Chapitre I: Synthèse bibliographiques

Tableau I.1. Tableau récapitulatif des techniques de construction en terre crue.....	page 13
Tableau I.2. Tableau récapitulatif sur les briques en terre crue stabilisées aux liants minéraux.....	page 21
Tableau I.3. Tableau récapitulatif sur les briques en terre crue stabilisées aux liants minéraux alternatifs.....	page 27

Chapitre II: Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

Tableau II.1. Compositions chimiques des matières premières (oxydes en wt(%))....	page 35
Tableau II.2. Distribution granulométrique des matériaux utilisés.....	page 41
Tableau II.3. Distributions granulométriques cumulatives des matériaux utilisés.....	page 41
Tableau II.4. Limites d'Atterberg de la terre.....	page 44
Tableau II.5. Surfaces spécifiques (Blaine et BET) des matériaux utilisés.....	page 47
Tableau II.6. Masses volumiques des matériaux utilisés.....	page 48

Chapitre III: Effet des cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée

Tableau III.1. Récapitulatif des résultats de l'analyse thermogravimétrique des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours, conservées dans des conditions ambiantes, hermétiques et hygrothermiques.....	page 119
--	----------

Introduction générale

L'histoire de la construction humaine est intimement liée à l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction. Les découvertes archéologiques à travers le monde témoignent de cette relation ancestrale, démontrant la maîtrise précoce des techniques de construction en terre par les premières civilisations. Cette tradition perdue aujourd'hui encore, puisqu'un tiers de l'humanité vit toujours dans des habitations en terre.

Paradoxalement, malgré l'essor technologique considérable des derniers siècles et la multiplication des matériaux de construction modernes, un regain d'intérêt significatif pour la construction en terre crue est actuellement observé. Ce retour aux sources s'observe non seulement dans les pays en développement mais également dans les nations industrialisées, où la recherche scientifique et le développement de nouvelles techniques de production contribuent à sa renaissance.

Les avantages intrinsèques de la terre crue comme matériau de construction sont nombreux et significatifs. Sa disponibilité locale réduit considérablement les coûts de transport et l'impact environnemental. Sa mise en œuvre, relativement simple et nécessitant un outillage minimal, la rend particulièrement adaptée aux constructions rurales, bien que son utilisation s'étende également aux zones urbaines. Ses qualités esthétiques naturelles, combinées à une excellente inertie thermique, permettent de réguler naturellement la température intérieure des bâtiments, offrant une fraîcheur en été et une conservation de la chaleur en hiver [1-5]. Cependant, les constructions en terre présentent certaines limitations techniques, notamment une résistance mécanique relativement faible, une tendance à la fissuration due au retrait et une sensibilité particulière à l'eau [1-5].

Pour surmonter les inconvénients inhérents à la construction en terre crue, différentes techniques de stabilisation ont été développées au fil du temps. Parmi les innovations majeures, les Briques en Terre Comprimée (BTC) représentent une avancée technique significative. Cette méthode récente offre une grande flexibilité d'utilisation, permettant leur intégration aussi bien comme matériau de remplissage dans une structure poteau-poutre que comme élément porteur principal.

L'amélioration des performances des BTC nécessite généralement l'utilisation de stabilisants, traditionnellement le ciment et/ou la chaux, qui visent à réduire la porosité, limiter les variations volumétriques et améliorer la résistance à l'érosion [6-8]. Cependant, bien que le ciment soit couramment utilisé comme stabilisant du sol à des niveaux ne dépassant pas 10%, ce

pourcentage reste problématique d'un point de vue environnemental. En effet, la production de ciment contribue significativement aux émissions de dioxyde de carbone et à l'effet de serre [6, 8], ce qui soulève des questions quant à la durabilité de cette approche dans un contexte de changement climatique.

Face à ces préoccupations environnementales et à la nécessité de développer des solutions de construction durables, la recherche s'oriente vers des stabilisants alternatifs plus respectueux de l'environnement. L'utilisation des déchets de biomasse comme stabilisants dans la production des briques en terre comprimées représente une voie prometteuse, qui puise ses racines dans des pratiques ancestrales tout en s'adaptant aux applications modernes et industrielles. Cette approche prend une dimension particulière en Algérie, où la construction en terre fait partie intégrante du patrimoine architectural, notamment dans les zones rurales et arides. Le pays, générant annuellement des millions de tonnes de déchets agricoles, dispose d'un potentiel considérable pour le développement de cette technique, permettant ainsi d'allier tradition constructive et innovation durable.

La valorisation de la biomasse représente en effet un enjeu majeur tant au niveau national qu'international. En Algérie, le potentiel en biomasse est considérable, comme le démontrent les données du Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER, 2020) [9]. Selon l'Agence Nationale des Déchets (AND) [10], le pays génère annuellement environ 1,5 million de tonnes de résidus agricoles, 5 millions de tonnes de déchets d'élevage et 2 millions de tonnes de déchets organiques municipaux. Les résidus agricoles, principalement issus des cultures céréalières, des déchets forestiers et des résidus d'exploitation agricole, présentent un potentiel significatif pour la valorisation énergétique et matérielle. D'après les études menées par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) [11], ces ressources pourraient contribuer significativement à la transition énergétique du pays.

Cette situation s'inscrit dans un contexte mondial plus large. À l'échelle planétaire, la FAO estime la production annuelle de déchets de biomasse à 56 milliards de tonnes pour l'agriculture, 42 milliards de tonnes pour la sylviculture, 28 milliards de tonnes pour l'élevage et 14 milliards de tonnes pour les déchets municipaux [12]. L'importance de la biomasse dans le mix énergétique global est soulignée par l'Agence Internationale de l'Énergie, qui indique qu'elle représente 10% de l'approvisionnement mondial en énergie primaire et 2% de la production d'électricité mondiale [13].

Les technologies de valorisation actuelles montrent des résultats prometteurs. La méthanisation affiche des rendements énergétiques de 50-75% et permet une réduction des émissions de 60-80% par rapport aux combustibles fossiles [14]. Le compostage, quant à lui, permet une réduction de volume de 40-60% et génère 400-600 kg d'amendement par tonne traitée [15].

Néanmoins, plusieurs défis techniques persistent, comme l'a identifié le CDER: la dispersion géographique des gisements, la variabilité saisonnière et les besoins en prétraitement [11]. Pour surmonter ces obstacles, la Banque Mondiale préconise le renforcement des capacités locales, le transfert technologique Sud-Sud, le développement de filières intégrées et la mise en place de mécanismes de financement innovants [16].

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente recherche, qui vise à étudier l'utilisation des cendres de déchets agricoles comme stabilisant dans la production des briques en terre comprimées. Plus spécifiquement, l'étude se concentre sur deux types de cendres de bois (Wood Biomass Ash - WBA) issues de la combustion de bois domestique utilisé pour le chauffage dans les maisons de campagne. Cette approche présente un double avantage: elle permet de valoriser des déchets agricoles tout en développant des matériaux de construction durables et économiquement viables, particulièrement adaptés aux conditions climatiques sévères de l'Algérie.

Cette étude s'attache à examiner en détail les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité des briques en terre comprimées stabilisées avec ces cendres de bois. L'objectif final est de contribuer au développement de solutions constructives innovantes, répondant à la fois aux enjeux environnementaux actuels et aux besoins en logements, particulièrement dans les zones rurales où la pénurie d'habitat reste une préoccupation majeure.

Cette recherche s'inscrit ainsi dans une démarche globale de développement durable, combinant valorisation des ressources locales, innovation technologique et réponse aux besoins sociétaux, tout en respectant les nouvelles orientations législatives algériennes en matière d'énergies renouvelables et de construction durable.

Pour répondre à ces enjeux et atteindre les objectifs fixés, ce travail de recherche s'articule autour de quatre chapitres principaux, suivant une démarche méthodologique progressive et cohérente.

Le premier chapitre propose une synthèse bibliographique approfondie, constituant le socle théorique de la recherche. Il dresse un panorama complet de la construction en terre, depuis les propriétés fondamentales du matériau jusqu'aux différentes techniques de mise en œuvre, en accordant une attention particulière aux blocs de terre comprimée (BTC). Cette revue de la littérature analyse également les différents modes de stabilisation et examine de manière exhaustive les travaux antérieurs portant sur l'incorporation des déchets de biomasse, notamment les cendres, et leur influence sur les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité des BTC.

Le deuxième chapitre se concentre sur la caractérisation approfondie des matériaux utilisés dans cette étude. Il présente une analyse détaillée des propriétés physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques de la terre et des cendres de bois sélectionnées. Ce chapitre expose également la méthodologie expérimentale adoptée, détaillant les procédures de formulation des mélanges, les techniques de fabrication des briques, les protocoles de conservation, ainsi que l'ensemble des essais réalisés pour évaluer les performances des matériaux développés.

Les chapitres trois et quatre sont consacrés à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux. Le troisième chapitre examine spécifiquement l'influence de deux types de cendres de bois, issues de la combustion de déchets de biomasse domestique, sur les performances des briques en terre comprimées. Cette étude systématique analyse l'impact de différents paramètres: le taux de substitution de la terre par les cendres (variant de 5 à 20% en poids), les conditions de conservation (milieu ambiant, hermétique et hygrothermique), et le temps de cure (de 7 à 180 jours). Les performances sont évaluées en termes de résistances mécaniques (flexion et compression), propriétés thermiques (conductivité et capacité volumétrique), durabilité face à l'eau, et variations dimensionnelles. L'objectif est de valider l'utilisation des cendres de bois comme stabilisant alternatif écologique, capable d'améliorer significativement les performances globales des BTC tout en préservant leurs avantages environnementaux et économiques.

Le quatrième chapitre approfondit l'étude des conditions de cure et leur optimisation pour remédier aux faiblesses traditionnelles des briques en terre: faibles résistances mécaniques, et sensibilité à l'eau. Une attention particulière est portée à l'influence des conditions de conservation (température et humidité relative) sur l'hydratation des mélanges et le développement des performances. Cette approche vise à optimiser les protocoles de cure pour

maximiser les bénéfices de la stabilisation aux cendres de bois, tout en maintenant la dimension écologique du matériau.

La conclusion générale synthétise l'ensemble des résultats obtenus et propose des recommandations pratiques pour l'utilisation des cendres de bois comme stabilisant dans la production de BTC. Ces préconisations visent à faciliter le transfert des résultats de la recherche vers les applications pratiques, contribuant ainsi au développement de solutions constructives durables et économiquement viables.

Cette structuration permet d'aborder de manière systématique et cohérente la problématique de la stabilisation des BTC par les cendres de bois, depuis les fondements théoriques jusqu'aux applications pratiques, en passant par une caractérisation approfondie des matériaux et une analyse détaillée de leurs performances.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

La terre, matériau naturel omniprésent à la surface de la planète, constitue une ressource fondamentale aux propriétés remarquables. Ce matériau complexe se compose d'un mélange de particules minérales de différentes tailles (argiles, limons et sables), de matière organique, d'eau et d'air. Sa composition varie considérablement selon son origine géologique, les conditions climatiques et l'activité biologique locale.

Les propriétés physico-chimiques de la terre dépendent largement de sa composition granulométrique et minéralogique. La présence d'argiles lui confère sa plasticité et sa cohésion, tandis que les sables, les limons et les graviers influencent sa résistance mécanique. Sa structure poreuse lui permet de stocker l'eau et l'air, essentiels aux processus biologiques.

Depuis des millénaires, l'homme utilise la terre comme matériau de construction, que ce soit sous forme de briques, de pisé ou d'adobe... Dans l'agriculture, elle joue un rôle vital comme support de culture. En géotechnique, ses propriétés mécaniques sont exploitées pour divers ouvrages. La terre représente également une ressource précieuse pour l'artisanat, notamment en poterie et en céramique.

Face aux enjeux environnementaux actuels, la terre connaît un regain d'intérêt comme matériau de construction durable, offrant d'excellentes propriétés thermiques et une faible empreinte carbone. Sa disponibilité locale et son caractère recyclable en font un matériau d'avenir pour un développement plus respectueux de l'environnement.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter l'état de l'art des connaissances sur la stabilisation de la terre crue par des liants alternatifs, particulièrement les cendres de bois issues des déchets agricoles. Ce chapitre s'articule en trois parties principales:

La première partie traitera des généralités sur la terre et les constructions en terre crue, en présentant leurs caractéristiques et propriétés fondamentales.

La deuxième partie sera consacrée à la stabilisation des briques en terre comprimée en général, et plus spécifiquement aux liants minéraux couramment utilisés dans la stabilisation des matériaux en terre crue, en présentant leurs propriétés, applications et leur influence sur les propriétés d'usage des briques en terre crue.

La troisième partie portera sur l'utilisation de liants alternatifs, notamment les déchets de biomasse, pour la stabilisation des briques en terre crue, en soulignant leurs effets sur les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité des briques.

Cette structure permettra d'établir une base solide pour comprendre les enjeux et les perspectives de l'utilisation des cendres de bois comme liant alternatif dans la construction en terre crue.

I.2. Revue bibliographique

I.2.1. Généralités sur la terre

La terre crue constitue l'un des plus anciens matériaux de construction de l'humanité, comme en témoigne son utilisation extensive dans l'habitat traditionnel à travers le monde. Bien que son usage ait décliné avec l'avènement des matériaux de construction industriels, notamment le béton et l'acier, elle connaît aujourd'hui un regain d'intérêt significatif, tant dans les pays en développement que dans les nations industrialisées. Malgré les critiques concernant sa sensibilité à l'eau et les questions de durabilité, la terre crue moderne se distingue par ses nombreux avantages pour la construction d'habitations durables, confortables et économiques [1, 17-18].

Pour comprendre ces avantages, il est essentiel d'examiner sa composition. La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments: les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (< 2 μm). Cette composition se divise en deux catégories principales: les matériaux inertes (graviers, sables) et les matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette tandis que les seconds agissent comme liant, similaire au ciment. Ainsi, la terre présente une structure comparable à celle du béton, mais avec un liant différent [1].

Les proportions de ces éléments constitutifs sont déterminantes pour les propriétés et le comportement du matériau. Certains composants réagissent aux variations d'humidité par des changements de volume, tandis que d'autres restent stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire la capacité à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations significatives des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction [1]. Particulièrement importantes sont les argiles, qui jouent un rôle crucial comme liant dans la fabrication des BTC (Briques de Terre Comprimée). Ces particules minérales de moins de 2 micromètres, issues de l'altération des roches et de transformations chimiques complexes,

confèrent au matériau ses propriétés liantes essentielles [18, 20]. Pour optimiser l'utilisation de la terre crue en construction et analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est donc primordial de bien comprendre les propriétés physico-chimiques des argiles.

La structure des argiles est particulièrement sophistiquée. Elles sont composées essentiellement de phyllosilicates (silicates en feuillets) organisés en plans ioniques successifs, avec des anions (O^{2-} ou OH^-) et des cations (Si^{4+} , Al^{3+}). Ces plans s'assemblent pour former des couches tétraédriques (T) et octaédriques (O) (**Figure I.2**), qui s'associent ensuite en différents types de feuillets élémentaires (T-O, T-O-T) (**Figure I.1**). Ces feuillets s'empilent pour constituer les unités structurales, séparées par des espaces interfoliaires jouant un rôle crucial [18, 20, 21]. L'espace interfoliaire peut être vide ou contenir divers éléments (cations, groupes hydroxyles, couches). L'assemblage des feuillets selon différentes configurations (face-face, face-bord) forme les particules argileuses [18].

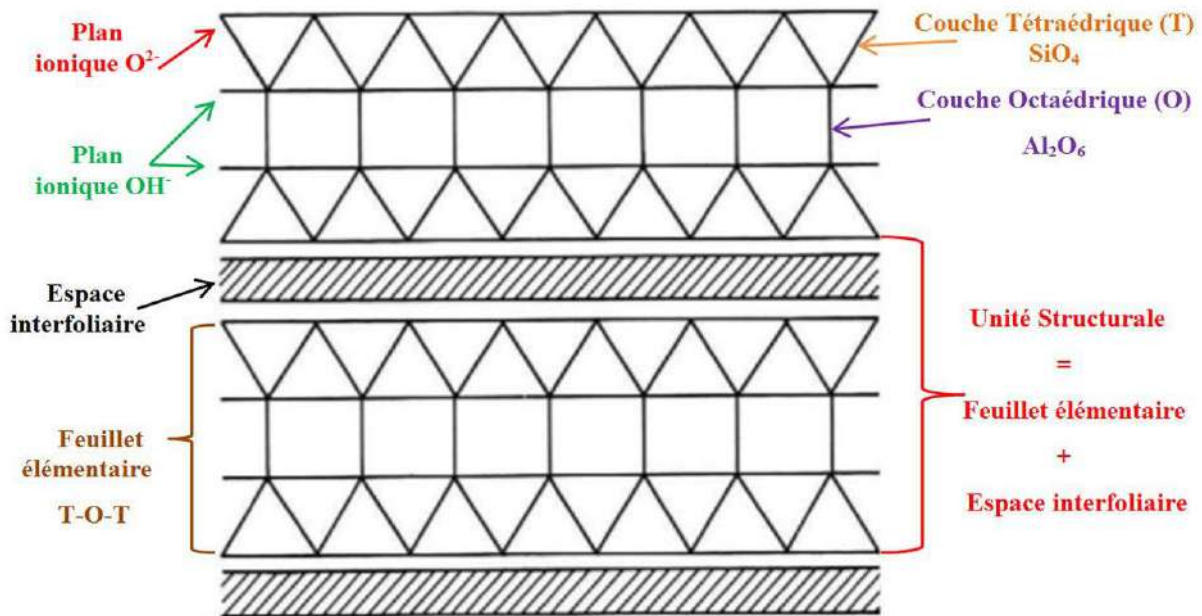


Figure I.1. Représentation schématique d'une structure phyllosilicatée de type T-O-T [18].

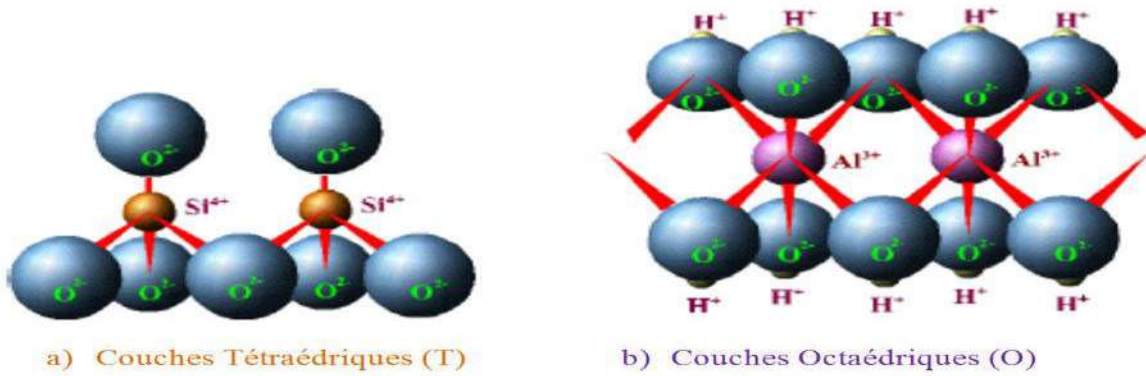


Figure I.2. Couches tétraédriques (a) et octaédriques (b) [20].

En mécanique des sols, on distingue trois grandes familles d'argiles selon leur structure et leur réactivité à l'eau: les Kaolinites (feuillelet T-O, 7 Å), les Illites (feuillelet T-O-T, 10 Å) et les Smectites (feuillelet T-O-T avec ions intercalés, 10 Å variable). Cette composition unique confère à la terre crue des propriétés intéressantes pour la construction contemporaine, alliant performance environnementale et confort d'usage. La **Figure I.3** représente l'ensemble des familles d'argiles.

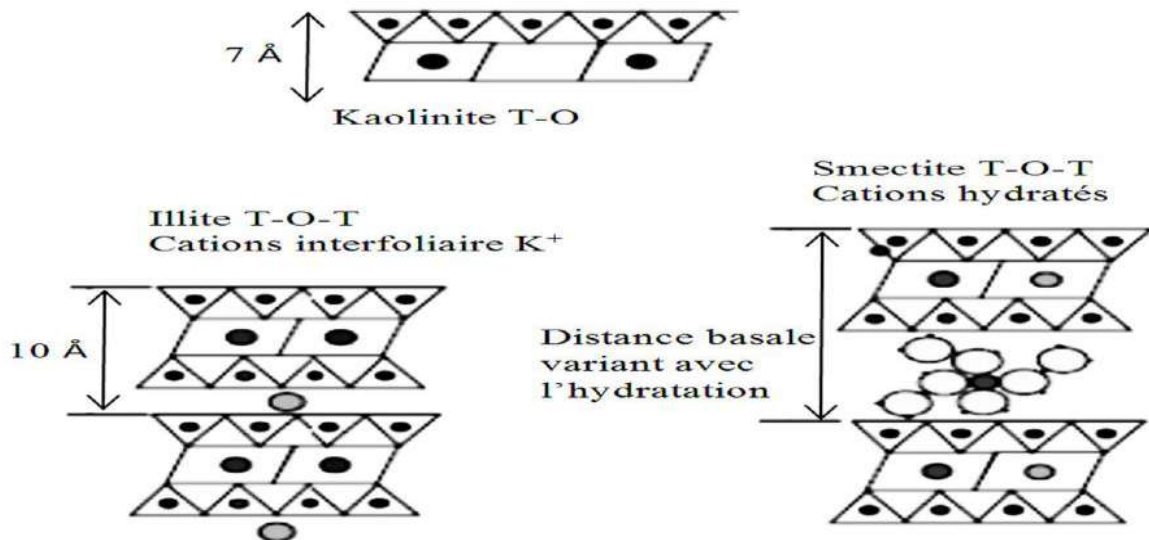


Figure I.3. Trois grandes familles d'argile [18, 22].

I.2.1.1. Les kaolinites

La kaolinite est une argile caractérisée par un feuillelet élémentaire de type T-O, avec une distance basale de 7 Å. Ses feuillelets adhèrent les uns aux autres grâce à des liaisons d'hydrogène établies entre le proton du groupement hydroxyle (OH⁻) de la couche octaédrique et les atomes d'oxygène de la couche tétraédrique du feuillelet adjacent (**Figure I.4 (a)**) [18, 23]. Cette liaison

hydrogène rigide rapproche les feuillets, conférant à la kaolinite un caractère relativement stable et non-gonflant en présence d'eau [18, 24]. La **Figure I.4 (b)** présente une image MEB d'une argile de type kaolinite.

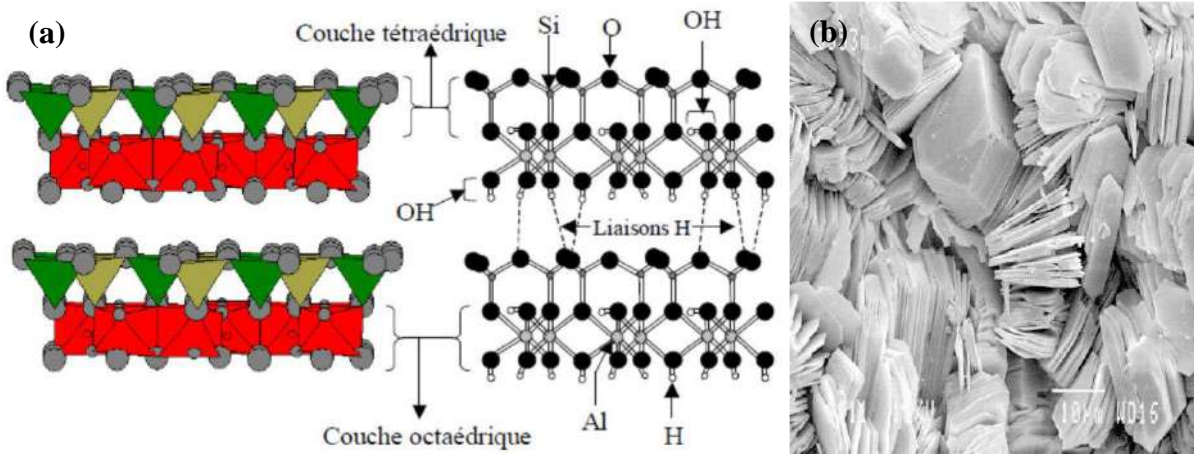


Figure I.4. (a) Unité structurale de la Kaolinite et des liaisons hydrogène, (b) Image MEB d'une kaolinite [23, 24].

I.2.1.2. Les illites

L'illite, également appelée mica, est une argile à feuillet élémentaire T-O-T, avec une distance basale de 10 Å. Son espace interfoliaire contient des cations de potassium (K^+). La présence de ces cations, dont le diamètre correspond à l'espace interfoliaire, compense le déficit de charge à la surface des feuillets et contribue ainsi à rigidifier l'ensemble. En conséquence, les molécules d'eau ne peuvent pas s'insérer entre les feuillets, donnant aux illites une faible capacité de gonflement [18].

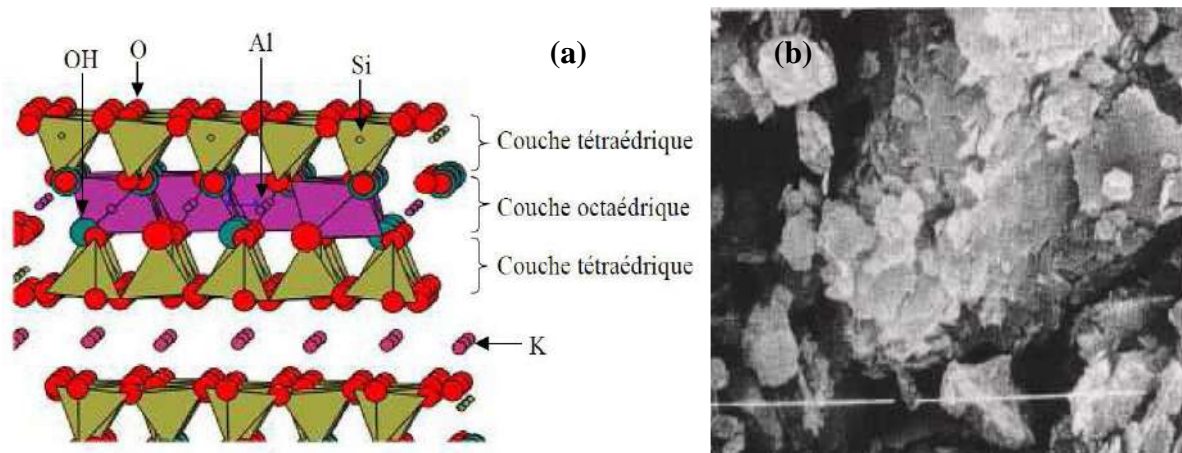


Figure I.5. (a) Unité structurale d'une illite avec un cation potassium dans l'espace interfoliaire, (b) Image MEB d'une illite [23, 25].

I.2.1.3. Les smectites

Les smectites, comme la montmorillonite, présentent également un feuillet élémentaire de type T-O-T, avec une distance basale de 10 Å. Cependant, cette distance basale peut augmenter en fonction de l'hydratation du feuillet. Cela s'explique par le fait que le déficit de charge n'est pas entièrement compensé par des cations. L'équilibre électrique est assuré par l'insertion, dans l'espace interfoliaire, de cations plus ou moins hydratés (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Cette particularité permet aux smectites d'accueillir des molécules d'eau dans leur espace interfoliaire, leur conférant ainsi une importante capacité de gonflement, d'où leur appellation d'argiles gonflantes [18]. La **Figure I.6 (b)** présente une image MEB d'une montmorillonite.

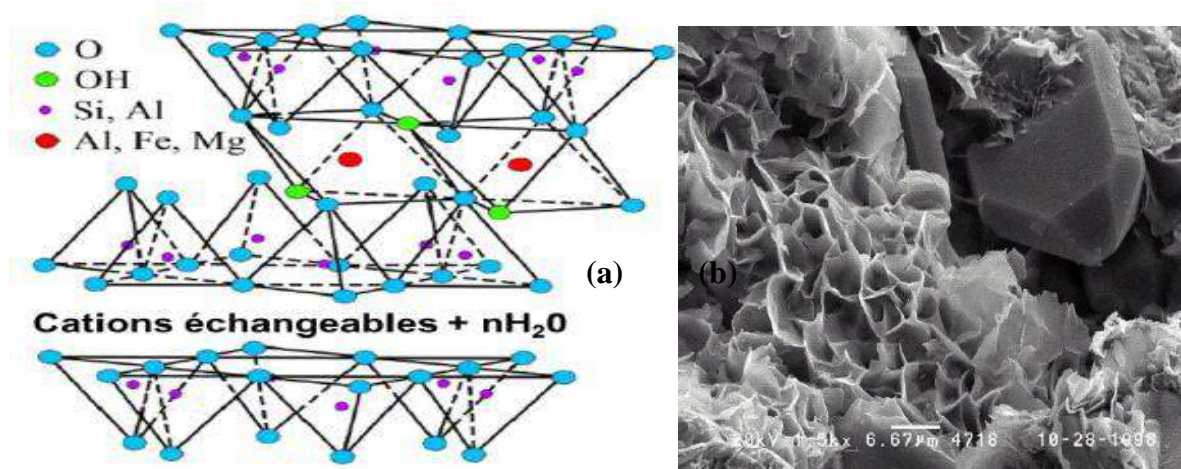


Figure I.6. (a) Unité structurale de la smectite avec un cation échangeable, (b) Image MEB d'une Montmorillonite [26, 27].

I.2.2. Généralités sur la construction en terre crue

La construction en terre crue connaît un renouveau d'intérêt ces dernières années, face aux enjeux environnementaux et dans l'optique de bâtir de manière plus durable. Utilisée depuis des millénaires, cette technique ancestrale présente en effet de nombreux avantages [27, 28].

La terre, matériau naturel et local, se décline sous différentes formes pour la construction: adobe, pisé, bauge, torchis, etc. Sa composition granulaire (argiles, limons, sables) lui confère des propriétés remarquables. Elle est à la fois résistante, isolante thermiquement et hygrométriquement, et offre une grande inertie thermique [29, 30].

Les constructions en terre crue ont l'avantage d'être économes en énergie grise, puisque le processus de fabrication est peu énergivore. Elles permettent de réduire significativement

l'empreinte carbone du bâtiment, en comparaison des matériaux de construction conventionnels [27, 31]. De plus, la terre peut être facilement réemployée ou recyclée en fin de vie [32].

Sur le plan esthétique, l'aspect naturel et authentique de la terre crue séduit de nombreux maîtres d'ouvrage. Les possibilités de mise en œuvre offrent une grande variété d'expressions architecturales, alliant tradition et modernité [33, 34].





Cependant, la construction en terre crue nécessite une maîtrise des techniques ancestrales, une connaissance des matériaux et une adaptation aux conditions locales. Des innovations techniques permettent aujourd'hui de concilier ces savoir-faire avec les exigences du bâtiment moderne [35, 28]. Ainsi, la terre crue s'impose comme un matériau d'avenir, répondant aux attentes de durabilité, de performance et de qualité de vie dans l'habitat [29].

La construction en terre crue est riche de traditions multiséculaires et se décline en une grande diversité de techniques, adaptées aux qualités de la terre locale et aux savoir-faire des constructeurs. Ce patrimoine mondial se traduit par une infinité de variantes, reflétant l'identité des lieux et des cultures.

Bien que simplificateur, le schéma circulaire établi par Guillaud et Houben (1995) [36] répertorie ces douze techniques principales, sans distinguer entre les méthodes traditionnelles et les innovations plus récentes. Parmi les techniques les plus courantes aujourd'hui figurent les blocs de terre comprimée (BTC), les briques extrudées et le pisé, en raison de leur caractère mécanisable et standardisable, mieux adapté à la construction moderne [33, 37]. La terre coulée reste en phase d'étude, le principal défi étant la réduction du temps de séchage. Les techniques les plus connues sont consignées dans le **Tableau I.1**.

Au-delà des éléments de structure, la terre crue est également utilisée pour les enduits intérieurs et extérieurs, jouant un rôle esthétique et hygrothermique grâce à ses propriétés de régulation de l'humidité [38, 39]. Dans la plupart des cas, la terre employée provient des environs du chantier, avec une sélection locale en fonction des caractéristiques du matériau et de sa compatibilité avec le type de construction.

Tableau I.1. Tableau récapitulatif des techniques de construction en terre crue.

Technique	Description	Illustration
Adobe	Briques en terre façonnées à la main puis séchées au soleil. Ce matériau présente une texture visqueuse, et des fibres végétales ou animales peuvent être incorporées au mélange [17, 18].	
Pisé	Murs réalisés en terre compactée par couches successives à l'aide de coffrages. Le matériau possède une consistance solide [17, 18].	
Brique de Terre Comprimée	Briques en terre, produites par compaction mécanique. Elles sont souvent stabilisées avec du ciment ou de la chaux, et le matériau présente une consistance solide [17, 18].	
Torchis/terre paille	Murs composés d'une ossature en bois enduite d'un mélange de terre et de fibres végétales, telles que la paille [17, 18].	

<p>Bauge</p>	<p>Mur monolithique en terre, pouvant inclure des fibres. Il est érigé par l'ajout successif de couches de mélange sur des couches déjà sèches. Les parois des couches encore humides sont égalisées pour obtenir une finition lisse [17, 18].</p>	
<p>Façonnage</p>	<p>Murs monolithiques en terre modelés manuellement, similaires à la technique de la poterie [17, 18].</p>	
<p>Extrusion</p>	<p>Processus mécanique précédant la cuisson des briques. La pâte de terre est mise sous vide pour assurer une compacité optimale, puis extrudée à travers une filière qui lui donne la forme de sa section transversale. Enfin, elle est découpée en briques de dimensions régulières [18, 36].</p>	
<p>La terre coulée</p>	<p>Un mélange liquide de terre et d'eau est versé dans un coffrage, de la même manière que le béton hydraulique. Cette technique requiert l'ajout de liants et/ou d'adjuvants [18, 39].</p>	

I.3. Stabilisation des briques en terre comprimées

La terre crue, utilisée depuis des millénaires dans la construction, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt face aux enjeux environnementaux [27, 29, 30]. Cependant, l'emploi de la terre crue dans le bâtiment nécessite souvent une stabilisation pour améliorer certaines de ses propriétés [41]. La stabilisation de la terre crue consiste à modifier sa composition ou sa structure afin d'augmenter sa résistance mécanique, sa durabilité et son comportement hydrique [42]. Plusieurs techniques de stabilisation existent à savoir;

La stabilisation mécanique repose sur deux approches distinctes: le compactage, qui permet d'optimiser la cohésion et la densité du matériau [43], et l'incorporation de fibres végétales comme la paille ou le chanvre, qui jouent un rôle de renforcement structurel [44, 45].

La stabilisation chimique fait appel à différents additifs. D'une part, l'utilisation de liants hydrauliques tels que le ciment et la chaux permet d'améliorer significativement la résistance mécanique [46, 47]. D'autre part, l'ajout de produits spécifiques comme les silicates, les polymères ou les résines confère au matériau des propriétés d'imperméabilisation [48].

Enfin, la stabilisation thermique s'effectue selon deux procédés distincts: la cuisson en four, qui transforme l'argile en céramique pour la production de briques et de tuiles [49], et le séchage, qu'il soit naturel ou artificiel, qui élimine l'eau contenue dans la terre pour obtenir un durcissement du matériau [50].

Le choix de la méthode de stabilisation dépend des propriétés initiales de la terre, des performances souhaitées et des contraintes du projet (coût, disponibilité des matériaux, réglementations, etc.) [51]. Une étude approfondie du matériau terre est nécessaire pour définir la solution de stabilisation la plus adaptée [52]. La stabilisation permet ainsi d'exploiter pleinement le potentiel de la terre crue dans la construction, tout en améliorant ses caractéristiques techniques et sa durabilité [53]. Elle ouvre la voie à une utilisation plus répandue de ce matériau naturel, local et écologique [54].

I.3.1. Stabilisation des briques en terre comprimées aux liants minéraux

I.3.1.1. À l'échelle microscopique

L'ajout de liants à un sol argileux provoque des interactions complexes à l'échelle microscopique, qui se manifestent par des changements macroscopiques significatifs [55]. Ces interactions varient selon le type de liant utilisé, notamment la chaux.

Dans le cas de la chaux, deux types de réactions successives se produisent: les réactions à court terme et à long terme [55, 56].

Les réactions à court terme se caractérisent par deux phénomènes principaux. Premièrement, un échange cationique intervient, où les argiles échangent leurs cations constitutifs avec les ions calcium libérés par l'hydratation de la chaux [57, 58]. La nature de cet échange dépend de la capacité d'échange cationique (CEC) de l'argile. Les argiles à forte CEC, comme la montmorillonite, fixent les cations dans l'espace interfoliaire, tandis que celles à faible CEC, comme la kaolinite, les fixent principalement sur les bords des feuillets [18, 21, 58-60].

Deuxièmement, une floculation et une agglomération des particules a été observée. L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles, réduisant l'extension de la double couche d'eau et permettant la floculation. Ce processus entraîne une diminution du volume apparent du sol et une amélioration de sa consistance [18, 21, 56, 58-60].

Les réactions à long terme sont marquées par deux processus principaux: les réactions pouzzolaniques et la carbonatation. Les réactions pouzzolaniques constituent une étape fondamentale impliquant une interaction complexe entre le calcium de la chaux et les particules d'argile, plus précisément leurs couches tétraédriques et octaédriques [18, 21, 59, 63-65]. Ce mécanisme se déclenche dans un milieu basique saturé en calcium, où les argiles subissent une décomposition libérant de l'alumine et de la silice. Ces composés réagissent ensuite avec le calcium et les hydroxydes de la chaux en présence d'eau, formant trois types principaux d'hydrates calciques: l'hydrate de silicate calcique (C-S-H), l'hydrate d'aluminate calcique (C-A-H) et l'hydrate aluminosilicate calcique (C-A-S-H) [58, 59, 61, 63-65].

La cinétique de ces réactions présente des caractéristiques particulières. Naturellement lente, elle nécessite plusieurs mois à température ambiante pour produire des effets significatifs. Sa vitesse est fortement influencée par les conditions environnementales: la température joue un

rôle crucial (ralentissement en dessous de 5 °C, accélération avec la chaleur), et une humidité suffisante est nécessaire pour faciliter la mobilité ionique [18, 21, 56, 62, 63, 66-69].

La carbonatation, correspondant à la formation de calcite, survient lorsque la chaux réagit avec le CO₂ atmosphérique. Ce processus s'avère problématique car les cristaux de calcite qui en résultent présentent de faibles propriétés liantes et compromettent la stabilisation des sols en inhibant la réaction pouzzolanique [18, 21, 70]. La carbonatation consomme une partie de la chaux qui aurait dû participer à la réaction pouzzolanique, entraînant une diminution de la résistance finale du sol traité [18, 21].

La stabilisation des sols par des liants hydrauliques, notamment le ciment, vise principalement à former rapidement des hydrates calciques [71]. Le ciment se distingue par sa cinétique de réaction particulièrement efficace: après 28 jours de cure, la quasi-totalité du liant a réagi, conférant au matériau des caractéristiques pratiquement définitives. Cette rapidité d'action résulte d'un mécanisme de formation directe des minéraux aux propriétés liantes à partir du ciment lui-même [18, 24].

Le processus d'hydratation met en jeu plusieurs réactions chimiques complexes. Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) se forment à partir de deux composants principaux du ciment: l'alite (C₃S) et la bélite (C₂S). L'hydratation de ces composés, ainsi que celle des aluminates calciques, s'accompagne d'une libération excédentaire de chaux qui se transforme en portlandite. Parallèlement, les aluminates calciques participent à la formation de diverses phases hydratées, notamment les aluminates calciques hydratés (C₄AH₁₃ et C₃AH₆). En présence de soufre, ils contribuent également à la formation d'ettringite et de monosulfoaluminate [18].

Dans des applications telles que les bétons et les matériaux granulaires traités au ciment (graves et sables), le ciment joue un rôle crucial de liant. Il crée une enveloppe autour des granulats, assurant ainsi la cohésion de l'ensemble de la structure [18]. Cette capacité à agglomérer les particules et à créer une matrice rigide fait du ciment un stabilisant particulièrement efficace pour les sols et les matériaux de construction.

I.3.1.2. À l'échelle macroscopique

L'impact des liants sur les sols à l'échelle macroscopique se manifeste principalement à travers deux aspects majeurs: la régulation de la teneur en eau et la modification des propriétés rhéologiques du sol argileux.

L'incorporation de liants dans un sol, particulièrement la chaux, entraîne une modification significative de sa teneur en eau. Plus précisément, lorsque 1% de chaux vive est ajouté au sol, une réaction exothermique d'hydratation se produit, provoquant un assèchement qui réduit la teneur en eau d'environ 0.5 à 1% [17, 18, 24, 72].

En ce qui concerne les propriétés rhéologiques, la chaux joue un rôle prépondérant. Son ajout transforme la texture du sol en provoquant l'agglomération des particules argileuses, ce qui améliore la consistance du sol. Cette modification se traduit par une augmentation de la limite de plasticité. L'intensité de ces changements varie en fonction de plusieurs facteurs: la quantité de chaux utilisée, la nature des minéraux argileux présents dans le sol traité et la teneur en eau initiale [18, 24, 54, 62, 63, 73].

Les nombreuses recherches menées sur l'effet de la chaux ont démontré une augmentation immédiate de la limite de plasticité des sols argileux traités, accompagnée d'une réduction du domaine de plasticité [18, 21, 60, 61, 67, 46, 54, 77-78]. Concernant la limite de liquidité, son évolution dépend de la nature du sol argileux traité: elle diminue dans le cas des smectites mais augmente pour la kaolinite et l'illite [18, 21, 46, 54, 61, 62, 67, 74-78].

Concernant le ciment, son effet immédiat demeure limité. Cependant, l'utilisation d'un liant hydraulique riche en chaux peut provoquer un phénomène de floculation des argiles, comparable à celui obtenu avec la chaux pure [18, 68].

I.3.1.3. Résistances mécaniques

L'effet des liants minéraux sur le comportement mécanique des sols se manifeste sur le long terme, avec des améliorations significatives des caractéristiques mécaniques du matériau traité. Cette amélioration varie selon le type de liant utilisé: la chaux ou le ciment [18, 24, 62].

Dans le cas du traitement à la chaux, les réactions pouzzolaniques jouent un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés mécaniques, un processus qui peut se poursuivre jusqu'à un an après le traitement [18, 57]. Les effets observés sont multiples: une réduction de la densité sèche

du mélange, une augmentation progressive de la résistance à la compression simple avec le temps de cure, ainsi qu'une élimination du gonflement et une diminution du retrait [17, 18, 24].

Le traitement au ciment, quant à lui, améliore les caractéristiques mécaniques par deux mécanismes distincts: l'hydratation du ciment formant un mortier et sa réaction avec l'argile. Ces améliorations sont rapides durant le premier mois et peuvent continuer à se développer pendant une année [62]. Le processus d'hydratation du ciment crée un gel d'hydrates qui enveloppe la surface des agglomérats d'argile. La portlandite libérée interagit avec l'argile en milieu alcalin, provoquant sa dégradation. Il en résulte une structure complexe composée de trois matrices distinctes: une matrice inerte sableuse liée au ciment, une matrice d'argile stabilisée, et une matrice de terre non stabilisée [18].

L'efficacité du traitement au ciment dépend largement de la nature du sol traité, de la proportion de ciment utilisée et des conditions de conservation. Un minimum de 6% de ciment est généralement nécessaire pour obtenir des résultats satisfaisants, la résistance en compression étant fortement influencée par le dosage [18, 24]. Les effets du traitement au ciment se manifestent sur plusieurs paramètres, notamment la masse volumique sèche, qui évolue différemment selon la capacité initiale du sol à se compacter. La résistance à la compression (sèche et humide) varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que la masse volumique sèche, l'indice des vides, l'indice de plasticité, la limite de liquidité et la proportion d'éléments fins. La résistance à la traction représente généralement entre un cinquième et un dixième de la résistance à la compression. Les variations dimensionnelles (retrait au séchage et gonflement à l'humidification) sont réduites, et la résistance à l'érosion est améliorée, particulièrement pour les terres contenant de gros grains [18, 24].

L'amélioration des propriétés mécaniques des sols par l'ajout de liants est un sujet largement étudié dans la littérature scientifique. La chaux et le ciment peuvent améliorer significativement les caractéristiques mécaniques des sols traités, chacun suivant des mécanismes spécifiques et avec des effets pouvant se développer sur une période allant jusqu'à un an. Une analyse approfondie de la littérature, menée par Danso et al. (2015) [79], met en évidence la dominance des liants minéraux dans les techniques de stabilisation, représentant 90% des études publiées. Le ciment occupe une position prépondérante avec 50% des travaux de recherche, le reste se répartissant entre la chaux, d'autres additions minérales, et diverses combinaisons de liants minéraux.

L'évaluation de l'efficacité de ces traitements repose principalement sur la mesure de la résistance à la compression simple. Cependant, la comparaison des résistances en compression entre différentes études se heurte à des difficultés méthodologiques importantes. Ces complications s'expliquent par plusieurs facteurs critiques: le mode de fabrication des éprouvettes, la densité du matériau, les conditions de conservation, le temps de cure et le taux de substitution [37]. Les travaux de Van Damme et al. (2017) [80], soulignent que l'efficacité de la stabilisation est étroitement liée à ces paramètres.

Concernant la stabilisation au ciment, une synthèse détaillée de plusieurs études scientifiques révèle des résultats complexes et parfois contradictoires. Le cas d'Alavéz-Ramírez et al. (2012) [81] se distingue par une augmentation spectaculaire de la résistance en compression de 0.6 à 23.5 MPa avec 10% de ciment. Toutefois, la majorité des recherches rapporte des améliorations plus modestes: Alam et al. (2015) [82] montrent une augmentation de 1 à 2 MPa avec 10% de ciment, Dao et al. (2018) [83] une progression de 2.2 à 3.2 MPa avec 12% de ciment, et Bahar et al. (2004) [84] une évolution de 1.6 à 6.4 MPa avec 20% de ciment.

De manière similaire, l'analyse des études sur la stabilisation à la chaux révèle des résultats variables. L'étude d'Alavéz-Ramírez et al. (2012) [81] se démarque avec des résultats exceptionnellement élevés, atteignant 16.5 MPa avec 10% de chaux hydratée après 28 jours de cure. Les autres études sur la chaux présentent des améliorations plus modestes: Millogo et al. (2008) [85] observent une augmentation de 2.3 à 3.5 MPa avec 10% d'un mélange de chaux, Eires et al. (2014) [86] notent des variations selon le type de chaux, et Alam et al. (2015) [82] rapportent une progression limitée de 1 à 1.3 MPa pour 10% de chaux. Seco et al. (2017) [87], utilisant une chaux hydraulique naturelle, obtiennent des résistances entre 4.5 et 5.5 MPa avec 10% de chaux.

Ces résultats, tant pour le ciment que pour la chaux, mettent en évidence que le gain de résistance en compression reste généralement faible, indépendamment du dosage et du type de liant utilisé. Cette observation est d'autant plus frappante que certaines briques de terre crue non stabilisées, comme l'ont montré Aubert et al. (2016) [88], peuvent naturellement atteindre des résistances supérieures à 2 MPa, voire jusqu'à 7.5 MPa pour des briques extrudées.

Ces analyses convergentes sur l'efficacité limitée des stabilisants minéraux soulignent l'importance cruciale d'une approche critique dans l'évaluation des méthodes de stabilisation. Elles renforcent également la nécessité d'une standardisation des protocoles expérimentaux et

d'une prise en compte rigoureuse des conditions de cure, qui peuvent significativement influencer les résultats obtenus. Le **Tableau I.2** récapitule les résultats des résistances à la compression des briques en terre crue stabilisées aux liants minéraux.

Tableau I.2. Tableau récapitulatif sur les briques en terre crue stabilisées aux liants minéraux.

Références	Type	Temps de cure (J)	Conditions de cure	Taux de liant (%)	Résistance à la compression (MPa)
Cas du ciment					
(Bahar et al., 2004) [84]	BTC	28	À l'air en laboratoire	0	1.6
				20	6.4
(Alavéz-Ramírez et al., 2012) [81]	BTC	28	HR= 90%	0	0.6
				10	23.5
Medjo Eko et al., 2012) [89]	BTC	7, 14, 21,	(0-7j) durcis dans un sac de plastique (HR= 90%). (7-28j) durcis à l'air libre	0	1
		28		10	11.6
(Lima et al., 2012) [90]	BTC	28	Durcis dans une pièce à ventilation contrôlée et sans lumière directe du soleil	0	1.54
				12	3.1
(Eires et al., 2014) [86]	BTC	56	Pas de conditions	0	1
				4	1.5
(Alam et al., 2015) [82]	BTC	28	À l'air libre	0	1
				10	2
(Seco et al., 2017) [87]	BTC	28	T= 20 °C, HR= 100%	0	
				10	11-14
Tran et al., 2018) [91]	BTC	28	T= 20 °C	0	0.6
				12	6
(Sore et al., 2018) [5]	BTC	21	Géopolymère	0	1.4
				8	8.2

Dao et al., 2018) [83]	Adobe	28	T= 20 °C	0	2.2
				12	3.2
Cas de la Chaux					
(Millogo et al., 2008) [85]	Adobe	Pas de cure	Pas de conditions	0	2.3
				12	3.2
(Alavéz-Ramírez et al., 2012) [81]	CEB	28	HR= 90%	0	0.6
				10	16.5
(Eires et al., 2014) [86]	CEB	56	Pas de conditions	0	1
				4	0.8-1.9
(Alam et al., 2015) [82]	CEB	28	À l'air libre	0	1
				10	1.3
(Seco et al., 2017) [87]	BTC	28	T= 20 °C, HR= 100%	0	
				10	4.5-5.5

I.3.1.4. Propriétés thermiques

L'amélioration des propriétés mécaniques des sols par l'ajout de liants est un sujet largement étudié, comme mentionnée précédemment à travers l'analyse des stabilisations au ciment et à la chaux. Cependant, une des propriétés les plus intéressantes de la terre crue pour son utilisation en construction est son excellent comportement thermique, caractérisé notamment par une forte inertie thermique et un fort potentiel de régulation d'humidité. Il est donc crucial de vérifier que la stabilisation chimique par ajout de liants minéraux ne détériore pas ces propriétés essentielles [92].

L'analyse des effets de la stabilisation sur les propriétés thermiques peut être divisée en deux aspects principaux: la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique.

Concernant la conductivité thermique, sa mesure, indépendamment de la méthode utilisée (fil chaud, plaque chaude gardée, ou méthode de la boîte), est influencée principalement par deux paramètres intrinsèques au matériau: sa teneur en eau et sa densité apparente sèche. À teneur en eau égale, la densité apparente a un impact prépondérant sur la conductivité thermique, en raison du principe même de propagation de la chaleur dans les matériaux solides. En effet, la

chaleur se propageant de proche en proche entre les particules de la matière solide, la présence de vides correspondant à la porosité des matériaux moins denses crée une rupture dans cette transmission [24].

L'effet de la stabilisation sur la conductivité thermique varie selon le mode de fabrication du matériau. Pour les matériaux pressés ou compactés (BTC ou pisé), l'ajout des liants minéraux s'accompagne généralement d'une diminution de la densité optimale de compactage. Ce phénomène entraîne une diminution de la conductivité thermique, comme l'ont démontré Liuzzi et al. (2013) [93], l'ajout de 5% de chaux fait baisser la densité apparente sèche de 1992 kg/m³ à 1843 kg/m³, réduisant ainsi la conductivité thermique de 1.20 W/K.m à 0.88 W/K.m.

En revanche, pour les adobes, qui sont des matériaux plus poreux, l'ajout de liant peut avoir l'effet inverse en comblant la porosité et augmentant la densité. Les travaux de Dao et al. (2018) [83] et Saidi et al. (2018) [4] sur les adobes montrent une augmentation de la conductivité thermique à partir de 8-12% d'ajout de ciment. Cependant, pour des taux d'ajout inférieurs à 8%, la conductivité thermique reste comparable à celle du matériau non stabilisé, suggérant qu'une stabilisation à faible taux n'affecte pas significativement cette propriété.

I.3.1.5. Propriétés de durabilités

La revue de la littérature scientifique concernant l'évaluation de la résistance à l'eau des briques en terre crue stabilisées révèle un consensus sur l'effet bénéfique des liants minéraux [81, 82, 84, 86], malgré la difficulté de comparer directement les résultats entre les différentes études en raison de la diversité des méthodes d'essai employées. Une analyse approfondie permet d'identifier quatre principales catégories de tests, chacune présentant ses propres caractéristiques et limitations [37].

La méthode la plus répandue est la mesure de la résistance en compression humide après immersion, généralement réalisée selon la norme XP P 13-901 (2001) [94]. Bien que ce test offre l'avantage de fournir des résultats quantitatifs, l'interprétation absolue des valeurs obtenues après une immersion de deux heures reste délicate. La durée d'immersion varie également selon les études [81, 84], allant de 2 h à 24 h, ce qui complique davantage la comparaison des résultats.

L'essai d'immersion simple constitue l'approche la plus élémentaire. Cette méthode, principalement qualitative, se caractérise par une grande variabilité dans les protocoles et les

critères d'évaluation, comme le montrent les travaux d'Alam et al. (2015) [82]. Les résultats sont généralement exprimés en termes simples de maintien ou de désagrégation de l'échantillon, ce qui limite la précision de l'analyse mais permet une première évaluation rapide de la résistance à l'eau.

L'essai d'érosion accélérée se distingue comme étant le plus représentatif des conditions réelles d'exposition aux fortes pluies. Cependant, une importante hétérogénéité dans les protocoles utilisés a été observée, que ce soit au niveau des pressions d'eau appliquées (100 kN/m²) [83], des durées d'exposition variant de 60 secondes à 2 heures, ou des configurations de test comme dans l'étude de Dao et al. (2018) [83] qui utilisent une pulvérisation sous 2 bars pendant 10 minutes avec un angle de 30° [82, 84]. Les résultats peuvent être analysés tant qualitativement que quantitativement, notamment à travers la mesure de la perte de masse, de la profondeur de pénétration ou de l'état de surface [36].

Enfin, l'essai d'ascension capillaire, généralement basé sur la norme XP P 13-901 (2001) [94], présente l'avantage d'être représentatif des phénomènes de remontées capillaires dans les murs tout en fournissant des résultats quantitatifs avec une mise en œuvre relativement simple. Néanmoins, cet essai mesure principalement la porosité ouverte interconnectée du matériau, ce qui peut le rendre moins discriminant pour évaluer l'efficacité de la stabilisation. Sa pertinence est d'ailleurs remise en question par certains chercheurs comme Seco et al. (2017) [87], bien que cette position reste discutable compte tenu des avantages pratiques de la méthode.

Cette analyse met en lumière la nécessité d'une standardisation des procédures d'essai pour faciliter la comparaison des résultats entre les différentes études. Elle souligne également l'intérêt d'adopter une approche combinant plusieurs types d'essais, comme l'ont fait Sore et al. (2018) [5] en associant test de dispersivité et résistance en compression humide, pour obtenir une évaluation plus complète et plus fiable de la résistance à l'eau des briques de terre crue stabilisées. Cette approche multiple permettrait de mieux comprendre les différents aspects de la durabilité de ces matériaux face à l'eau, qu'il s'agisse de leur résistance mécanique en conditions humides, de leur comportement face à l'érosion ou de leur capacité à limiter les remontées capillaires.

I.5. Stabilisation des briques en terre comprimées aux liants alternatifs

La stabilisation des briques en terre comprimée (BTC) par le ciment et la chaux, bien qu'efficace pour améliorer les propriétés mécaniques, thermique et la durabilité, soulève d'importantes

préoccupations environnementales. En effet, la production de ciment est responsable d'environ 8% des émissions mondiales de CO₂ [95], tandis que la fabrication de chaux nécessite des températures élevées (environ 900 °C) impliquant une consommation significative d'énergie fossile [48]. Ces impacts environnementaux contrastent avec l'intérêt croissant pour les matériaux de construction écologiques et remettent en question la durabilité de ces méthodes de stabilisation conventionnelles.

Parallèlement, le secteur agricole et agro-industriel génère annuellement des volumes considérables de déchets de biomasse. La production mondiale de riz génère environ 100 millions de tonnes de balles de riz par an [96], tandis que l'industrie de la canne à sucre produit approximativement 180 millions de tonnes de bagasse [81]. Ces résidus, souvent sous-valorisés, sont fréquemment brûlés à l'air libre ou mis en décharge, créant des problèmes environnementaux supplémentaires comme la pollution atmosphérique et l'occupation des sols.

Les recherches récentes ont montré le potentiel des cendres issues de ces déchets de biomasse comme additifs pouzzolaniques dans les matériaux de construction [97]. La présence de silice amorphe dans ces cendres, notamment dans la balle de riz [98] ou la bagasse [81], suggère leur capacité à participer à des réactions pouzzolaniques bénéfiques pour la stabilisation des sols.

Dans ce contexte, la valorisation des déchets de biomasse ou agricole et agro-industrielle représente une alternative ou un complément prometteur aux stabilisants conventionnels (ciment et chaux) dans la fabrication des briques en terre comprimée. Cette approche vise plusieurs objectifs: réduire l'empreinte environnementale du matériau final, assurer des performances mécaniques et thermiques satisfaisantes selon les normes en vigueur et maintenir une durabilité adéquate, particulièrement en termes de résistance à l'eau. Elle permet également de développer des solutions économiquement viables et adaptées aux contextes locaux, tout en contribuant à la gestion durable des déchets agricoles.

Cette recherche s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable, avec pour ambition de transformer un déchet en ressource tout en réduisant l'impact environnemental du secteur de la construction. Elle ouvre la voie à des recherches approfondies sur l'optimisation des formulations, la compréhension des mécanismes de stabilisation impliquant ces bio-résidus, et le développement de solutions innovantes adaptées aux ressources localement disponibles.

I.5.1. L'effet des liants alternatifs sur les résistances mécaniques

La valorisation des liants minéraux alternatifs pour la stabilisation des briques en terre crue représente une approche prometteuse dans le domaine de la construction durable. Cette démarche vise principalement à réduire l'utilisation des liants conventionnels comme le ciment et la chaux, tout en valorisant les déchets de biomasse et les sous-produits industriels.

Les recherches fondamentales dans ce domaine ont été marquées par plusieurs études significatives. Alavéz-Ramírez et al. (2012) [81] ont obtenu des résultats remarquables en utilisant un mélange de chaux et de cendres de bagasse de canne à sucre, atteignant une résistance à la compression de 21.3 MPa avec 20% de mélange après 28 jours de cure. Dans la même perspective, Hossain et al. (2011) [99] ont exploré l'utilisation des poussières de fourneau de ciment et des cendres volcaniques, démontrant une augmentation progressive des résistances mécaniques jusqu'à 6 MPa avec 20% de poussière de fourneau de ciment après 90 jours de cure.

L'évolution des recherches a conduit à l'exploration de nouvelles alternatives. Chea et al. [100] ont innové en remplaçant totalement le ciment par des cendres de combustible (PFA) et des cendres de bois, obtenant des performances remarquables avec une résistance à la compression de 30 MPa et une résistance à la flexion de 1.55 MPa. Raut et Gómez [101] ont étudié l'incorporation des cendres volantes issues de la combustion de l'huile de palme (POFA), atteignant une résistance à la compression de 7.21 MPa.

Des approches plus diversifiées ont également émergé. Lang et al. [102] ont exploré l'utilisation de boues de dragage stabilisées avec différents liants, tandis que Basha et al. [103] ont démontré les avantages de l'incorporation de cendres de balle de riz (RHA) à des taux de 15-20%. Les travaux de Turgut [104] ont révélé que l'ajout de fumée de silice pouvait augmenter significativement la résistance à la compression, passant de 13.8 MPa à 24 MPa avec 20% d'addition.

L'utilisation des cendres volantes (FA) comme stabilisant s'est révélée prometteuse [104-106], tout comme l'incorporation de cendres de fond de biomasse (BBA), de cendres volantes de charbon (CFA) et de cendres de bois (WBA) [107-112]. Ces additions ont démontré leur efficacité pour l'amélioration des propriétés mécaniques, notamment en réduisant la porosité du matériau et en produisant des liants capables de renforcer les briques crues en comblant les espaces poreux [107, 109]. D. Eliche-Quesada et al. (2021) [108] soulignent que ces produits

présentent des similarités avec ceux formés lors de l'hydratation du ciment Portland, ce qui contribue à réduire la porosité du matériau.

Cependant, bien que ces liants alternatifs soient efficaces, leur cinétique de réaction est plus lente comparée aux liants traditionnels, nécessitant des temps de cure prolongés et des conditions de conservations spéciales pour atteindre les résistances optimales. Malgré ces limitations, l'utilisation de proportions relativement élevées de ces liants offre un intérêt environnemental notable. En effet, leur incorporation favorise la valorisation de déchets et de sous-produits industriels, apportant une solution écologique et durable.

Tableau I.3. Tableau récapitulatif sur les briques en terre crue stabilisées aux liants minéraux alternatifs.

Reference	Type	Liants alternatifs	Conditions de cure	Tem ps de cure (j)	Taux de liant (%)	Résistance à la compression (MPa)
Alavéz-Ramírez et al., (2012) [81]	BTC	Chaux-cendres de bagasse à canne	HR= 90%		0	0.6
				7	20	17.7
				14	20	20.8
				28	20	21.3
Hossain et al., (2011) [99]	BTC	Poussière de fourneau de ciment		7, 14, 28, 56, 90	0 20	0.1 2.7-6
		Cendres volcanique		7, 14, 28, 56, 90	20	0.5-3.1
Seco et al., (2017) [87]	BTC	Chaux-laitier de haut fourneau	T= 20 °C, HR= 100%	28	10	11.7

		Ciment-laitier de haut fourneau	T= 20 °C, HR= 100%	28	10	13.6
Sore et al., (2018) [5]	BTC	Métakaolin activé	Géopolymère	7	0	1.4
					20	8.9
Eliche-Quesada et al., (2021) [108]	Briques comprimées	Cendres de fond de biomasse	Dans l'eau	28	100	30
		Cendres de fond de biomasse-Geosilex	Dans l'eau		70-30	52
Eliche-Quesada et al., (2019) [109]	Briques comprimées	Cendres de bois	Dans l'eau	28	100	18.7
		Cendres de bois-DFGD	Dans l'eau		90-10	17.3
Eliche-Quesada et al., (2018) [110]	Briques comprimées	Cendres volantes de charbon (CFA)	Dans l'eau à T=20 °C	28	100	26
		Cendres volantes de charbon-Geosilex	Dans l'eau à T=20 °C	28	60-40	45

I.5.2. L'effet des liants alternatifs sur les propriétés thermiques

L'augmentation constante de la consommation énergétique liée au maintien du confort thermique dans les bâtiments soulève des préoccupations majeures, tant sur le plan économique qu'environnemental dans le secteur de la construction. Cette problématique met en évidence la nécessité cruciale de développer des matériaux de construction innovants qui combinent

légèreté, propriétés isolantes et respect de l'environnement, dans l'objectif de réduire significativement la consommation énergétique [108, 46].

Les études scientifiques ont permis d'identifier les principaux facteurs influençant la conductivité thermique des matériaux de construction. Ces paramètres incluent la densité sèche, la structure interne du matériau, l'humidité relative, la composition chimique ainsi que la température ambiante [108, 113-116]. Les travaux de Sutcu et al. (2009) [116] et García et al. (2010) [117] ont établi une corrélation inversement proportionnelle entre la densité et les propriétés d'isolation thermique: plus la densité du matériau est faible, meilleures sont ses performances en termes d'isolation thermique.

Cette relation a été confirmée par de nombreuses études portant sur l'incorporation de cendres de biomasse dans les briques crues et les briques en terre comprimée [107-112]. Ces recherches ont démontré que l'ajout de différents types de cendres, à des proportions variables, entraîne une diminution significative de la conductivité thermique. Cette amélioration des propriétés isolantes est attribuée à la structure poreuse caractéristique des cendres de biomasse, qui contribue à réduire la densité globale du matériau tout en améliorant ses performances thermiques.

Carrasco et al., (2014) [118] ont confirmé la diminution de la conductivité en utilisant les cendres de fond de biomasse (BBA) dans les briques de terre. Les valeurs minimales obtenues varient de 0.87 W/mK à 0.60 W/mK pour des éprouvettes de 10% et 90% en poids de cendres de biomasse, respectivement. Çiçek et al., (2015) [119], ont produit des briques légères à haute isolation thermique à base de de cendres volantes (FA) et la chaux. La conductivité thermique des briques a été réduite de 0.98 W/mK à 0.91 W/mK en remplaçant respectivement 5 à 15% du volume de cendres volantes. Dans les travaux d'Eliche-Quesada et al., (2021) [108], des résultats optimaux ont été obtenus pour des échantillons contenant 70 à 60% en poids de cendres de fond de biomasse (BBA) et 30 à 40 % en poids de Geosilex, avec une conductivité thermique de 0.52 à 0.57 W/mK, respectivement.

I.5.3. L'effet des liants alternatifs sur les propriétés de durabilités

Les cendres de biomasse, telles que celles issues du bois, se révèlent être des stabilisateurs efficaces pour les briques de terre comprimée. En intégrant ces cendres, une amélioration notable de la résistance mécanique et de la durabilité des matériaux a été observée. Les stabilisateurs naturels comme les cendres de biomasse réduisent la porosité, ce qui permet aux

briques d'être plus résistantes à l'humidité et aux cycles de gel/dégel, augmentant ainsi leur durabilité. Cependant, il convient de noter que la cinétique de réaction plus lente de ces stabilisateurs nécessite des temps de cure prolongés pour atteindre des résistances optimales. En dépit de cela, l'utilisation de ces liants alternatifs, en particulier les cendres de biomasse, offre un avantage environnemental significatif en valorisant des déchets et sous-produits industriels [120].

Les recherches démontrent que les briques stabilisées avec des cendres de bois présentent une meilleure résistance aux conditions environnementales. Des études corroborent ces observations, indiquant que les composites de terre à base de biomasse sont une alternative prometteuse pour la construction durable, malgré une absorption d'eau plus élevée sous faible pression et une résistance à l'abrasion sèche légèrement diminuée [121]. Enfin, la stabilisation avec des géopolymères, qui peut inclure des cendres de biomasse, améliore également la durabilité des blocs en terre comprimée en augmentant leur résistance à l'eau et aux cycles de gel/dégel [112].

I.6. Conclusion

La revue bibliographique a permis de mettre en évidence que la terre crue demeure un matériau de construction ancestral qui connaît un regain d'intérêt dans le contexte actuel de développement durable. Les briques en terre comprimée (BTC) représentent une évolution technologique importante de ce matériau traditionnel, permettant d'améliorer et de standardiser ses performances.

La stabilisation des BTC, traditionnellement réalisée avec du ciment et de la chaux, a démontré son efficacité pour améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité. Cependant, l'impact environnemental de ces stabilisants conventionnels a conduit la recherche vers des alternatives plus écologiques, notamment l'utilisation de déchets de biomasse comme stabilisants.

Cette approche novatrice de stabilisation par les déchets de biomasse présente un double avantage: elle permet de valoriser des sous-produits agricoles ou industriels tout en réduisant l'empreinte carbone de la construction en terre. Les recherches montrent des résultats prometteurs quant à l'amélioration des propriétés des briques en terre comprimées, même si les performances obtenues peuvent varier selon le type de biomasse utilisé.

Cette synthèse de la littérature souligne l'importance de poursuivre les recherches sur l'optimisation des formulations intégrant ces nouveaux stabilisants biosourcés, afin de développer des matériaux de construction plus respectueux de l'environnement tout en maintenant des performances techniques satisfaisantes.

Chapitre 2

Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

II.1. Introduction

Ce chapitre présente la caractérisation des matériaux utilisés ainsi que les procédures expérimentales des essais élaborés au cours de cette thèse. Dans une première partie, les matériaux sélectionnés pour cette étude seront introduits; il s'agit d'une terre limono-argileuse utilisée dans la fabrication de briques en terre comprimée, stabilisée avec deux types de cendres issues de déchets agricoles.

D'après la synthèse bibliographique, plusieurs études ont eu recours à divers stabilisants, tels que les matériaux naturels, des déchets de biomasse et des sous-produits industriels, en tant que liants, soit pour minimiser, soit pour remplacer les liants hydrauliques. Dans cette optique, l'objectif principal de cette étude vise à produire des briques en terre comprimées stabilisées avec deux types de cendres de bois, issues principalement de la combustion de bois domestique, utilisé pour le chauffage des maisons de campagne. Ces briques sont envisagées comme des alternatives respectueuses de l'environnement, garantissant de meilleures performances mécaniques, un bon confort thermique, ainsi qu'une durabilité vis-à-vis de l'eau.

La présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux a été réalisée. Ce chapitre décrira en détail tous les matériaux utilisés en caractérisant leurs propriétés physiques, chimiques, minéralogiques, mécaniques et thermiques. Ensuite, la formulation basée sur l'optimisation de la teneur en eau sera exposée, dans le but de satisfaire aux critères de fabrication des briques en terre comprimées. Enfin, les résultats obtenus, les interprétations qui en découlent et les discussions associées seront présentés.

II.2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont: une terre provenant d'une ressource locale Algérienne (une carrière locale de Remila au nord-est de l'Algérie). Ce site est fortement exploité dans la production des briques de terres cuites. Cette terre est représentée sur la **Figure II.1**.



Figure II.1. Matières premières; (a) Terre à l'état naturelle, (b) Terre utilisée.

Deux types de cendres de déchets agricoles (Wood Biomass Ash (WBA)) sont récupérés lors de la combustion de bois domestiques utilisés pour le chauffage des maisons de campagne. Ce bois a été récupéré lors de l'élagage des arbres. Ces deux cendres de biomasse notées WBAa, WBAb, respectivement sont utilisées dans la production des briques en terre comprimée sans aucun pré-traitement. Ces cendres sont illustrées respectivement dans la **Figure II.2**.

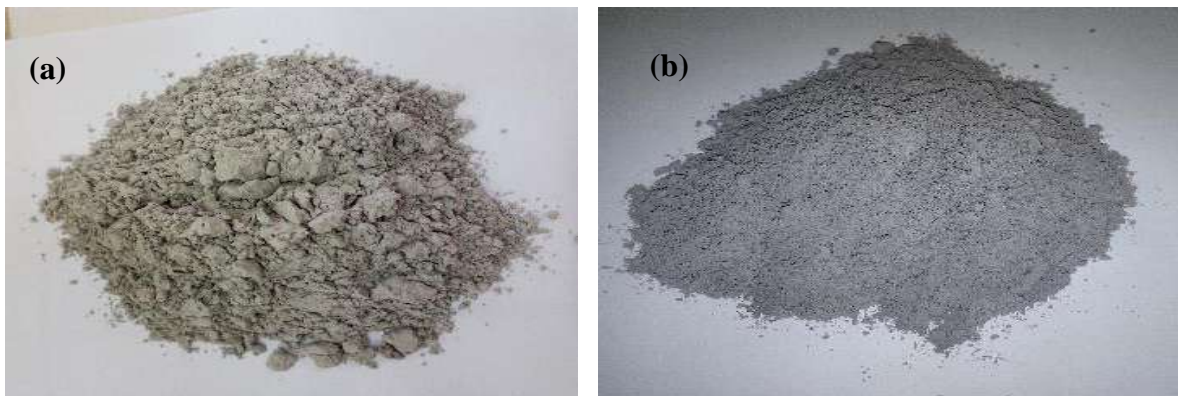


Figure II.2. Cendres de déchets de biomasses; (a) WBAa, (b) WBAb.

II.3. Caractérisations des matières premières

II.3.1. Caractérisations chimiques et minéralogiques

II.3.1.1. Analyse chimique par spectrométrie de fluorescence des rayons X

La Spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique permettant de déterminer la composition chimique élémentaire d'un matériau. Elle quantifie en pourcentage massique les oxydes majeurs et mineurs présents. À partir de ces résultats et en utilisant les masses molaires, les pourcentages en oxydes sont calculés. La fluorescence X est une émission de rayons X

caractéristique des éléments atomiques qui composent l'échantillon. Les rayons X sont envoyés par un tube cathodique sur l'échantillon. Ces rayons X primaires excitent les atomes, qui en retour émettent un rayonnement X secondaire, dont le spectre, caractéristique de l'atome, est analysé par un spectromètre. Le spectromètre peut fonctionner en mode de dispersion d'énergie ou en dispersion de longueur d'onde, selon l'appareil utilisé. L'analyse de ce spectre permet de déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments.

La composition chimique des matières premières a été déterminée par la technique de la spectrométrie de fluorescence X (XRF) en utilisant un Spectromètre de Fluorescence des Rayons X de marque BRUKER, de modèle S2 PUMA (XY). La composition chimique des matières premières est indiquée dans le **Tableau II.1**.

La terre présente un taux élevé en silice (49.44 %) et une teneur modérée en alumine (11.37 %). Les cendres de bois (WBA) utilisées possèdent une teneur élevée en CaO. Cependant, WBA_b présente une teneur élevée en MgO par rapport à WBA_a. Le pourcentage de chaux dans les deux WBA est légèrement différent. En raison de la variation du pourcentage d'oxydes présents dans les cendres, cela peut entraîner des réactions pouzzolaniques différentes. D'autre part, la perte au feu (LOI) était très élevée dans les cendres de bois. Cela peut être principalement attribué à la présence de carbonates et de matières organiques en grande quantité [108]. Leur présence en grande quantité peut ralentir la réaction pouzzolanique et entraver la formation des produits de liaison [122].



Figure II.3. Dispositif de fluorescence X utilisé.

Tableau II.1. Compositions chimiques des matières premières (oxydes en wt(%)).

	Terre	WBAa	WBAb
SiO₂	49.44	11.73	12.67
Al₂O₃	11.37	0.40	0.20
Fe₂O₃	5.31	0.02	0.02
CaO	14.63	43.74	35.58
MgO	1.70	1.58	15.13
K₂O	1.44	6.94	8.36
Na₂O	0.01	0.01	0.46
SO₃	0.70	0.82	0.91
LOI	15.38	34.55	27.00
Total	99.98	99.79	100.33

II.3.1.2. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X (DRX)

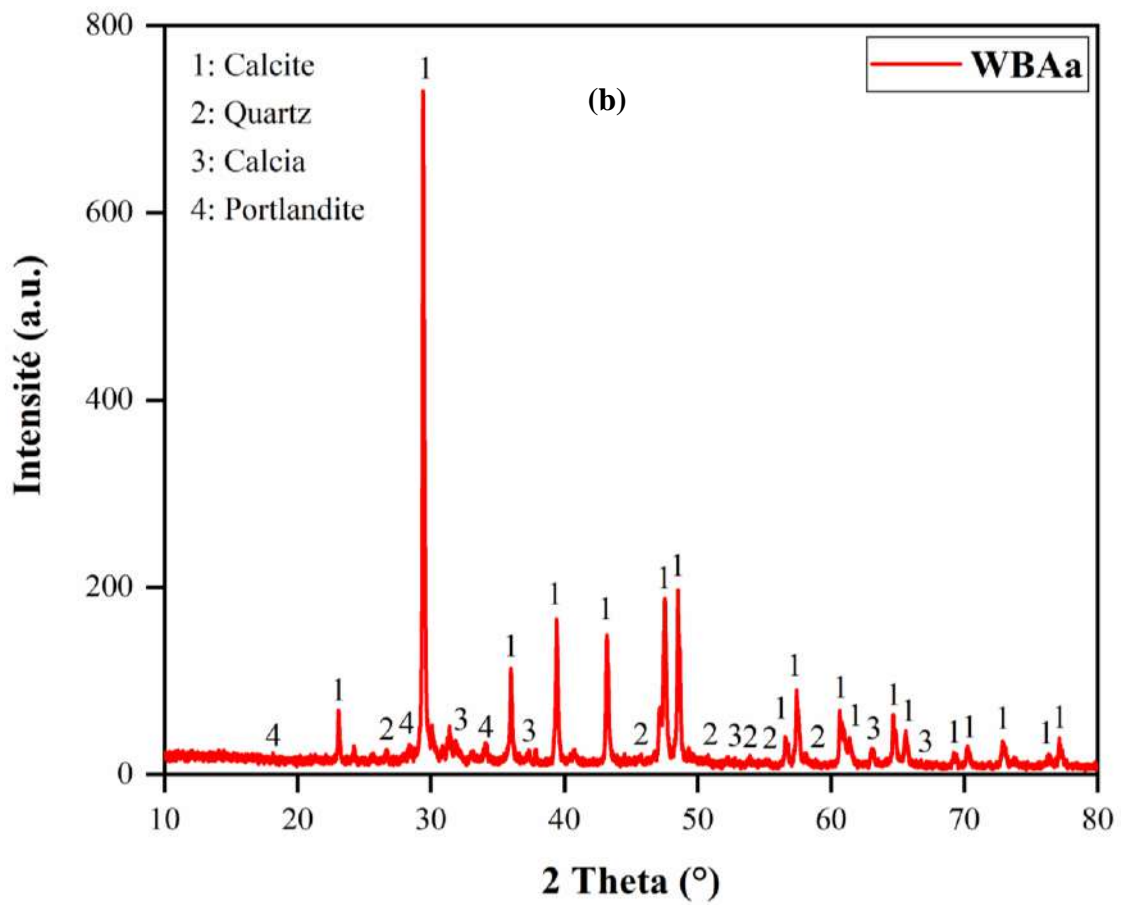
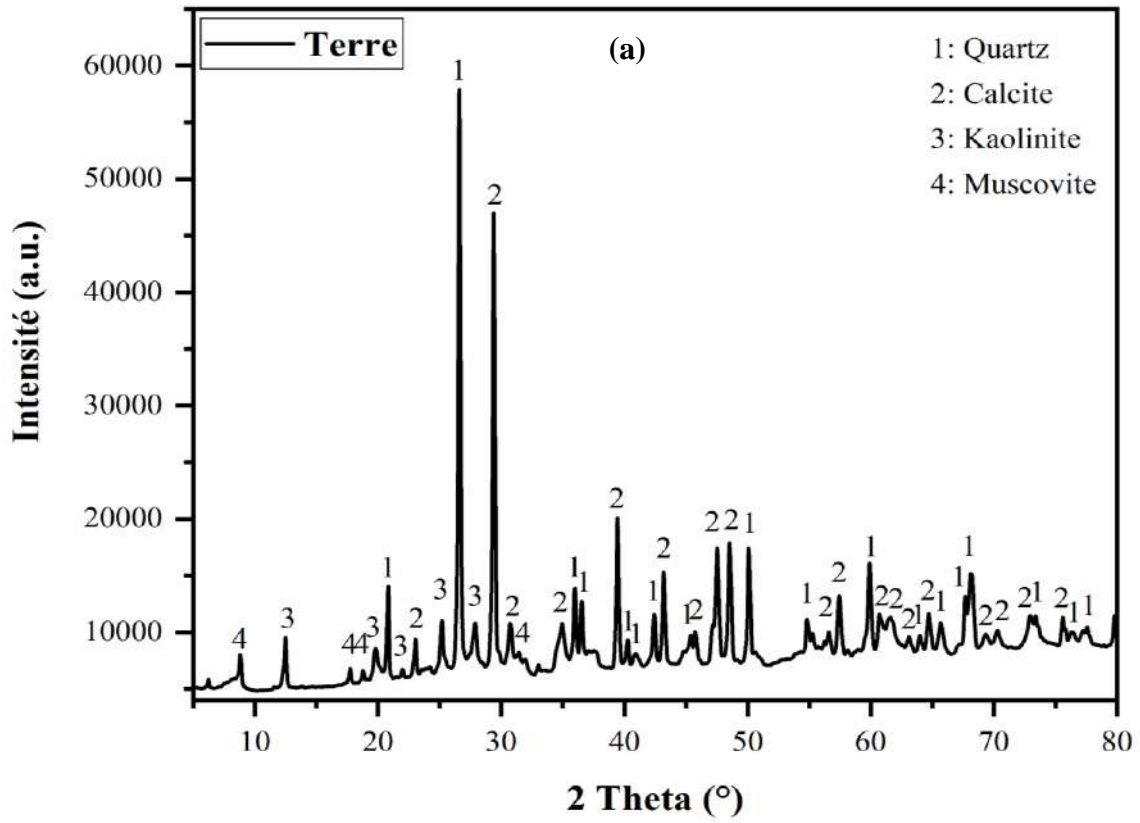
La composition minéralogique des matériaux fournit des informations sur les phases minérales présentes, permettant de déterminer si ses constituants sont amorphes ou cristallins, ainsi que d'identifier les phases cristallines spécifiques. L'identification minéralogique peut être réalisée de manière manuelle, en indexant les pics, ou automatiquement en utilisant des logiciels d'identification associés aux banques de données de référence de l'ASTM. L'analyse minéralogique a été effectuée par diffraction des rayons X (DRX), qui révèle la nature des minéraux cristallins, présents dans des échantillons préalablement séchés et réduits en poudre jusqu'à ce que l'ensemble puisse passer à travers un tamis d'ouverture de 63 μm .

Dans cette étude, l'analyse minéralogique des matériaux a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre du type Malvern PANalytical Empyrean conçu pour caractériser des échantillons plans polycristallins. Sa configuration est basée sur le principe de Debye-Scherrer, et le domaine angulaire balayé s'étend de 5 à 105° en 2 θ (angle d'incidence) avec un pas (step) de 0.003°. Le temps d'exposition était de 20 minutes. La radiation du cuivre Cu K α 1 avec une longueur d'onde ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) a été utilisée, produite sous une tension de 40 kV et avec une intensité de 30 mA. Toutes les caractérisations par DRX ont été réalisées sur des poudres non orientées.



Figure II.4. Diffractomètre modèle Malvern PANalytical Empyrean.

Les résultats de cette analyse DRX ont permis d'identifier les phases minéralogiques présentes dans les échantillons, et ils sont illustrés sur les diffractogrammes de la **Figure II.5**. La terre contenait principalement du quartz et de la calcite, avec de faibles teneurs en kaolinite et en muscovite. Les cendres de bois (WBA) présentaient une concentration significative de calcite, accompagnée de petits pics de diffraction notables attribués au quartz et à la chaux. De plus, la présence de la portlandite dans les WBAa ainsi que de la périclase, de la brucite et de la fairchildite dans les WBAb ont été détectées. Ces informations sont essentielles pour comprendre les réactions chimiques réalisées lors du processus d'hydratation et de formation de matériaux cimentaires.



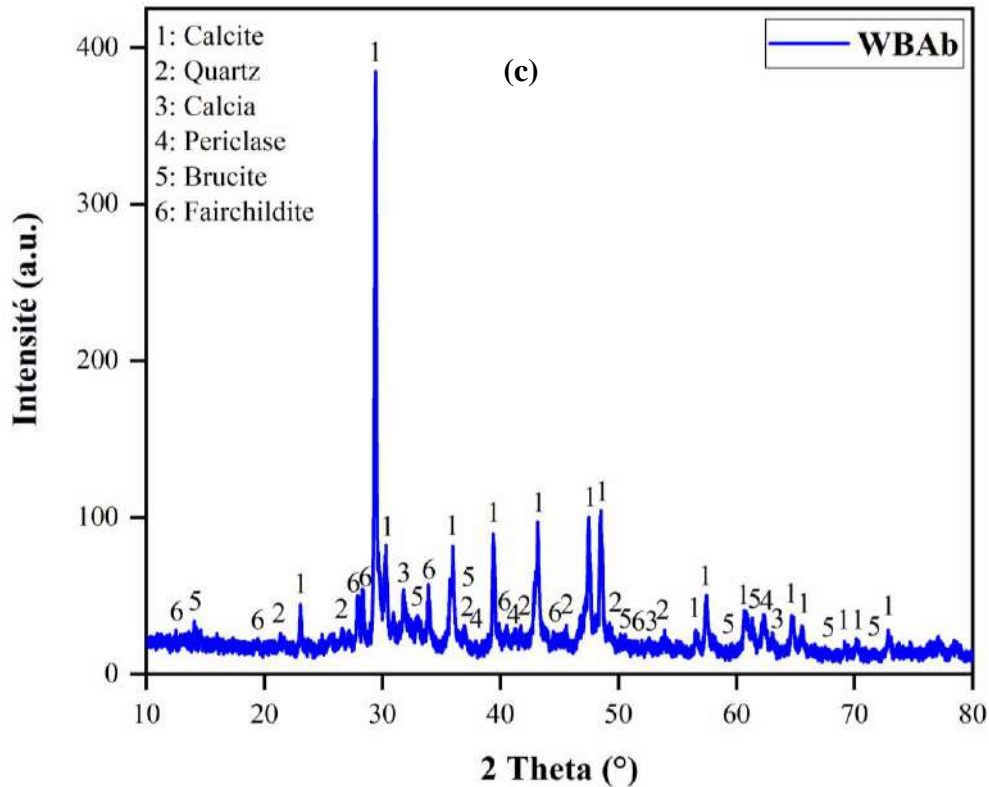


Figure II.5. DRX des matières premières (a) terre, (b) WBAa et (c) WBAb.

II.3.2. Caractérisations physiques

II.3.2.1. Analyse granulométrique au laser

La granulométrie au laser est une méthode précise et largement utilisée pour déterminer la distribution des tailles de particules fines dans différents matériaux. Elle repose sur l'utilisation d'un granulomètre tel que le Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer Partica LA-960V2 de marque HORIBA, qui utilise la diffraction de la lumière pour mesurer la taille des particules. Cet appareil est capable d'analyser des particules dans une gamme de tailles allant de 0.01 μm à 5000 μm . Le processus de mesure commence par la suspension des particules fines de la terre et des deux cendres dans un liquide de dispersion, ce qui permet d'obtenir une distribution homogène des particules. Ensuite, un faisceau laser est dirigé vers cette suspension, et les particules dispersent la lumière lorsqu'elles interagissent avec le laser. Les photodiodes de mesure détectent ces variations de lumière et fournissent des données qui sont utilisées pour calculer la distribution des tailles de particules. La distribution de taille est calculée en appliquant la théorie de Mie en assimilant les particules à des sphères. Cette technique repose sur certaines hypothèses, notamment celle que les particules sont sphériques. De plus, il existe

des limites quant à la détection des petites particules fines, car elles peuvent être masquées par des particules plus grosses [123]. Malgré ces limitations, la granulométrie au laser reste un outil précieux pour caractériser la taille des particules dans divers matériaux.



Figure II.6. Granulomètre laser de HORIBA.

La distribution granulométrique des matières premières, illustrée dans la **Figure II.7** et résumée dans le **Tableau II.2**, montre que la terre est composée principalement de 12.08% d'argile ($< 2 \mu\text{m}$), de 74.07% de limon (2-20 μm) et de 13.85% de sable fin (20-200 μm). La quantité de limon est en dehors des limites supérieures des spécifications granulaires proposées par la norme NF XP 13-901 [94] pour les briques en terre comprimée, ainsi que la quantité de sable qui est très faible par rapport aux limites inférieures désignées selon cette norme. Cependant, ces courbes de référence sont des données indicatives pour les briques en terre crue. La terre de carrière utilisée, dans cette étude, est fortement exploitée dans la fabrication des briques de maçonneries sauf à des diamètres probablement supérieurs à 63 μm . Les tailles des particules des WBA sont plus fines que celles de la terre. Le pourcentage de particules fines inférieure à 2 μm est faible dans les deux cendres WBAa, WBAb de l'ordre de 0.51% et 0.76%, respectivement. La fraction granulaire de ces cendres est concentrée entre deux diamètres (2-20 μm) de l'ordre de 96.11% pour les WBAa, et de 61.76% pour les WBAb, et de l'ordre de 3.38% dans les WBAa et de 37.48% dans les WBAb à un diamètre compris entre 20 et 200 μm .

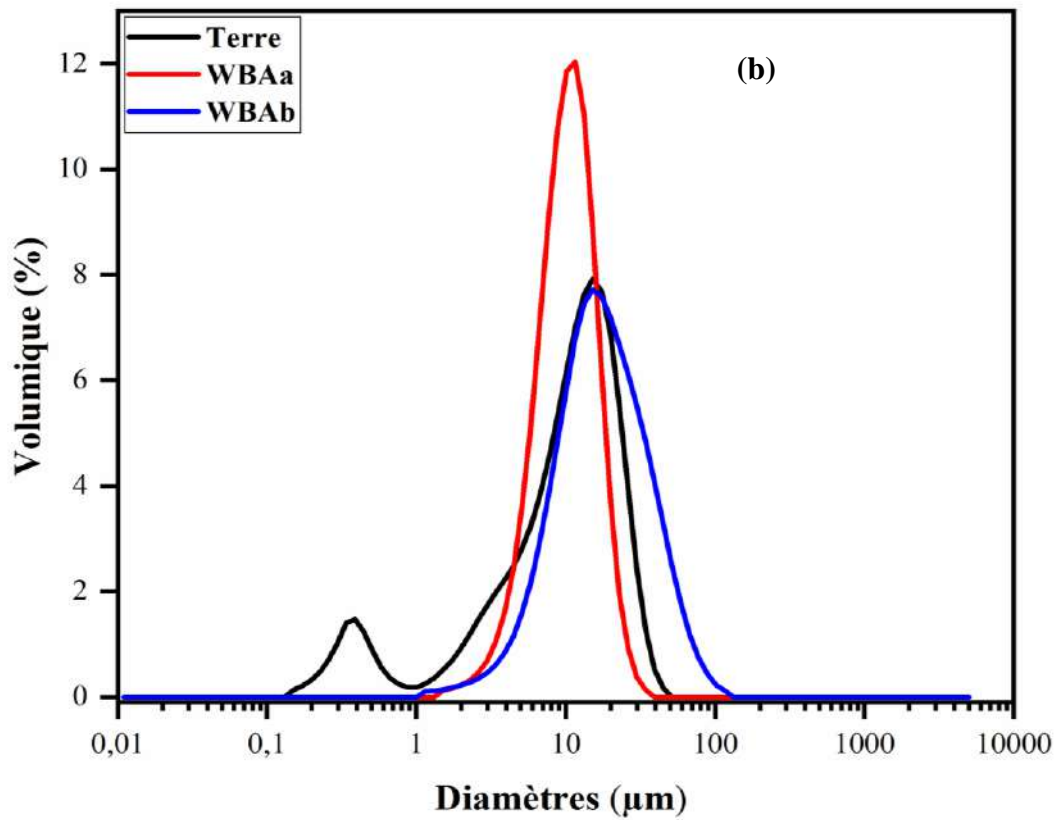
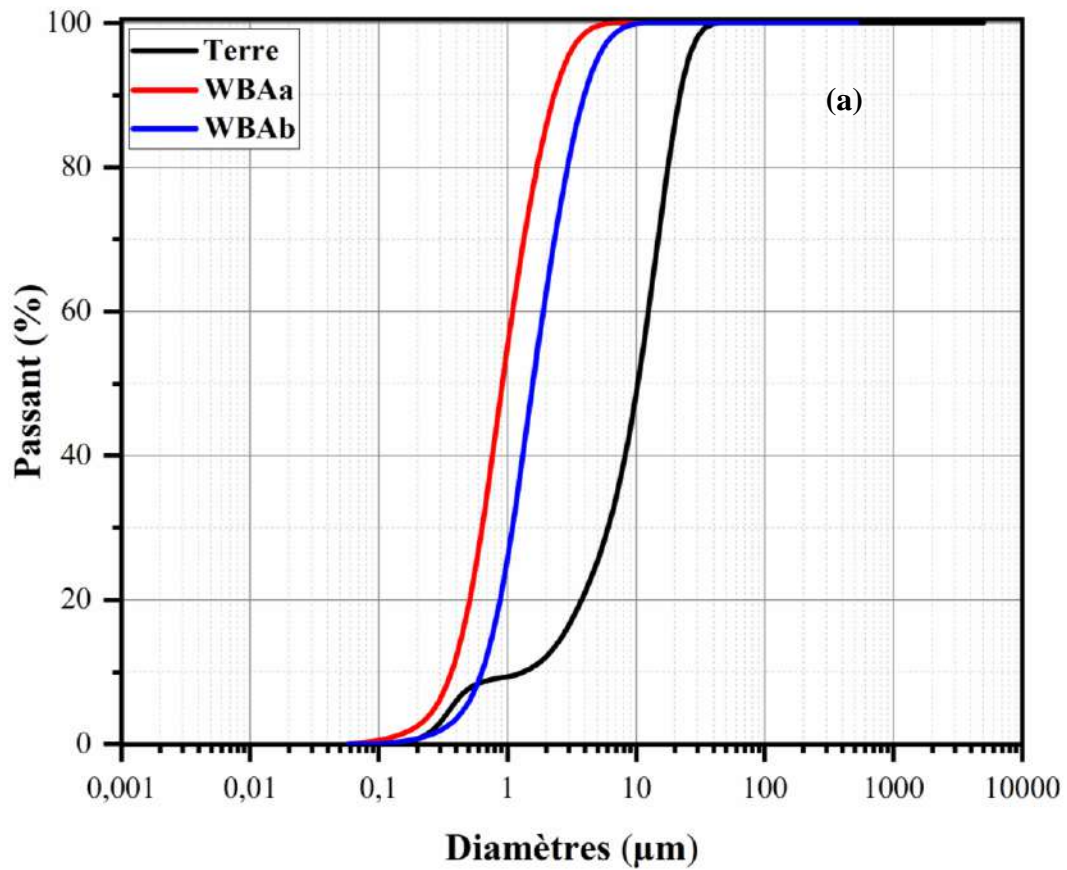


Figure. II.7. Distributions granulométriques de la terre et WBA.

Tableau II.2. Distribution granulométrique des matériaux utilisés.

Distribution granulométrique	Terre	WBAa	WBAb
Pourcentages d'argile < 2µm	12.08	0.51	0.76
Pourcentages de limon 2-20 µm	74.07	96.11	61.76
Pourcentages de sable 20-200 µm	13.85	3.38	37.48

La **Figure II.7. (b)** présente les distributions cumulatives des tailles des particules des matériaux utilisés. La distribution granulaire de la terre est bimodale, avec un D90 correspondant aux particules de 21.87 µm, ainsi qu'une taille médiane des particules (D50) de 10.28 µm. En ce qui concerne les deux cendres, leurs distributions granulaires sont unimodales. WBAb est plus grossier que les WBAa (**Tableau II.3.**), avec un D90 correspondant aux particules de 16.29 µm et 39.66 µm pour les WBAa et WBAb, respectivement. La taille médiane des particules (D50) est de 9.55 µm pour les WBAa et de 15.79 µm pour WBAb.

Tableau II.3. Distributions granulométriques cumulatives des matériaux utilisés.

Diamètres	Terre	WBAa	WBAb
D10	1.32	4.99	6.35
D50	10.28	9.55	15.79
D90	21.87	16.29	39.66

Sur la base des résultats du **Tableau II.2** et du positionnement de la terre étudiée dans la classification triangulaire des sols fins (**Figure II.8.**), il est possible de conclure que cette terre présente un pourcentage élevé de limon fin. Selon la classification du triangle des textures de l'INRA [124], cette terre est donc considérée comme une terre limono-argileuse. D'après la norme NF XP 13-901 [94], cette terre est déconseillée pour la fabrication de briques en terre comprimée. Il est recommandé d'utiliser un stabilisant physique et/ou chimique. Le faible pourcentage d'argile entraîne une porosité granulaire en raison du manque de cohésion entre les particules, ce qui rend nécessaire l'utilisation d'un liant pour combler les vides entre les grains et assurer une meilleure compaction.

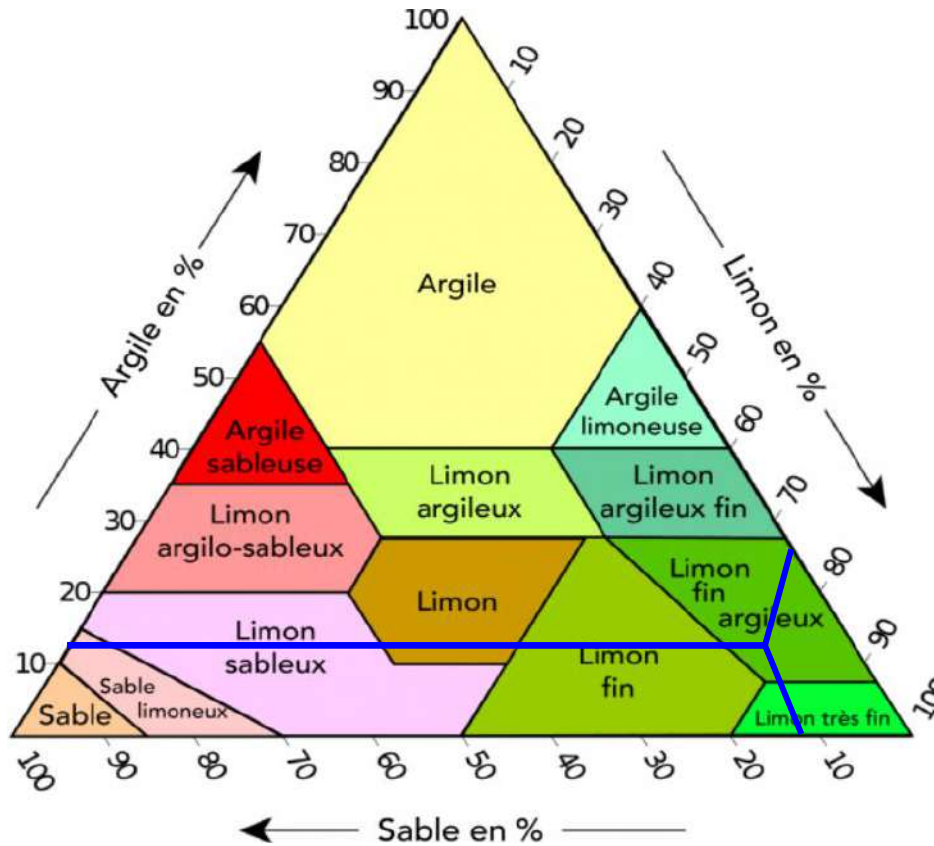


Figure. II.8. Classification de la terre utilisée selon le triangle des textures de l'INRA [124].

II.3.2.2. Mesure de la teneur en eau (NF P 94-050)

La teneur en eau naturelle de la terre dépend de son mode de séchage. La teneur en eau initiale de la terre est réduite lorsqu'elle est mise en dépôt sur un lit de séchage naturel à l'air libre. Il est essentiel de déterminer cette teneur en eau initiale pour évaluer la quantité d'eau à éliminer en vue d'une réutilisation éventuelle.

La détermination de la teneur en eau de la terre est effectuée conformément à la norme française NF P 94-050 (1995) [125], en utilisant la méthode de séchage en étuve. Le principe de cette méthode consiste à sécher une masse de 1 kg de terre dans une étuve réglée à 105°C jusqu'à ce que la différence de masse devienne constante, généralement après 24 heures. La différence entre le poids de l'échantillon avant et après séchage permet d'exprimer la teneur en eau de l'échantillon initial, mesurée en pourcentage (%).

$$W(\%) = \frac{\text{Masse de l'échantillon humide} - \text{Masse de l'échantillon sec}}{\text{Masse de l'échantillon sec}} \times 100 \quad (1)$$

D'après l'équation (1), la valeur moyenne de la teneur en eau naturelle de la terre utilisée est de 12% après séchage dans l'étuve à 105°C.

II.3.2.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg, également appelées limites de consistance, sont des valeurs qui délimitent les différents états de consistance d'un sol. Elles sont indicatrices de plusieurs propriétés physiques du sol, notamment sa plasticité, sa résistance, sa perméabilité, sa compressibilité et son potentiel de retrait/gonflement [126]. Les limites d'Atterberg sont spécifiquement déterminées pour les éléments fins d'un sol. Lorsque la teneur en eau d'un matériau fin augmente, le matériau solide peut passer de l'état solide à un état liquide (WL), avec des états intermédiaires présentant des propriétés plastiques (WP). Des limites arbitraires ont été définies pour caractériser ces différents états en fonction de la teneur en eau croissante. La détermination de ces deux limites est effectuée suivant la norme NF P94-051, 1993 [126]. La **Figure II.9** illustre les essais d'identification des limites d'Atterberg.

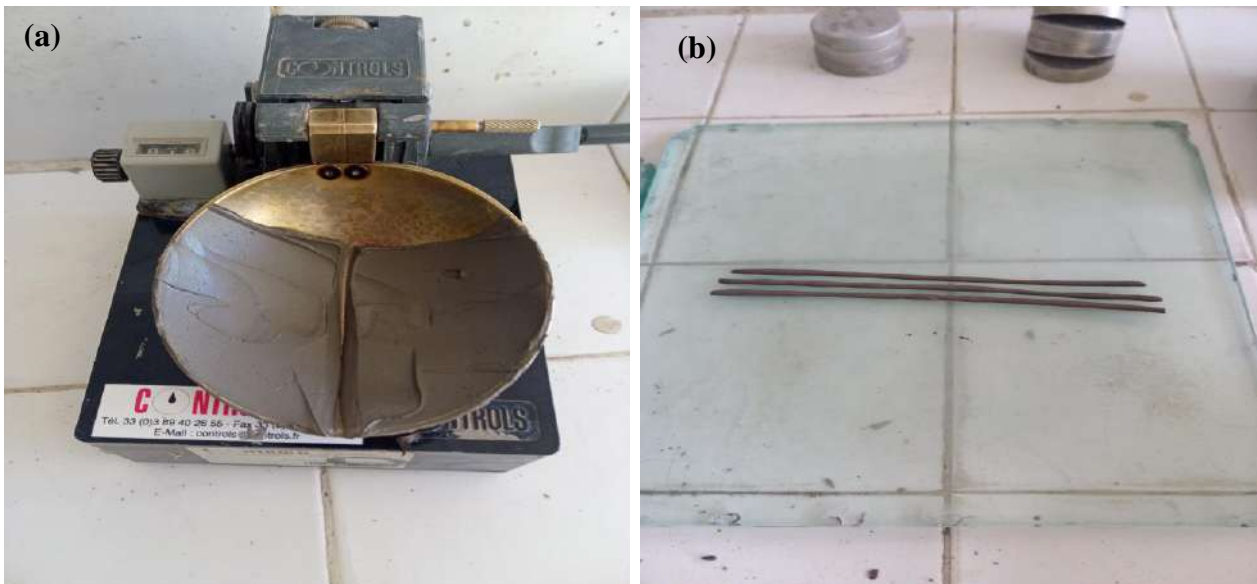


Figure II.9. Limites d'Atterberg; (a) Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande, (b) Limite de plasticité au rouleau.

Le domaine situé entre les deux limites mentionnées précédemment détermine l'indice de plasticité (I_p) d'un sol. Cet indice est essentiel pour caractériser la plasticité d'un matériau particulier, notamment les sols fins. Il se calcule en soustrayant la limite de liquidité (W_L) de la limite de plasticité (W_P). Suivant les valeurs de cet indice, les sols peuvent être classés selon leurs degrés de plasticité. L'indice de consistance (I_c) représente le rapport de la différence entre la teneur en eau et la limite de plasticité, par son indice de plasticité. Il donne une indication sur l'état de la consistance d'un sol et sur le degré d'adhérence entre les particules. Le **Tableau II.4**

présente les limites d'Atterberg, l'indice de plasticité ainsi que l'indice de consistance pour les échantillons de terre testés.

Tableau II.4. Limites d'Atterberg de la terre.

	Teneur en eau W (%)	Limite de plasticité W_p (%)	Limite de liquidité W_L (%)	Indice de plasticité I_p (%)	Indice de consistance I_c (%)
Terre	12	19.61	39.62	20.01	1

Les résultats présentés dans le **Tableau II.4** et la **Figure II.10** montrent que les limites de plasticité sont bien positionnées dans les limites appropriées pour la fabrication de briques en terre comprimée. Conformément à la norme AFNOR XP P 13-901 [94], cette terre se situe dans la plage de plasticité recommandée pour les sols utilisés dans la production de briques en terre comprimée. De plus, selon les critères de CRATerre-EAG [127], l'indice de plasticité et la limite de liquidité indiquent que cette terre est adaptée à la fabrication de briques en terre comprimée.

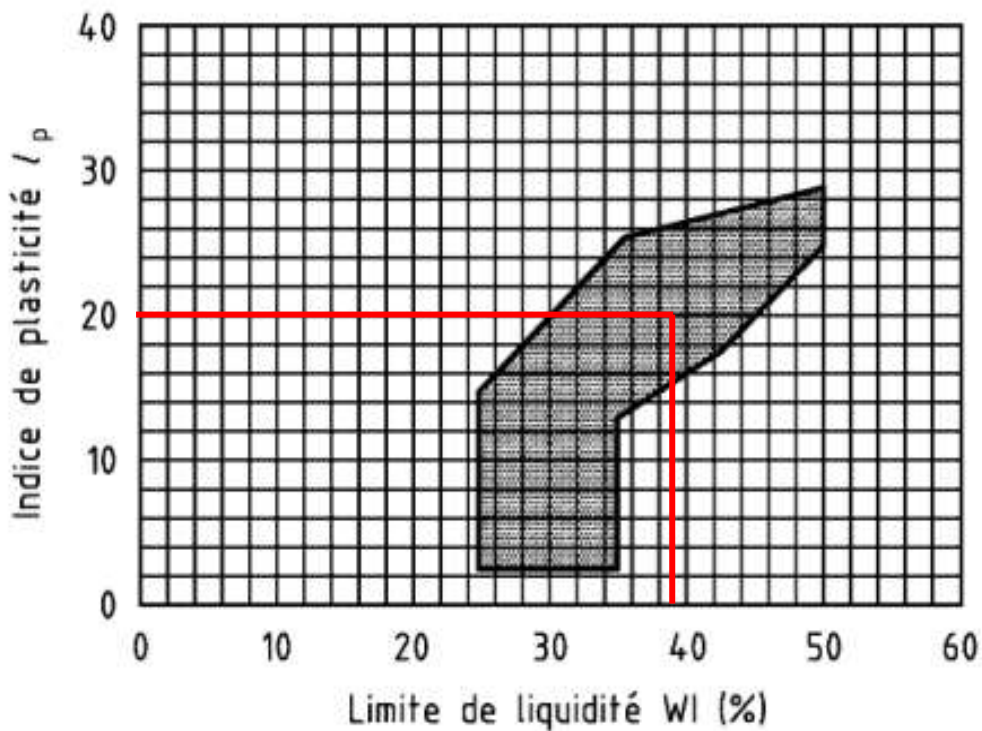


Figure II.10. Diagramme de plasticité de la terre.

II.3.2.4. Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068)

L'activité des argiles présentes dans un sol traduit leur rôle prépondérant dans le comportement global du sol en présence d'eau. Cette activité dépend de la proportion d'argiles dans le sol ainsi que de leurs surfaces externes et internes, qui révèlent la nature minéralogique de ces argiles. La valeur au bleu de méthylène permet de quantifier la capacité d'absorption d'eau des sols sur la fraction de particules inférieure à 2 mm dans un sol [128]. La valeur au bleu de méthylène permet une estimation précise de la surface spécifique, du potentiel de gonflement et de la capacité d'échange cationique des sols argileux. Le guide des terrassements routiers (GTR, 2000) [129] propose une classification des sols en fonction de leur valeur au bleu de méthylène.

Selon la norme française NF P 94-068 [128], un échantillon sec de la terre, pesant 200 g et prélevé dans la fraction inférieure à 2 mm de la terre, est placé dans 500 ml d'eau déminéralisée. Afin de garantir une dispersion homogène, l'échantillon est soumis, par la suite, à l'action d'un agitateur équipé d'ailettes, à une vitesse de 700 ± 100 tr/min, pendant au moins 5 minutes. La vitesse de rotation de l'agitateur est ajustée pour se stabiliser à 400 ± 100 tr/min. La suite de l'essai implique l'addition progressive de 5 cm³ à 10 cm³ de bleu de méthylène à la suspension jusqu'à ce que les particules d'argile atteignent leur saturation, ce qui est illustré dans la **Figure II.11**. Pour déterminer précisément le moment de saturation, un test de la tâche est réalisé, une petite goutte de la solution est prélevée et déposée sur un filtre. Le test est considéré comme réussi lorsque l'auréole qui entoure la tâche centrale bleue prend une couleur caractéristique. La valeur au bleu de méthylène est calculée selon l'équation suivante :

$$VBS = \frac{\text{Masse sèche de la prise d'essai (g)}}{\text{Volume du bleu de méthylène (cm}^3\text{)}} \times 10 \quad (2)$$

La valeur au bleu de méthylène (VBS) de la terre étudiée est de 2.7 g/100 g. Conformément aux directives de la norme NF P11-300 [129], cette terre est classée comme un sol limoneux de plasticité moyenne.



Figure II.11. Essai de bleu de méthylène.

II.3.2.5. Surfaces spécifiques

a) Surface de Blaine (NF EN 196-6)

La méthode Blaine est une technique utilisée pour mesurer la finesse d'une poudre ou d'un matériau fin, en particulier les ciments et les matériaux cimentaires. Cette méthode est couramment employée pour évaluer la surface spécifique d'un matériau en fonction de la quantité d'air nécessaire pour compacter une quantité donnée de matériau dans un cylindre de Blaine standard. En général, plus le matériau est fin, plus il nécessitera d'air pour être compacté, ce qui permet d'estimer sa finesse.

La surface de Blaine de la terre, ainsi que des deux cendres, a été déterminée à l'aide d'un perméabilimètre à l'air de Blaine, conformément à la norme NF EN 196-6 [130]. Les résultats de la surface de Blaine de la terre et des deux cendres sont récapitulés dans le **Tableau II.5**.

b) Méthode Brunauer, Emmett et Teller (BET)

La méthode Brunauer, Emmett et Teller (BET) est utilisée pour évaluer le volume de diazote (N_2) adsorbé par un échantillon à des températures basses. Cette analyse repose sur la théorie

de l'adsorption multicouche des gaz, telle que formulée par Brunauer, Emmett et Teller (BET) [131]. Il est important de noter que cette méthode permet uniquement de mesurer la surface spécifique externe, car le gaz utilisé ne peut pas pénétrer les couches d'argiles.

La surface spécifique BET des deux cendres de bois a été déterminée en utilisant la physisorption de gaz avec un Micromeritics ASAP 2020, Version 2.00 (**Figure II.12**), et les résultats sont récapitulés dans le **Tableau II.5**.



Figure II.12. BET Micromeritics ASAP 2020 Plus, V2.00.

Tableau II.5. Surfaces spécifiques (Blaine et BET) des matériaux utilisés.

	Terre	WBAa	WBAb
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	5186	4720	4794
Surface spécifique de BET (m ² /g)		6.03	7.58

D'après les résultats du **Tableau II.5**, on peut conclure que la surface spécifique de Blaine de la terre est plus élevée que celles des WBA. De plus, la mouture de finesse de WBAb est

légèrement supérieure à celle de WBAa, ceci peut s'expliquer probablement par la différence de densité des deux bois utilisés lors de la combustion. Il est important de noter que les données de la surface spécifique de BET confirment les résultats de la surface de Blaine des deux cendres.

II.3.2.6. Masses volumiques (apparentes et absolues) (NF P 94-053)

La masse volumique absolue et la masse volumique apparente sont deux termes couramment utilisés pour caractériser la densité d'un matériau, mais ils diffèrent légèrement dans leur signification. La masse volumique absolue se rapporte à la densité intrinsèque d'un matériau, tandis que la masse volumique apparente tient compte des espaces vides, des pores ou de la structure particulière du matériau dans des conditions spécifiques [132].

Les masses volumiques des matériaux utilisés ont été déterminées selon la norme NF P 94-053 [136], et résumé dans le **Tableau II.6**. Les valeurs obtenues pour la masse volumique apparente sont de 0.83 g/cm³ pour la terre, de 0.39 g/cm³ pour les WBAa et de 0.40 g/cm³ dans les WBAb. Les masses volumiques absolue sont de 2.72 g/cm³, 2.68 g/cm³ et 2.69 g/cm³ dans la terre, WBAa et WBAb, respectivement. En revanche, les cendres WBA sont plus légères que la terre.

Tableau II.6. Masses volumiques des matériaux utilisés.

	Terre	WBAa	WBAb
La masse volumique apparente (g/cm³)	0.83	0.39	0.40
La masse volumique absolue (g/cm³)	2.72	2.68	2.69

II.3.2.7. Mesure de pH

La mesure du pH pour la terre et les deux cendres (WBA) a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre Portable pH/EC/TDS/Temperature Meter - HI991300 de la marque HANNA Instruments. Le pH-mètre se compose d'un boîtier et d'une sonde, comprenant une électrode et une électrode de référence dont le pH est connu. Lorsque la sonde est immergée dans une solution, une différence de potentiel se crée, ce qui permet de calculer le pH de la solution. Le pH mesuré correspond à la concentration en ions H₃O⁺ dans la solution. Si le pH est supérieur à 7, la solution est basique, s'il est égal à 7, la solution est neutre, et s'il est inférieur à 7, la solution est acide. Avant chaque série de mesures, le pH-mètre est étalonné de manière régulière. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un pH-mètre en utilisant une suspension de 20 grammes de

matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La solution obtenue est ensuite placée sur un agitateur magnétique. Trois mesures de pH sont alors effectuées. Le pH peut fournir des informations importantes sur la prédominance de matières organiques décomposées ou de carbonates [1]. L'analyse de la terre a montré que son pH est de 8.78. Selon Guettala A., (2003) [133], pour qu'un sol soit approprié à la stabilisation, son pH doit être supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6, un prétraitement du sol est nécessaire. Selon cette mesure, la valeur de pH des deux cendres est de 13.11 pour les WBAa et de 13.31 pour les WBAb, et elles diffèrent légèrement en raison de leurs différentes teneurs en alcalins. Ces deux cendres WBA présentent également des valeurs de pH fortement basiques par rapport à celles de la terre.



Figure II.13. Mesure de pH à l'aide d'un pH-mètre HANNA instrument.

II.3.3. Caractérisations microstructurales (MEB/EDX)

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la morphologie d'un matériau à l'échelle nanométrique. Le principe de cette technique repose sur l'interaction entre les électrons secondaires émis et rétrodiffusés, ce qui permet de créer une image de l'objet.

Les microstructures des échantillons ont été examinées à l'aide de l'appareil Thermo Scientific™ Quattro ESEM haute résolution, couplé à la spectroscopie à rayons X à dispersion

d'énergie (EDX) pour l'analyse chimique (20 kV). Les échantillons ont été préparés en les plaçant sur un support en aluminium et en les recouvrant de carbone pour la pulvérisation ionique. La préparation des échantillons peut se faire sous forme solide ou en poudre, qui est directement déposée sur un porte-échantillon préalablement enduit de laque de carbone. Une fois préparé, l'échantillon est métallisé puis introduit dans la chambre du MEB (**Figure II.14**). Cette technique permet d'observer et d'analyser la structure fine des matériaux à une échelle très petite. La microscopie électronique à balayage permet la visualisation à l'échelle de nanomètre de la morphologie d'une matière. Le principe de cette technique est basé sur l'interaction forte entre les électrons secondaires émis et rétro diffusés qui permettent de reconstituer l'image de l'objet.

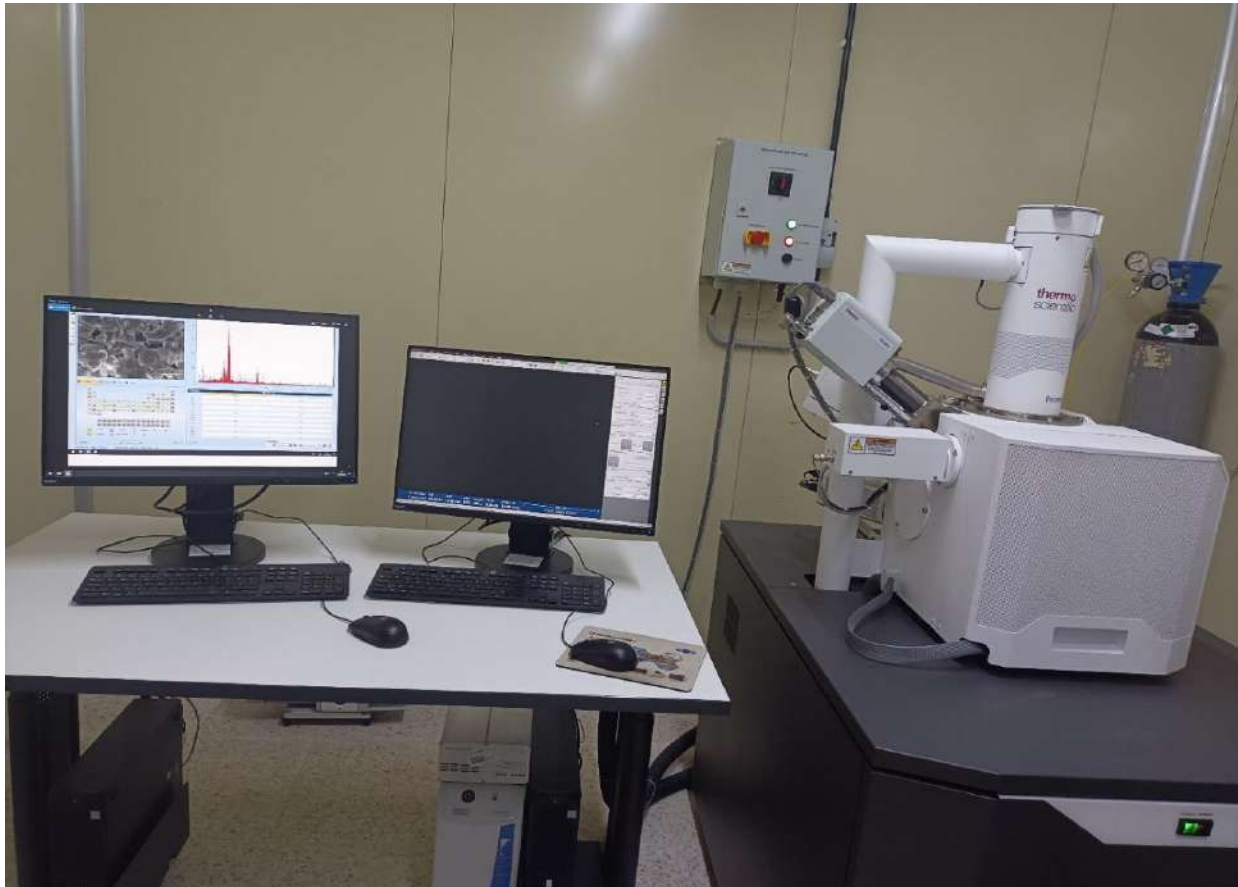
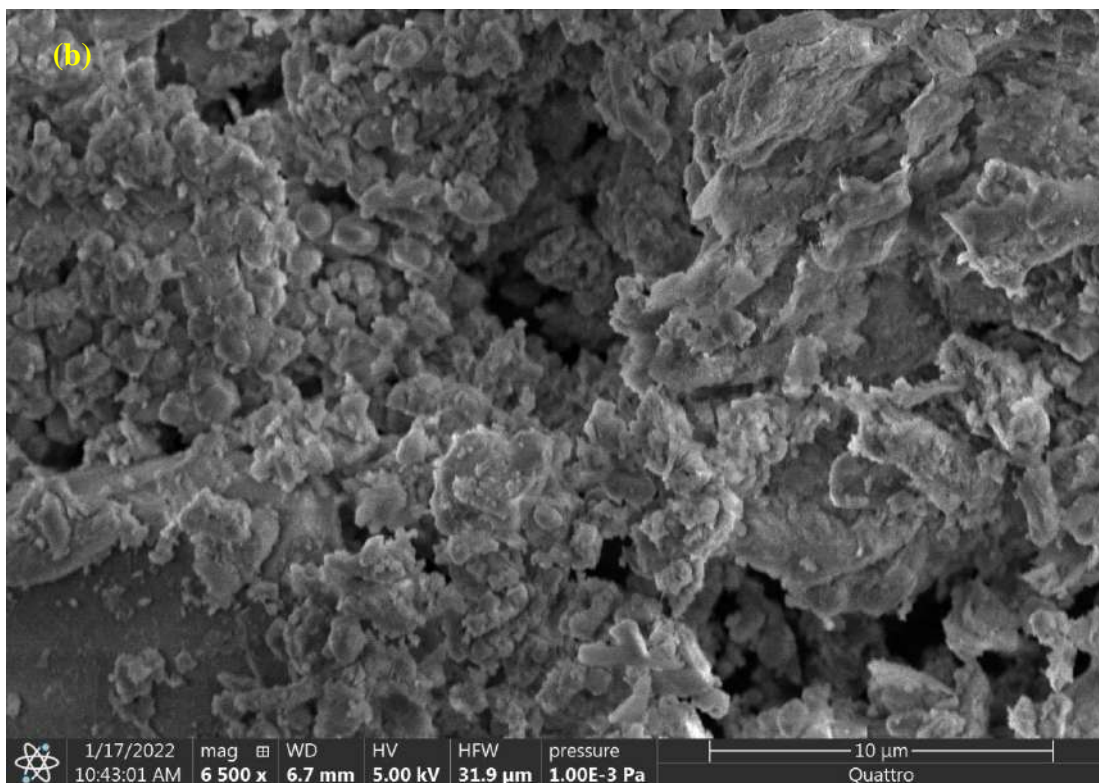
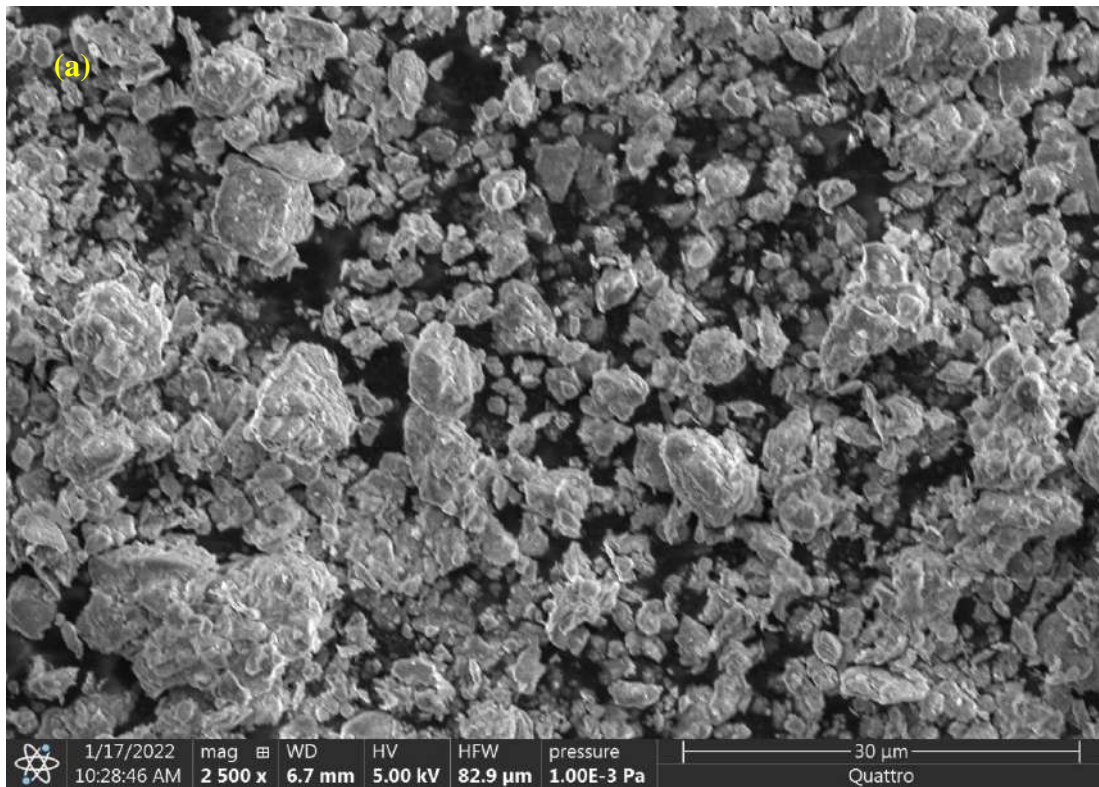


Figure II.14. Microscope électronique à balayage MEB de Thermo Scientific.

La microstructure MEB de la terre (**Figure II.15**) indique que cette matière première est composée de particules de tailles angulaires différentes et dans une moindre mesure, des tailles sphériques. Les WBA ont des particules légèrement arrondies et anguleuses présentant une plus grande proportion de particules angulaires, avec une large distribution de taille de particules.



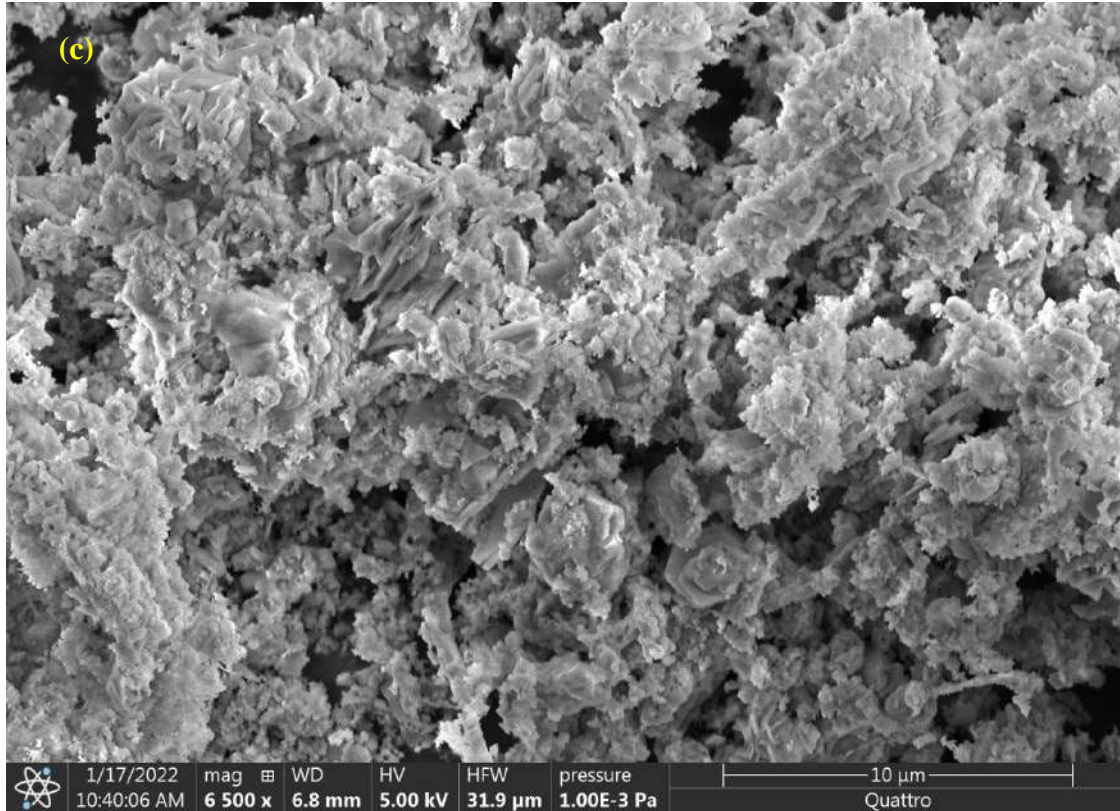


Figure II.15. Images MEB des matières premières (a) terre, (b) WBAa et (c) WBAb.

II.3.4. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)

L'analyse thermique est un outil précieux pour suivre le comportement des échantillons lors de la calcination. Elle permet aussi de connaître les constituants composant l'échantillon. Elle comprend deux techniques principales: l'Analyse Thermique Gravimétrique (ATG) et l'Analyse Thermique Différentielle (DTG).

L'analyse thermogravimétrique (ATG) mesure la perte de masse de l'échantillon en fonction de la température. Cette technique permet de quantifier les variations de masse au fur et à mesure que la température augmente. Elle fournit des données quantitatives sur les pertes ou gains de masse de l'échantillon en fonction de la température.

L'Analyse Thermique Différentielle (DTG) est une technique qui représente la dérivée de la perte de masse en fonction du temps. Elle est particulièrement utile pour calculer avec précision les variations de masse à des températures spécifiques. Dans les courbes DTG, les phénomènes exothermiques (libérant de la chaleur) sont généralement représentés vers le haut, tandis que les phénomènes endothermiques (absorbant de la chaleur) sont représentés vers le bas. L'analyse

DTG fournit des données qualitatives sur les réactions thermiques qui se produisent dans l'échantillon.

Ces deux techniques, ATG et DTG, sont complémentaires et permettent d'obtenir à la fois des données quantitatives et qualitatives sur les changements de masse et les réactions thermiques qui se produisent au cours de la calcination des échantillons.

L'analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) a été réalisée à l'aide d'un équipement composé d'un four de modèle METLER TOLEDO couplé à un système d'acquisition HP 34970A associé au logiciel STARe v.15 (**Figure II.16**). Le principe consiste à mesurer la perte de masse d'un échantillon représentatif de 20-30 mg environ, placé dans un creuset cylindrique, lors de la montée en température jusqu'à 1000°C avec une rampe de 10°C/min dans de l'argon sous un balayage d'air (80 ml/min). Cet essai permet d'identifier les composés présents dans les matières premières à partir de leur température de décomposition et, connaissant les équations chimiques des transformations, de calculer la proportion de ces composés. Préalablement à l'essai, les échantillons ont été tamisés au passant à 63 µm.

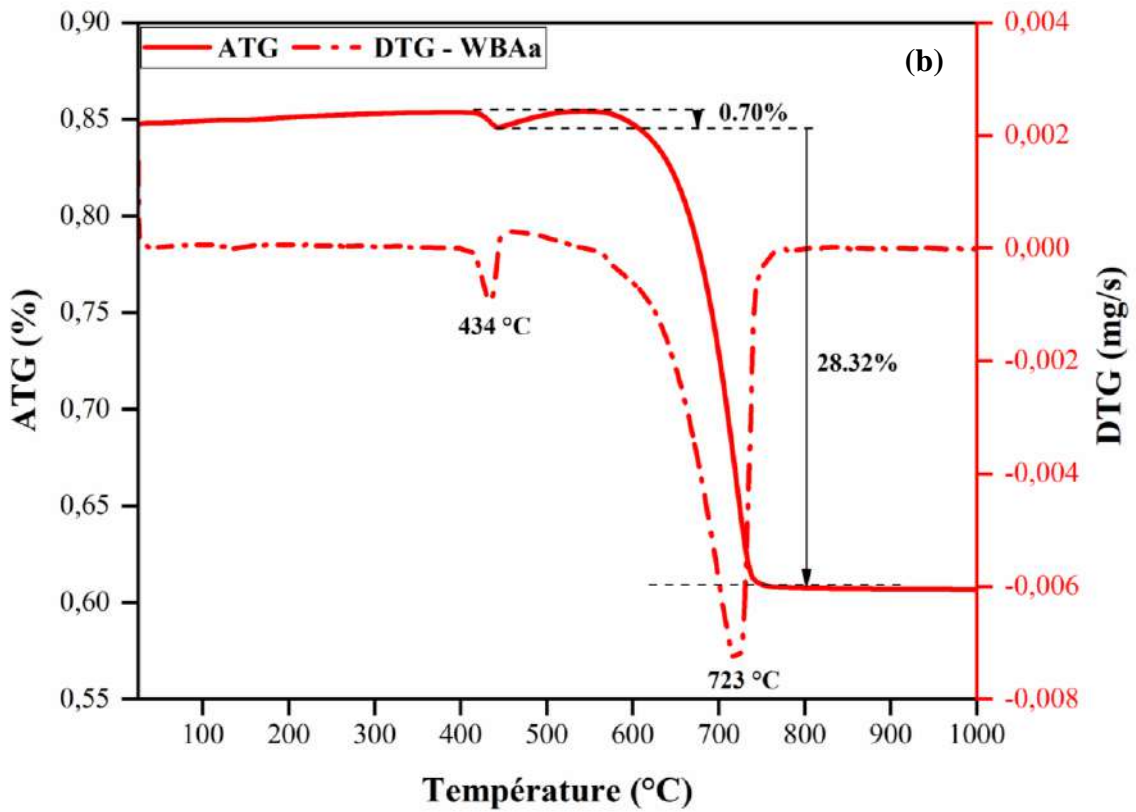
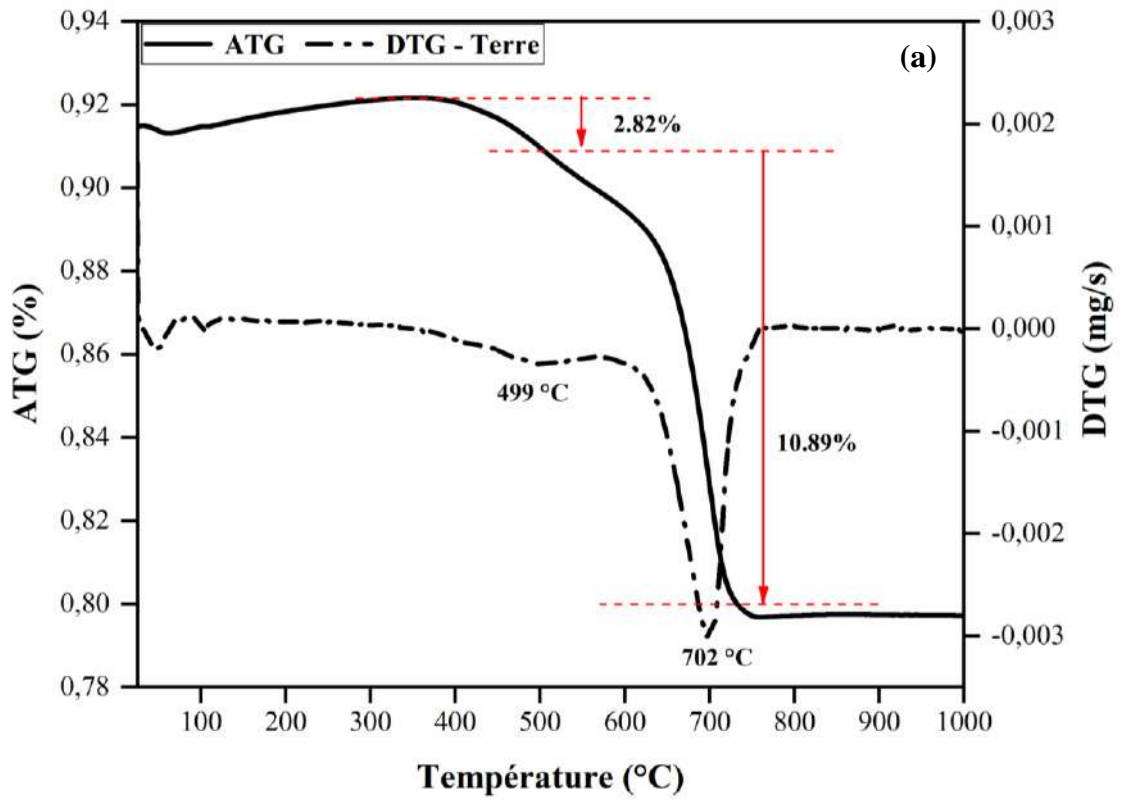


Figure II.16. Dispositif de l'analyse thermogravimétrique (ATG/DTG).

Des tests d'analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) ont été réalisés sur les matériaux utilisés. Les résultats de l'analyse thermique, présentés sur la **Figure II.17**, montrent que la perte de masse augmente en fonction de la température de cuisson. La caractérisation thermique de la terre révèle trois pics principaux observés sur les courbes DTG, qui correspondent aux points d'inflexion de la ATG. La variation de masse se caractérise par une perte de masse initiale due principalement au départ de l'eau physiquement absorbée par les feuillets de la kaolinite contenue dans la terre ($T \leq 120^{\circ}\text{C}$) [134-136]. Une perte de masse supplémentaire a été observée entre 400°C et 600°C , d'environ 2.82%. L'origine de cette diminution est liée au départ de l'eau de constitution, à la décomposition de la kaolinite et à sa transformation en métakaolinite [134-137], ainsi qu'à la déshydroxylation de la portlandite [138, 139]. De plus, une autre perte de masse a été enregistrée dans la plage de 600°C à 800°C , attribuée à la réorganisation structurale de la métakaolinite, ainsi qu'au début de la recombinaison et de la cristallisation des composés céramiques en phase solide, entraînant une nouvelle diminution de masse [135]. Au cours de ce cycle de chauffage, la terre présente une perte de masse assez importante, d'environ 10.89%. Cette valeur relativement élevée peut s'expliquer par la quantité de kaolinite contenue dans la terre utilisée, ainsi que par la décomposition des carbonates de calcium (CaCO_3) avec la libération de CO_2 [137-140].

La **Figure II.17 (b, c)** montre les résultats ATG/DTG des cendres WBA. Dans la plage de 400°C à 600°C , les WBAa présentent une légère perte de masse d'environ 0.70%. Ce pic correspond à la décomposition de la portlandite en chaux libre [138, 139]. De 600°C à 800°C , une perte de masse importante de 28.32% a été enregistrée, due à la décomposition des carbonates de calcium (CaCO_3) [137-140].

En revanche, dans les WBAb, quatre pics principaux ont été enregistrés. À $T < 350^{\circ}\text{C}$, une perte de masse modérée a été observée, attribuée à l'évacuation de l'eau libre [140, 141]. De 350°C à 450°C , un petit pic endothermique est apparu avec une perte de masse de 0.58%. Selon plusieurs chercheurs, ce pic est attribué à la décomposition ou déshydroxylation de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) [140-142]. Au même pic dans la plage de 400°C à 600°C , ce pic est attribué simultanément à la décomposition de la portlandite en chaux libre [138, 139]. De 600°C à 800°C , une perte de masse importante, de 20.28%, a été enregistrée, due à la décomposition des carbonates de calcium (CaCO_3) [137-140]. De 800°C à 900°C , un petit pic a été observé avec une perte de masse d'environ 1.63%. Ce pic est attribué simultanément à la décomposition de la calcite résiduelle et de la dolomite [137, 141].



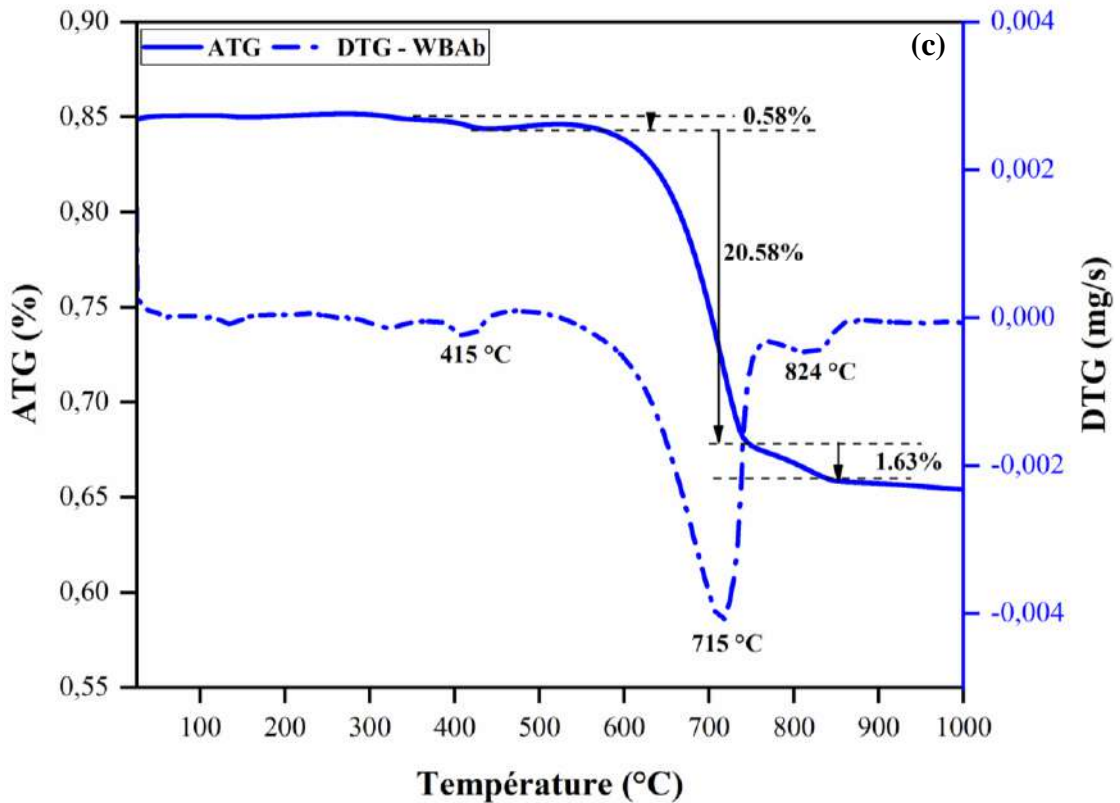


Figure II.17. ATG/DTG des matériaux utilisés; (a) terre, (b) WBAa et (b) WBAb.

II.3.4.1. Calcul de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de la calcite (CaCO_3)

L'analyse thermogravimétrique est une technique qui mesure la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température. Elle permet d'analyser des composés tels que le l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), la brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et le carbonate de calcium (CaCO_3) à partir de données ATG en déterminant les températures auxquelles ces composés se décomposent ou réagissent thermiquement. Le calcul des quantités de ces composés chimiques peut être réalisé au moyen de calculs analytiques, les résultats obtenus sont illustrés sur la **Figure II.18**.

La quantité de portlandite contenue dans les matériaux est déterminée en calculant la différence de perte de masse observée dans la plage de 400°C à 600°C, puis en multipliant cette perte par la masse molaire de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) divisée par la masse molaire de l'eau (H_2O) [138, 140]. Pour la brucite, c'est le même principe mais en utilisant la perte de masse entre 350°C et 450°C, et le rapport des masses molaires de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ sur l'eau. En revanche, la

quantité de calcite contenue est évaluée à partir de la différence de perte de masse observée dans la plage de 600°C à 800°C, en multipliant cette perte par la masse molaire des carbonates de calcium (CaCO_3) divisée par la masse molaire du dioxyde de carbone (CO_2) [138, 140].

D'après les résultats présentés sur cette figure, il apparaît que le pourcentage de la portlandite (Ca(OH)_2) est considérablement élevé dans la terre en comparaison aux deux types de cendres. La terre contient des argiles de type kaolinite (**Figure II.5**) qui libèrent de la portlandite lors de leur déshydroxylation vers 400-600°C. En revanche, le pourcentage de calcite (CaCO_3) est nettement plus élevé dans les cendres WBAA et WBAb que dans la terre. En plus de la calcite, les cendres WBAb contiennent un pourcentage modéré de la brucite d'environ 1.86%.

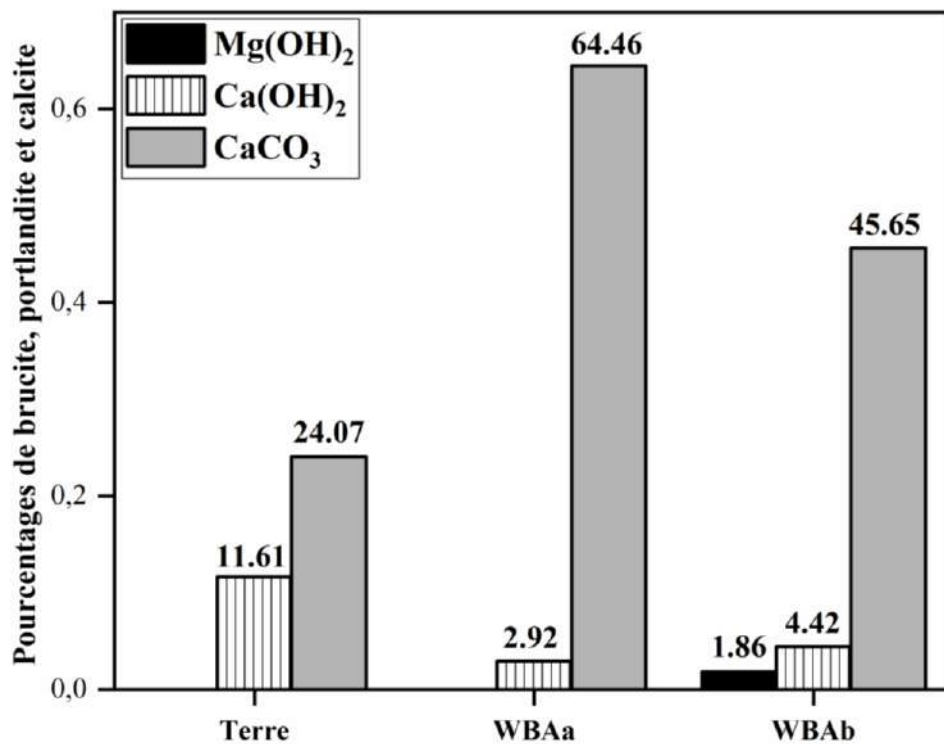


Figure II.18. Résultats des pourcentages de Mg(OH)_2 , Ca(OH)_2 et CaCO_3 contiennent dans les matériaux utilisés.

II.4. Confection des briques en terre comprimées

II.4.1. Production des éprouvettes

La préparation des briques de terre comprimée s'appuie sur des études antérieures menées par Mesbah et al., (1999) [143] et P'KLA (2002) [144]. Selon ces recherches, l'utilisation de la méthode Proctor pour le compactage et la détermination de la teneur en eau optimale n'est pas appropriée pour la production de blocs en terre comprimée, en raison des différences d'énergie

nécessaires lors du compactage. Pour cette raison, les briques en terre comprimée, appelées BWBA, ont été fabriquées à l'aide d'une presse hydraulique, en appliquant directement une charge statique selon la méthode proposée par le Centre pour le Développement de l'Entreprise (Centre for Development of Enterprise) C.D.E [145].

Les matières premières ont été séchées dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. La terre a été réduite en particules d'un diamètre inférieur à 2 mm, tandis que les WBA ont été tamisées pour obtenir un diamètre de 63 μm . Différents mélanges de BWBAa(0-20%) et BWBAb(0-20%) ont été préparés en remplaçant partiellement la terre par WBAa et WBAb, respectivement, à des proportions de 0, 5, 10, 15 et 20% en poids. La terre et les WBA ont été mélangés dans un malaxeur de 5 litres à une vitesse de 139 tr/min pendant 3 minutes. L'eau optimale calculée a été ajoutée progressivement jusqu'à l'obtention d'un mélange légèrement humide. Le mélange ainsi obtenu a été introduit dans un moule de forme parallélépipédique de dimensions 160 mm x 50 mm x 80 mm. Ensuite, il a été pressé à l'aide d'une presse hydraulique avec une force de compactage de 10 MPa. Les briques en terre comprimée ainsi fabriquées ont été démoulées, puis conservées dans trois milieux différents: un milieu ambiant, un milieu hermétique et un milieu hygrothermique pendant 7, 28, 60 et 180 jours. Les différentes étapes de confection des échantillons sont illustrées sur la **Figure II.19**.

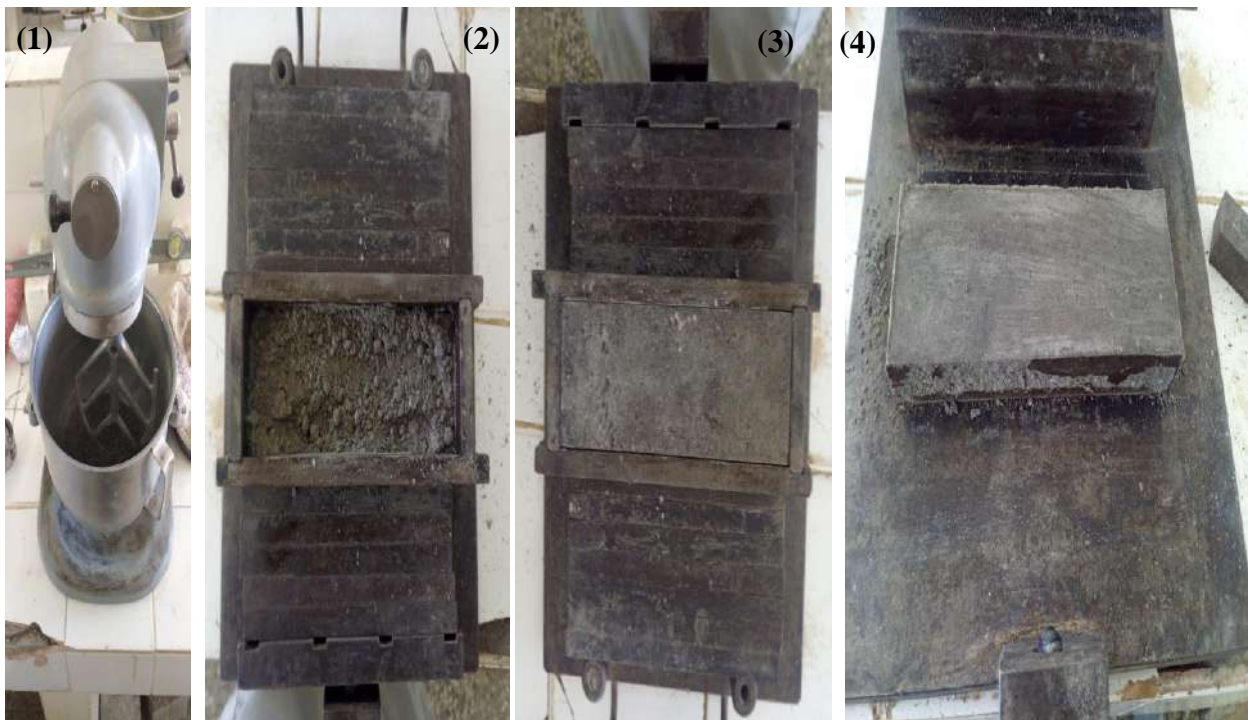


Figure II.19. Confections des éprouvettes; (1) malaxage, (2) moulage, (3) avant démoulage, et (4) démoulage.

II.4.2. Optimisation de la teneur en eau

L'optimisation de la teneur en eau dans les briques en terre comprimée est essentielle pour garantir la qualité du produit final. La teneur en eau a un impact significatif sur le comportement des matériaux et peut affecter des propriétés cruciales telles que la résistance mécanique, la durabilité et la conductivité thermique. Même de légères variations autour de la teneur en eau optimale peuvent entraîner une baisse significative de la résistance des briques une fois qu'elles sont séchées. Par conséquent, un contrôle précis de la teneur en eau pendant le processus de fabrication est nécessaire pour maintenir des normes de qualité élevées. Il est essentiel de comprendre les caractéristiques de la matière première, d'effectuer des essais en laboratoire pour déterminer la teneur en eau optimale, et d'appliquer ces connaissances dans le processus de fabrication. Cela garantit que les briques en terre comprimée auront la résistance et la durabilité nécessaires pour leur application prévue.

D'après les études de Guettala (2003) [133] et Taallah (2014) [1], on met en évidence l'importance critique de la teneur en eau et comment de petites variations autour de l'optimum peuvent avoir un impact significatif sur la résistance des matériaux. Ces recherches soulignent l'importance du contrôle précis de la teneur en eau pour maintenir la qualité des briques en terre comprimée.

La **Figure II.20** montre les résultats de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale des différents échantillons en fonction de la substitution partielle des deux WBA. Le remplacement partiel de 0 à 20% de WBAa a entraîné une diminution de la densité sèche maximale des briques allant de 1.96 g/cm³ pour les briques témoins BWBA(0%) et atteignent une valeur minimale de 1.83 g/cm³ pour les BWBAa(20%). Dans les BWBA(0%) la teneur en eau optimal varie en augmentant de 11.72% à 14.67% dans les BWBAa(20%). La substitution partielle de la terre par les WBAb a provoqué une diminution de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale de l'ordre de 1.84 g/cm³ et 10.80%, respectivement dans les BWBAb(20%), comparativement aux briques témoins.

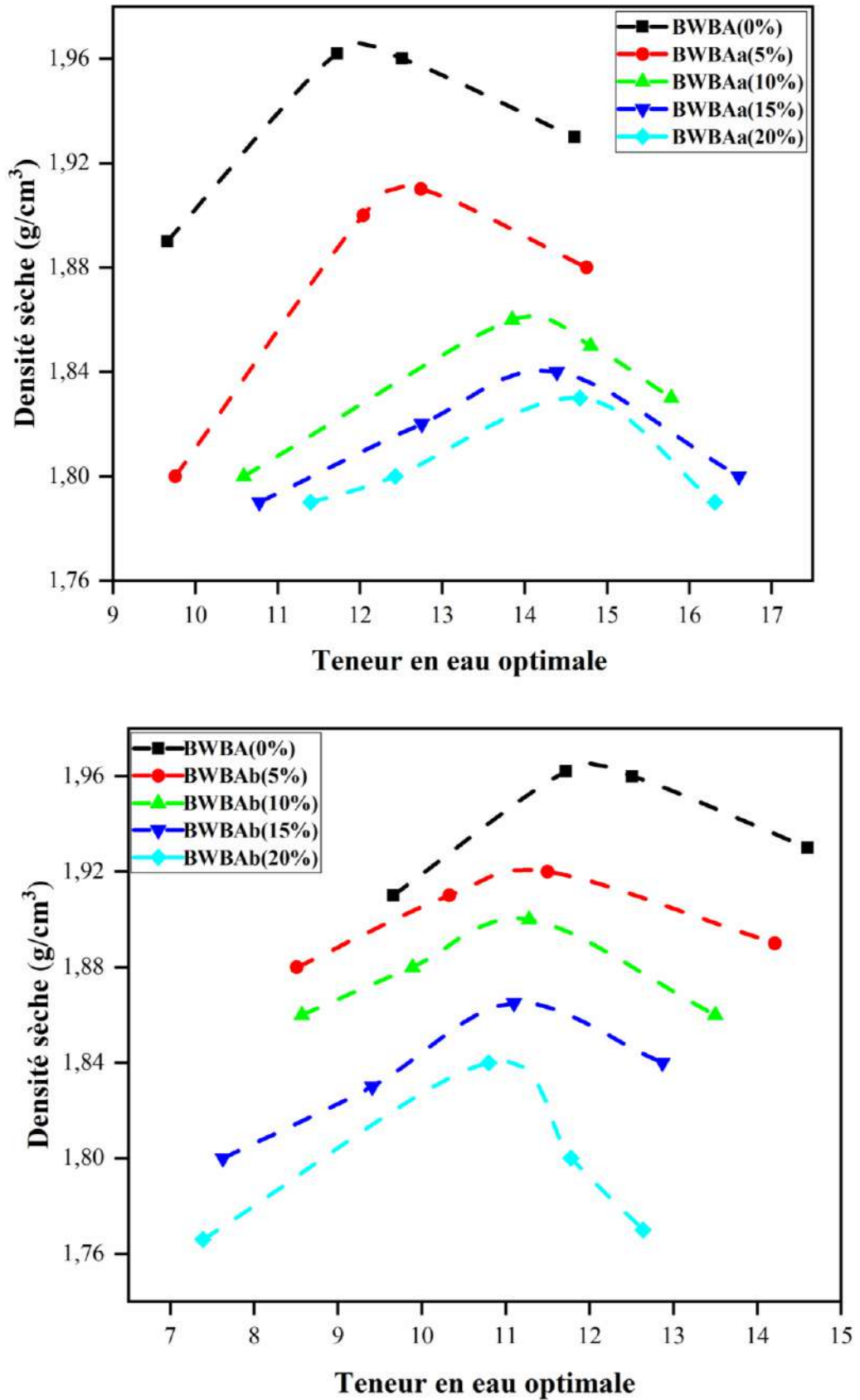


Figure II.20. Densité sèche maximale et teneur en eau optimale de BWBA.

La diminution de la densité sèche des différentes combinaisons est due principalement aux faibles densités des cendres comparées à la densité de la terre. Plusieurs chercheurs ont rapporté que la diminution de la densité du matériau est liée directement à la mouture de finesse des particules des cendres de biomasse [112, 122, 147-149, 150, 151].

Le comportement des WBA dans les mélanges diffère considérablement en ce qui concerne leur interaction avec l'eau. Les WBAa ont une capacité d'absorption d'eau élevée, comme l'ont confirmé plusieurs auteurs [112, 122, 149], contrairement aux WBAb. Cette disparité est directement liée à la teneur en MgO présente dans les deux types de WBA. La WBAa présente une carence en MgO, ce qui a entraîné une rétention d'eau et, par conséquent, une accumulation d'eau dans les briques BWBAa en fonction du taux de substitution, allant de 0% à 20%. En revanche, la teneur élevée en MgO dans les WBAb (15.13 %) a entraîné une diminution de la teneur en eau optimale dans les BWBAb(0-20%). Le MgO a des propriétés hydrophobes, ce qui contribue à réduire la teneur en eau optimale [150]. Selon Kitamura et al. (1995) [151] et Dünzen (2017) [152], le processus d'hydratation du MgO dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau est caractérisé par une hydratation lente due à la formation d'une fine couche de brucite polycristalline sur les grains de MgO, ce qui limite la diffusion de l'eau vers la surface du MgO.

II.4.3. Compactages des briques en terre

Le choix de la contrainte de compactage repose sur la littérature. Conformément aux travaux de Taallah et al. (2014) [1] ainsi que Guettala (2002) [153], il est évident que la contrainte de compactage joue un rôle prépondérant dans les propriétés mécaniques des briques en terre comprimée. Plus précisément, l'augmentation de la contrainte de compactage a un effet notable sur la résistance à la compression des blocs en terre stabilisée, et cette résistance augmente à mesure que la contrainte de compactage augmente, atteignant un optimum à 10 MPa. Cependant, au-delà de cette valeur, **on observe** une chute d'environ 7% de la résistance à la compression pour une contrainte de compactage de 20 MPa.

L'étude menée par Bouchefra et al. (2022) [154] a révélé qu'en augmentant la contrainte de compactage de 5 MPa à 10 MPa, la résistance à la compression augmentait de 50%. Des tendances similaires ont été observées par Taallah et al. (2014) [1]. Ils ont examiné les effets de l'augmentation de la pression de compactage de 5 MPa à 10 MPa et ont constaté qu'une augmentation de 100% de la pression de compactage entraînait une augmentation de 120% de la résistance à la compression.

II.5. Conditions de cures des éprouvettes

Les briques en terre comprimée fabriquées avec l'incorporation de cendres de biomasse en tant que stabilisant chimique nécessitent une période de maturation pour favoriser les réactions d'hydratation de manière optimale et ainsi améliorer l'efficacité du stabilisant. Cette maturation implique de maintenir le matériau dans un environnement suffisamment humide, à une température ambiante favorable, pour une période adéquate pour maximiser les réactions chimiques ou pouzzolaniques. Dans ce contexte, trois milieux de conservation ont été mises en place;

II.5.1. Milieu ambiant (M-A)

Les échantillons sont placés directement dans une salle du laboratoire, à une température ambiante de 20 ± 2 °C et à une humidité relative de $75 \pm 5\%$, pour des périodes de 7, 28, 60 et 180 jours.

II.5.2. Milieu hermétique (M-He)

Les échantillons sont placés dans des sacs hermétiques et conservés dans une salle du laboratoire à une température ambiante de 20 ± 2 °C et une humidité relative de $75 \pm 5\%$ pour des durées de 7, 28, 60 et 180 jours.

II.5.3. Milieu hygrothermique (M-Hy)

Les échantillons sont placés dans une enceinte climatique à une température contrôlée de 40 °C et une humidité relative constante de 100% pour des périodes de 7, 28, 60 et 180 jours.

Pendant la période de maturation (de 7 à 180 jours), la masse des échantillons est surveillée par des pesées quotidiennes. Les échantillons sont considérés comme secs lorsque la variation de leur masse sur 24 heures est inférieure à 0.1%. La durée maximale de maturation est de 180 jours.

II.6. Caractérisations des briques en terre comprimée

II.6.1. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques des briques BWBAa(0-20%) et BWBAb(0-20%) ont été évaluées après 7, 28, 60 et 180 jours de cure conformément à la norme XP P 13-901 [94] en utilisant une presse hydraulique de marque Controls de type PILOT PRO modèle 65-L27P12.

La résistance à la flexion trois points a été déterminée conformément à la norme NF EN 196-1 [155], en appliquant une charge concentrée jusqu'à la rupture. L'éprouvette a été positionnée dans un dispositif de cintrage, avec une de ses faces latérales reposant sur deux rouleaux de support et son axe longitudinal perpendiculaire à ces rouleaux. Une charge concentrée a été appliquée de manière verticale sur le côté opposé de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression a été évaluée en soumettant un échantillon composé de deux demi-éprouvettes superposées à une charge uniaxiale jusqu'à la rupture. Ces deux demi-éprouvettes ont été disposées latéralement par rapport au dispositif de compression par rapport aux plateaux de la machine, et longitudinalement par rapport aux plateaux supérieurs. Ensuite, une charge uniaxiale a été appliquée sur les deux demi-éprouvettes jusqu'à la rupture.



Figure II.21. Dispositif de résistances mécaniques de marque Controls de type PILOT PRO.

II.6.2. Propriétés thermiques

La conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique des BWBA(0-20%) ont été déterminées conformément à la norme NF EN 993-15 [156], mesurée à l'aide d'un CT-mètre, avec la méthode du fil chaud déterminée selon la norme ISO 8894-1:1987 [157]. Une sonde plate très fine est glissée entre deux demi-éprouvettes parfaitement plates permettant le transfert

d'un flux de chaleur transitoire qui détermine l'isolation thermique des matériaux. Toutes les mesures ont été effectuées à une température ambiante de 20 ± 2 °C.

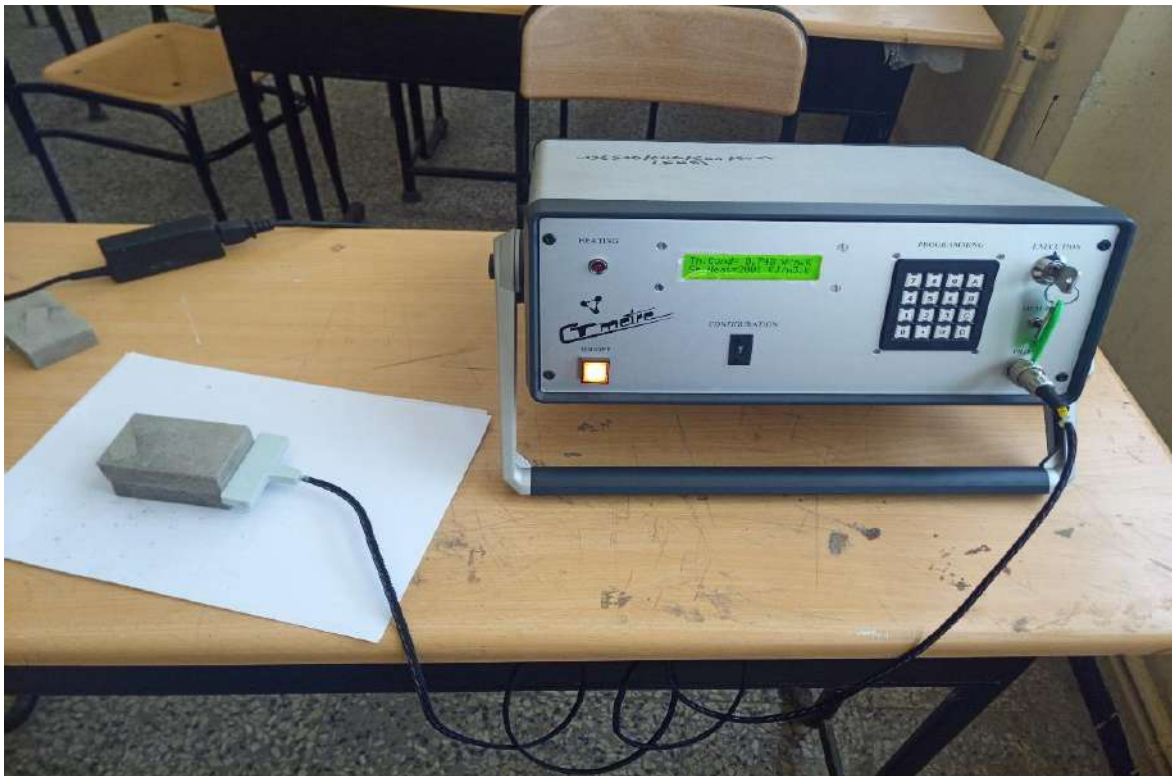


Figure II.22. Dispositifs thermique (CT-Mètre).

II.6.3. Durabilités à l'eau

Le test d'absorption d'eau capillaire, est déterminé selon XP P 13-901 [94]. Ce test permet de connaître la sensibilité et la durabilité des briques BWBAa et BWBAb après immersion partielle dans l'eau pendant 10 min, de classer le matériau selon sa porosité et/ou capillarité sur la base d'un calcul de coefficient d'absorption d'eau capillaire pour connaître son application dans le domaine des matériaux de construction.

Le coefficient d'absorption d'eau (C_b , $g/(cm^2 \cdot min^{1/2})$) a été calculé à l'aide de l'équation (3), avec;

$P_1(g)$ le poids de BWBA après immersion capillaire dans l'eau.

$P_0(g)$ le poids de BWBA avant immersion capillaire dans l'eau.

$S(cm^2)$ représente la surface de la face immergée de BWBA.

$t(min)$ le temps d'immersion.

$$C_b = \frac{100(P_1 - P_0)}{S\sqrt{t}} \quad (3)$$

L'équation (3), permet de déterminer le coefficient d'absorption d'eau capillaire, qui est un indicateur de la capacité du matériau à absorber l'eau par capillarité pendant une période donnée. Ce coefficient est lié à la conductivité thermique et à la résistance mécanique du matériau [158], ce qui en fait un paramètre important pour évaluer la performance des matériaux de construction. Plus le coefficient d'absorption d'eau capillaire est élevé, plus le matériau est susceptible d'absorber rapidement de l'eau par capillarité, ce qui peut avoir un impact sur ses propriétés et sa durabilité dans certaines applications.



Figure II.23. Essai d'absorption d'eau capillaire.

II.7. Microcalorimétrie

Les essais de microcalorimétrie sont des expériences de mesure de la chaleur échangée lors de réactions chimiques ou d'autres processus thermiques à une échelle microscopique. Le microcalorimètre est un instrument de laboratoire de haute précision conçu pour mesurer de très petites quantités de chaleur, permettant de suivre en temps réel la libération ou l'absorption

de chaleur lors d'une réaction chimique, et pouvant être utilisé pour mesurer les capacités thermiques des matériaux.

Les essais de microcalorimétrie ont été réalisés à l'aide d'un microcalorimètre TAM Air 8-channel de TA Instruments. Cet appareil est un puissant calorimètre isotherme, caractérisé par une sensibilité au flux thermique dans la plage des microwatts et des performances inégalées en termes de stabilité de la ligne de base.

Les essais de microcalorimétrie ont été effectués sur des échantillons de terre et de cendres présentant différentes teneurs (0%, 10%, et 20% en poids) en utilisant initialement la teneur en eau optimale pour maintenir le milieu ambiant. Pour le milieu hermétique et le milieu hygrothermique, un rapport d'eau identique a été ajouté aux différents mélanges. Les essais de microcalorimétrie ont été réalisés sur une durée de 4 jours.



Figure II.24. Microcalorimètre TAM Air 8-channel de TA Instruments.

II.8. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%)

Des tests de mesure de pH ont été évalués sur des échantillons de briques BWBAa et BWBAb à 20% substitution des WBAa et WBAb, respectivement. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un pH-mètre en utilisant une suspension de 20 grammes de matériau sec dans 100

millilitres d'eau déminéralisée. Les mesures de pH ont été prises à différents temps (28, 60 et 180 jours) et dans différents milieux de conservation. Le pH, qui mesure l'acidité ou la basicité d'une solution, a été utilisé comme indicateur pour suivre les réactions chimiques dans les mélanges de terre et de cendres de bois.

II.9. Porosimétrie par intrusion de mercure

La porosimétrie par intrusion de mercure est utilisée pour déterminer la taille des pores, leur distribution et le volume poreux en fonction des seuils d'accès aux pores. Cette méthode consiste à faire pénétrer un liquide non mouillant, tel que le mercure, dans les pores ouverts sous une pression contrôlée. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un porosimètre de la série IV Micromeritics AutoPore 9500, avec une pression maximale de 206 MPa. Cette technique permet la mesure des rayons de pores dans une plage allant de 0.006 μm à 360 μm sur des échantillons de BWBAa(20%) et BWBAb(20%) à 180 jours de durcissement, dans différentes conditions de cure, notamment en milieu ambiant, en milieu hermétique et en milieu hygrothermique.



Figure II.25. Micromeritics AutoPore 9500.

II.11. Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de présenter le contexte expérimental de ce travail de thèse, En mettant en évidence les matériaux utilisés durant cette étude et les procédures d'essais.

Concernant les matériaux, une terre limono-argileuse provenant d'une carrière locale de Remila, située au nord-est de l'Algérie, a été utilisée dans la fabrication des briques en terre comprimées stabilisées avec deux types de cendres de biomasse.

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières entrant dans la composition des briques en terre comprimée stabilisées développées dans cette étude, à savoir la terre et les deux stabilisants. Les cendres de bois utilisées dans cette étude proviennent de la calcination du bois issu des déchets agricoles. Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors cette étude.

La présentation de la composition des mélanges et des procédures de fabrication des briques en terre comprimée dans ce chapitre facilitera une analyse plus efficace des résultats et une meilleure compréhension de l'impact des différents paramètres étudiés sur les propriétés des briques en terre comprimées stabilisées.

Chapitre 3

L'effet des cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée

III.1. Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence la nécessité d'études expérimentales pour améliorer les performances des briques en terre crue par stabilisation. Malgré leurs qualités esthétiques et leur bonne inertie thermique, ces briques présentent plusieurs défauts à savoir; un déficit en résistance mécanique, une fissuration due au retrait et une sensibilité à l'eau. La stabilisation traditionnelle à base de ciment et de chaux pose problème car leur production est énergivore et émettrice de CO₂, contribuant ainsi à un effet de serre. Il est donc crucial de trouver des alternatives plus écologiques pour stabiliser les briques en terre crue, afin d'améliorer leurs performances et leur durabilité tout en réduisant leur impact environnemental. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce chapitre, qui analyse les résultats d'un programme expérimental visant à étudier le potentiel des cendres de bois comme stabilisant physique et/ou chimique pour les briques en terre comprimée.

Ce chapitre analyse les résultats d'une étude expérimentale portant sur l'effet de deux types de cendres de bois, issues de la combustion de déchets de biomasse utilisé pour le chauffage domestique, sur les performances mécaniques, l'isolation thermique et la durabilité des briques en terre comprimée conservées dans différents milieux: ambiant (M-A), hermétique (M-He), et hygrothermique (M-Hy), et à différents temps de cure (7 à 180 jours).

L'étude examine également l'influence du taux de substitution de la terre par les cendres de bois (5 à 20% en poids) en fonction du temps et du milieu de conservation sur les résistances mécaniques (résistance à la flexion et à la compression), les propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité volumétrique), la durabilité au contact avec de l'eau, et les variations de masses volumiques apparentes et de densité. L'impact de la composition chimique et minéralogique des cendres de biomasse sur le comportement des briques, ainsi que leur effet sur le pH, a également été analysé. Des analyses complémentaires par DRX, MEB/EDX, ATG/DTG, microcalorimétrie, et porosimétrie par intrusion de mercure ont été effectuées sur les briques en terre comprimée à différents temps et modes de cure pour compléter les résultats obtenus. Ces analyses visent à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et à établir des corrélations entre les performances des briques, leur composition et les conditions de cure.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer la fiabilité des cendres de bois utilisées comme un stabilisant alternatif et écologique pour améliorer de manière significative les

performances globales et la durabilité des briques en terre crue. Le but est de trouver une solution permettant de pallier les faiblesses des briques en terre, tout en préservant leurs avantages écologiques et économiques dans le domaine de la construction. En utilisant des déchets agricoles valorisés sous forme de cendres, cette approche vise à renforcer les propriétés des briques en terre crue sans compromettre leur faible impact environnemental et leur coût abordable, deux atouts majeurs de ce matériau de construction traditionnel. Cette démarche s'inscrit dans une perspective de développement durable, cherchant à optimiser l'utilisation des ressources locales et renouvelables pour bâtir des structures performantes et résilientes.

III.2. Caractérisation des propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

III.2.1. Résistances mécaniques

Afin de garantir la qualité technique d'un matériau, en particulier pour son utilisation dans la construction de bâtiments, les propriétés mécaniques représentent un critère essentiel et fondamental. Les résultats de la résistance à la flexion et à la compression des briques BWBAa(0-20%) et BWBAb(0-20%) ont été étudiés en fonction du milieu de conservation (milieu ambiant (M-A), milieu hermétique (M-He) et milieu hygrothermique (M-Hy)), ainsi que du temps de cure (7, 28, 60 et 180 jours).

III.2.1.1. Résistances à la flexion

L'évolution des résistances à la flexion des BWBA conservées en milieu ambiant, illustrée sur la **Figure III.1**, augmente pour tous les pourcentages de substitution partielle de la terre par les WBAa et WBAb, variant de 5 à 20%. Les résultats des BWBAa et BWBAb ont montré des valeurs supérieures à celles des briques de référence BWBA(0%). La résistance à la flexion des briques de référence, conservées dans le milieu ambiant, varie de 0.76 MPa à 7 jours, 0.77 MPa à 28 jours, 0.80 MPa à 60 jours et 0.64 MPa à 180 jours.

En revanche, à 7, 28 et 60 jours de durcissement, les résistances à la flexion des briques BWBAa(5-20%) conservées dans le même milieu augmentent proportionnellement aux pourcentages de WBAa et atteignent, à 20% de substitution, des valeurs maximales de l'ordre de 1.21 MPa, 1.43 MPa et 1.50 MPa, respectivement. À 180 jours, une diminution de la résistance à la flexion a été observée pour tous les pourcentages, atteignant une valeur minimale de l'ordre de 1.18 MPa dans les BWBAa(20%).

D'autre part, la résistance à la flexion des BWBAb(5-20%) augmente de 7 à 28 jours, atteignant des valeurs maximales de l'ordre de 1.80 MPa à 2.50 MPa, respectivement, à 20% de remplacement partiel de WBAb. En revanche, une légère diminution de la résistance des BWBAb(20%) à 60 et 180 jours, de l'ordre de 2.3 MPa et 2.1 MPa respectivement, a été observée. Malgré cette baisse de résistance, les BWBAb demeurent toujours les plus résistantes par rapport aux BWBAa.

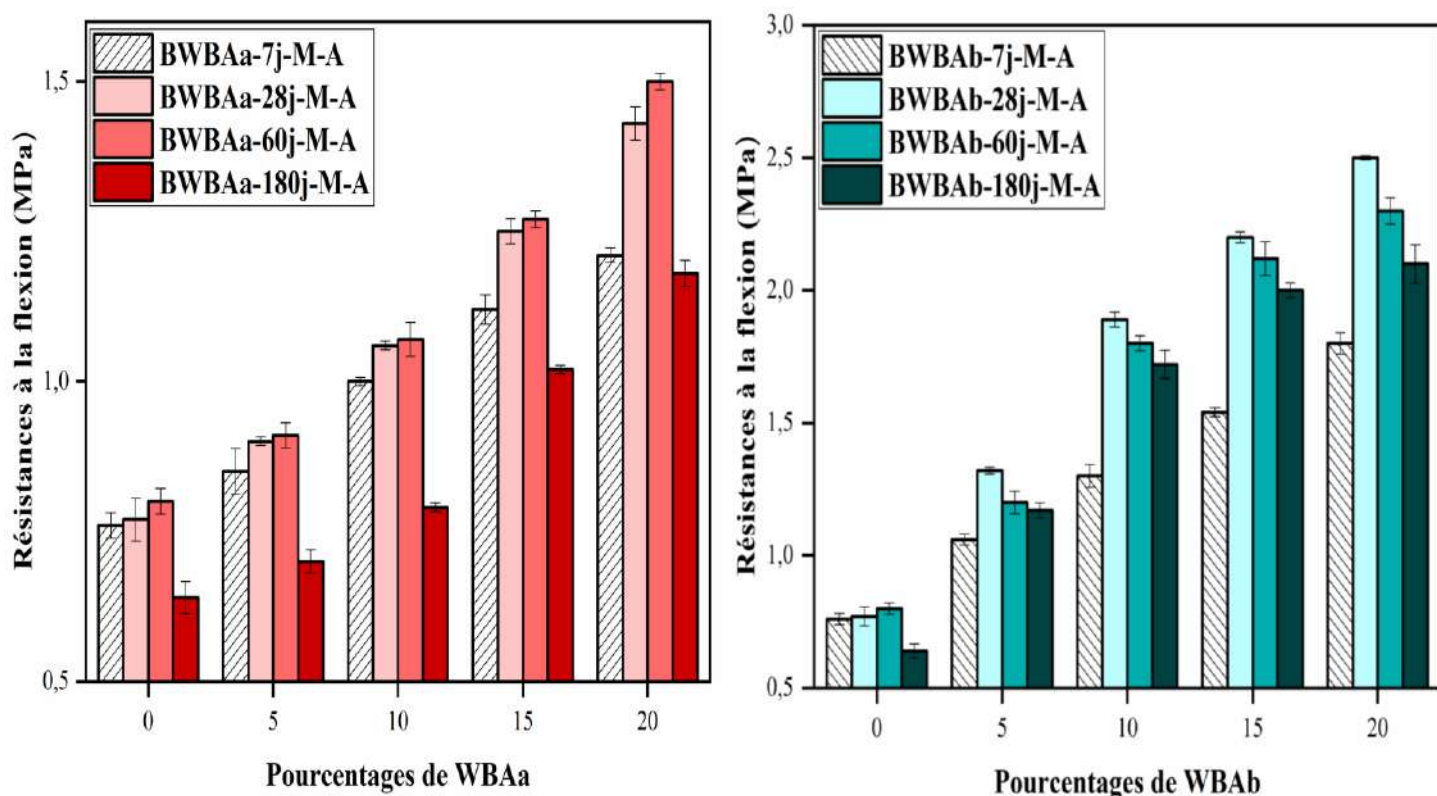


Figure III.1. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans le milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.

La progression des résistances à la flexion des briques en terre comprimée, conservées dans un milieu hermétique, s'accroît en fonction du pourcentage croissant de substitution partielle de la terre par les WBA, variant de 5 à 20%, ainsi qu'en fonction du temps de cure de 7 à 180 jours. Les résultats des résistances à la flexion, présentés sur la **Figure III.2**, indiquent que la résistance des briques de référence, conservées dans le milieu hermétique, fluctue de 0.45 MPa à 7 jours, 0.71 MPa à 28 jours, 0.72 MPa à 60 jours et 0.81 MPa à 180 jours.

Les résistances à la flexion des BWBA augmentent de manière progressive sur la plage de temps allant de 7 à 180 jours, atteignant leur valeur maximale avec un remplacement partiel de 20% de la terre par les WBA. Les résistances à la flexion maximales des BWBAa(20%) se situent autour de 0.75 MPa, 1.05 MPa, 2.08 MPa et 2.99 MPa aux périodes de 7, 28, 60 et 180 jours respectivement. De manière similaire, les résistances à la flexion des BWBAb(20%) évoluent entre 1.02 MPa, 1.94 MPa, 2.07 MPa et 2.27 MPa sur les mêmes périodes. Les valeurs maximales des résistances à la flexion des BWBAb surpassent celles des BWBAa pour tous les pourcentages et à toutes les périodes de cure, à l'exception des briques BWBAa(20%) à 60 et 180 jours, mais les valeurs de résistances restent toujours proches.

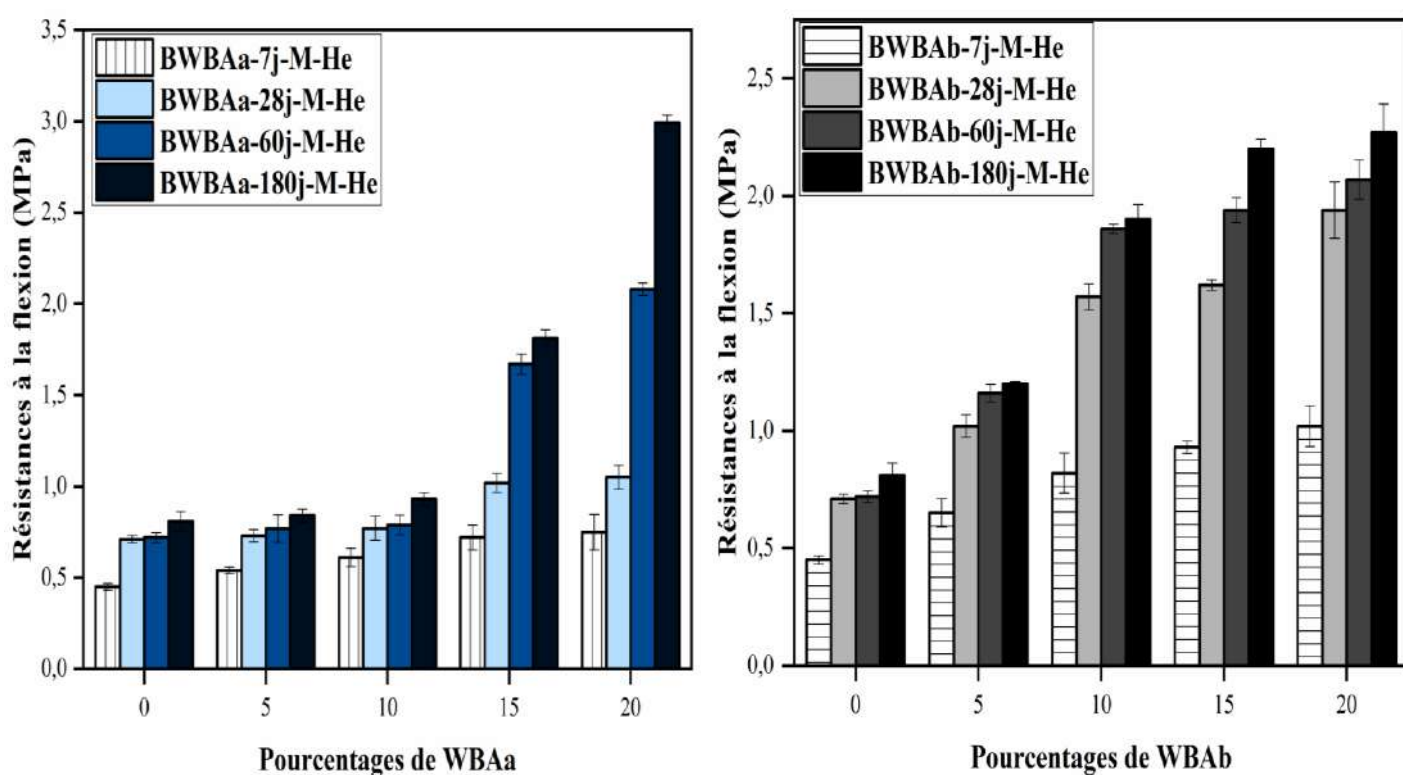


Figure III.2. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans le milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.

Dans ce milieu de conservation, où les briques en terre comprimée ont été maintenues dans un environnement hygrothermique, les résistances à la flexion augmentent de manière proportionnelle en fonction du temps de cure et du pourcentage de WBA. Les valeurs de la résistance à la flexion des BWBA(0%) varient de 0.69 MPa à 7 jours, 0.70 MPa à 28 jours, 0.76 MPa à 60 jours et 0.78 MPa à 180 jours.

D'autre part, les résistances à la flexion des BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) à 7, 28, 60 et 180 jours augmentent proportionnellement aux pourcentages de cendres WBAa et WBAb, respectivement, ainsi qu'en fonction de la durée de durcissement. Les résistances à la flexion des BWBAb surpassent celles obtenues avec les BWBAa et les BWBA(0%). Les BWBAb(20%) atteignent des valeurs maximales de 1.61 MPa à 7 jours, 1.68 MPa à 28 jours, 1.89 MPa à 60 jours et 2.22 MPa à 180 jours (**Figure III.3**). De même, les BWBAa(20%) présentent des valeurs maximales de l'ordre de 1.23 MPa, 1.28 MPa, 1.34 MPa et 1.40 MPa à 7, 28, 60 et 180 jours, respectivement.

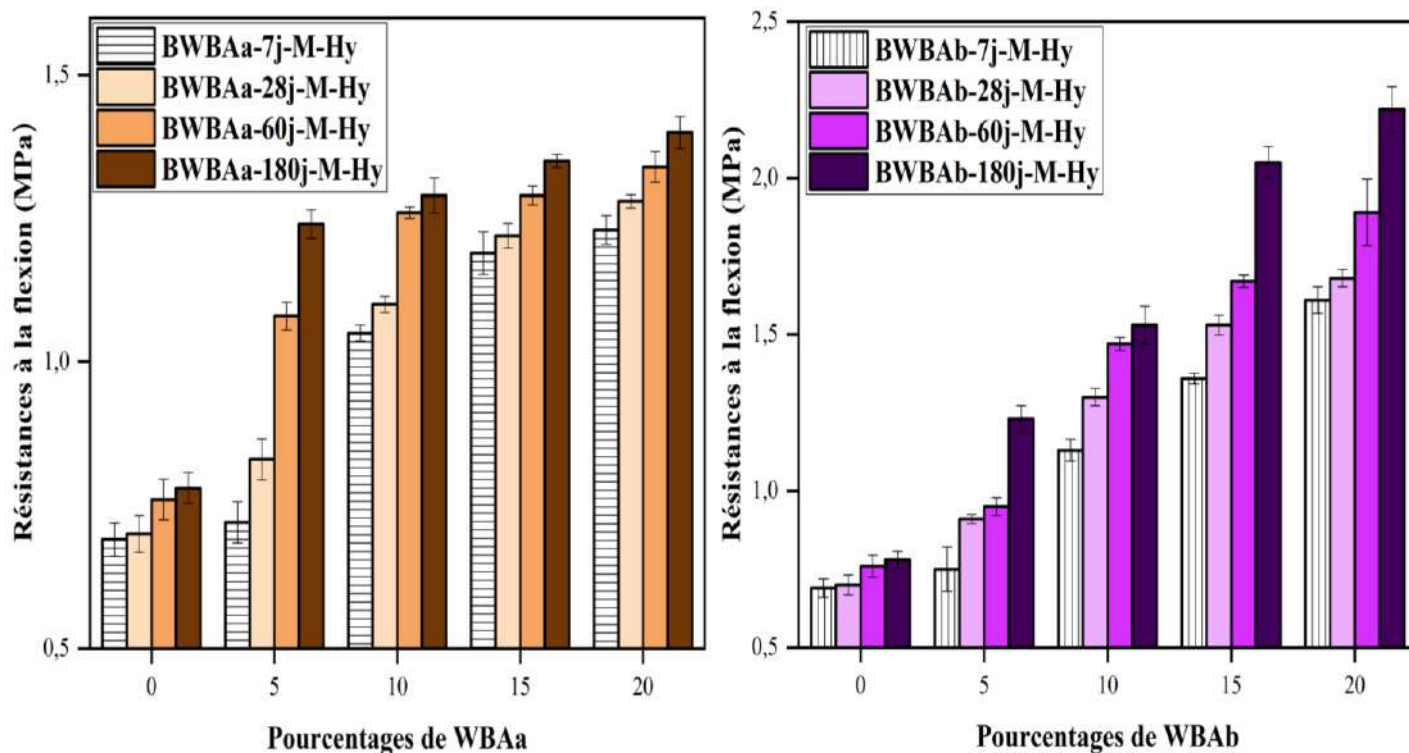


Figure III.3. Résistances à la flexion des BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.

III.2.1.2. Résistances à la compression

L'évolution de la résistance à la compression est analogue à celle de la résistance à la flexion. Les résistances à la compression des briques BWBA en fonction du taux de substitution de la terre par les cendres WBA, du milieu de conservation et de la durée de cure, sont présentées dans les **Figures III.4, III.5 et III.6**.

La **Figure III.4** montre que la résistance des briques de référence BWBA(0%), conservées en milieu ambiant, est de 11.60 MPa, 12.56 MPa, 11.77 MPa et 10.31 MPa après 7, 28, 60 et 180 jours de cure respectivement. Pour les briques BWBAa(5-20%), les résistances à la compression augmentent avec la durée de cure (7, 28 et 60 jours). Les valeurs maximales sont atteintes avec 20% de substitution, soit 13.01 MPa, 14.35 MPa et 16.29 MPa. Une diminution est constatée à 180 jours pour tous les taux de substitution de 5 à 20%, la valeur maximale étant de 12.82 MPa avec BWBAa(20%).

Concernant les briques BWBAb(5-20%), les résistances maximales atteignent 18.16 MPa et 25.90 MPa à 7 et 28 jours respectivement, pour 20% de remplacement de la terre. Une légère baisse est observée ensuite, les valeurs maximales étant de 22.20 MPa et 20.21 MPa dans BWBAb(20%) après 60 et 180 jours de cure.

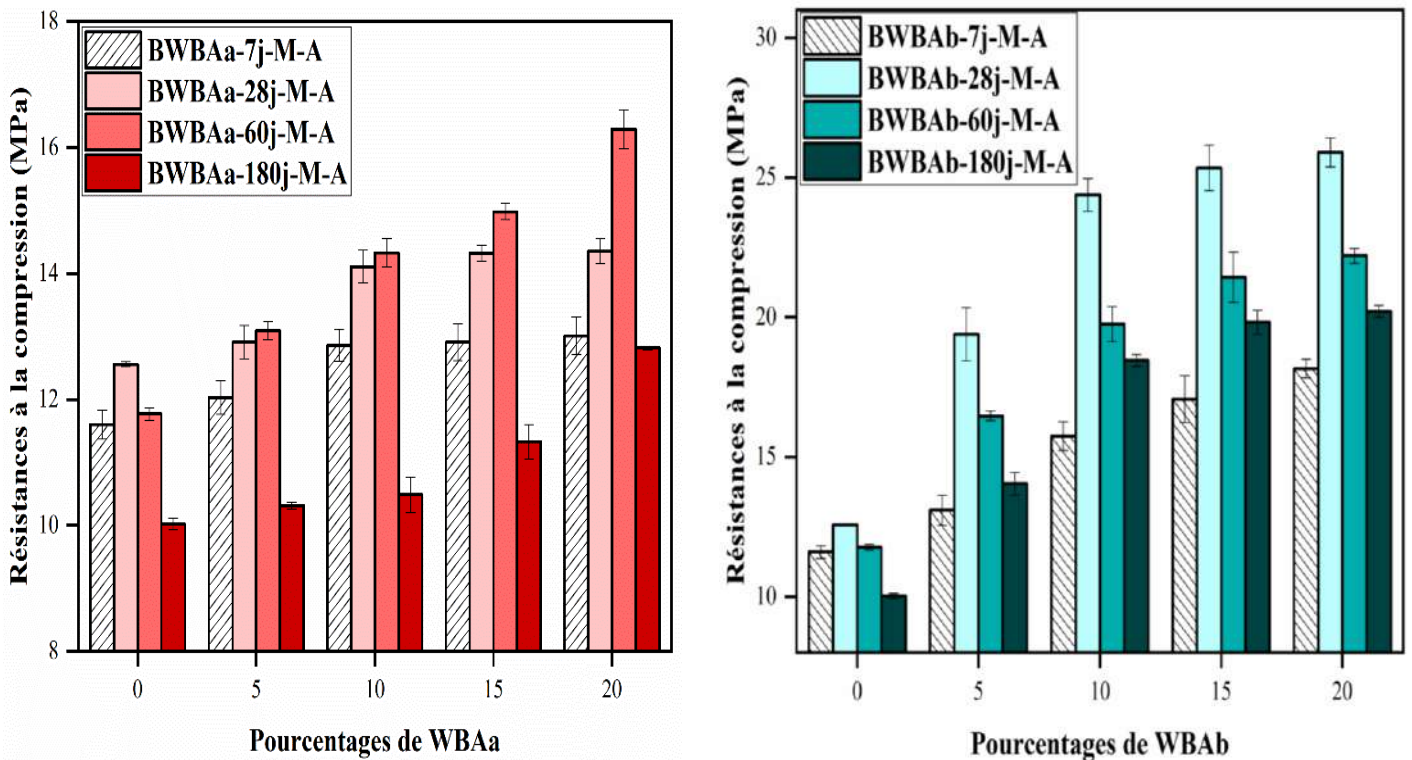


Figure III.4. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.

La progression des résistances à la compression des briques en terre comprimée, conservées en milieu hermétique, révèle une augmentation proportionnelle au taux croissant de substitution de la terre par les cendres WBA (de 5 à 20%) ainsi qu'à la durée de cure (de 7 à 180 jours).

Les résultats présentés dans la **Figure III.5** indiquent que la résistance des briques témoins dans ce milieu fluctue entre 4.15 MPa (7 jours), 6.57 MPa (28 jours), 9.69 MPa (60 jours) et 10.06 MPa (180 jours). Pour les briques BWBA, une augmentation progressive des résistances à la compression de 7 à 180 jours de cure, les valeurs maximales étant atteintes avec un remplacement de 20% de terre par les cendres WBA. Plus précisément, les résistances maximales des BWBAa(20%) sont de l'ordre de 5.99 MPa, 9.92 MPa, 20.22 MPa et 23.32 MPa après 7, 28, 60 et 180 jours respectivement. De manière similaire, les résistances des BWBAb(20%) évoluent entre 10.70 MPa, 19.66 MPa, 19.91 MPa et 21.77 MPa sur les mêmes périodes. Les BWBAb présentent des valeurs supérieures aux BWBAa pour tous les taux de substitution et durées de cure, à l'exception des BWBAa(20%) à 60 et 180 jours où les résistances sont proches.

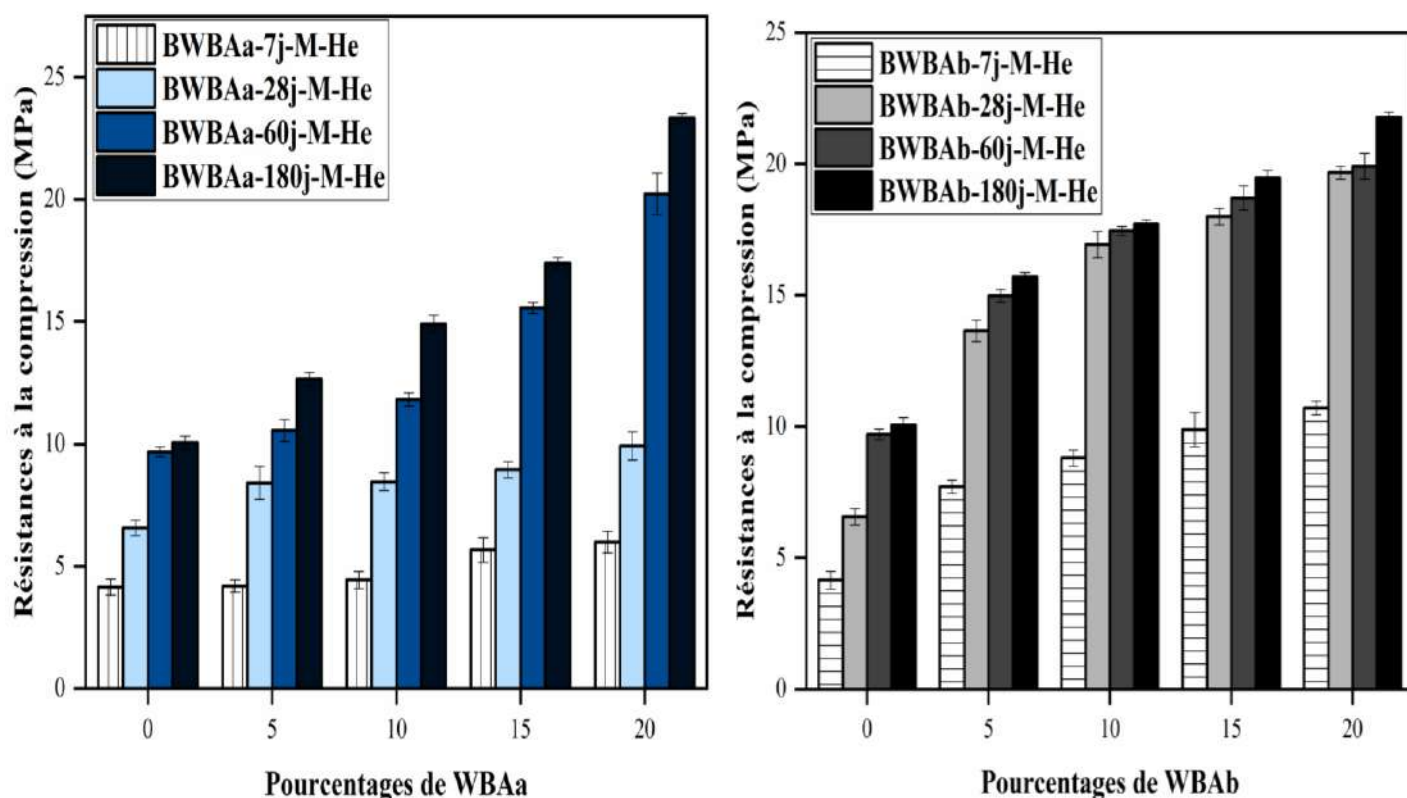


Figure III.5. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.

En milieu hygrothermique, la résistance à la compression des briques témoins est de l'ordre de 8.78 MPa, 9.37 MPa, 11.13 MPa et 11.60 MPa après 7, 28, 60 et 180 jours de cure,

respectivement. Les valeurs maximales sont obtenues avec les briques contenant 20% de cendres WBA.

Les briques fabriquées avec les cendres WBAb présentent des résistances à la compression plus élevées que celles produites avec les WBAA. Ces résistances mécaniques augmentent progressivement avec le taux de substitution, les valeurs maximales étant atteintes avec 20% de cendres WBAb et après 180 jours de cure en milieu hygrothermique.

Les briques BWBAb présentent des résistances à la compression supérieures à celles des BWBAa à toutes les périodes de cure en milieu hygrothermique. Les valeurs de résistances à la compression des BWBAb(20%) sont de l'ordre de 18.91 MPa, 24.34 MPa, 25.46 MPa et 33.34 MPa après 7, 28, 60 et 180 jours de cure, respectivement. D'autre part, les BWBAa(5-20%) ont montré une augmentation proportionnelle des résistances à la compression en fonction du temps de cure, avec des valeurs maximales de 12.01 MPa, 13.53 MPa, 15.89 MPa et 16.75 MPa après 7, 28, 60 et 180 jours, respectivement.

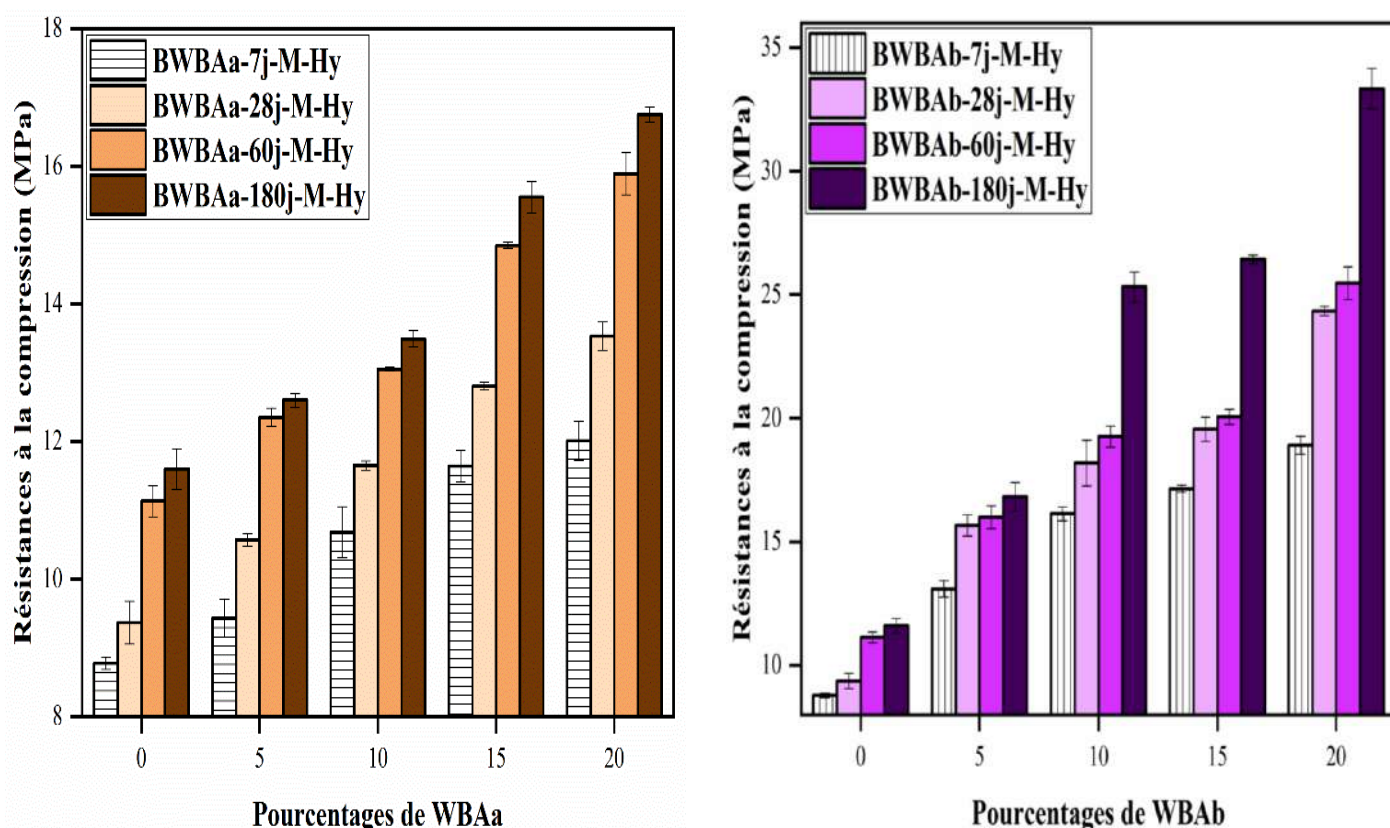


Figure III.6. Résistances à la compression des BWBA conservées dans le milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.

L'augmentation des résistances mécaniques des briques en terre comprimée, conservées en milieu ambiant (M-A), de 7 à 60 jours dans les BWBAa(5-20%) et de 7 à 28 dans les BWBAb(5-20%), est attribuable à la réaction pouzzolanique qui se produit entre les composantes de la terre et les composantes des deux WBA (**Figure II.5**). Selon D. Eliche – Quesada et al., (2021), (2018) [108, 110], les réactions pouzzolaniques génèrent des produits liants qui améliorent la résistance mécanique des briques crues en favorisant la formation de produits cimentaires (**Figures III.25, III.26 et III.27**). Ce gel formé a la capacité de se développer à l'intérieur des espaces poreux des briques, rendant la matrice interne dense et compacte, ce qui améliore ainsi les résistances mécaniques [110].

En revanche, la diminution de la résistance à la flexion et à la compression observée dans les BWBAa à 180 jours et dans les BWBAb à 60 et 180 jours est probablement due à la carbonatation du matériau en contact avec le CO₂ de l'air (**Figure III.31**). Cette réaction pourrait avoir lieu pendant la maturation des sols traités [18]. Dans le cas du développement de cette réaction, les cristaux de calcite (CaCO₃) ainsi formés ont une propriété liante très médiocre, perturbant la stabilisation des sols car leur développement inhibe la réaction pouzzolanique [18, 21]. Ainsi, cette réaction provoque une réduction de la résistance finale en raison de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique [18].

D'autre part, la perte des propriétés mécaniques dans les BWBA est peut probablement être attribuée à une carence en chaux due à une quantité insuffisante des cendres, ou à un manque en aluminosilicates dans la terre crue. D'après B. Carrasco-Hurtado et al., (2014) [113], une quantité insuffisante des sources de chaux ou de silice et d'alumine influence considérablement à la diminution des propriétés mécaniques des briques. Ainsi, le déclin des résistances mécaniques des BWBA peut être attribué à la faible quantité d'eau de constitution, qui joue un rôle principal et prédominant dans les réactions pouzzolaniques, cette eau-là s'évaporant progressivement avec le temps de cure de 7 à 180 jours.

Cependant, les briques témoins BWBA(0%) ont montré une augmentation de résistances mécaniques de 7 à 28 jours en milieu ambiant en raison de l'évaporation d'eau, créant ainsi des pressions capillaires. L. Laou et al., (2021) [159] ont rapporté que ces pressions capillaires provoquent une augmentation de la résistance mécanique. D'autre part, la diminution des résistances mécaniques des BWBA(0%) à 60 et 180 jours est liée à la carbonatation de la matrice interne de la terre contenant un taux de 14.63% de chaux (**Tableau II.1**), engendrant ainsi une faible cohésion de la matrice du matériau [18]. En parallèle, l'évaporation

progressive de l'eau de constitution entre 7 et 180 jours a laissé des vides et des pores se former dans ces briques de référence. Cette augmentation de la porosité des briques en terre a directement contribué à la diminution de leurs résistances mécaniques sur le long terme. La microstructure poreuse évolutive des briques en fonction du départ de l'eau semble donc un facteur clé impactant leurs performances.

D'autre part, les briques conservées dans un milieu hermétique et hygrothermique, avec différentes teneurs en WBA (5 à 20% en poids) et à différents temps de cure (de 7 à 180 jours), ont présenté une augmentation continue des résistances à la flexion et à la compression sur la période de 7 à 180 jours. L'augmentation des résistances mécaniques en fonction du temps et du taux de substitution des WBA est principalement due à la réaction pouzzolanique qui se produit entre les composants de ces matériaux. Cette réaction chimique s'effectue de manière optimale dans des conditions idéales, favorisées par les deux milieux de conservation en termes de température ambiante et d'humidité relative.

Les résultats observés pour les briques BWBAa(5-10%) et BWBAa(15-20%), conservées dans un milieu hermétique, indiquent une augmentation modeste des propriétés mécaniques sur les périodes de 7 à 180 jours et de 7 à 28 jours, respectivement. La résistance à la compression atteint 11.90 MPa à 10% de substitution après 180 jours et 9.92 MPa à 20% de substitution après 28 jours. Cette légère amélioration peut être attribuée également à une réaction pouzzolanique restreinte se produisant dans ces conditions de conservation. Néanmoins, l'augmentation des propriétés mécaniques sur la plage de 7 à 180 jours, ainsi que de 7 à 28 jours, semble résulter de l'effet de remplissage des cendres WBAa, favorisant une structure interne dense et compacte, ou peut-être résulte d'un faible taux de substitution. Selon J. Eid, (2016) [18], A. Lasledj, (2009) [21] et S. Rao et al., (2005) [69], la réaction pouzzolanique résultant de la stabilisation des sols avec de la chaux présente une cinétique lente, nécessitant plusieurs mois à température ordinaire avant que ses effets puissent être pleinement observés. De plus, l'introduction de chaux entraîne une modification de la texture du sol, où les particules argileuses s'agglomèrent, conduisant à une amélioration de la consistance du sol [1, 18].

À 60 jours, une augmentation significative des résistances mécaniques a été constatée pour les BWBAa(15-20%), atteignant une résistance à la flexion et à la compression maximale dans ce milieu de conservation, s'élevant à 2.99 MPa et 23.32 MPa à 180 jours, respectivement. Cette accélération de la réaction chimique à long terme est attribuable à la composition minéralogique de la terre et les WBAa (**Figure II.5 (a, b)**), favorisant ainsi une réaction

pouzzolanique accélérée. Conformément à plusieurs auteurs, dans le cas du traitement à la chaux, les réactions pouzzolaniques contribuent à améliorer les caractéristiques mécaniques du mélange [1, 18, 24]. De plus, l'ajout de chaux augmente la résistance à la compression simple avec le temps de cure [17].

D'autre part, pour les BWBA_b(5-20%) conservées dans le milieu hermétique, une augmentation significative des résistances mécaniques est observée de 7 à 28 jours atteignant 19.66 MPa dans les BWBA_a(20%) à 28 jours, résultant de la réaction pouzzolanique. À partir de 28 jours, l'augmentation des résistances à la compression est modeste, atteignant 21.77 MPa à 20% de substitution de la terre par les WBA_b à 180 jours. Cette augmentation modeste dans ce milieu de conservation est probablement due à la formation de la brucite, issue de la réaction chimique de l'oxyde de magnésium (MgO), provenant des cendres de bois WBA_b, avec l'eau de constitution, ce qui ralentit la réaction pouzzolanique et entraîne une faible augmentation des résistances mécaniques. Selon Ch. Dünzen, (2017) [152], Kitamura et al. (1995) [153], l'hydratation des mélanges d'oxyde de magnésium dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau est lente car une fine couche de brucite polycristalline se forme sur les grains de MgO, ce qui entrave la diffusion de l'eau à la surface du MgO, ralentissant ainsi les réactions chimiques et expliquant la faible augmentation.

D'autre part, les briques (BWBA) conservées en milieu hygrothermique ont montré une augmentation continue des résistances à la flexion et à la compression entre 7 et 180 jours. Les conditions hygrothermiques, en l'occurrence la température et l'humidité, favorisent l'accélération des réactions pouzzolaniques. Les valeurs de résistances mécaniques les plus faibles ont été obtenues pour les briques de référence sans cendres. Plusieurs auteurs confirment que la stabilisation des briques en terre crue et des briques de terre comprimée avec différents types de cendres de biomasse améliore leurs propriétés mécaniques [100, 108-111, 118, 119, 160-166], ayant ainsi un impact positif sur l'augmentation de leur résistance à la compression pour différents taux d'incorporation [100, 101, 104, 108-110, 119, 167, 168].

Les **Figures III.3** et **III.6** illustrent l'effet des taux croissants de WBA_a et WBA_b en milieu hygrothermique sur les résistances mécaniques des briques BWBA_a et BWBA_b respectivement. Ces figures montrent qu'une teneur plus élevée en cendres dans les briques impacte positivement leurs résistances, avec des valeurs maximales atteintes à 20%. Plus précisément, pour les BWBA_a(5-20%), la résistance à la compression augmente continuellement entre 7 et 180 jours, atteignant 16,75 MPa avec 20% de WBA_a à 180 jours.

Concernant les BWBA(5-20%), l'augmentation est plus rapide entre 7 et 28 jours grâce aux réactions pouzzolaniques [108, 110]. Puis le gain ralentit entre 28 et 60 jours, avec seulement 4,6% d'augmentation supplémentaire, probablement dû à la formation de brucite freinant ces réactions. Enfin, le processus s'accélère à nouveau pour atteindre 33.34 MPa à 180 jours avec 20% de WBA, cette nouvelle augmentation étant due à la reprise des réactions pouzzolaniques. Selon des études antérieures, l'hydratation du MgO en atmosphère humide comprend deux phases: une lente où une fine couche de brucite entrave la diffusion d'eau, puis une accélérée lorsque cette couche se rompt sous l'effet de la variation volumique, permettant une meilleure diffusion [151, 152].

III.2.2. Propriétés thermiques

III.2.2.1. Conductivité thermique

La consommation excessive d'énergie, dédiée à maintenir le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, a engendré une augmentation des impacts économiques et environnementaux dans le secteur de la construction. Dans ce contexte, il devient impératif de développer des matériaux de construction légers, isolants et respectueux de l'environnement afin de réduire la consommation énergétique [6, 135]. Les **Figures III.7, III.8 et III.9** mettent en évidence l'évolution de la conductivité thermique des briques en fonction de la teneur en WBA, du temps de cure et du milieu de conservations. La conductivité thermique diminue avec l'augmentation des pourcentages de WBA variant de 5 à 20% pour les éprouvettes conservées en milieu ambiant et en fonction du taux de substitution et du temps de cure (7 à 180 jours) pour les éprouvettes conservées en milieux hermétique et hygrothermique.

Les valeurs de conductivité thermique des briques de référence BWBA(0%) varient en fonction des conditions de conservation. En milieu ambiant, elles sont d'environ 1.061 W/mK à 7 jours, 0.93 W/mK à 28 jours, 0.9565 W/mK à 60 jours et 0.973 W/mK à 180 jours. Dans un environnement hermétique, ces valeurs passent à 1.53 W/mK, 1.3305 W/mK, 1.014 W/mK et 0.9505 W/mK respectivement à 7, 28, 60 et 180 jours. Quant au milieu hygrothermique, les valeurs sont de 1.015 W/mK, 0.9655 W/mK, 0.9535 W/mK et 0.9520 W/mK à 7, 28, 60 et 180 jours.

L'évaporation d'une quantité d'eau de constitution au fil du temps dans les éprouvettes conservées en milieu ambiant a engendré une augmentation de la porosité dans les briques, entraînant ainsi une diminution de la conductivité thermique. Les briques stabilisées avec les

WBAA à 20% de substitution partielle assurent une bonne isolation thermique comparativement aux BWBA(5-20%) et BWBA(0%).

Dans le cas des BWBAa(20%), une conductivité thermique de l'ordre de 0.8055 W/mK à 7 jours, 0.747 W/mK à 28 jours, et 0.728 W/mK à 60 jours a été obtenue. Une augmentation de cette conductivité est observée à 180 jours, de l'ordre de 0.776 W/mK. D'autre part, les BWBA(20%) ont présenté une conductivité de l'ordre de 0.86 W/mK, 0.787 W/mK à 7 et 28 jours, respectivement. Une augmentation de la conductivité thermique a été observée à 60 et 180 jours, elle est de l'ordre de 0.80 W/mK et 0.818 W/mK, respectivement. L'augmentation progressive des conductivités thermiques à 60 jours dans les BWBAa, et à 60 et 180 jours dans les BWBA(20%) est due probablement à la carbonatation des briques crues en contact avec le CO₂ de l'air ambiant (**Figure III.31**). La formation de la calcite durant cette réaction colmate les vides et les pores dans la microstructure des briques [115].

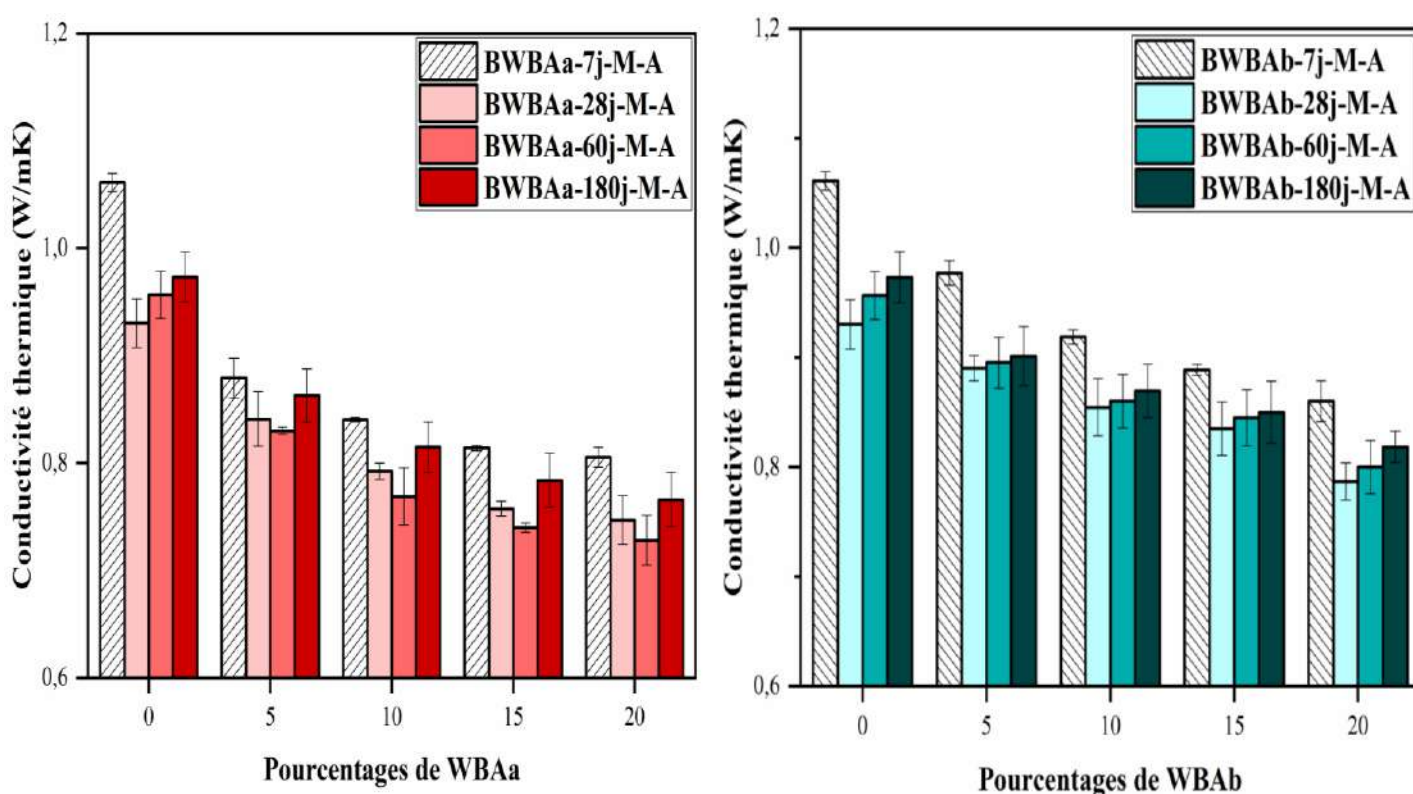


Figure III.7. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.

La conductivité thermique des briques BWBA diminue à mesure que le taux de substitution en WBA augmente, indépendamment du mode de conservation (milieu hermétique ou

hygrothermique). Cette réduction de la conductivité se maintient tout au long de la période de durcissement, allant de 7 à 180 jours. Les meilleures performances d'isolation sont observées lorsque le taux de remplacement de la terre par les WBA atteint 20%. À ce niveau, les briques contenant du WBAA présentent une conductivité thermique plus basse que celles avec du WBAb.

En milieu hermétique, la conductivité thermique atteint 1.2315 W/mK, 0.91 W/mK, 0.7995 W/mK et 0.7285 W/mK à 7, 28, 60 et 180 jours, respectivement pour les BWBAa(20%), comparé à 1.4085 W/mK à 7 jours, 0.916 W/mK à 28 jours, 0.883 W/mK à 60 jours et 0.834 W/mK à 180 jours pour les BWBAb(20%).

En milieu hygrothermique, les valeurs sont de 0.8 W/mK, 0.7555 W/mK, 0.74 W/mK et 0.722 W/mK à 7, 28, 60 et 180 jours dans les BWBAa(20%), tandis qu'elles sont de 0.922 W/mK, 0.903 W/mK, 0.846 W/mK et 0.828 W/mK aux mêmes échéances. L'intégration de WBA en tant que stabilisant dans les briques en terre crue améliore donc significativement leurs capacités d'isolation thermique.

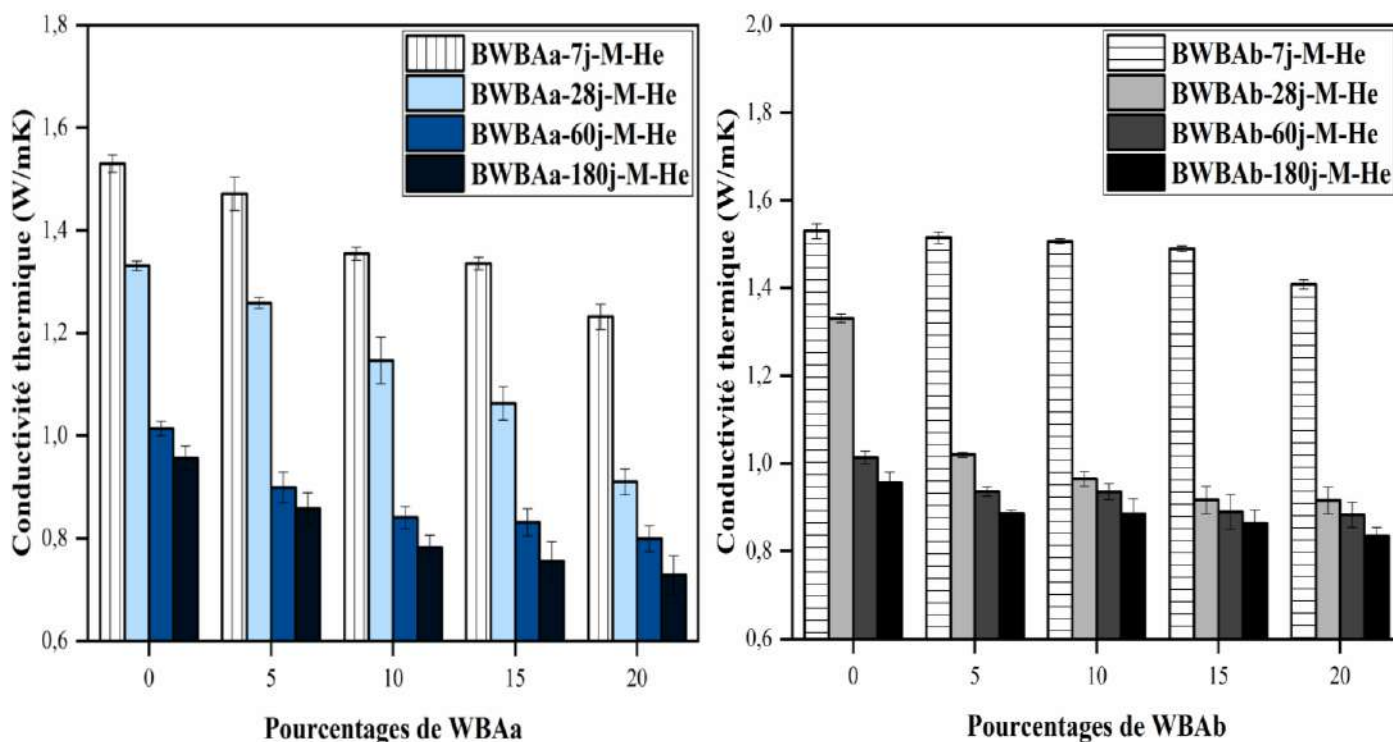


Figure III.8. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.

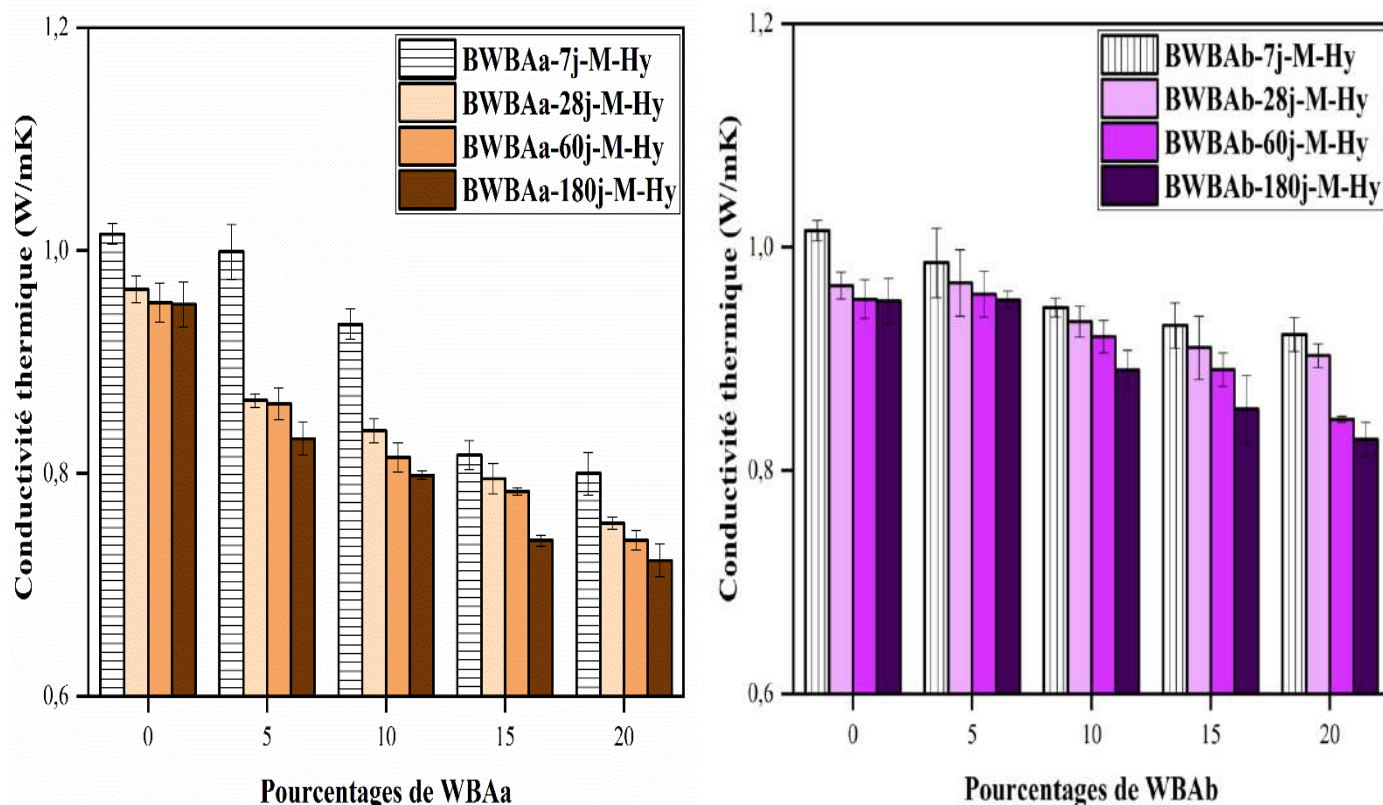


Figure III.9. Conductivités thermiques des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.

Le décroît de la conductivité thermique des BWBA conservées en milieu hermétique et hygrothermique, en fonction du temps de cure et de la teneur en WBA, est principalement attribuable à la faible masse volumique des deux cendres de bois (WBA) (**Tableau II.6**). L'incorporation de cendres de faible densité dans la terre à brique permet ainsi d'abaisser la densité globale des briques finales en fonction de l'augmentation du taux de cendres, ce qui se traduit par une conductivité thermique plus basse et donc de meilleures capacités isolantes. La faible densité des cendres de bois joue donc un rôle important dans l'amélioration des performances thermiques des briques de terre comprimées stabilisées avec ces additions (**Figure II.20**). Plusieurs chercheurs ont conclu que la conductivité thermique des matériaux dépend principalement de la densité sèche, la structure interne, l'humidité relative, la composition chimique et la température ambiante [108, 116, 169, 170]. Selon Sutcu et al., (2009) [116] et García et al., (2010) [169], un matériau à faible densité garantit une bonne isolation thermique. Ce comportement a également été observé par d'autres auteurs, en fonction de la nature et la quantité de cendre ajoutées au mélange. La diminution de la

conductivité est associée à l'incorporation des différents types de cendres de biomasse et à différentes proportions dans les briques crues et les briques en terre comprimée [104, 106, 108, 109, 112, 113, 118, 119].

III.2.2.2. Capacité thermique volumétrique

Les résultats de la capacité thermique volumétrique des briques BWBA, dépendant du taux de substitution, des milieux de conservation et du temps de cure, sont représentés sur les **Figures III.10, III.11 et III.12**. La capacité thermique diminue avec l'augmentation des pourcentages de WBA, variant de 5 à 20%, pour les briques conservées en milieu ambiant, et en fonction du taux de substitution et du temps de cure pour celles conservées en milieux hermétique et hygrothermique. Cette capacité thermique volumétrique décroît proportionnellement au taux de substitution et atteignant les meilleurs résultats à 20% de substitution de la terre par les WBA. Les valeurs de capacité thermique volumétrique des briques de référence BWBA(0%) varient en fonction des conditions de conservation. En milieu ambiant, elles s'établissent à environ 2413.5 kJ/m³.K à 7 jours, 2235.5 kJ/m³.K à 28 jours, 2252.5 kJ/m³.K à 60 jours et 2315 kJ/m³.K à 180 jours. En milieu hermétique, ces valeurs passent à 3149.5 kJ/m³.K, 2782 kJ/m³.K, 2254 kJ/m³.K et 2252,5 kJ/m³.K, respectivement à 7, 28, 60 et 180 jours. Dans le milieu hygrothermique, les valeurs varient à 2463.5 kJ/m³.K, 2347 kJ/m³.K, 2345 kJ/m³.K, 2229.5 kJ/m³.K à 7, 28, 60 et 180 jours, respectivement.

Les BWBAa(20%) conservées en milieu ambiant donnent des valeurs de 2096.5 kJ/m³.K, 2079.5 kJ/m³.K, 1878.5 kJ/m³.K et 1980.5 kJ/m³.K, respectivement à 7, 28, 60 et 180 jours. De même, les BWBAb(20%) conservées en même milieu et sur la même plage de temps donnent des valeurs de 2130.5 kJ/m³.K, 2124.5 kJ/m³.K, 2128 kJ/m³.K et 2145 kJ/m³.K, respectivement. En milieu hermétique, les BWBAa(20%) varient de 2986 kJ/m³.K à 7 jours, 2510.5 kJ/m³.K à 28 jours, 2061.5 kJ/m³.K à 60 jours et 1978.5 kJ/m³.K à 180 jours. De même pour les BWBAb(20%) avec des valeurs de 2661 kJ/m³.K, 2307 kJ/m³.K, 2201 kJ/m³.K et 2161 kJ/m³.K. En milieu hygrothermique, les valeurs de capacité thermique des BWBAa(20%) sont de l'ordre de 2100.5 kJ/m³.K, 2021.5 kJ/m³.K, 1980 kJ/m³.K et 1906.5 kJ/m³.K à 7, 28, 60 et 180 jours, tandis que les BWBAb(20%) présentent des valeurs d'environ 2350.5 kJ/m³.K, 2218.5 kJ/m³.K, 2218 kJ/m³.K et 2077 kJ/m³.K à 7, 28, 60 et 180 jours.

Ils révèlent une corrélation entre la capacité thermique volumétrique et la conductivité thermique. L'incorporation de WBA a conduit à une réduction de la capacité thermique volumétrique et de la conductivité thermique, cette dernière étant fortement influencée par la densité. Cette diminution simultanée s'explique par l'impact significatif de la densité sur ces propriétés thermiques. La porosité des briques apparaît comme le facteur prédominant de cette variation. Selon S. Djadouf et al. (2020) [171], S. Layachi et al. (2023) [114], et D. Khoudja et al. (2021) [158], la capacité volumétrique est largement conditionnée par la densité des matériaux et la porosité des blocs en terre.

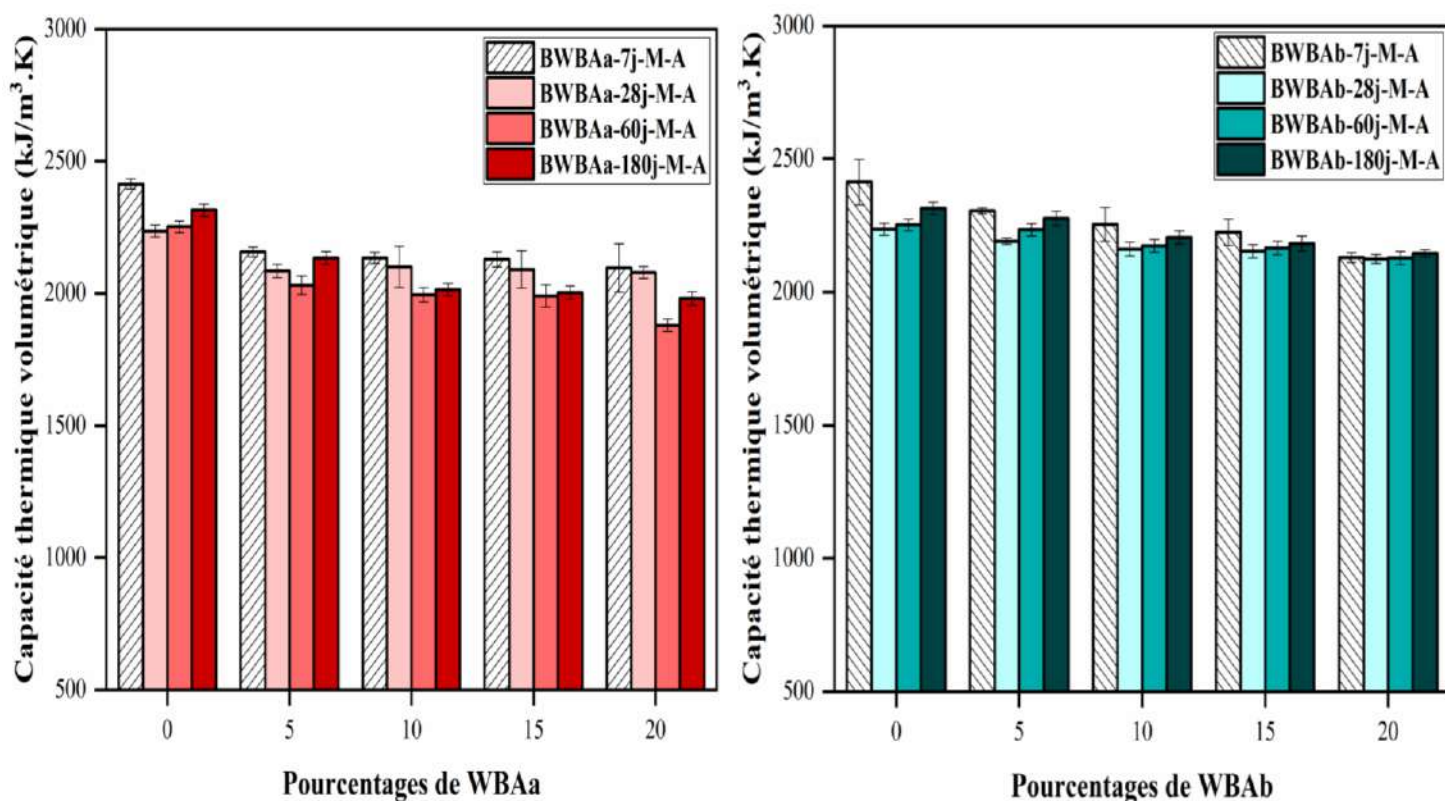


Figure III.10. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.

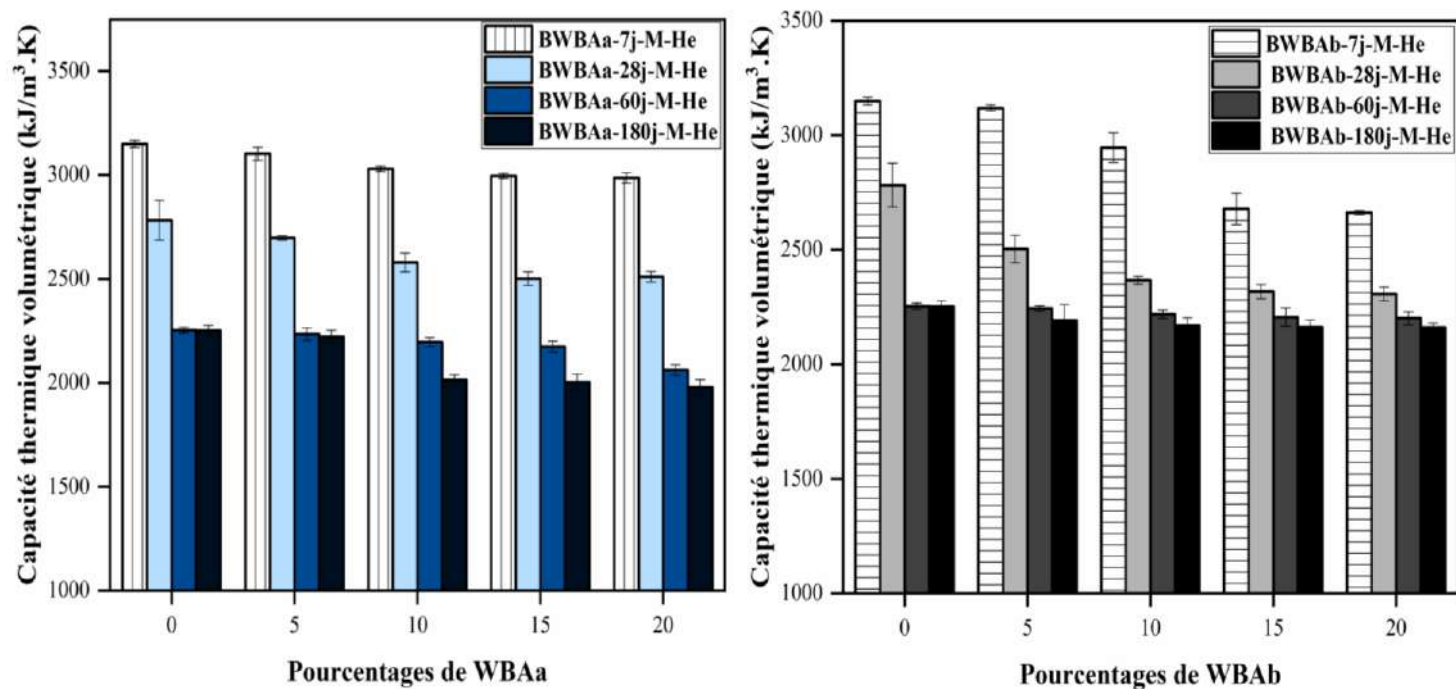


Figure III.11. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.

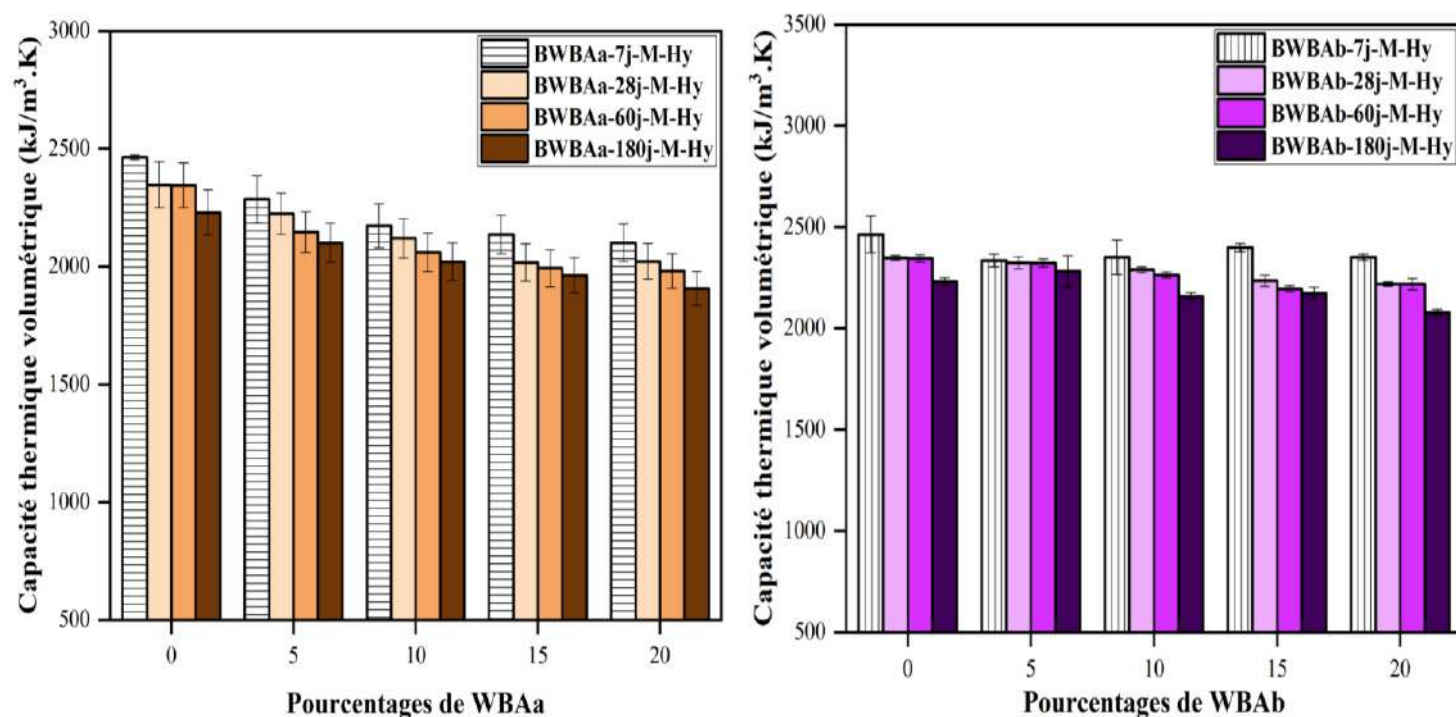


Figure III.12. Capacités thermiques volumétriques des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours.

III.2.3. Durabilité des BWBA

L'évaluation de la durabilité face à l'eau est un critère essentiel pour les briques en terre comprimée stabilisées, étant donné que les constructions en terre sont connues pour leur sensibilité à l'humidité et au contact direct à l'eau [1, 87]. Le contact avec l'eau peut se faire par immersion directe ou par absorption capillaire, selon la norme XP P 13-901 [94]. Des tests d'absorption d'eau capillaire ont été effectués sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées dans trois milieux distincts, après 7, 28, 60 et 180 jours de durcissement. Les cinétiques d'absorption d'eau par capillarité ont été comparées à celles des briques témoins BWBA(0%). L'objectif est de quantifier l'impact des deux cendres de bois WBA, avec un taux de remplacement de 20%, sur la résistance à l'eau des briques en terre, en simulant les conditions de pluie ou de remontées capillaires sur le terrain.

Les **Figures III.13, III.14 et III.15** illustrent l'évolution des coefficients de capillarité des BWBA en fonction du temps et du milieu de conservation. Les BWBA(0%), constituées uniquement de la terre et conservées dans les trois milieux de conservation, ont été totalement dégradées à la fin de l'essai en raison de leurs faibles résistances hydriques. Le coefficient d'absorption (C_b) diminue en fonction du temps, atteignant des valeurs minimales de $16.90 \text{ g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ à 60 jours pour les BWBAa(20%) et de $13.42 \text{ g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ à 28 jours pour les BWBAb(20%) conservées en milieu ambiant. Une légère augmentation du C_b a été constatée pour les BWBAa(20%) à 180 jours et pour les BWBAb(20%) à 60 et 180 jours. Cette augmentation des coefficients d'absorption, entraînant une diminution de la durabilité des BWBAa(20%) à 180 jours et des BWBAb(20%) à 60 et 180 jours en milieu ambiant, est probablement due à leur carbonatation, formant ainsi des liaisons médiocres [115]. Lors de la conservation des BWBA à 60 et 180 jours en milieu ambiant, le dioxyde de carbone réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former un calcaire presque insoluble. Dans une phase ultérieure, le dioxyde de carbone transforme le calcaire en bicarbonate de calcium, un produit très soluble dans l'eau et facilement lessivable.

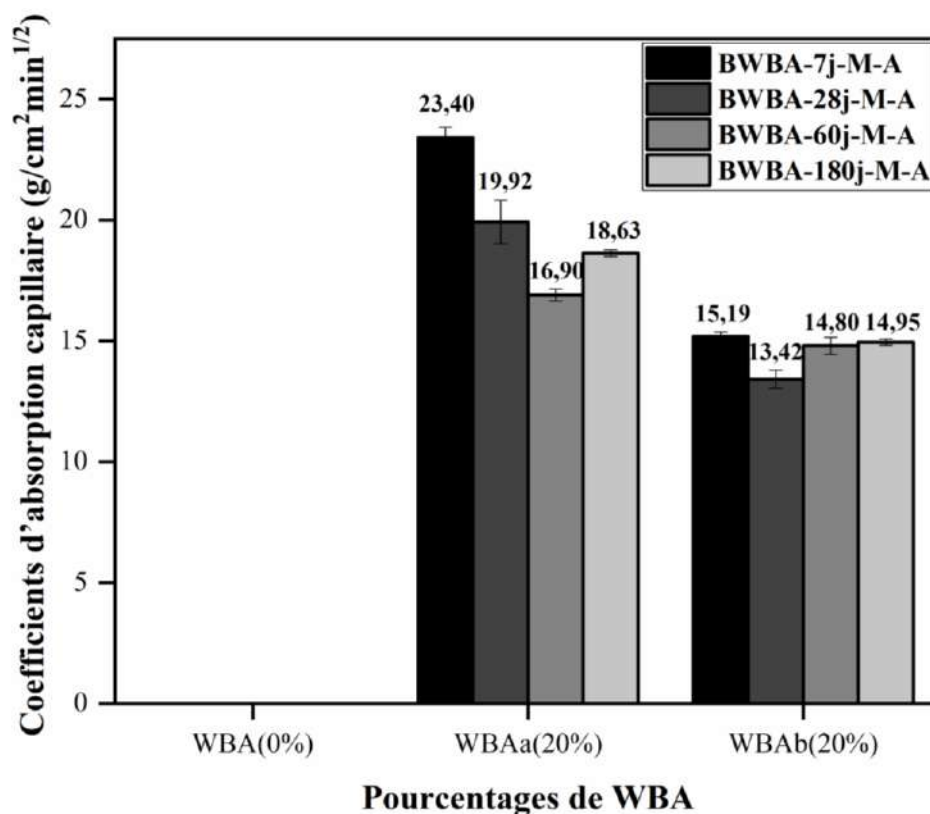


Figure III.13. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant à 7, 28, 60 et 180 jours.

En milieu hermétique, les BWBAa(20%) présentent une augmentation continue du coefficient d'absorption capillaire sur une période s'étendant de 7 à 180 jours. Cette augmentation est particulièrement faible à court terme (7 et 28 jours), mais elle se poursuit à long terme (60 et 180 jours), atteignant la valeur de $6.07 \text{ g/cm}^2 \text{ min}^{1/2}$ à 180 jours. Cette cinétique est probablement liée à la réaction pouzzolanique, qui est initialement lente puis s'accélère sur le long terme. Cette lenteur peut également être due à l'accumulation d'eau de constitution dans les briques, qui réagissent faiblement. Selon J. Eid, (2016) [18] et A. Lasledj, (2009) [21], la réaction pouzzolanique, lors de la stabilisation des sols avec de la chaux, présente une cinétique lente, nécessitant plusieurs mois à température ordinaire avant que ses effets puissent être pleinement observés. Par contre, les WBAb(20%) présentent un coefficient d'absorption (C_b) qui diminue en fonction du temps et atteint une valeur minimale à 180 jours de l'ordre de $7.02 \text{ g/cm}^2 \text{ min}^{1/2}$. Cette diminution est due aux réactions chimiques qui se produisent au sein des briques, améliorant ainsi leur durabilité face à l'eau [115].

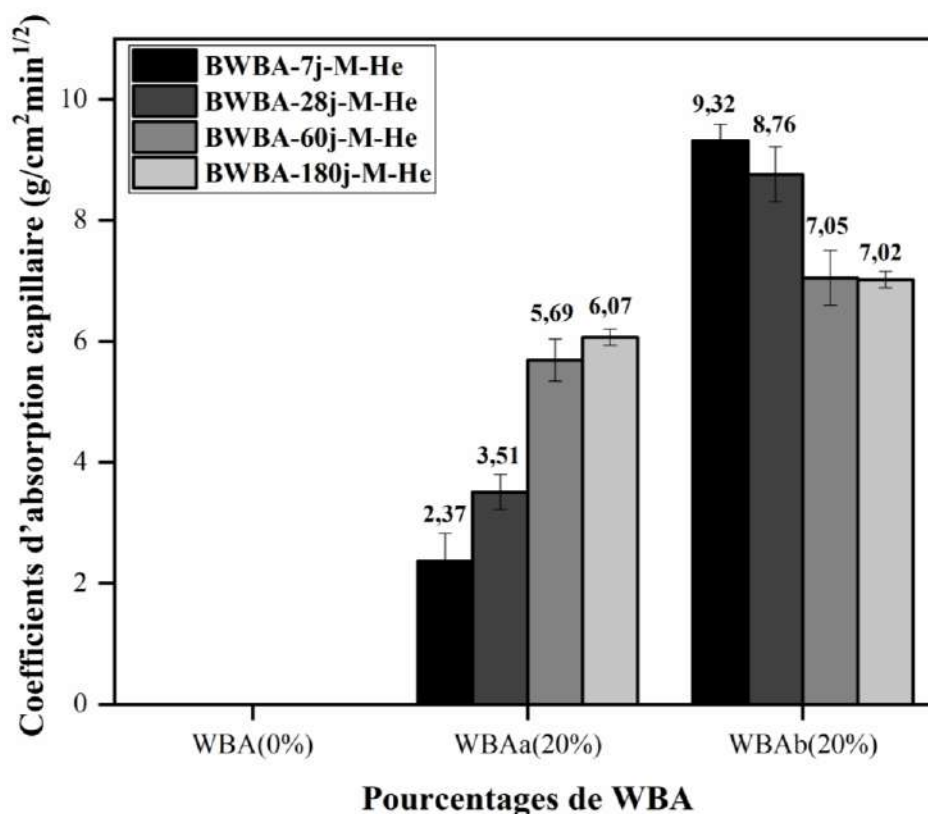


Figure III.14. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique à 7, 28, 60 et 180 jours.

D'autre part, en milieu hygrothermique, une diminution continue du coefficient d'absorption d'eau capillaire a été obtenue pour les BWBAa(20%) et WBBAb(20%) de 7 à 180 jours de cure. Ces briques BWBAa(20%) et WBBAb(20%) ont atteint des valeurs minimales de coefficient capillaire de l'ordre de 7.93 $\text{g}/\text{cm}^2\text{min}^{1/2}$ et 4.43 $\text{g}/\text{cm}^2\text{min}^{1/2}$ à 180 jours, respectivement. L'amélioration de la durabilité des BWBA conservées en milieu hygrothermique revient aux propriétés liantes par la formation des produits colloïdaux composés principalement de gel liant [112]. Celui-ci entraîne une densification de la matrice interne, augmentant ainsi la durabilité des éprouvettes au contact direct avec l'eau [112, 172, 173].

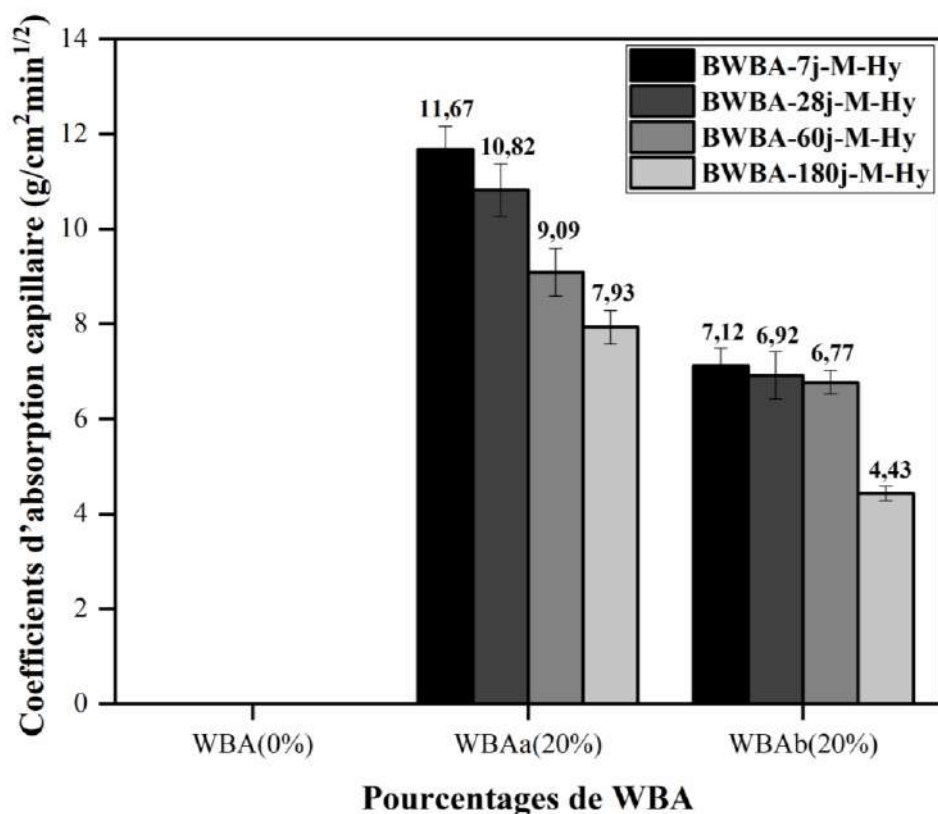


Figure III.15. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA conservées dans un milieu hygrothermique à 7, 28, 60 et 180 jours

Les **Figures III.16, III.17 et III.18** représentent l'état de dégradation des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) en fonction du temps (7, 28, 60 et 180 jours) et du milieu de conservation (milieu ambiant, hermétique et hygrothermique). Selon les recommandations de la norme française NF XP 13-901 [94], le coefficient de capillarité des BWBAa(20%) conservées en milieu ambiant à 7 jours dépasse la valeur de seuil définie dans la norme, les classant ainsi comme des matériaux peu capillaires ($C_b \leq 40$). En revanche, le C_b des BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, ainsi que celui des BWBAb(20%) à 7, 28, 60 et 180 jours de cure, est défini comme celui d'un matériau faiblement capillaire ($C_b \leq 20$). D'autre part, le coefficient de capillarité des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservés en milieu hermétique et hygrothermique a été classé comme faiblement capillaire ($C_b \leq 20$).

Les coefficients d'absorption d'eau par capillarité obtenus pour les briques en terre comprimée, stabilisées avec différents taux de substitution de WBA et conservées dans différents milieux, sont destinés aux murs extérieurs conformément à la norme NF XP 13-901 [94].

(a)

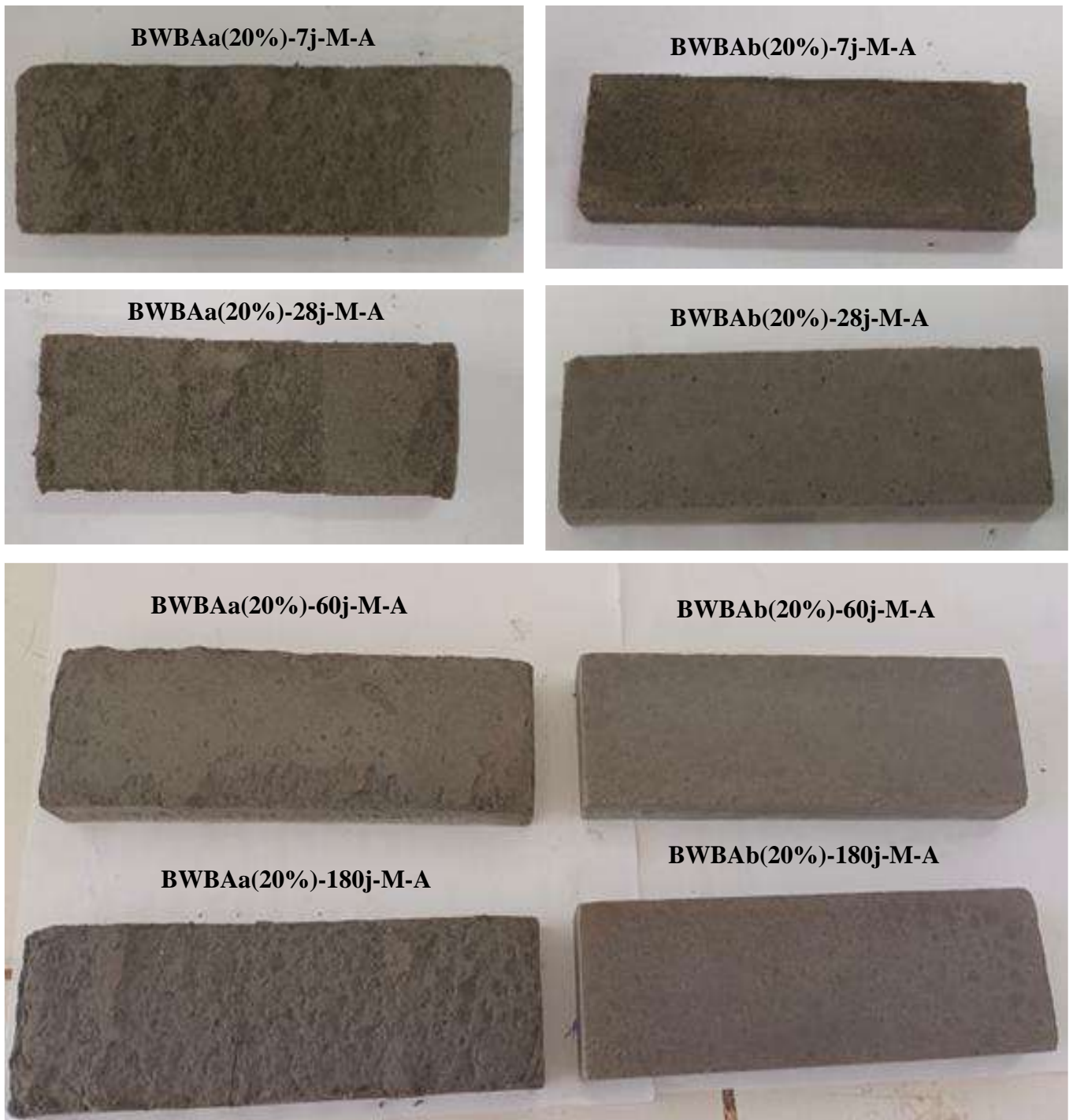


Figure III.16. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu ambiant pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

(b)

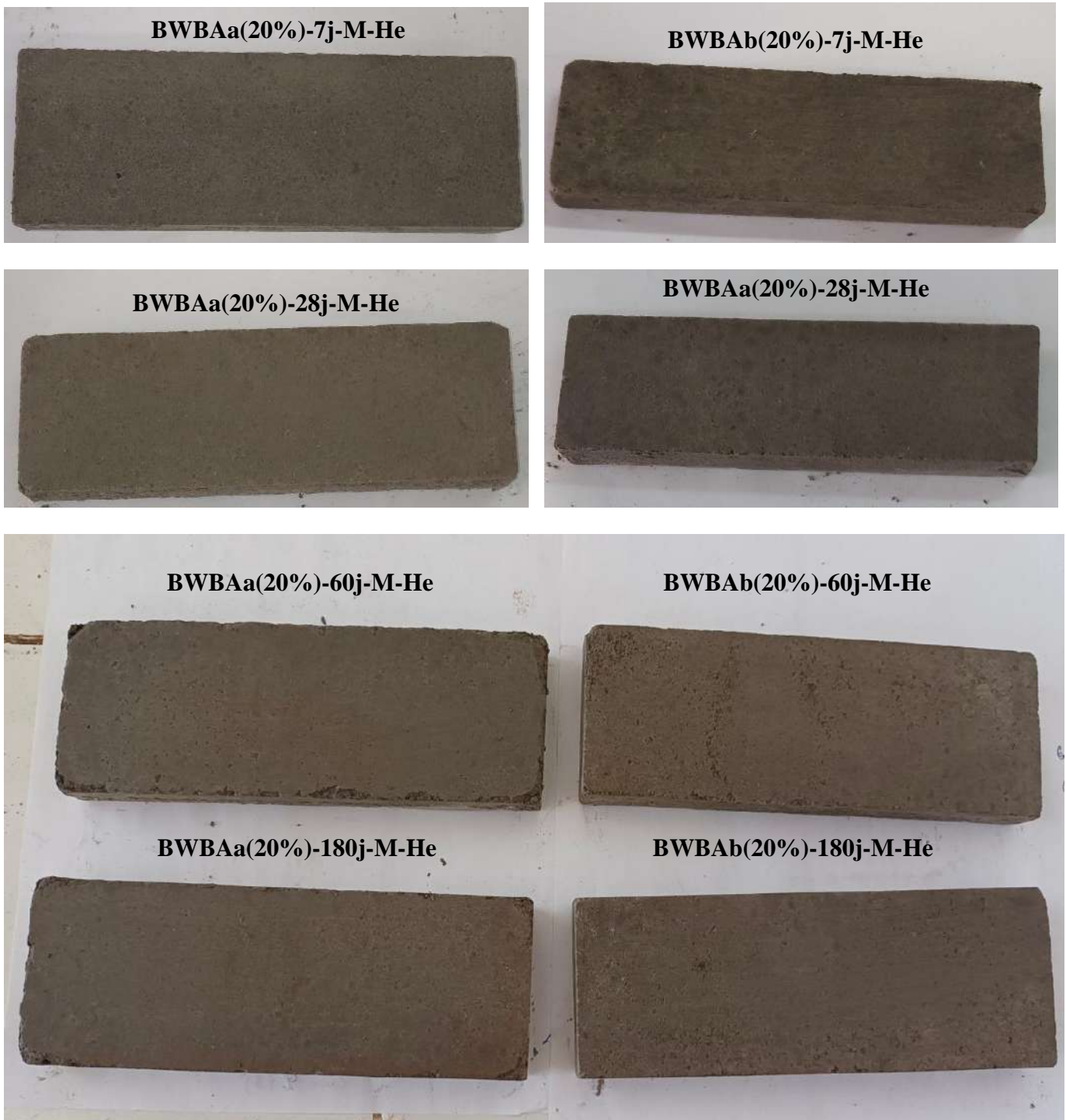


Figure III.17. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu hermétique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

(c)

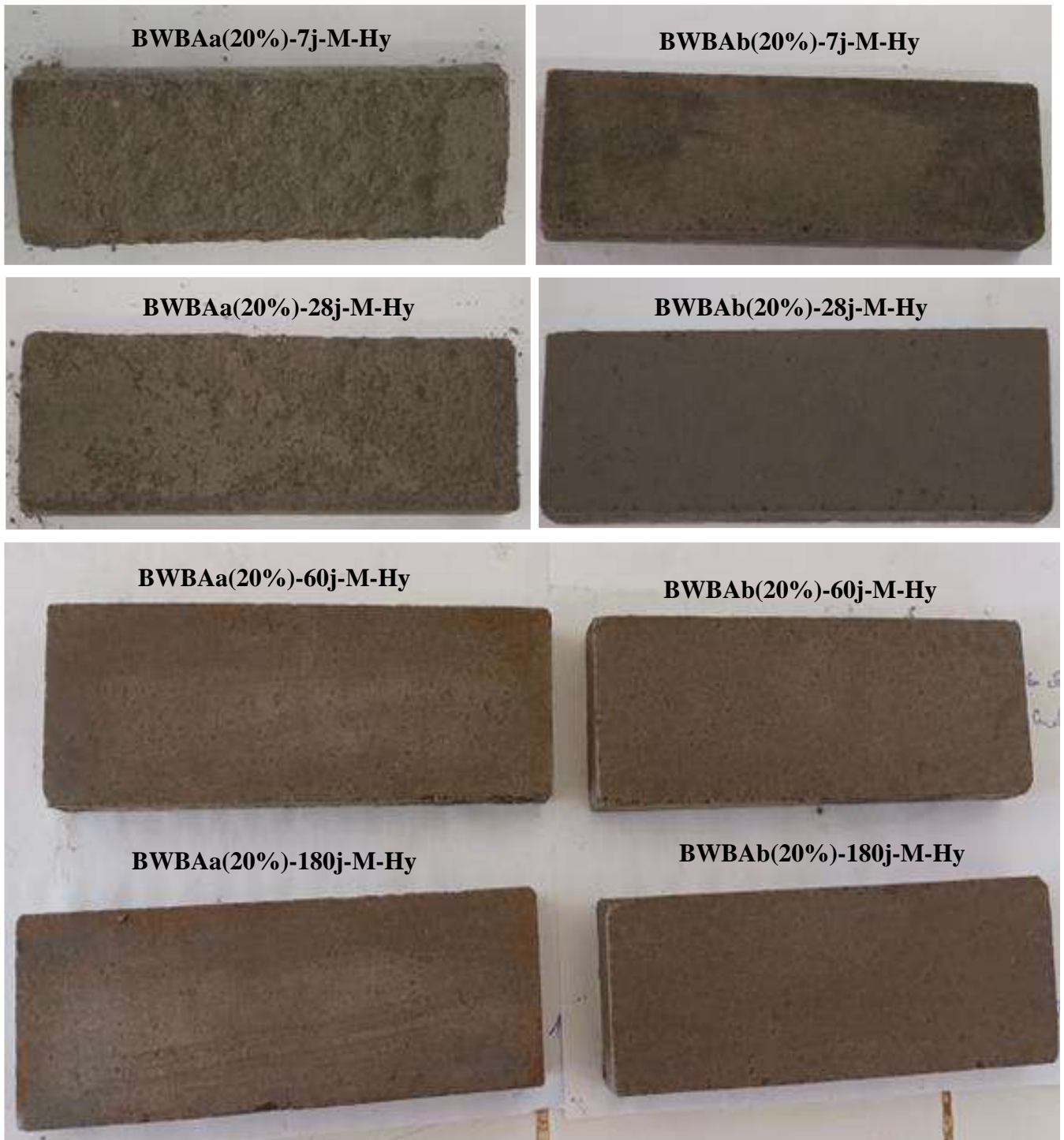


Figure III.18. Les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après l'essai d'absorption capillaire, conservées dans un milieu hygrothermique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

III.2.4. Masses volumiques apparentes des briques en terre comprimée

La masse volumique apparente est une propriété intrinsèque des matériaux qui dépend de plusieurs facteurs tels que la composition, le processus de fabrication, la teneur en eau du mélange et la porosité des briques, ainsi que le temps et les conditions de cure [1]. Les **Figures III.19, III.20 et III.21** présentent les mesures de densité des briques incorporant de 5 à 20% de WBA, après des cures allant de 7 à 180 jours dans trois environnements différents (milieu ambiant, hermétique et hygrothermique), comparées aux briques de référence sans cendres.

Les briques en terre sans WBA varient peu, passant de 311.45 g/cm^3 à 7 jours à 310.59 g/cm^3 à 60 jours, avec une légère augmentation à 311.12 g/cm^3 à 180 jours. Cette légère augmentation confirme la formation de calcite, entraînant une augmentation des propriétés thermiques et donc une diminution de l'isolation thermique, ainsi qu'une diminution des résistances mécaniques et de la durabilité.

En milieu ambiant, la masse volumique diminue initialement avec l'augmentation de la teneur en cendres de bois (WBA) de 5 à 20%. Les briques BWBAa(5-20%) voient leur masse volumique diminuer de 299.06 g/cm^3 à 292.64 g/cm^3 entre 7 et 60 jours, puis remonter à 293.95 g/cm^3 à 180 jours. Pour les BWBAb(5-20%), elle baisse seulement jusqu'à 28 jours (301.07 g/cm^3), puis augmente jusqu'à 301.86 g/cm^3 à 180 jours, confirmant aussi la formation de calcite.

Cette remontée tardive de la masse volumique à long terme confirme la formation de calcite selon plusieurs études. Selon Guettala et al. (2003) [133], en milieu ambiant, la réaction pouzzolanique produit de la calcite (CaCO_3) qui a une masse volumique plus élevée (2.71 g/cm^3) que les C-S-H ($2.0\text{-}2.2 \text{ g/cm}^3$), faisant augmenter la masse volumique globale. D'après Ogunye et Boussabaine (2002) [174], la formation de cette calcite contribue également à combler la porosité capillaire initialement créée, densifiant la structure et faisant remonter la masse volumique. Maskell et al. (2014) [175] indiquent que la carbonatation du matériau en milieu ambiant par le CO_2 atmosphérique produit des carbonates denses comme la calcite, augmentant aussi la masse volumique à long terme.

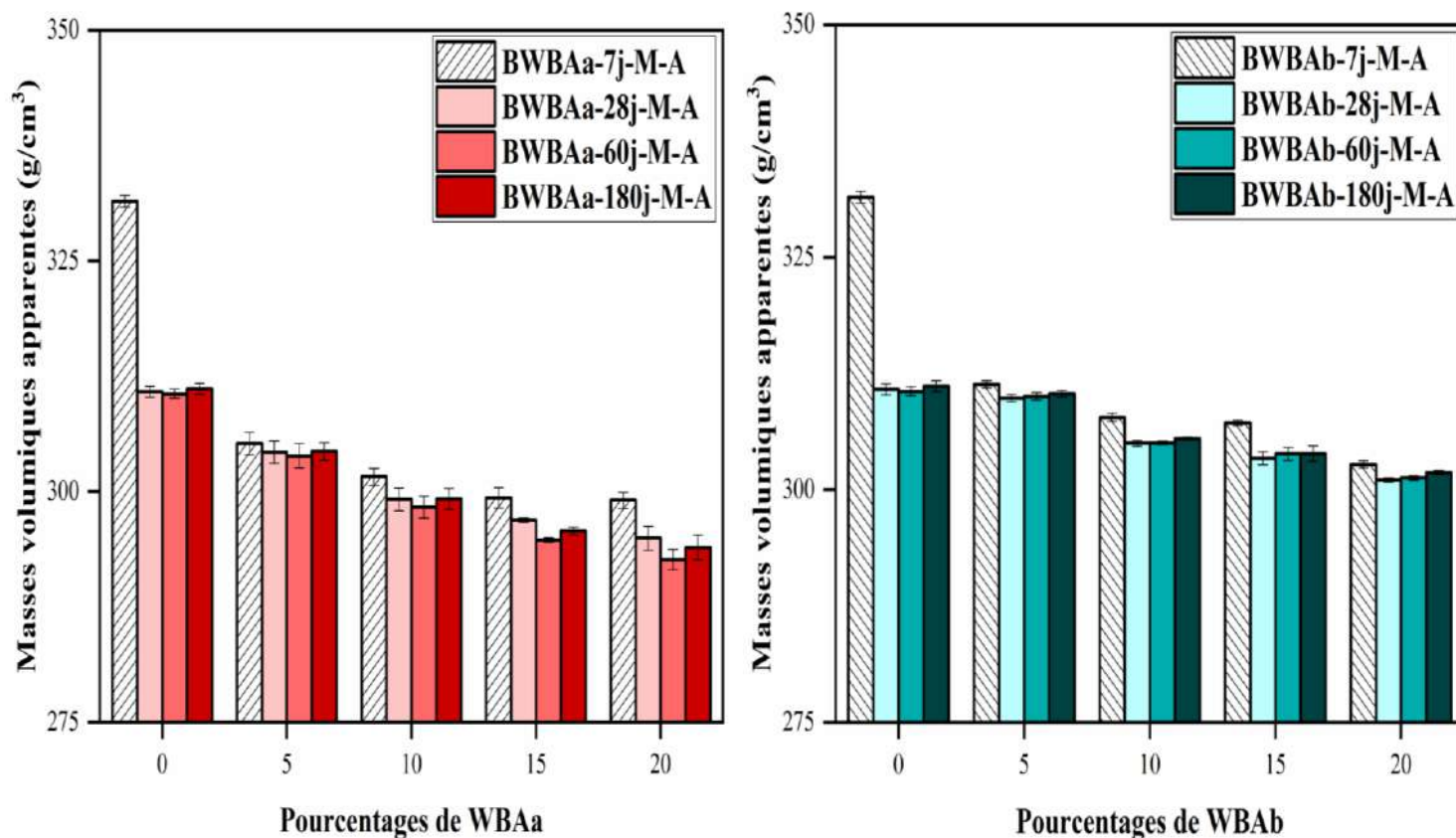


Figure III.19. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu ambiant pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

En milieu hermétique (M-He) et hygrothermique (M-Hy), la masse volumique des briques sans WBA diminue entre 7 et 180 jours, atteignant respectivement 313.36 g/cm^3 et 315.02 g/cm^3 à 180 jours. Celle des BWBAa(5-20%) baisse en fonction du temps pour atteindre 295.82 g/cm^3 (M-He) et 293.11 g/cm^3 (M-Hy) à 180 jours pour 20% de WBAa. Les BWBAb(20%) affichent 301.29 g/cm^3 (M-He) et 291.62 g/cm^3 (M-Hy) à 180 jours.

Les masses volumiques apparentes les plus faibles ont été obtenues pour les briques en terre comprimée stabilisées avec 5 à 20% de cendres de bois (WBAa et WBAb) conservées en milieu hygrothermique (100% HR, 40°C). Cela est principalement dû à deux phénomènes: la formation d'une porosité capillaire élevée favorisée par l'humidité très élevée (100% HR) dans les briques contenant les cendres de bois. Cette porosité capillaire fait diminuer la masse volumique apparente. L'accélération des réactions pouzzolaniques entre les cendres de bois et les composants de la terre à 40°C , produisant de C-S-H denses qui, bien que renforçant la microstructure et les performances, ont une masse volumique intrinsèque plus faible.

D'après les recherches menées par Eires et al. (2014) [86], Nagrockiene et al., (2018) [163], Al Haffar et al., (2021) [176], ainsi que Muntohar (2011) [177], ils mettent en évidence deux phénomènes majeurs influençant la masse volumique des matériaux argileux avec des liants pouzzolaniques comme les cendres de bois, en milieu humides. Premièrement, l'humidité élevée favorise la formation d'une porosité capillaire importante dans ces matériaux, en particulier lorsqu'ils contiennent des ajouts pouzzolaniques. Cette porosité capillaire accrue fait capillaire mécaniquement baisser la masse volumique apparente. Deuxièmement, les réactions pouzzolaniques entre les cendres et les composants argileux sont activées par des températures élevées, produisant davantage de C-S-H denses. Ces C-S-H renforcent la microstructure mais ont une masse volumique intrinsèquement plus faible que d'autres hydrates.

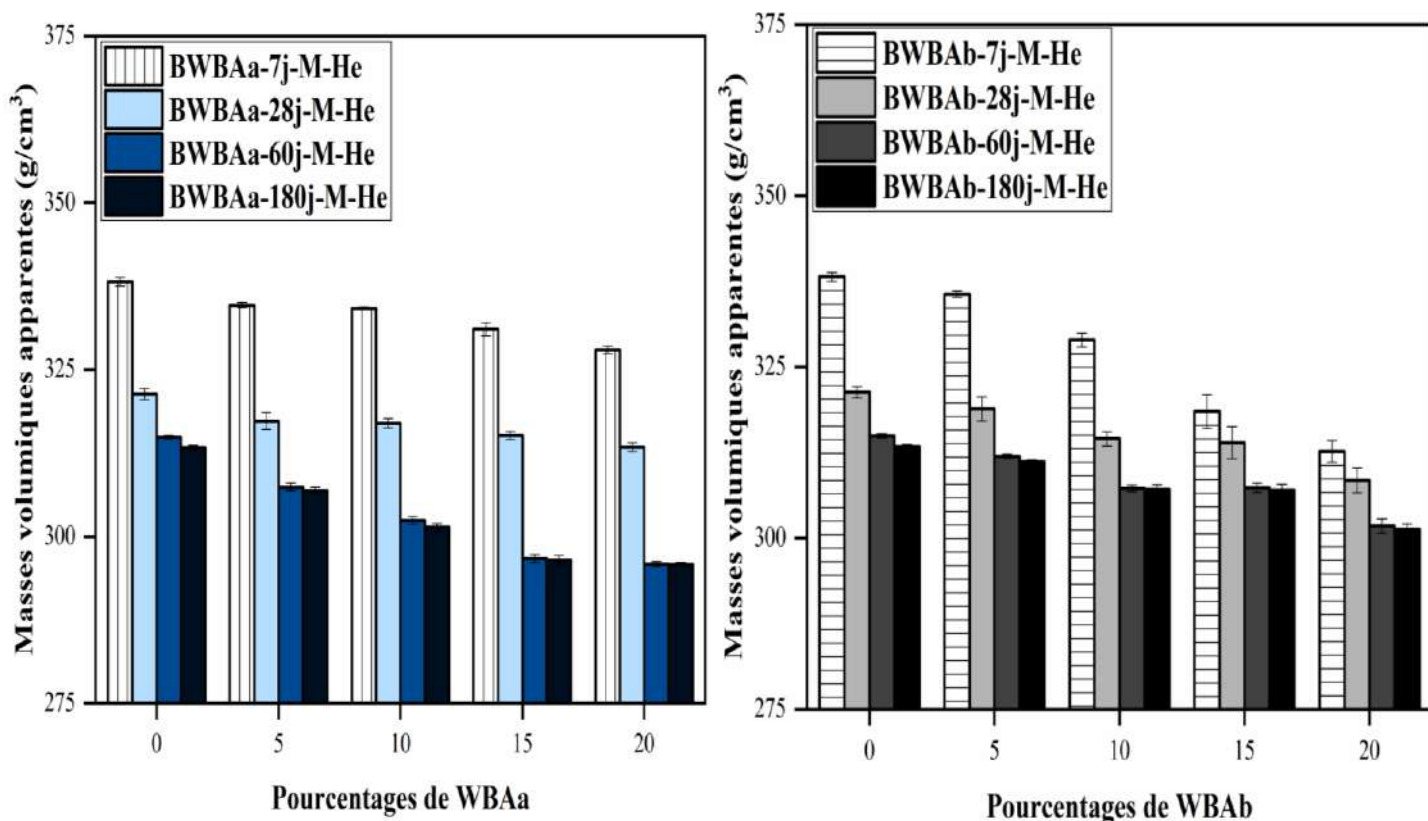


Figure III.20. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu hermétique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

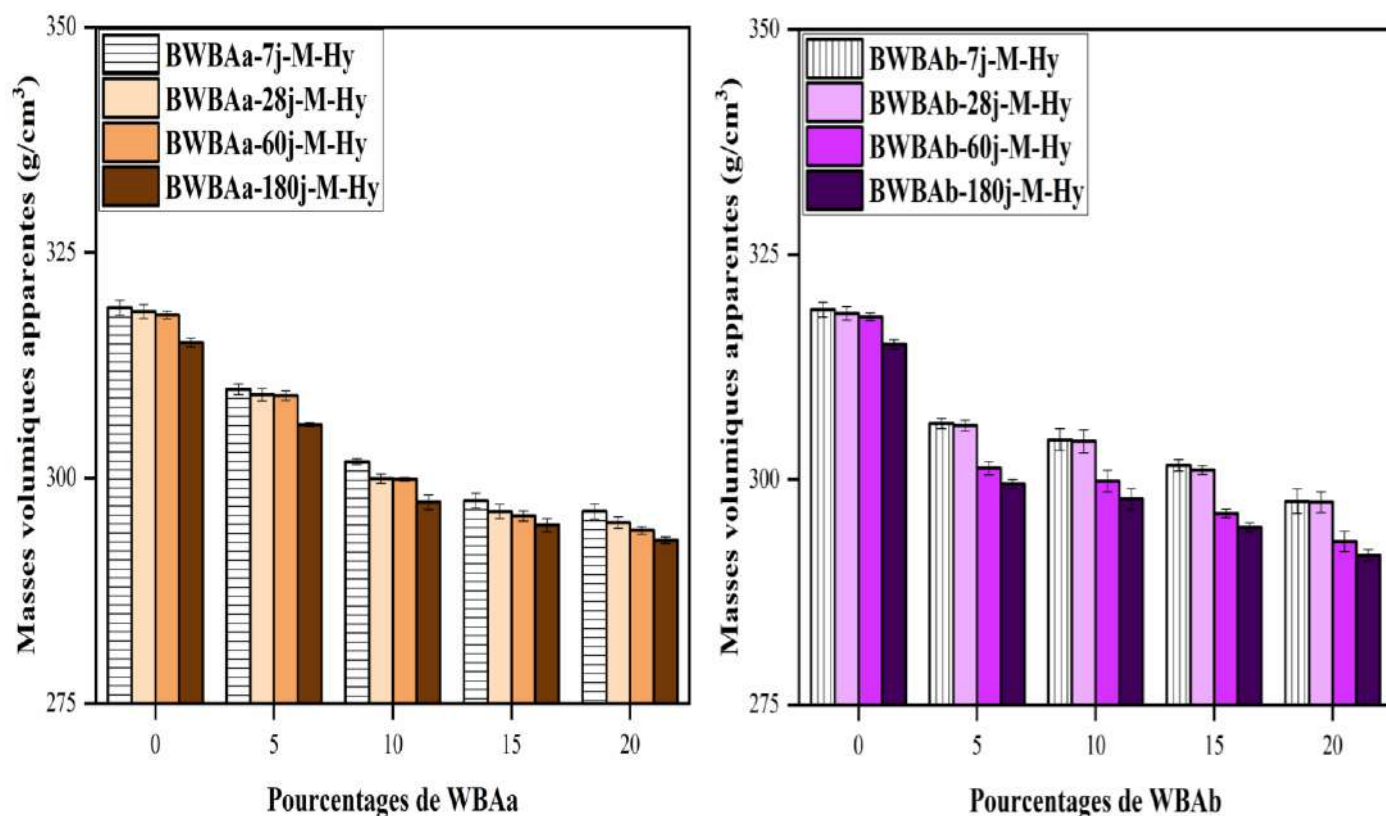


Figure III.21. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans un milieu hydrothermique pendant 7, 28, 60 et 180 jours.

III.3. L'effet de la teneur en cendres de bois sur les propriétés des briques en terre comprimée

III.3.1. Stabilisant physique et/ou chimique-Modification et rhéologie

L'étude a examiné l'incorporation de cendres de bois à des taux de 5 à 20% dans la fabrication de briques en terre comprimée. Elle a analysé le rôle potentiel des cendres comme stabilisants physiques et/ou chimiques, ainsi que leurs effets sur les propriétés rhéologiques des mélanges terre-cendres pour la production des briques.

La terre limono-argileuse utilisée avait un faible pourcentage d'argile, ce qui entraînait une porosité granulaire due au manque de cohésion entre les particules, nécessitant un stabilisant physique et/ou chimique. L'analyse granulométrique des cendres a révélé une teneur élevée en fines particules inférieures à 20 μ m (Tableau II.2). Cette finesse permettait de corriger celle de la terre utilisée. Les cendres occupaient les vides entre les grains, assurant ainsi une meilleure compaction et améliorant les propriétés mécaniques et la durabilité des briques en

terre comprimée. Plusieurs études ont montré que les fines particules de cendres peuvent combler les vides entre les grains de sol, augmentant la compacité et la résistance à sec [178]. D'autres soulignent que la forme sphérique des cendres facilite un meilleur agencement granulaire et réduit les frottements entre grains [167]. De plus, elles agissent comme des microfibrilles, renforçant la cohésion de la matrice argileuse à l'état plastique [178, 179].

Au-delà de leur rôle de stabilisant physique, les cendres agissent également comme stabilisant chimique dans les mélanges. Les cendres utilisées dans cette étude contiennent de la chaux (CaO) et de la périclase (MgO) réactives, comme confirmé par la diffraction des rayons X (**Figure II.5**). Ces composés peuvent réagir avec la silice et l'alumine de la kaolinite et de la muscovite pour former des produits pouzzolaniques liants tels que les silicates de calcium hydratés (C-S-H), les aluminates de calcium hydratés (C-A-H), les silico-aluminates de calcium hydratés (C-S-A-H) et les silicates de magnésium hydratés (M-S-H), contribuant ainsi à la solidification de la matrice argileuse [112].

Selon plusieurs études, l'ajout de cendres de bois modifie les propriétés rhéologiques des mélanges à court et long terme. À court terme, il y a l'échange cationique où les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} des cendres remplacent les cations interfoliaires (Na^+ , K^+) des argiles principalement issues de la kaolinite et de la muscovite, modifiant leur structure et leur état de dispersion/agglomération [62, 180]. Ensuite, la floculation et l'agglomération se produisent, où cet échange cationique induit la formation d'agglomérats plus volumineux de particules argileuses, affectant la texture et la maniabilité [178, 181].

À long terme, des réactions pouzzolaniques ont lieu, où la chaux, la périclase et les composants argileux forment des gels liants comme le C-S-H, le C-A-H et le M-S-H, consolidant la structure [112, 161, 182, 183]. Enfin, la carbonatation se produit, où le CO_2 réagit avec la chaux et la périclase résiduelles pour former de la calcite et de la magnésite, contribuant à la solidification [175, 184].

III.3.2. Résistances mécaniques

L'amélioration des résistances mécaniques, notamment en flexion et en compression, les briques en terre comprimée BWBAb(5-20%) par rapport aux BWBAa(5-20%) après 7, 28, 60 et 180 jours de conservation en milieu ambiant et hygrothermique, ainsi que pour les BWBAb(5-10%) à ces mêmes échéances et les BWBAb(15-20%) à 7 et 28 jours en milieu hermétique, est liée à la teneur en MgO présente dans les WBAb, qui manifeste un caractère hydrophobe élevé [112]. Cette teneur en MgO réduit la teneur en eau optimale des BWBAb

(**Figure II.20**) et favorise la formation des pressions capillaires dans les pores de la terre crue, augmentant ainsi la cohésion du matériau et, par conséquent la résistance mécanique [159, 185]. Cependant, pour les BWBA(15-20%) conservées pendant 60 et 180 jours en milieu hermétique, l'augmentation des résistances est faible en raison de la réaction chimique formant de la brucite dans les briques. Cette formation de brucite au sein de la matrice terre-cendres limite quelque peu le développement des résistances mécaniques à plus long terme dans ces conditions particulières de conservation hermétique (**Figure III.32**).

D'autre part, la surface spécifique des WBA est un paramètre crucial influant sur la vitesse de la réaction pouzzolanique des BWBA, et donc sur leur résistance à la flexion et à la compression. La surface spécifique des WBA_b est supérieure à celle des WBA_a (**Tableau II.5**). Selon D. Eliche-Quesada et al., (2019) [109], la surface spécifique des particules fines influe sur la vitesse de la réaction chimique ou pouzzolanique, ce qui entraîne une augmentation des propriétés mécaniques et durabilité des briques crues.

La composition chimique des matières premières joue également un rôle clé dans l'augmentation des résistances mécaniques. La quantité de CaO amorphe et réactif présente dans les WBA réagit avec le SiO₂ et l'Al₂O₃ de la terre, produisant des silicates de calcium hydratés (C-S-H), des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (C-A-S-H). Ces produits sont similaires à ceux formés lors de l'hydratation du ciment Portland, ce qui réduit la porosité du matériau [108, 110]. Les réactions pouzzolaniques produisent des produits liants qui améliorent la résistance mécanique des briques crues en formant des produits cimentaires, capables de se développer à l'intérieur des espaces poreux des briques [110]. De nombreuses études ont confirmé les bénéfices de l'utilisation de diverses cendres de biomasse pour stabiliser les briques en terre crue et les briques en terre comprimée, améliorant ainsi leurs propriétés mécaniques [100, 108-111, 113, 114, 160-166]. Cette valorisation des cendres a un impact positif sur l'augmentation de la résistance à la compression des briques à différentes teneurs en cendres [100, 101, 108-110, 115, 167, 168].

De plus, les WBA_b contiennent 15,13% de MgO amorphe, formant également des silicates de magnésium hydratés (M-S-H), ce qui améliore les résistances mécaniques des BWBA_b par rapport aux BWBA_a [112]. Dans le cas spécifique des briques BWBA_b stabilisées avec les cendres riches en MgO, un double effet pouzzolanique se produit. D'une part, les composants de la terre argileuse réagissent avec la chaux (CaO) des cendres. Mais en plus, le MgO amorphe présent dans les WBA_b permet une réaction pouzzolanique supplémentaire formant

des silicates de magnésium hydratés (M-S-H). La formation de ces liants pouzzolaniques M-S-H explique les résistances mécaniques plus élevées obtenues avec les BWBAb par rapport aux BWBAa stabilisées uniquement avec la chaux. Plusieurs recherches ont mis en évidence les avantages d'utiliser des cendres à forte teneur en périclase (MgO) pour la stabilisation des sols et l'amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité des briques en terre comprimée. Le MgO favorise notamment des phénomènes de floculation/agglomération conduisant à la formation de ces gels cimentaires renforcés [112, 186-190].

III.3.3. Propriétés thermiques

Les briques BWBAa stabilisées avec les cendres riches en CaO présentent de meilleures performances d'isolation thermique, avec une conductivité thermique et une capacité thermique volumétrique inférieures à celles des BWBAb stabilisées avec les cendres riches en CaO et MgO, et ce pour différents temps de cure (7 à 180 jours) et conditions de conservation (ambiant, hermétique, hygrothermique).

Cette disparité est probablement due à la formation accrue de gels liants résultant des réactions pouzzolaniques dans les BWBAb, qui produisent davantage de C-S-H, C-A-H et M-S-H que les BWBAa (seulement C-S-H et C-A-H). Ces gels ont tendance à remplir et densifier la microstructure des BWBAb, augmentant leur conductivité thermique et capacité thermique volumétrique.

Un autre facteur influent sur l'isolation thermique des matériaux est la densité des WBAb, légèrement plus élevée (0.40 g/cm³) que celle des WBAa (0.39 g/cm³). Bien que cette différence soit minime, elle reste un paramètre crucial dans les propriétés thermiques des briques en terre. De nombreuses études confirment que la conductivité thermique des matériaux dépend de la densité, et qu'une faible densité favorise généralement une meilleure isolation thermique [108, 116, 169, 170]. Dans le cas présent, la teneur élevée en MgO des WBAb contribue à accroître leur conductivité thermique par rapport aux WBAa, réduisant ainsi leurs performances en isolation thermique des BWBAb [112]. Ces résultats sont cohérents avec d'autres travaux montrant une diminution de la conductivité/isolation thermique lors de l'incorporation de diverses cendres de biomasse dans les briques en terre crues et les briques en terre comprimée [100, 104, 106, 108, 109, 112, 113, 119].

III.3.4. Durabilité

Les briques BWBAb stabilisées avec 20% de cendres WBAb riches en CaO et MgO ont démontré une meilleure résistance à l'usure et à la dégradation lors d'une immersion en contact direct avec l'eau, en comparaison avec les briques BWBAa stabilisées avec 20% de cendres WBAa riches en CaO seulement. Cette amélioration de la durabilité des BWBAb(20%) face à l'eau a été observée par des essais d'absorption capillaire et confirmée pour différents temps de cure (7, 28, 60 et 180 jours) ainsi que pour des conditions de conservation en milieu ambiant et hygrothermique.

Cette durabilité accrue des BWBAb(20%) est attribuée aux propriétés liantes résultant de la formation de produits colloïdaux et de gels cimentaires au sein de leur matrice. Tandis que les BWBAa ne forment que des C-S-H et C-A-H, les BWBAb produisent également des M-S-H grâce à la réactivité du MgO [112]. La présence combinée de ces gels liants C-S-H, C-A-H et M-S-H des BWBAb(20%) entraîne une densification de leur matrice interne, augmentant ainsi leur durabilité, en particulier au contact direct avec l'eau [112, 167, 172, 173].

Cependant, en milieu hermétique, ce sont les BWBAa(20%) qui ont démontré initialement une meilleure durabilité par rapport aux BWBAb(20%). Cette cinétique différente est probablement liée au déroulement lent des réactions pouzzolaniques, qui ne s'accélèrent qu'à plus long terme. La lenteur initiale peut également être due à l'accumulation d'eau de constitution au sein des briques, ralentissant les réactions chimiques. Selon plusieurs auteurs [18, 21], la réaction pouzzolanique lors de la stabilisation des sols avec la chaux présente en effet une cinétique lente, nécessitant plusieurs mois à température ordinaire avant que ses effets puissent être pleinement observés. En revanche, pour les BWBAb(20%), le coefficient d'absorption capillaire (C_b) diminue progressivement en fonction du temps de cure, traduisant une augmentation de leur durabilité. Cette diminution est révélatrice des réactions chimiques pouzzolaniques se produisant au fil du temps au sein de la matrice des BWBAb(20%), améliorant ainsi leur résistance face à l'eau [112].

III.3.5. Masses volumiques apparentes

Les briques en terre comprimée stabilisées avec 5 à 20% de cendres de bois (WBAa), conservées en conditions ambiantes et hygrothermiques, ont affiché les masses volumiques apparentes les plus faibles, comparées aux briques BWBAb avec les mêmes taux de cendres. Cependant, lorsqu'elles sont conservées dans des conditions hermétiques, ce sont les

BWBAb(5-20%) qui présentent les masses volumiques les plus basses par rapport aux BWBAa(5-20%).

Cette différence de comportement est due principalement à la concentration en eau de constitution plus élevée dans les WBAa. Le caractère hydrophile des WBAa, comparé au caractère hydrophobe des WBAb, joue ainsi un rôle clé dans la variation des masses volumiques, comme confirmé par la **Figure II.20** qui montre la teneur en eau optimale des briques en terre stabilisées aux cendres de bois. En conditions hermétiques, la forte teneur initiale en eau de constitution dans les WBAa qui conduit à une masse volumique apparente supérieure aux BWBAb, en raison que cette teneur en eau elle ne peut pas s'évaporer contribuant ainsi à une masse volumique apparente supérieure des WBAa.

De plus, la composition chimique des WBA permet une hydratation des oxydes. Les oxydes de calcium CaO présents dans les cendres riches en calcium ont tendance à s'hydrater plus facilement que les oxydes de magnésium MgO [191]. En conditions hermétiques, ce processus d'hydratation favorise la fixation d'eau supplémentaire dans la matrice cimentaire des WBAa, augmentant leur masse volumique. Les produits d'hydratation formés à partir du CaO, comme la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sont généralement plus denses (environ 2.2 g/cm^3) que ceux issus du MgO, comme la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ d'environ 2.4 g/cm^3 [192]. Cette différence de densité des hydrates contribue aux masses volumiques plus élevées des WBAa en milieu hermétique.

III.3.6. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X des BWBA(20%)

Les **Figures III.22, III.23 et III.24** présentent les résultats de l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) effectuée sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de conservation dans différents milieux (ambient, hermétique et hygrothermique). Ces figures mettent en évidence la présence de pics caractéristiques du quartz, de la calcite, de la muscovite et de la kaolinite dans les deux types de briques, quel que soit le milieu et la durée de conservation. Des pics de calcite et de chaux provenant des cendres de bois incorporées (WBA) ont également été observés. Concernant les BWBAb(20%), des pics de périclase (MgO) ont été identifiés après 28 jours. Cependant, ces pics ont disparu aux échéances de 60 et 180 jours, en raison de la consommation du MgO par les réactions pouzzolaniques impliquant la silice et l'alumine présentes dans la terre. Pour les WBAa(20%), la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) initialement présente a été totalement consommée au fil du temps, probablement par des réactions pouzzolaniques similaires.

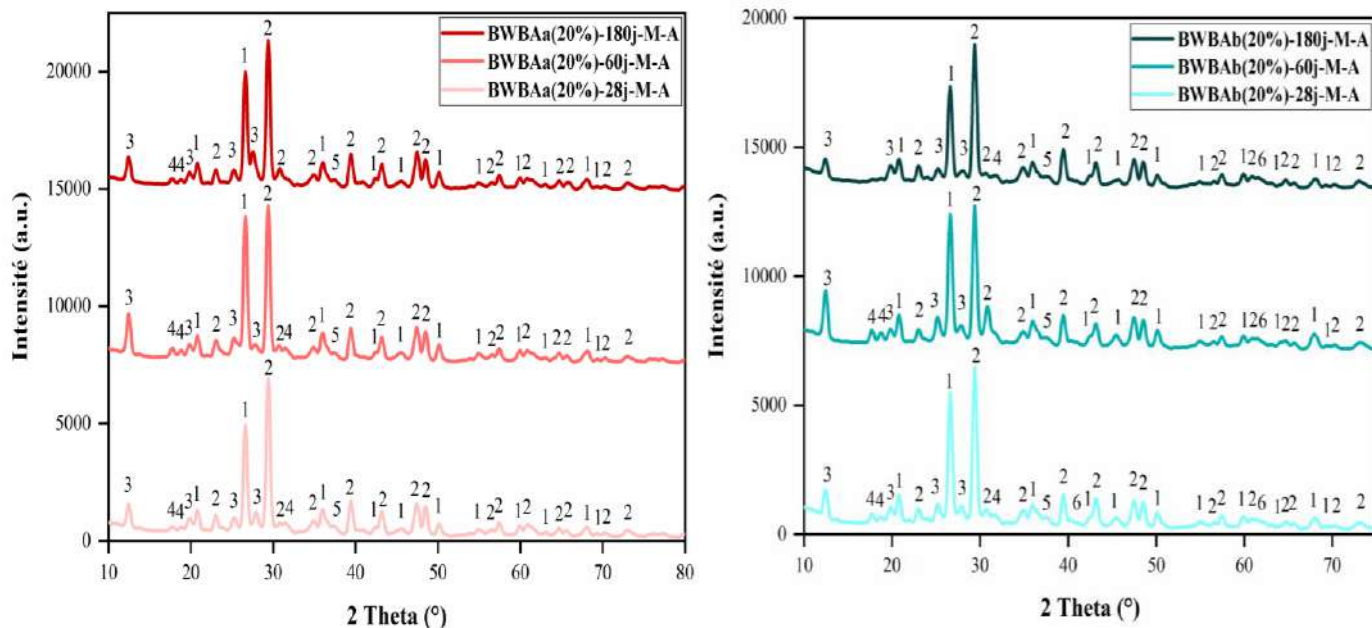


Figure III.22. DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu ambiant à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

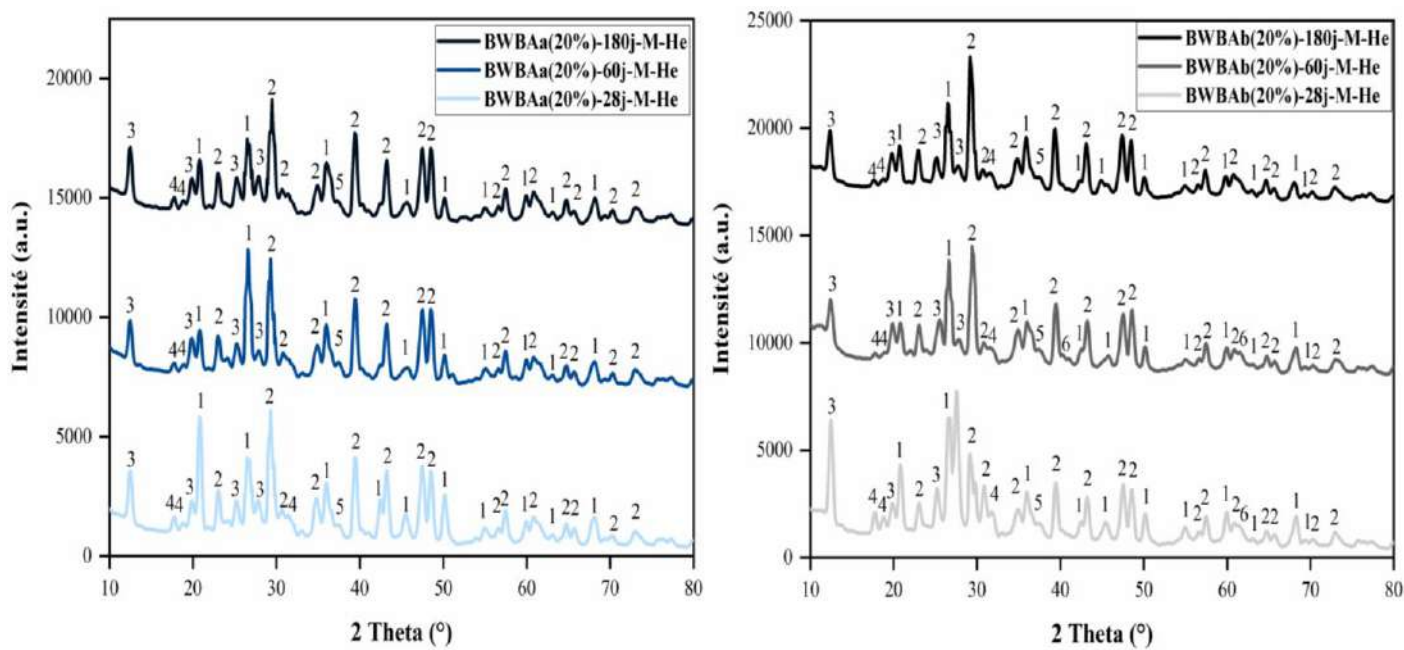


Figure III.23. DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hermétique à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

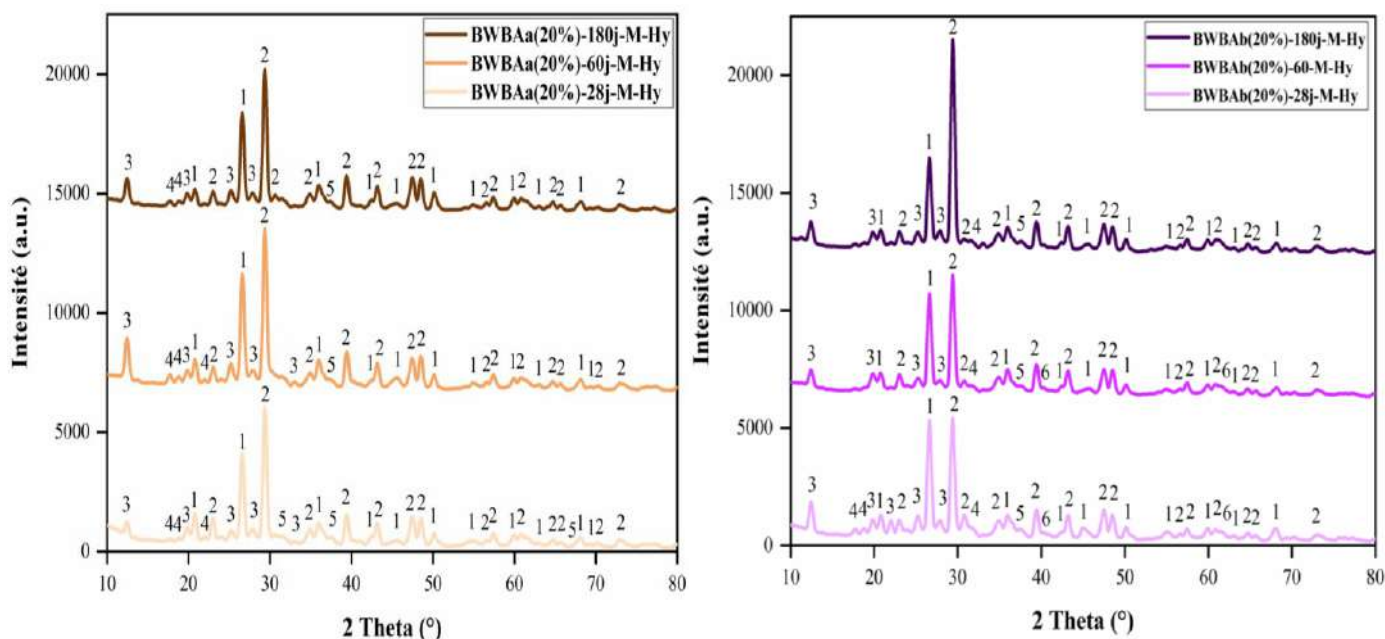


Figure III.24. DRX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hydrothermique à 28, 60 et 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

III.3.7. Caractérisations microstructurales (MEB et MEB/EDX) des BWBA(20%)

Des observations microstructurales par microscopie électronique à balayage (MEB) couplées à des analyses MEB/EDX ont été réalisées sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de cure dans les trois milieux de conservation (ambient, hermétique et hydrothermique).

Les micrographies présentées dans les **Figures III.25, III.26 et III.27** révèlent la formation d'une structure consolidée au sein des briques, quelle que soit la condition de conservation. Des particules de morphologies variées (sphériques, angulaires, alvéolaires) dispersées dans les échantillons, avec une distribution granulométrique prédominante serrée et condensée au sein de la matrice, ont été observées.

Les **Figures III.28, III.29 et III.30** illustrent plus en détail la morphologie microscopique MEB/EDX des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours dans les trois milieux. L'apparition de grands flocons agglomérés avec une surface granuleuse, arrondie et alvéolaire, formant ainsi un matériau compact et dense a été distinguée. Une concentration de petites particules granuleuses de structure floconneuse, sphérique, angulaire et alvéolaire

participe également à la formation de briques résistantes et durables, avec une densification de la structure interne.

Cette densification microstructurale est principalement attribuée aux produits formés lors des réactions pouzzolaniques entre les différents constituants (terre, cendres). Les analyses EDX ont mis en évidence la présence des éléments K, Ca, Al, Si, O, Fe, Na et Mg, avec des variations de concentrations selon le temps et le milieu de conservation.

Ces aspects microstructuraux caractéristiques résultent donc des réactions pouzzolaniques activées, dont l'ampleur varie en fonction du temps de cure et des conditions environnementales. Ils permettent de visualiser la microstructure consolidée et dense développée dans ces briques en terre stabilisées aux cendres de bois.

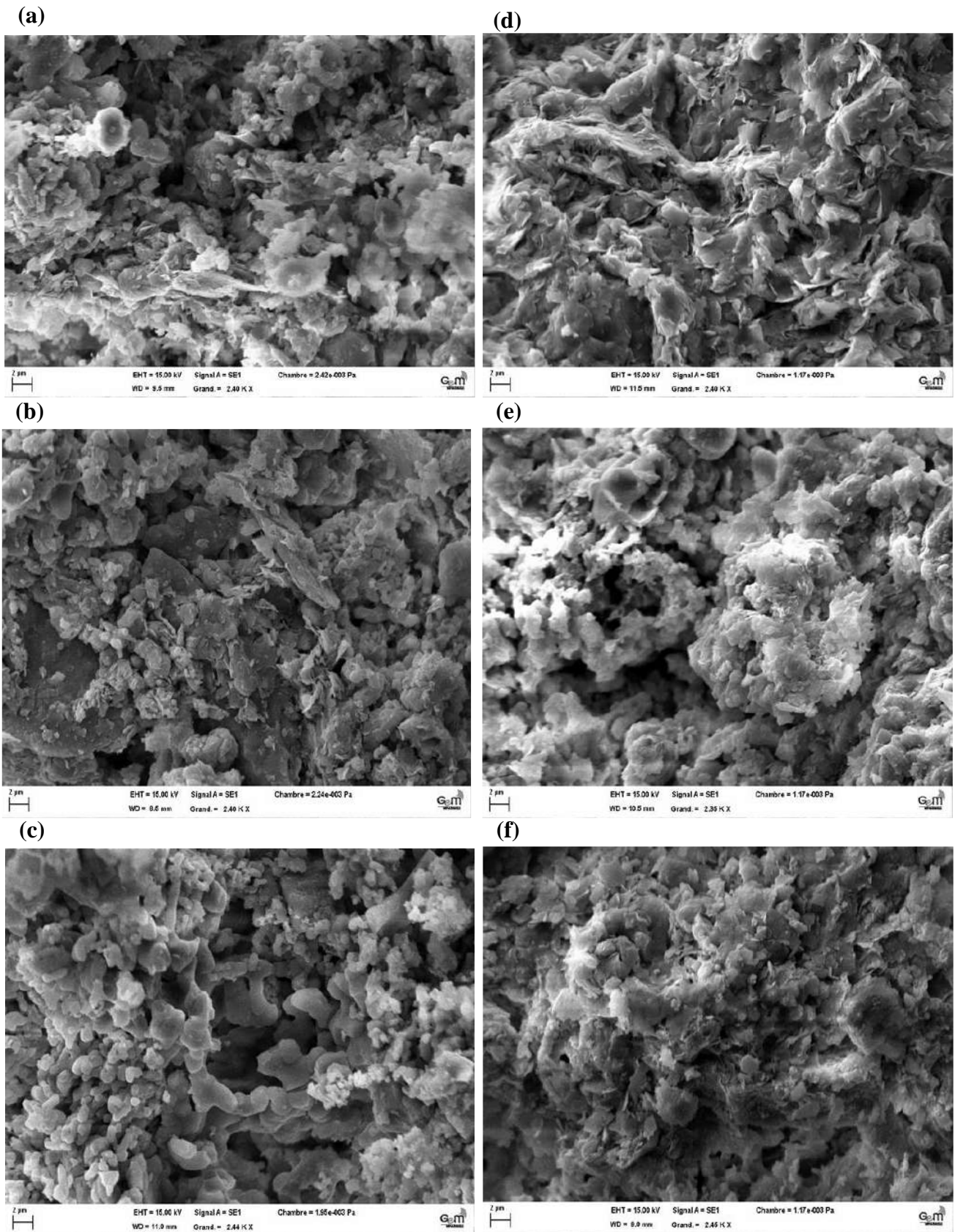


Figure III.25. Images MEB de BWBA conservées dans un milieu ambiant, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours.

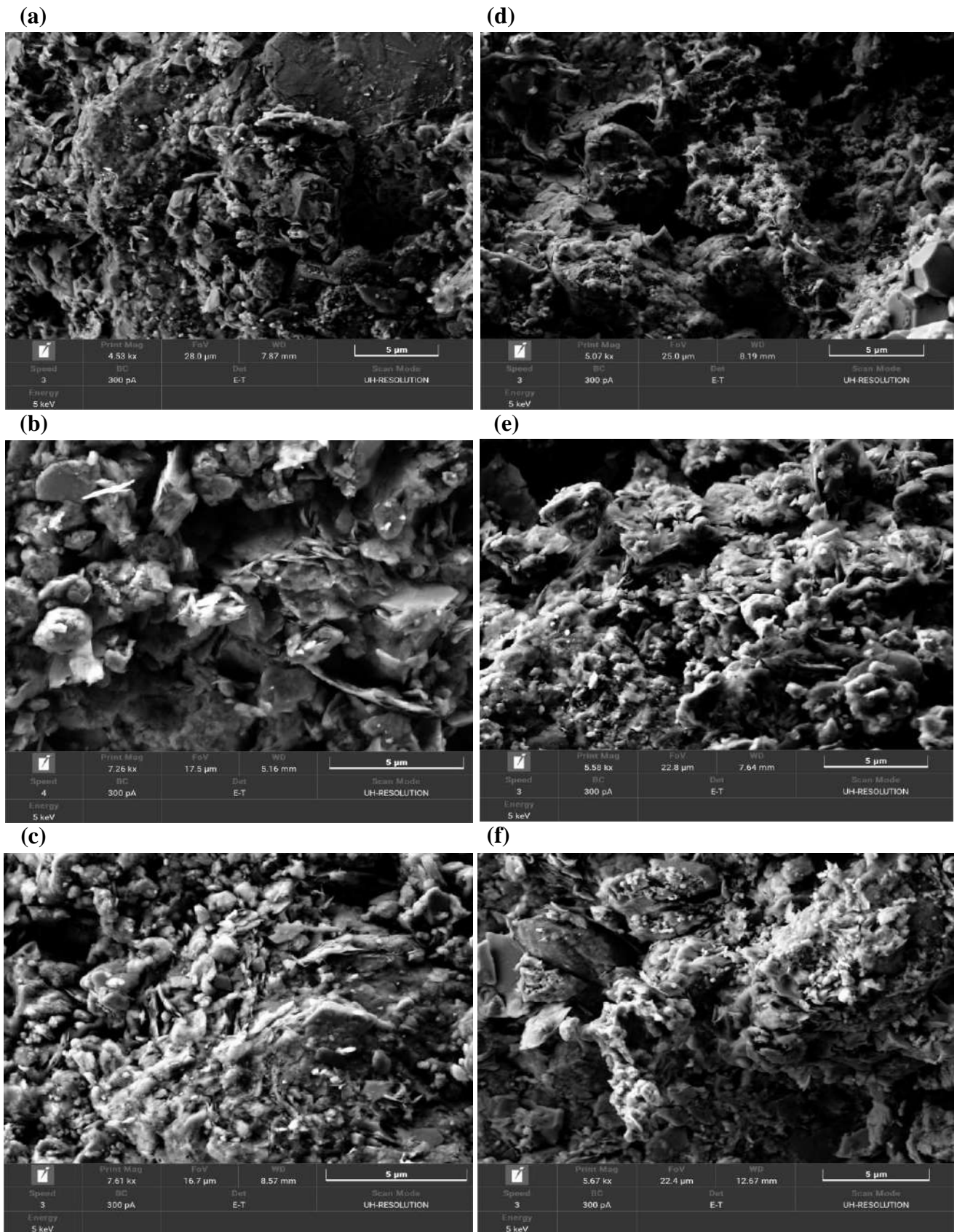


Figure III.26. Images MEB de BWBA conservées dans un milieu hermétique, (a, b, c) BWBAa(20 %) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours.

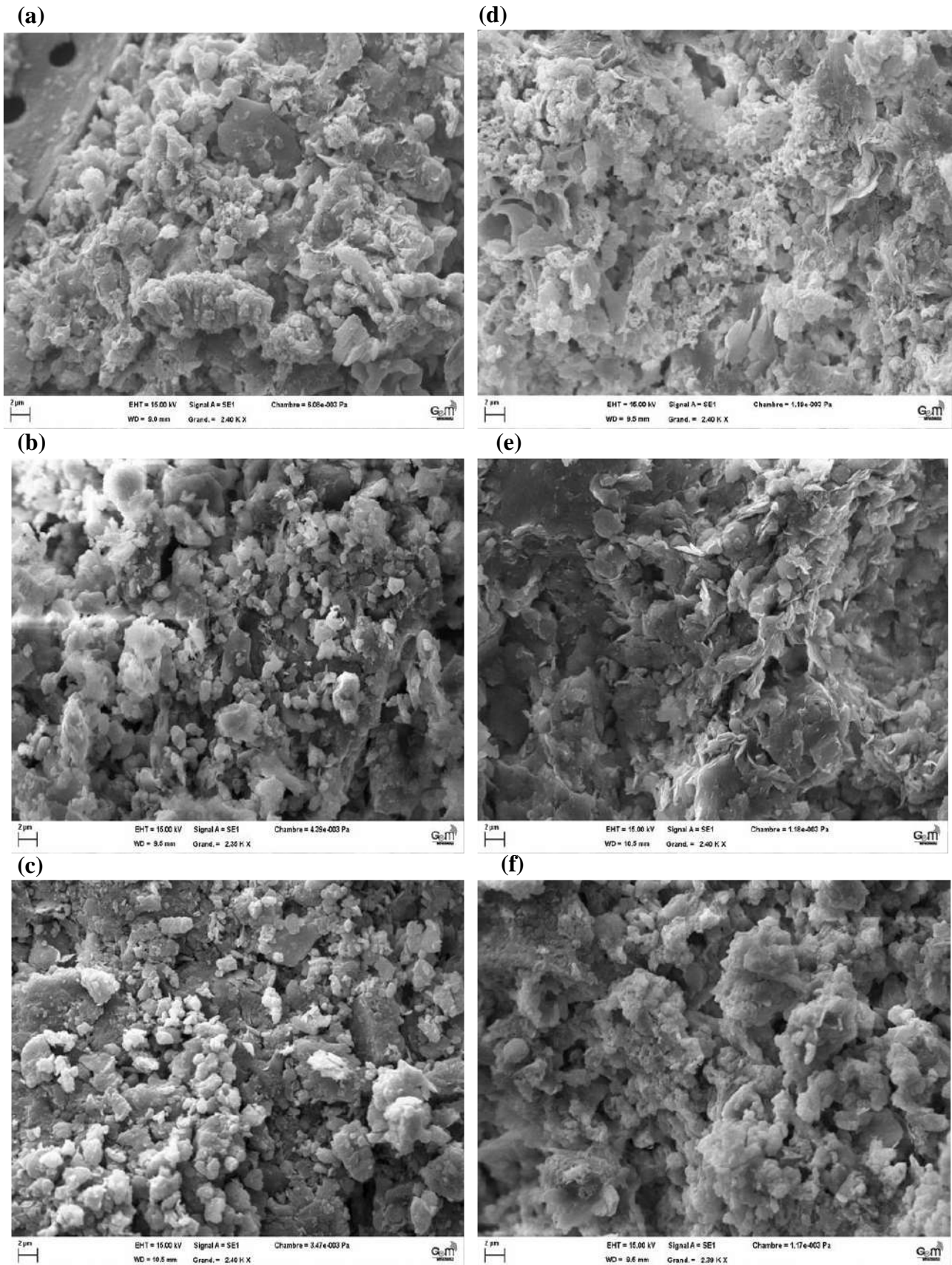
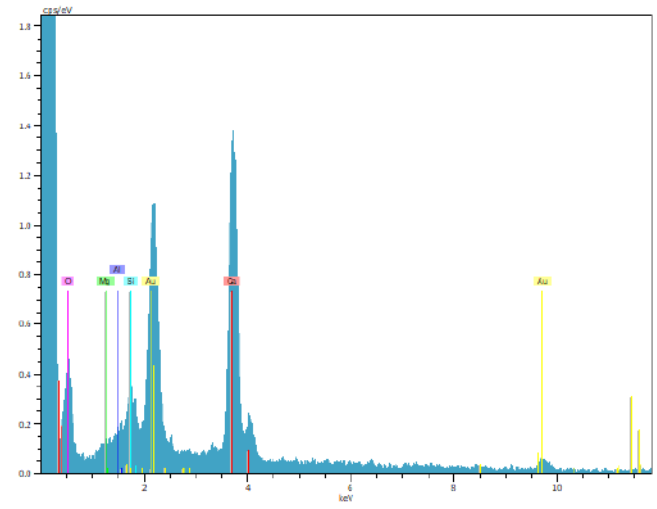
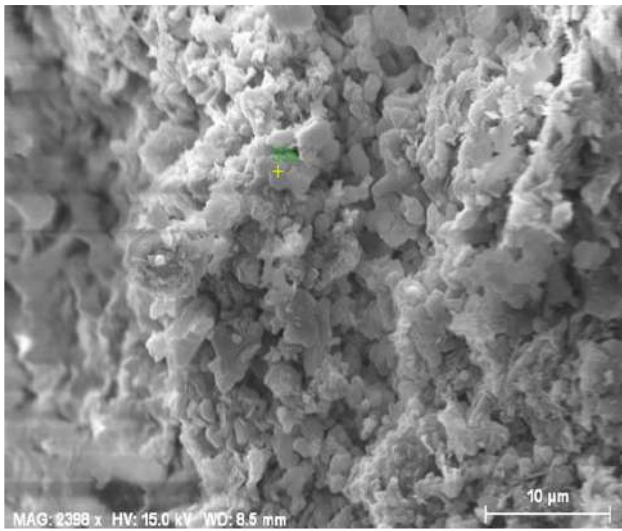
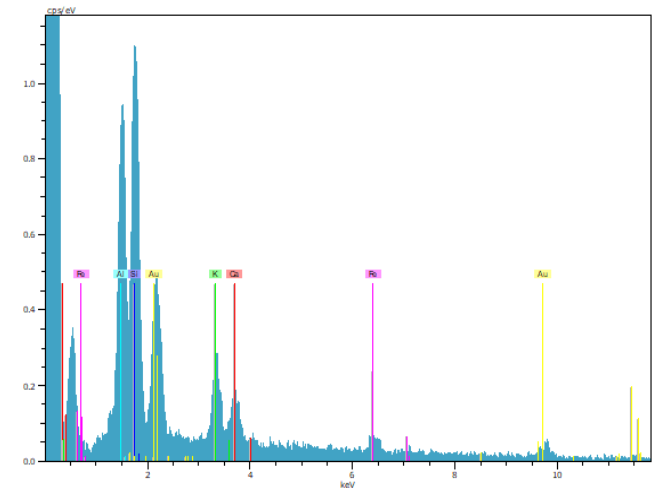
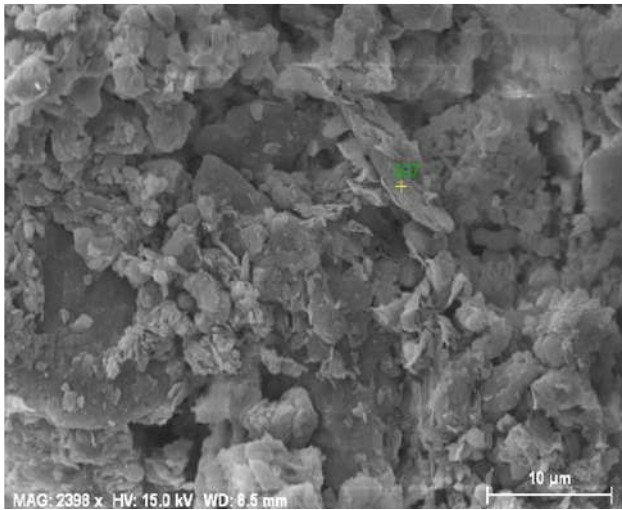


Figure III.27. Images MEB de BWBA conservées dans un milieu hygrothermique, (a, b, c) BWBAa(20 %) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20 %) à 28, 60 et 180 jours.

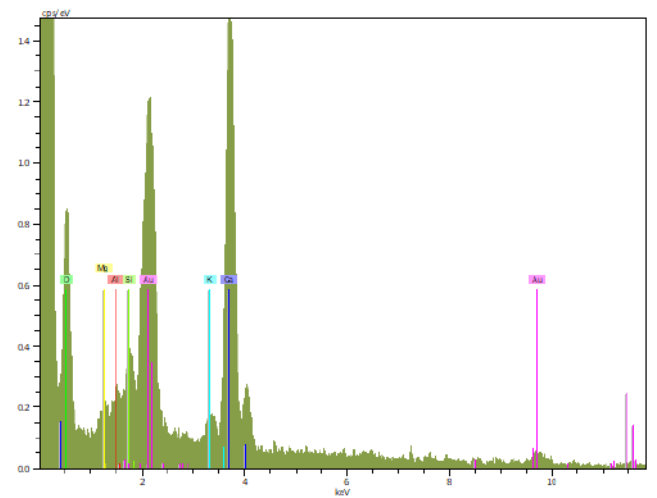
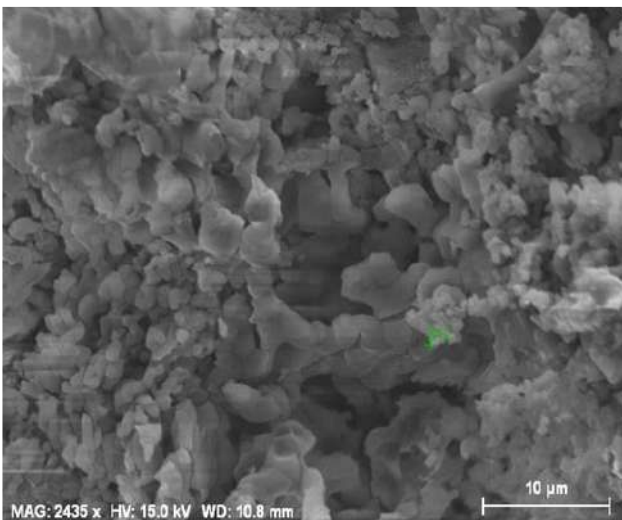
(a)



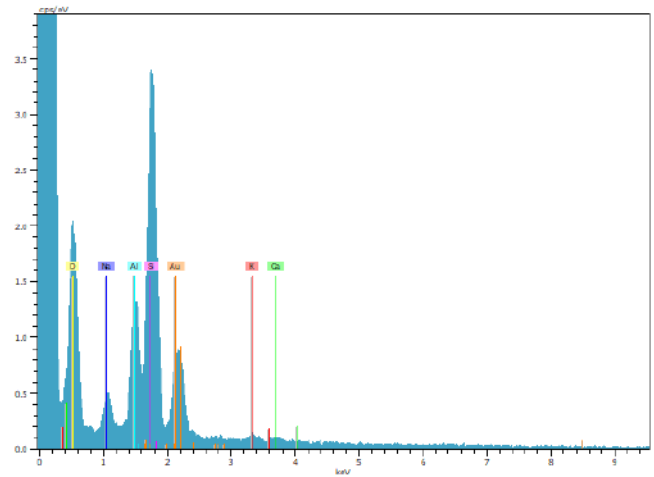
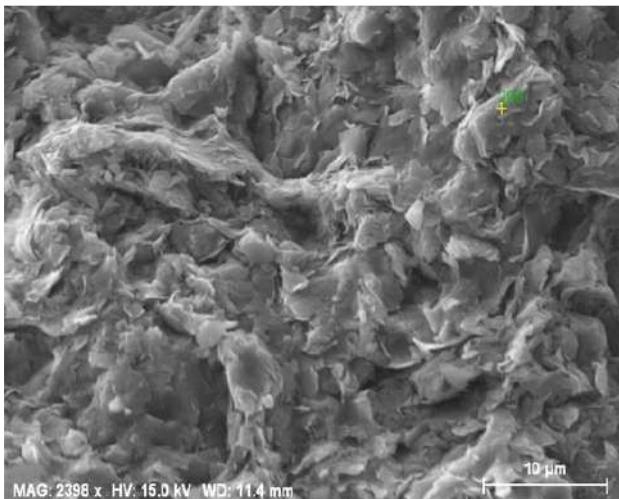
(b)



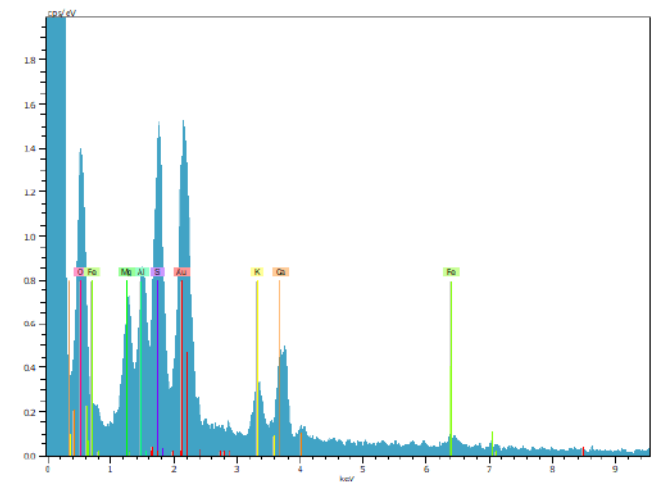
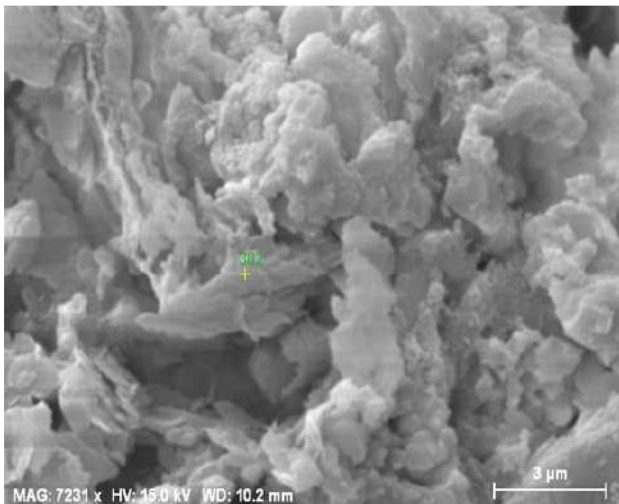
(c)



(d)



(e)



(f)

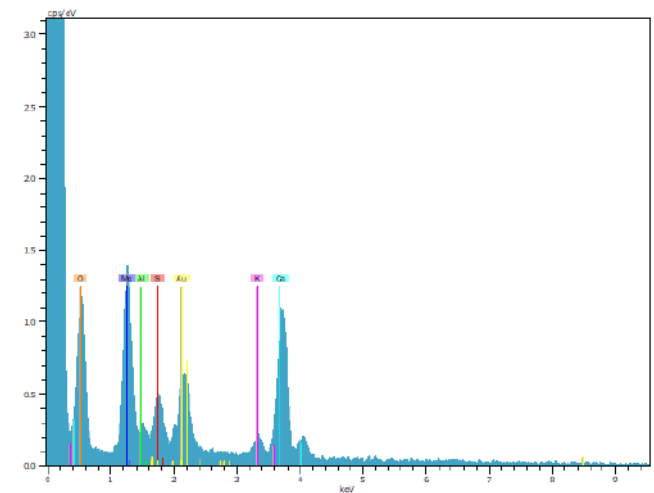
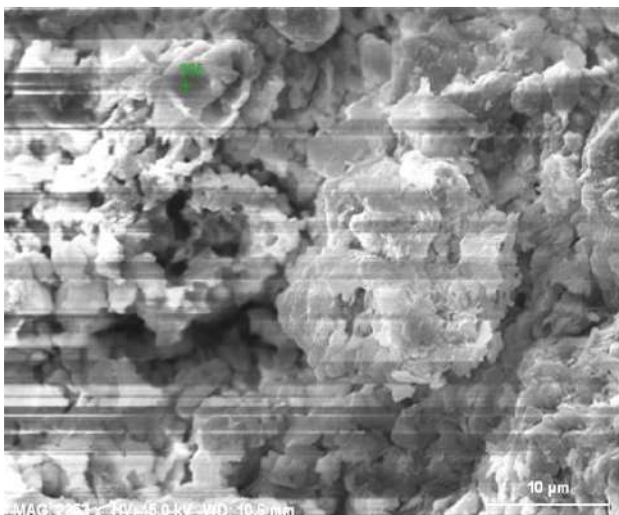
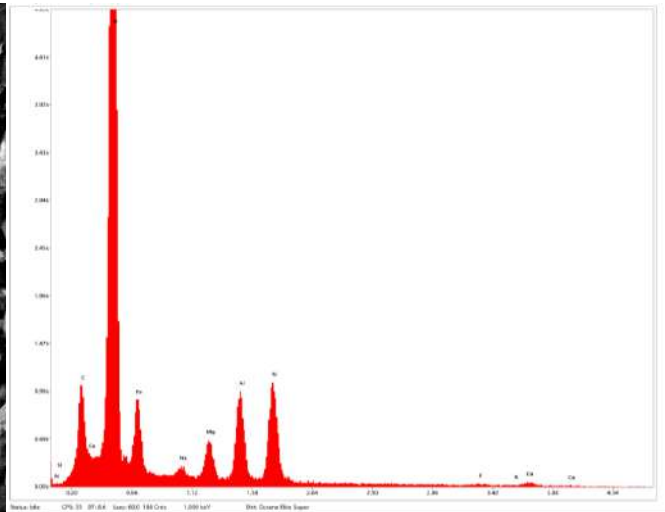
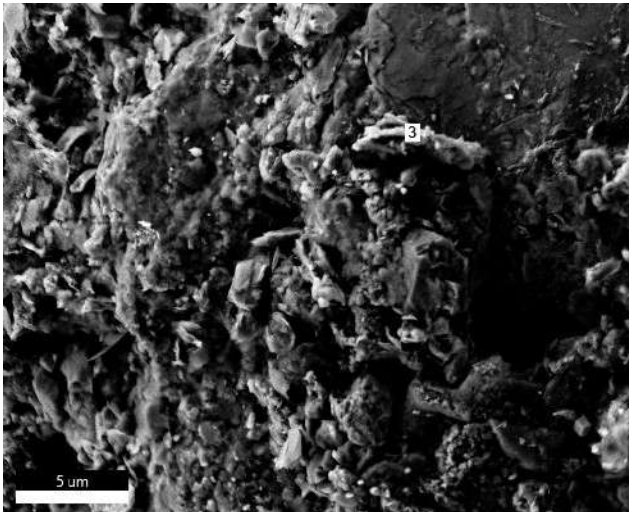
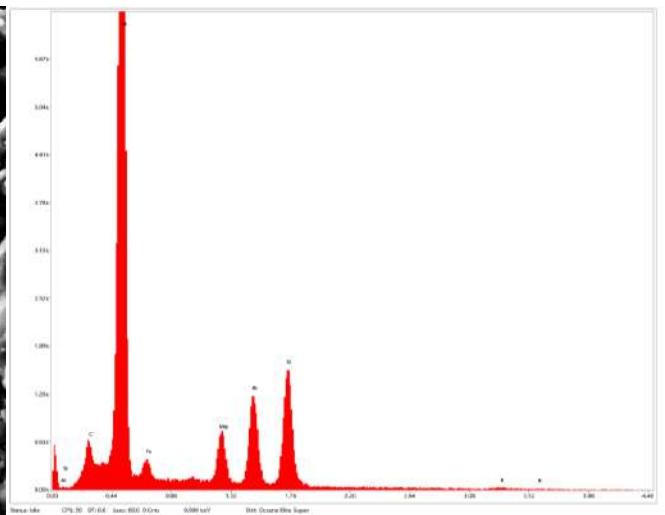
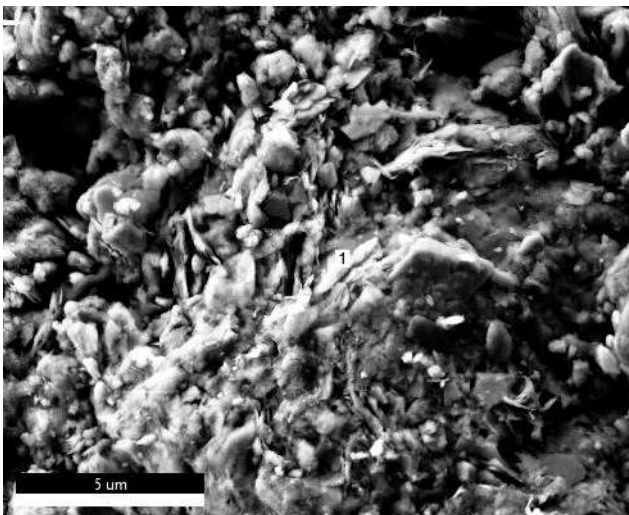


Figure III. 28. MEB/EDX des BWBA conservées en milieu ambiant, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours.

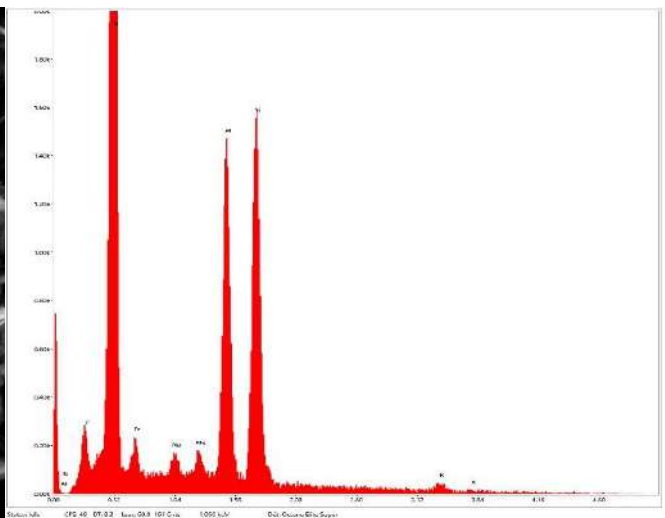
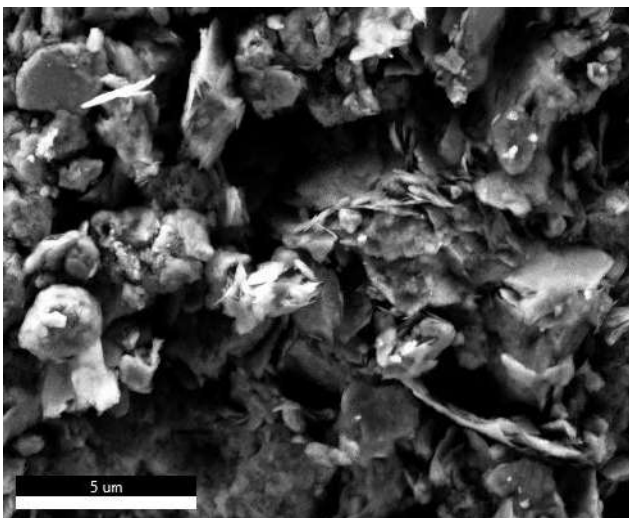
(a)



(b)



(c)



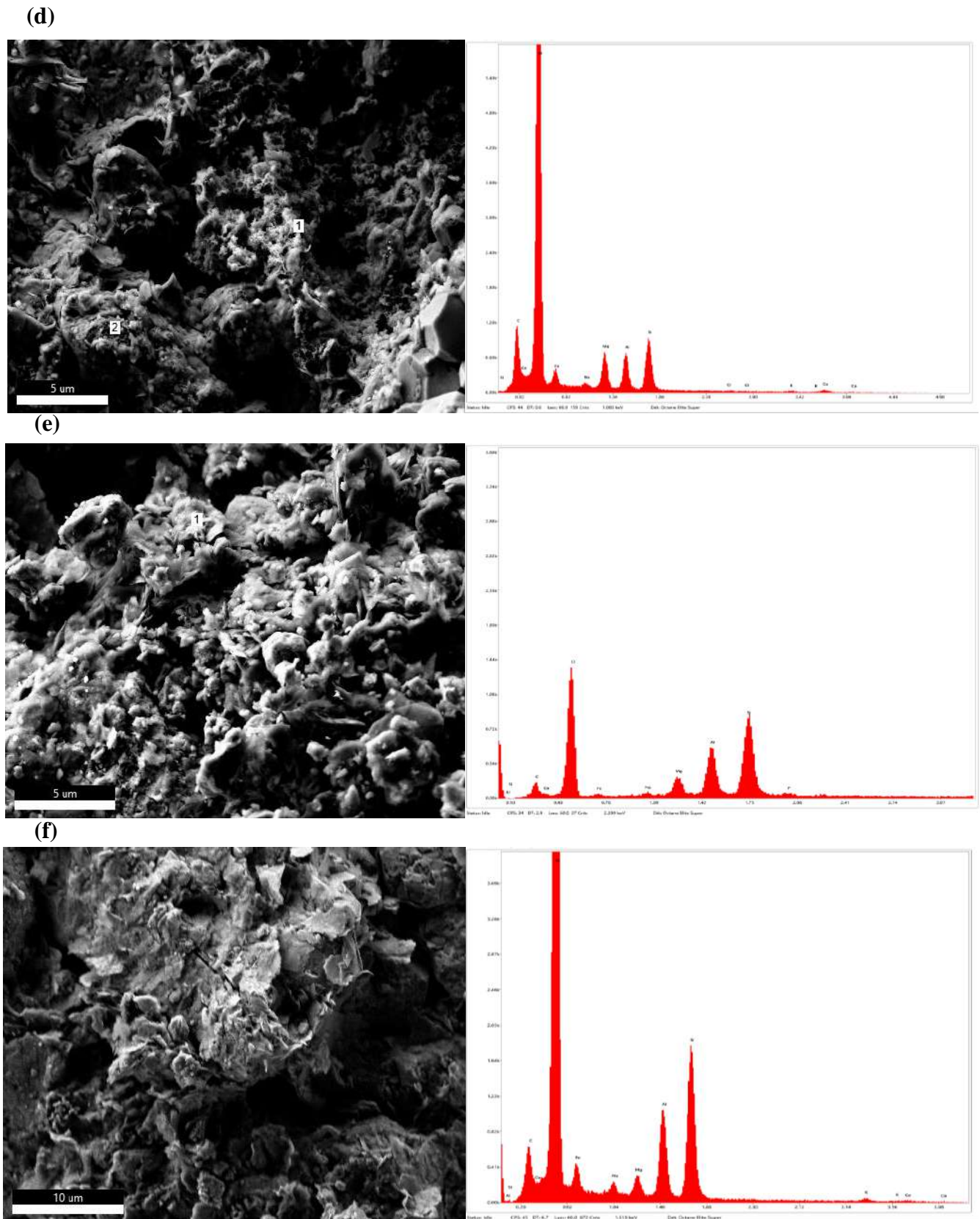
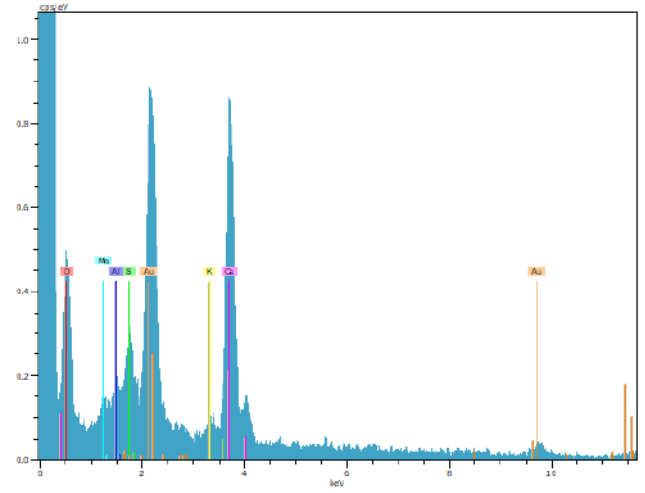
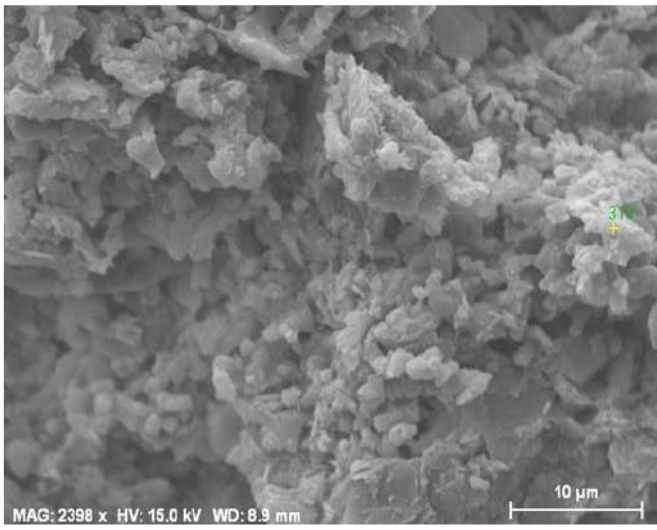
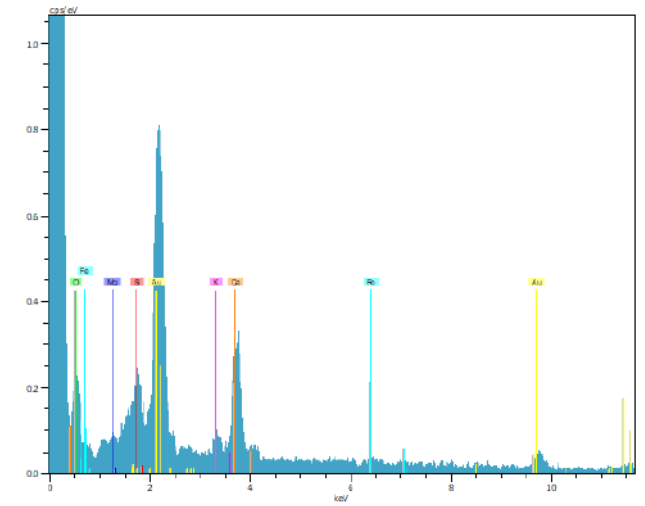
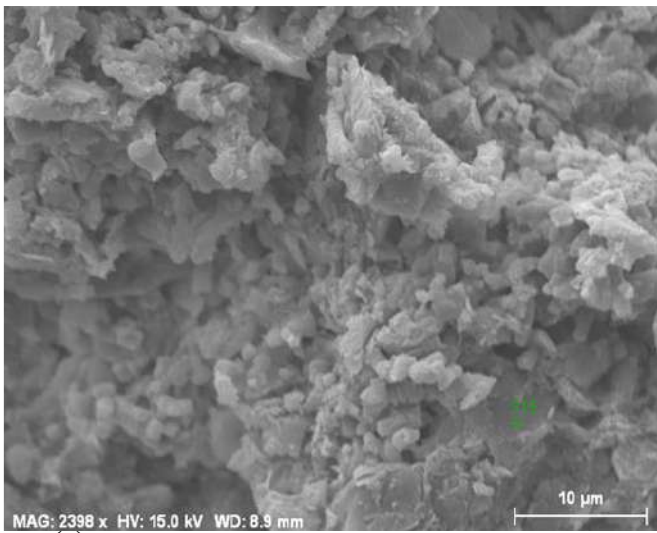


Figure III. 29. MEB/EDX des BWBA conservées en milieu hermétique, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours.

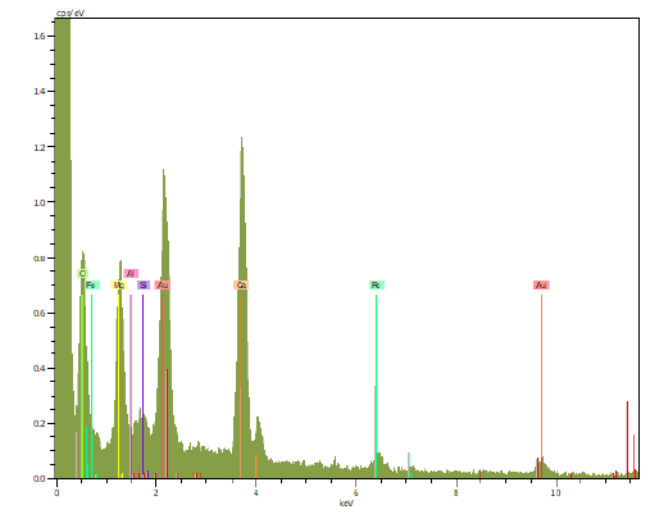
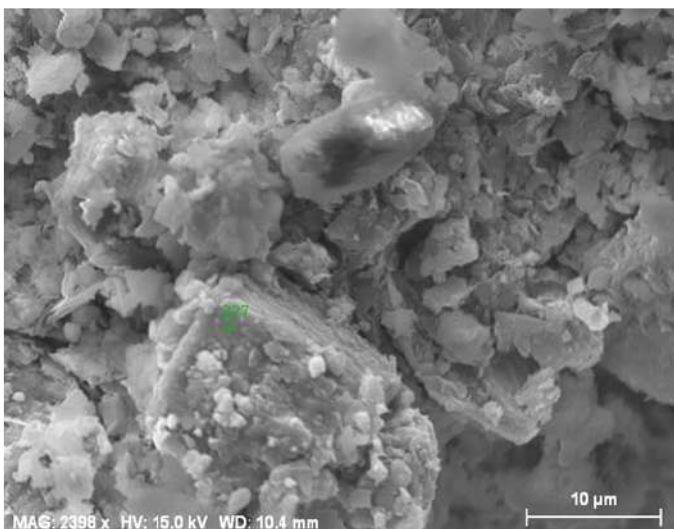
(a)



(b)



(c)



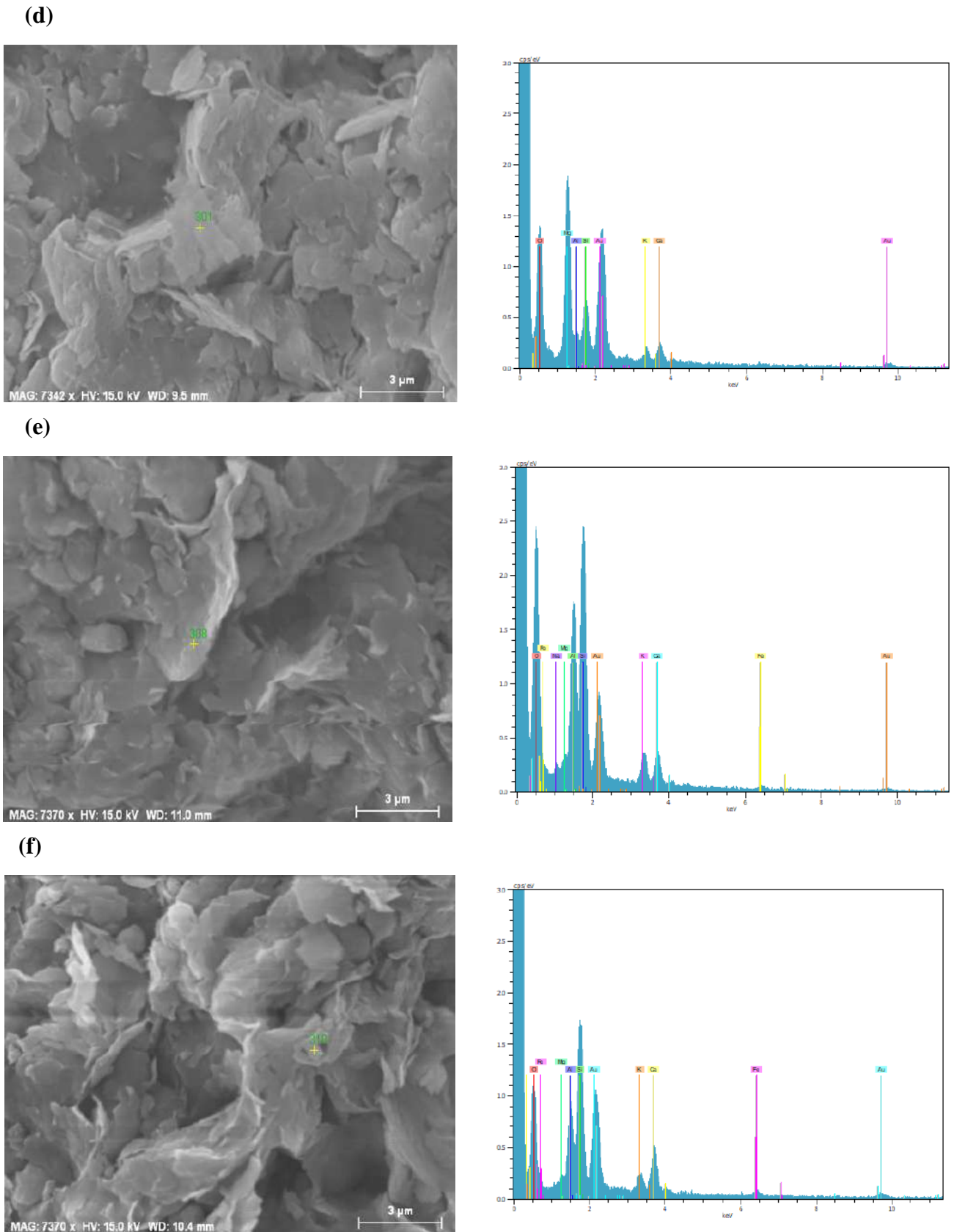


Figure III. 30. MEB/EDX des BWBA conservées en milieu hydrothermique, (a, b, c) BWBAa(20%) à 28, 60 et 180 jours, (d, e, f) BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours.

III.3.8. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) des BWBA(20%)

Des essais d'analyse thermogravimétrique ont été réalisés sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées dans des conditions ambiantes, hermétiques et hygrothermiques, après 28, 60 et 180 jours. Ces analyses thermogravimétriques apportent des informations détaillées sur les différentes transformations physico-chimiques et réactions se produisant au sein des briques en terre stabilisées aux cendres de bois lors de leur chauffage, en relation avec leur composition minéralogique initiale.

Les **Figures III.31, III.32 et III.33** présentent les résultats de l'analyse thermique de ces briques à 28, 60 et 180 jours. Ces courbes thermogravimétriques mettent en évidence principalement trois pics distincts:

- Un premier pic en dessous de 100°C, correspondant au départ d'eau d'hydratation [30, 134, 136, 137].
- Un deuxième pic dans la gamme de températures de 400°C à 600°C, attribué à deux phénomènes concomitants: la décomposition de la kaolinite et sa transformation en métakaolinite, ainsi que la déshydroxylation de la portlandite [135, 138-140].
- Une autre perte de masse observée entre 600°C et 800°C, résultant de la superposition de plusieurs processus: la réorganisation structurale de la métakaolinite, le début de la recombinaison et la cristallisation des composés céramiques en phase solide provoquant une nouvelle perte de masse, ainsi que la décomposition des carbonates de calcium avec libération de CO₂ [135, 138-140].
- De plus, les courbes des BWBAb(20%) présentent un pic supplémentaire dans la gamme 350-450°C, correspondant à la décomposition ou déshydroxylation de la brucite Mg(OH)₂ [141-143].

Les analyses thermogravimétriques des briques BWBA(20%) conservées dans différents milieux ont permis d'observer les pertes de masse dans plusieurs plages de températures en fonction du temps de cure (28, 60 et 180 jours), récapitulées dans le **Tableau III.1**. Ces pertes massiques importantes à hautes températures (supérieurs à 600°C) sont attribuées à la décomposition des carbonates et la libération de CO₂, confirmant leur formation qui peut affecter les propriétés des briques.

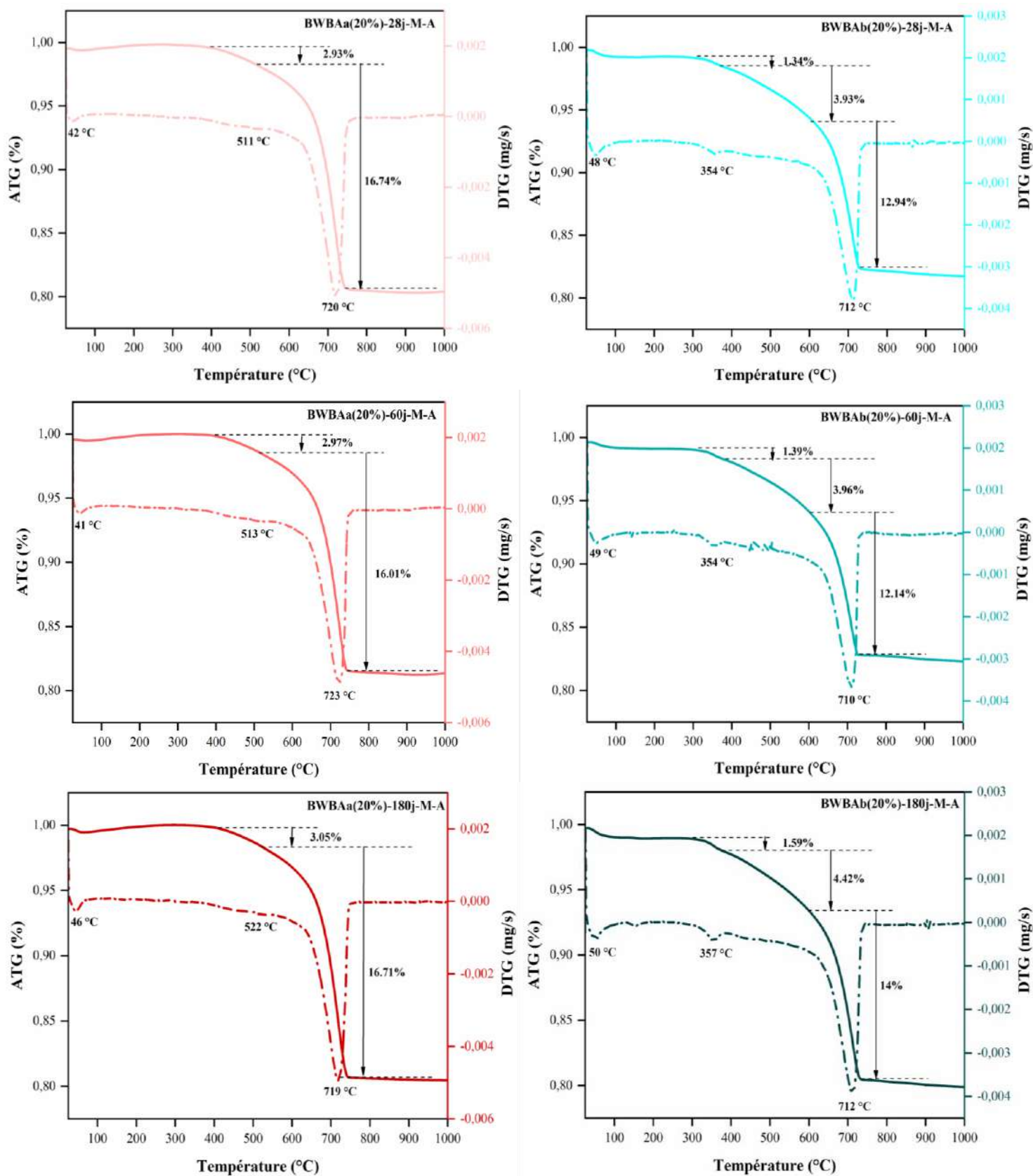


Figure III.31. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu ambiant à 28, 60 et 180 jours.

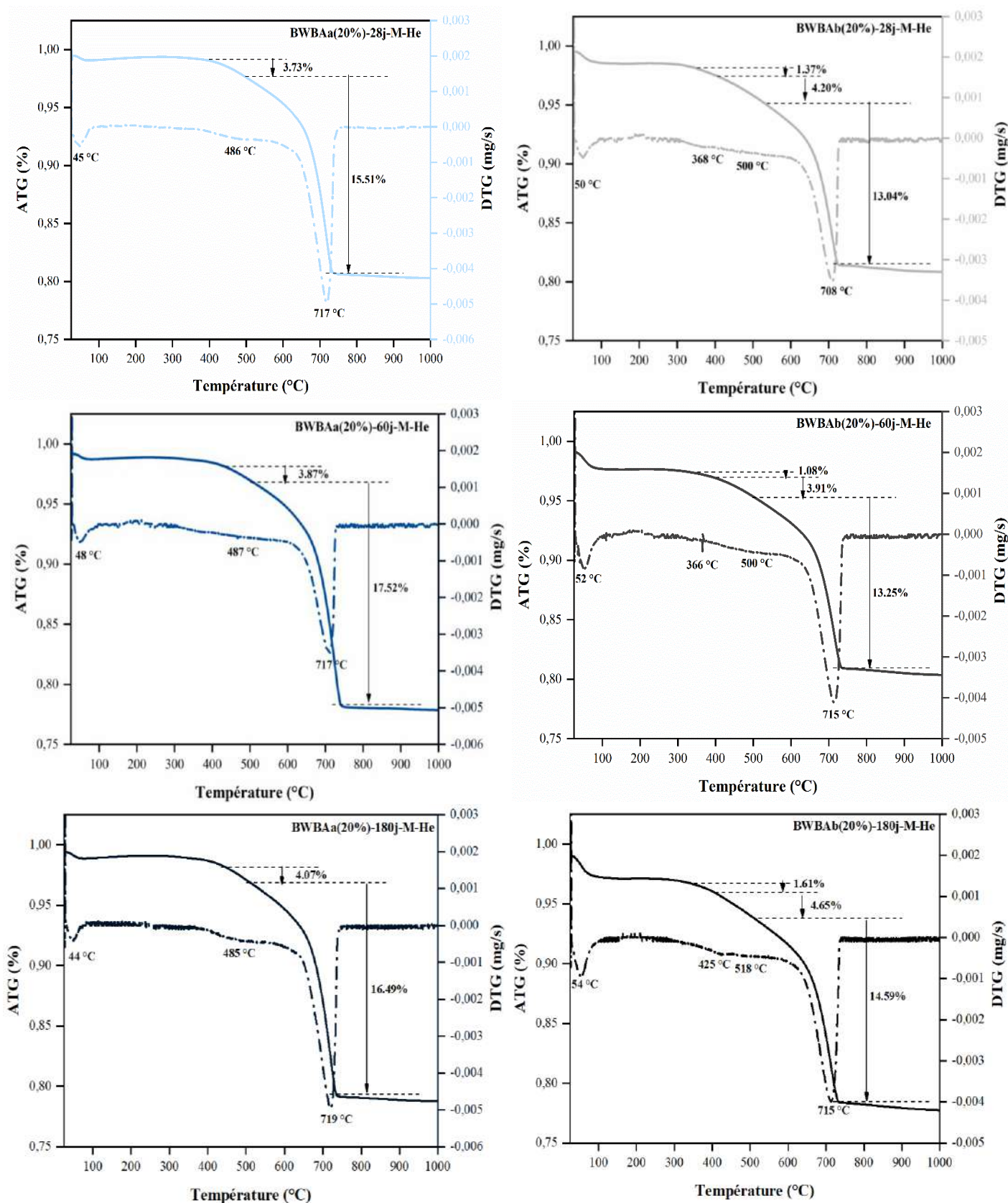


Figure III.32. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu hermétique à 28, 60 et 180 jours.

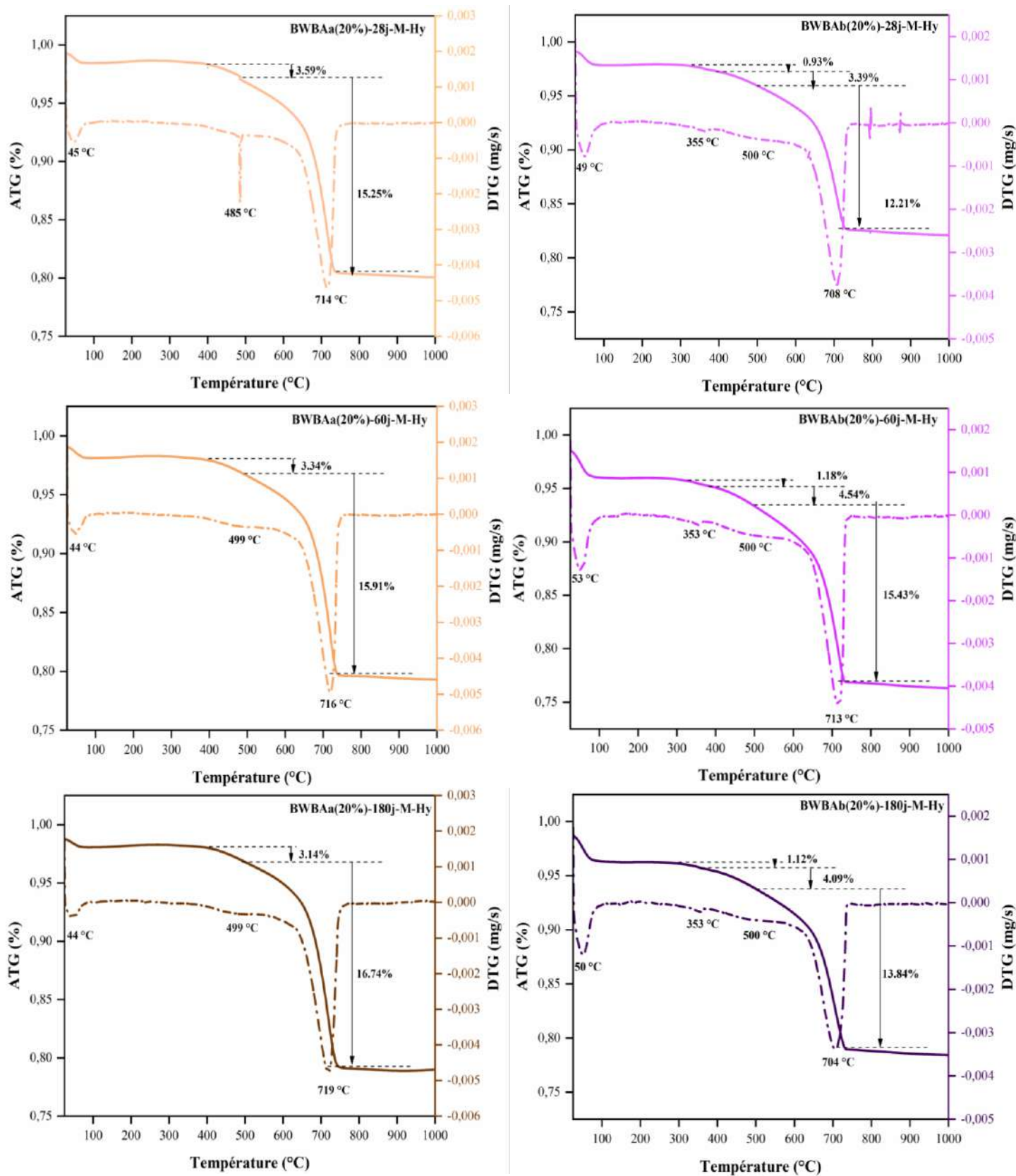


Figure III.33. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées en milieu hydrothermique à 28, 60 et 180 jours.

Tableau III.1. Récapitulatif des résultats de l'analyse thermogravimétrique des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) à 28, 60 et 180 jours, conservées dans des conditions ambiantes, hermétiques et hygrothermiques.

Plage de température	350-450°C	400-600°C	600-800°C
Milieu ambiant (M-A)			
BWBAa(20%)-28j	/	2.93%	16.74%
BWBAa(20%)-60j	/	2.97%	16.01%
BWBAa(20%)-180j	/	3.05%	16.71%
BWBAb(20%)-28j	1.34%	3.93%	12.94%
BWBAb(20%)-60j	1.39%	3.96%	12.14%
BWBAb(20%)-180j	1.59%	4.42%	14%
Milieu hermétique (M-He)			
BWBAa(20%)-28j	/	3.73%	15.51%
BWBAa(20%)-60j	/	3.87%	17.52%
BWBAa(20%)-180j	/	4.07%	16.49%
BWBAb(20%)-28j	1.37%	4.20%	13.04%
BWBAb(20%)-60j	1.08%	3.91%	13.25%
BWBAb(20%)-180j	1.61%	4.65%	14.59%
Milieu hygrothermique (M-Hy)			
BWBAa(20%)-28j	/	3.59%	15.25%
BWBAa(20%)-60j	/	3.34%	15.91%
BWBAa(20%)-180j	/	3.14%	16.74%
BWBAb(20%)-28j	0.93%	3.39%	12.21%
BWBAb(20%)-60j	1.18%	4.54%	15.43%
BWBAb(20%)-180j	1.12%	4.09%	13.84%

III.3.8.1. Calcul des pourcentages de calcite (CaCO_3), de portlandite (Ca(OH)_2) et de brucite (Mg(OH)_2)

La **Figure III.34** présente les pourcentages de calcite (CaCO_3), portlandite (Ca(OH)_2) et brucite (Mg(OH)_2) dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de conservation dans différents milieux (ambient, hermétique et hygrothermique).

Les résultats montrent que:

- Le pourcentage de portlandite est nettement plus élevé dans les BWBAb(20%) par rapport aux BWBAa(20%), indiquant une plus forte teneur en chaux (CaO) et/ou hydroxyde de calcium dans les matières premières des BWBAb.
- À l'inverse, le pourcentage de calcite est plus important dans les BWBAa(20%) que dans les BWBAb(20%), dû à la présence de chaux dans les matières premières des BWBAa.
- Les BWBAb(20%) contiennent des pourcentages modérés de brucite, variables selon le temps et le milieu de conservation. Cela provient de l'utilisation de WBAb contenant de l'oxyde de magnésium (MgO).

En milieu ambient, la formation de calcite augmente dans les BWBA(20%) entre 60 et 180 jours, ce qui est cohérent avec la diminution des résistances mécaniques et l'augmentation des propriétés thermiques. De plus, dans les BWBAb(20%), la formation continue de brucite de 28 à 180 jours contribue à la baisse des résistances des briques.

En milieu hermétique, la diminution du pourcentage de calcite entre 60 et 180 jours dans les BWBAa(20%) explique l'augmentation de la résistance mécanique, car cette calcite a été utilisée dans les réactions pouzzolaniques, contrairement aux BWBAb(20%). De plus, l'augmentation du taux de calcite et de brucite formées dans ces dernières confirme leur faible gain de résistance mécanique.

En milieu hygrothermique, l'augmentation du taux de calcite produite dans les BWBAa de 28 à 180 jours confirme leur faible évolution des résistances mécaniques. En revanche, pour les BWBAb(20%), leurs taux de calcite et de brucite augmentent de 28 à 60 jours, ce qui explique la faible augmentation de leur résistance sur cette période. Puis, de 60 à 180 jours, la diminution de ces taux signifie un retour aux réactions pouzzolaniques et justifie la résistance maximale à la compression de 33.34 MPa à 180 jours.

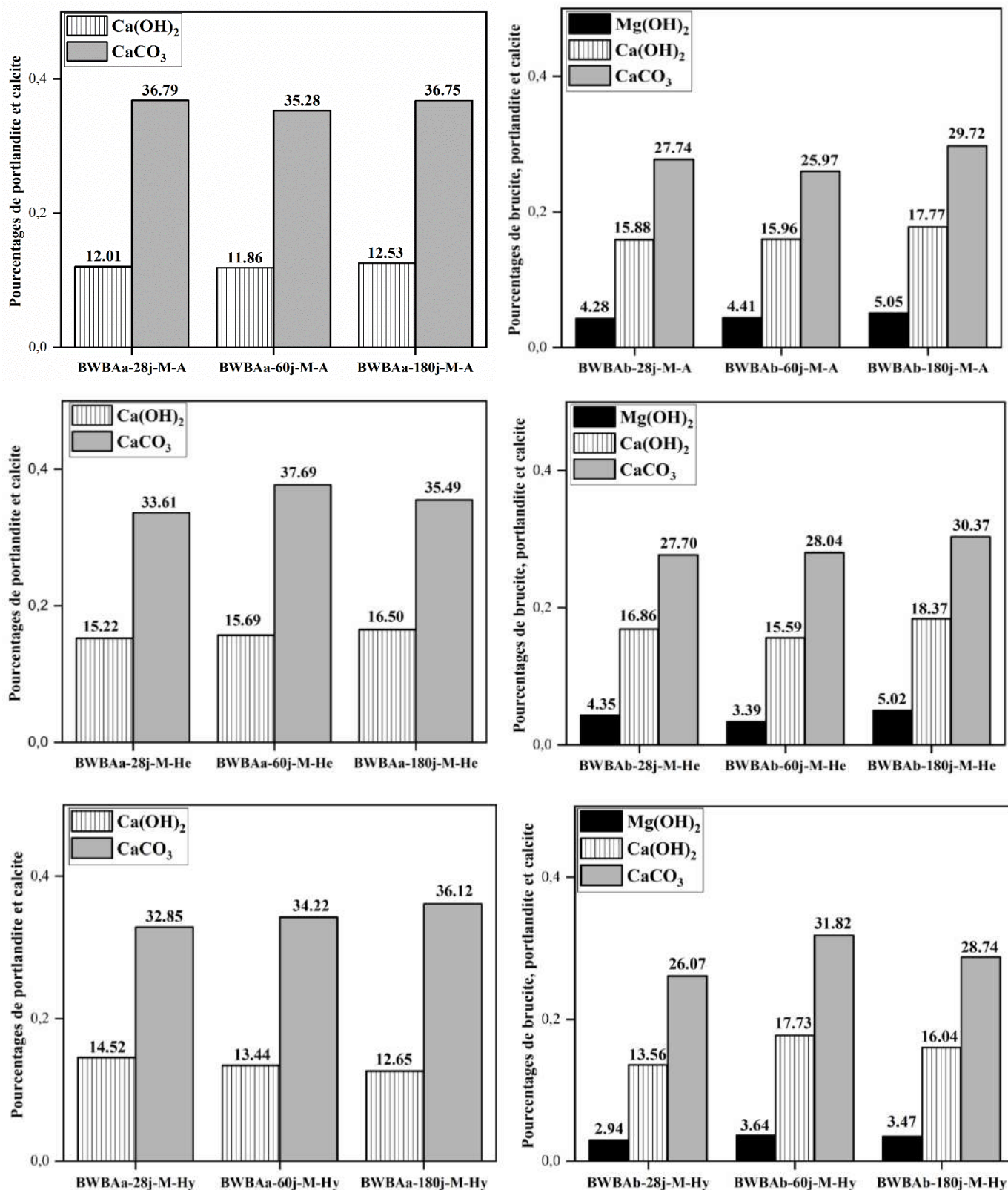


Figure III.34. Résultats des pourcentages de $Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ et $CaCO_3$ contenus dans les BWBA(20%) après 28, 60 et 180 jours dans les différents milieux de conservations.

III.3.9. Suivi du processus d'hydratation par microcalorimétrie isotherme

Les essais de microcalorimétrie ont été réalisés sur des mélanges de terre et de cendres (WBAA et WBAb) à différentes teneurs (0%, 10% et 20%), représentant les compositions des briques BWBA. Les mesures ont été effectuées pendant 4 jours, avec une teneur en eau optimale initiale pour le milieu ambiant. Pour les milieux hermétique et hygrothermique, un même rapport d'eau supplémentaire par rapport à l'optimum a été ajouté.

Les **Figures III.35** et **III.36** présentent les courbes d'évolution du flux de chaleur obtenues par microcalorimétrie isotherme à 20°C pendant 1 heure, après préparation des mélanges à l'extérieur du calorimètre.

En milieu ambiant, le flux maximal est observé pour la terre seule, probablement dû à la solubilité élevée des oxydes Al_2O_3 , SiO_2 et CaO présents issus de sa composition minéralogique riche en argiles comme la kaolinite et la muscovite. Ces oxydes peuvent former des hydrates en libérant de la chaleur [180]. Viennent ensuite les mélanges à 10% de cendres WBAA, avec une intensité de flux de chaleur presque égale à celle de la terre seule. Ceci est lié à la composition différente des WBAA qui sont riches en chaux, et la terre est riche en kaolinite et muscovite. Cette combinaison favorise probablement davantage les réactions d'hydratation et de dissolution, dégageant ainsi une chaleur proche de celle de la terre seule. Pour les mélanges à 10% de cendres WBAb, l'intensité est largement inférieure, probablement en raison de leur composition différente des WBAA. Enfin, les intensités de flux de chaleur les plus faibles sont observées pour les mélanges à 20% de cendres, quelle que soit la nature des cendres WBAA ou WBAb.

En milieux hermétique et hygrothermique (teneurs en eau plus élevées), le flux maximal provient des mélanges avec 20% de WBAb. Ceci peut s'expliquer par la teneur plus importante en chaux (CaO) et oxyde de magnésium (MgO) dans les WBAb par rapport aux WBAA. En présence d'une plus grande quantité d'eau, ces composés réagissent plus intensément, libérant davantage de chaleur par des réactions d'hydratation [193].

D'après ces résultats, le flux thermique et la chaleur d'hydratation sont influencés par plusieurs facteurs; la nature des cendres, leur teneur dans les mélanges, ainsi que la quantité d'eau disponible influencent les réactions d'hydratation/dissolution et le dégagement de chaleur associé. Les différences observées mettent en évidence l'impact de la composition des matières premières et du milieu de conservation sur le comportement des mélanges terre-cendres.

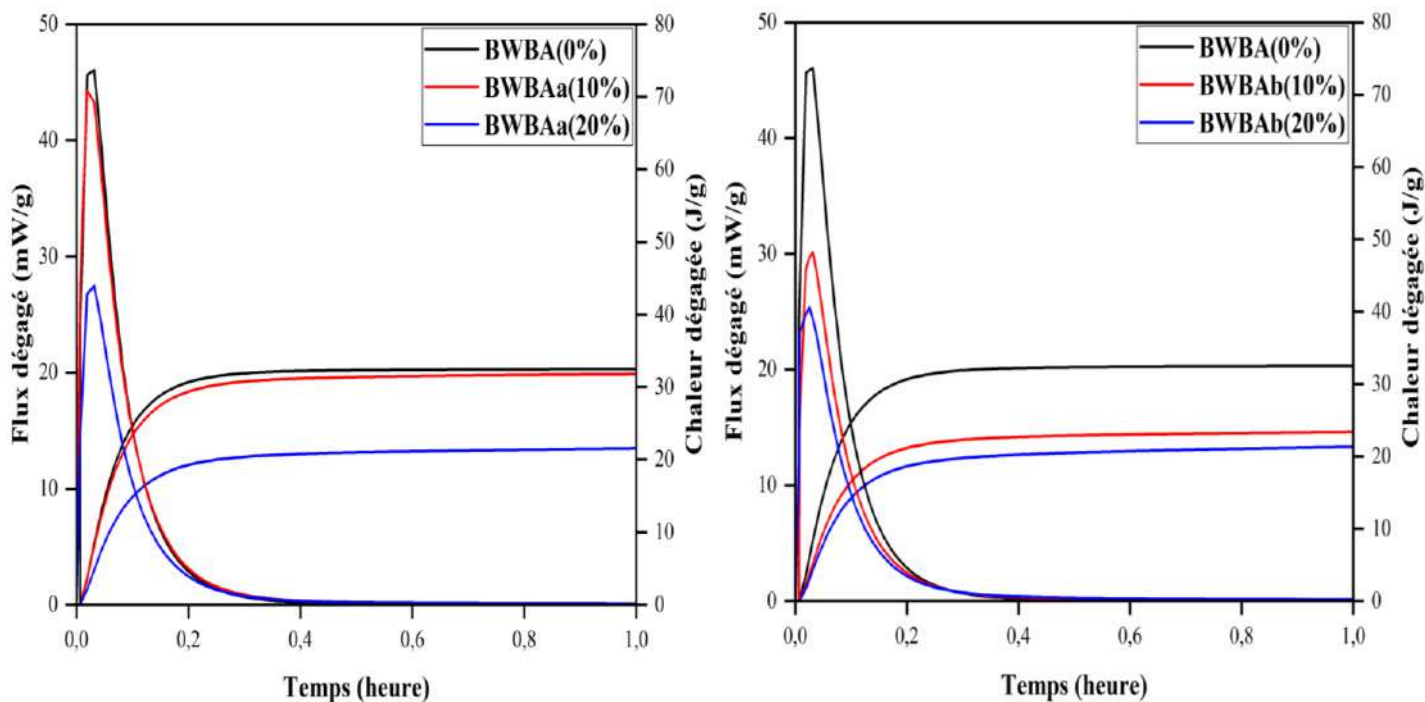


Figure III.35. Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres de bois (conditions ambiantes).

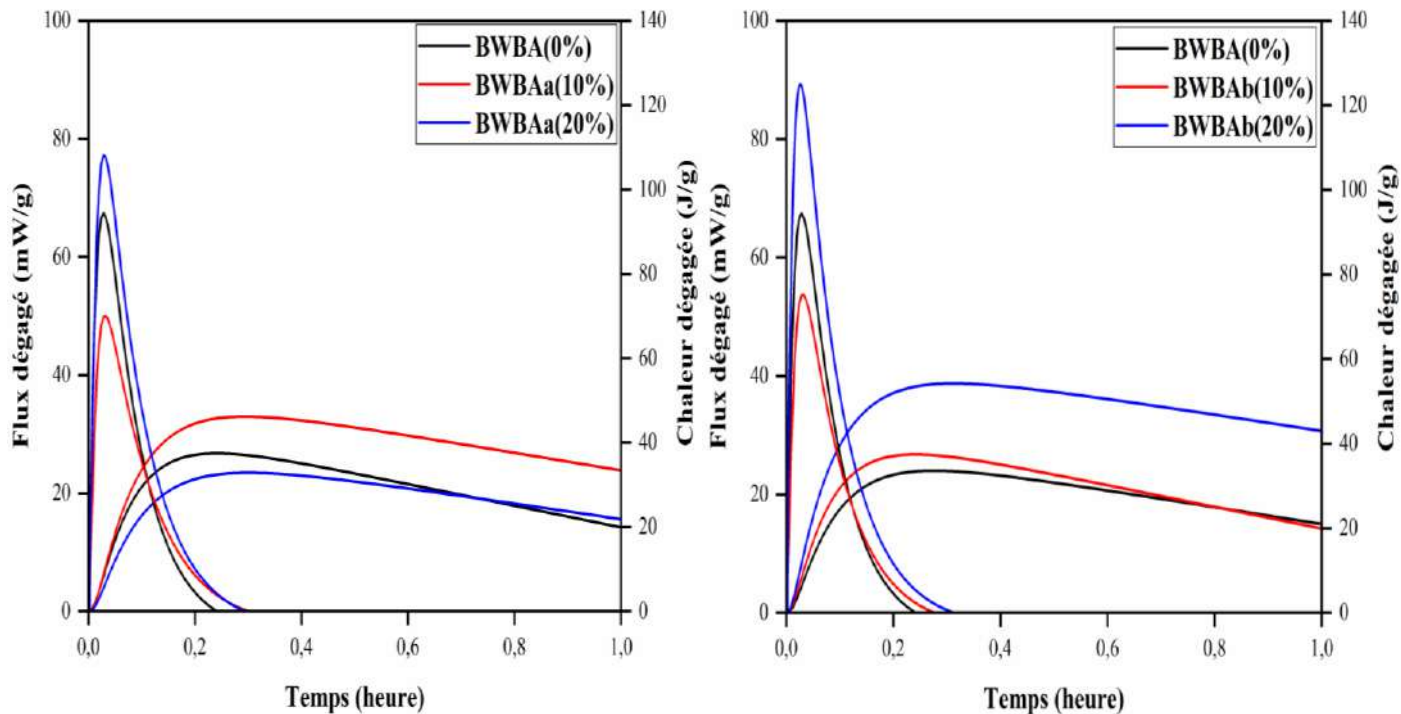


Figure III.36. Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres de bois (conditions hermétiques et hygrothermiques).

III.3.10. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%)

Les Figures III.37, III.38 et III.39 montrent les variations du pH des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de conservation dans différents milieux (ambient, hermétique et hygrothermique). Le pH, indiquant l'acidité ou la basicité, est utilisé comme indicateur pour suivre les réactions chimiques dans ces mélanges terre-cendres.

En milieu ambient:

- Pour les BWBAa(20%), le pH augmente de 11.92 à 12.24 entre 28 et 180 jours, probablement dû à la carbonatation formant de la calcite à long terme, ce qui réduit leurs résistances mécaniques [194].
- Pour les BWBAb(20%), le pH diminue légèrement de 11.16 à 10.96 entre 28 et 180 jours, cohérent avec la baisse des résistances observée. Ces variations sont liées aux résistances maximales: BWBAa(20%) à 60 jours et BWBAb(20%) à 28 jours. Un pH élevé favorise les réactions d'hydratation mais un excès peut être néfaste [195].

En milieux hermétique et hygrothermique:

- Pour les BWBAa(20%), le pH diminue de 28 à 60 jours (10.96 à 9.92 en hermétique et 11.44 à 11.32 en hygrothermique), puis remonte légèrement à 180 jours (9,93 et 11,41), cohérent avec les meilleures résistances obtenues.
- Pour les BWBAb(20%) en milieu hermétique, le pH diminue jusqu'à 10.43 à 180 jours, pouvant expliquer les moins bonnes performances à long terme par rapport aux BWBAa(20%).
- Cependant, en milieu hygrothermique, malgré une baisse à 10.44 à 180 jours, les BWBAb(20%) donnent les meilleures résistances. Un pH >10 reste favorable aux réactions d'hydratation [201]. Selon Rahhal et Talero (2008) [196], un milieu de cure humide accélère les réactions pouzzolaniques, améliorant les résistances à long terme. La réactivité pouzzolanique des cendres de bois dépend de leur composition influençant les résistances en fonction du pH et du milieu [197].

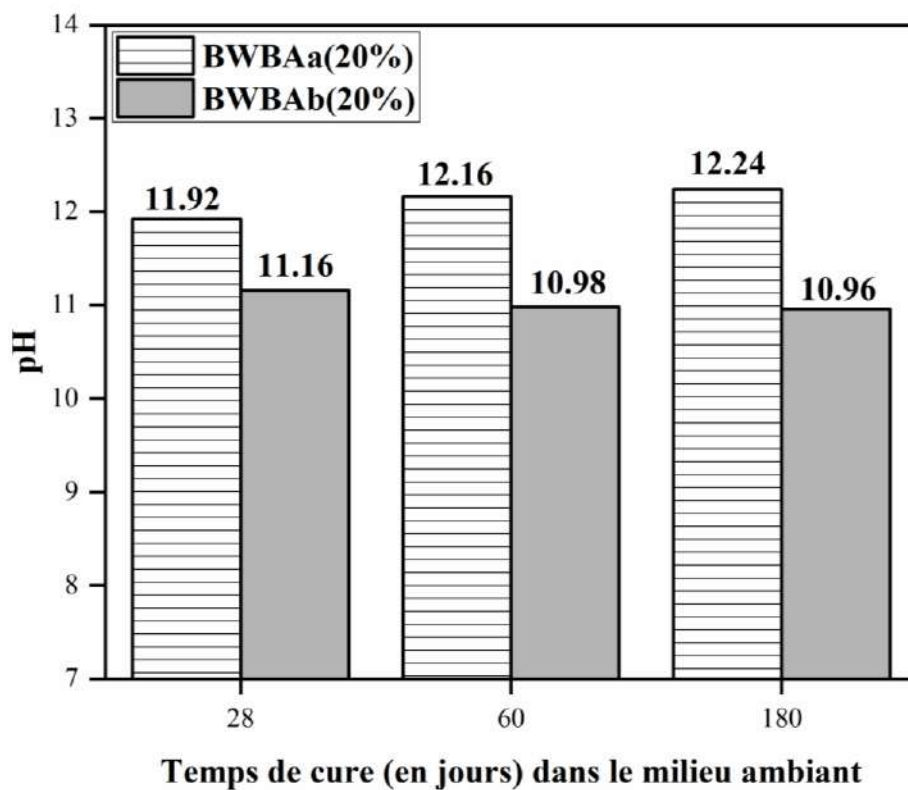


Figure III.37. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu ambiant pendant 28, 60 et 180 jours.

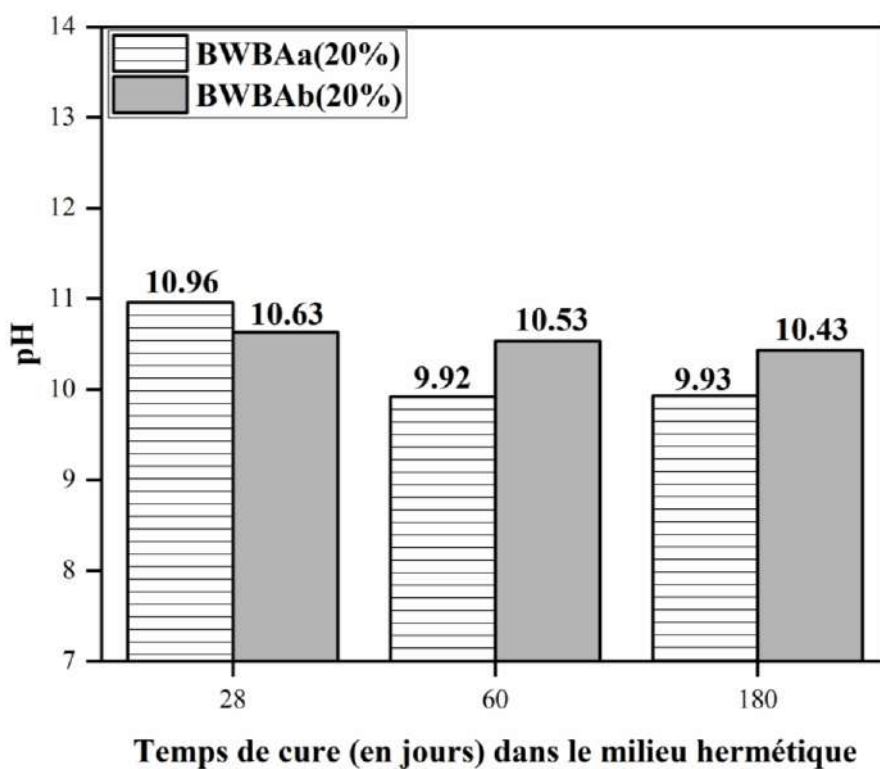


Figure III.38. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu hermétique pendant 28, 60 et 180 jours.

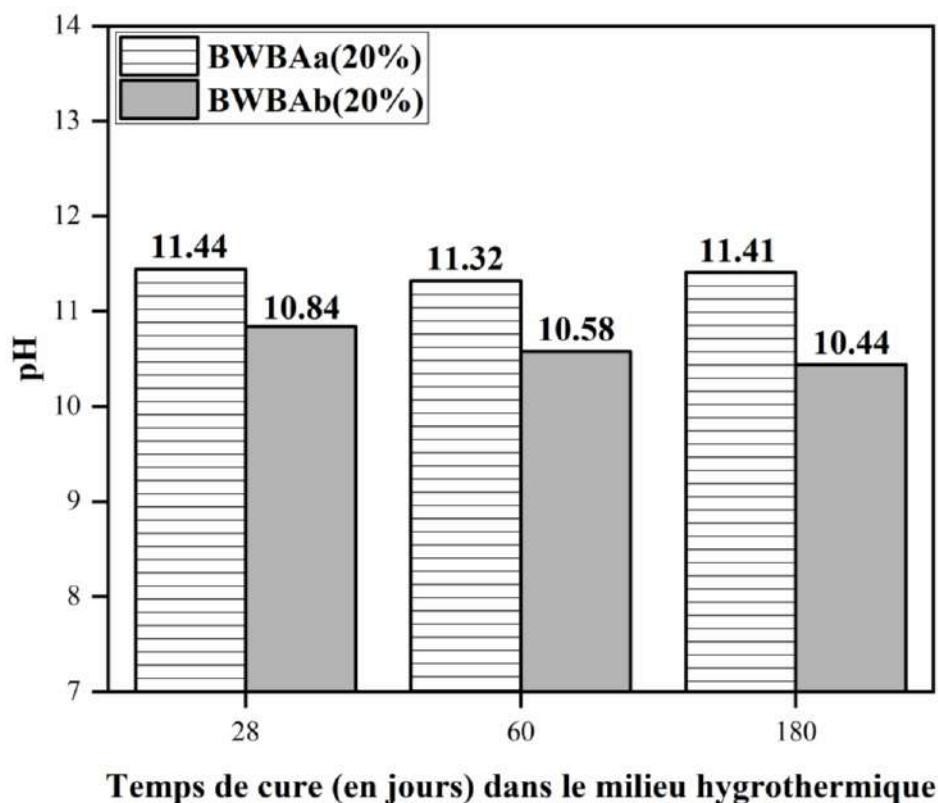


Figure III.39. Variation du pH des BWBA(20%) conservées en milieu hygrothermique pendant 28, 60 et 180 jours.

III.3.11. Porosimétrie par intrusion de mercure

Afin de caractériser la structure porale des briques, des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été menés sur les échantillons BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 180 jours de conservation dans des conditions ambiantes, hermétiques et hygrothermiques. Cette technique fournit des informations détaillées sur la distribution de la taille des pores et leur volume total, permettant ainsi de déterminer les caractéristiques poreuses comme la distribution granulométrique des pores, la surface spécifique et le volume poreux total. Les **Figures III.40, III.41 et III.42** illustrent les résultats obtenus pour ces briques à 180 jours.

Les courbes révèlent principalement deux modes distincts de distribution granulaire de forme bimodale. Les BWBA présentent un premier pic entre 30 et 300 nm correspondant à la faible classe granulaire, et un second pic majeur entre 300 et 2000 nm, représentant la porosité au mercure la plus importante.

Après 180 jours de conservation en conditions ambiante et hygrothermique, les BWBAa(20%) affichent une teneur en pores supérieure aux BWBAb(20%). En milieu

ambient et hygrothermique, cette différence est nettement plus marquée, avec une quantité de pores significativement plus élevée pour les BWBAa. Cependant, en milieu hermétique, les teneurs en pores sont quasi similaires, la seule distinction étant un décalage de la distribution vers les petits pores pour les BWBAa(20%) par rapport aux BWBAb(20%).

Les essais de porosité par intrusion de mercure réalisés après 180 jours de conservation en milieu ambient ont révélé un pic maximal situé vers 850 nm pour les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%), sans décalage observable entre les deux. Les BWBAa(20%) présentaient une distribution unimodale avec un seul pic maximal, ces résultats indiquent que les briques BWBA ont subi une carbonatation au contact du CO₂ atmosphérique, rendant leur matrice interne plus poreuse (**Figure III.31**). Ceci confirme la dégradation progressive des résistances mécaniques et l'augmentation de la conductivité thermique, entraînant une détérioration du confort thermique assuré par les briques à long terme (**Figure III.4 et III.7**).

En effet, l'exposition au CO₂ de l'air a provoqué une carbonatation responsable d'un accroissement de la porosité, comme l'atteste le pic élevé à 850 nm. Cette porosité accrue est associée à une chute des performances mécaniques, tandis que l'augmentation des propriétés thermiques conduit à une dégradation du confort thermique initial des briques. Ainsi, la carbonatation marquée en milieu ambient après 180 jours a engendré une matrice très poreuse, d'où la baisse conjointe des résistances mécaniques et thermiques, illustrée par le pic commun élevé aux BWBAa(20%) et BWBAb(20%).

Cependant, en milieu hermétique un comportement différent a été observé. Les BWBAb(20%) ont présenté un pic maximal vers 1000 nm, avec une porosité légèrement supérieure à celle des BWBAa(20%), ces dernières montrant un décalage du pic vers les petits pores, avec un maximum à 750 nm. Cela confirme l'augmentation des résistances mécaniques à long terme (60 et 180 jours) pour les BWBAa(20%) par rapport aux BWBAb(20%).

Cette différence de comportement en milieu hermétique provient de la limitation de la carbonatation grâce à l'absence de CO₂. Ainsi, pour les BWBAb(20%), le pic à 1000 nm traduit une porosité réduite sans carbonatation. Pour les BWBAa(20%), le décalage vers 750 nm suggère une meilleure densification et un affinement de la microstructure. Leur porosité légèrement inférieure par rapport aux BWBAb(20%) est cohérente avec leurs meilleures résistances mécaniques à long terme. L'environnement hermétique prévient donc la carbonatation néfaste, permettant une densification et une microstructure améliorée des

BWBAA(20%), d'où leurs performances mécaniques accrues. Les BWBAb(20%) bénéficient aussi d'une moindre porosité, mais dans une moindre mesure que les BWBAA(20%).

En milieu hygrothermique, une différence notable a été observée dans la distribution porale entre les BWBAA(20%) et les BWBAb(20%). Le pic maximal était supérieur pour les BWBAA(20%), indiquant une porosité globale plus élevée pour cette formulation comparée au BWBAb(20%). Cette distinction pourrait s'expliquer par une sensibilité différente à l'humidité du milieu entre les deux types de cendres de bois utilisées, impactant ainsi différemment leur microstructure respective.

De plus, les BWBAA(20%) et BWBAb(20%) ont toutes les deux développé dans ce milieu une distribution trimodale des pores, avec trois pics sans décalage observable entre les deux briques, le pic maximal étant obtenu vers 1500 nm. Cette forme suggère une microstructure plus hétérogène, présentant une large gamme de tailles de pores. Cette hétérogénéité pourrait résulter d'interactions complexes entre l'humidité du milieu et les composés spécifiques présents dans ces cendres, conduisant à différents mécanismes de formation des pores. Ces résultats corroborent également les performances mécaniques maximales obtenues pour les BWBAb(20%) après 180 jours dans ces conditions hygrothermiques.

En revanche, les propriétés intrinsèques des deux types de cendres aient réagi différemment à l'environnement hygrothermique, influençant de manière contrastée la formation et la distribution des pores au sein de leur microstructure. Cela s'est traduit par une porosité supérieure pour les BWBAA(20%), tandis que les BWBAA(20%) et BWBAb(20%) ont toutes les deux formé une matrice plus hétérogène avec une large distribution de tailles de pores.

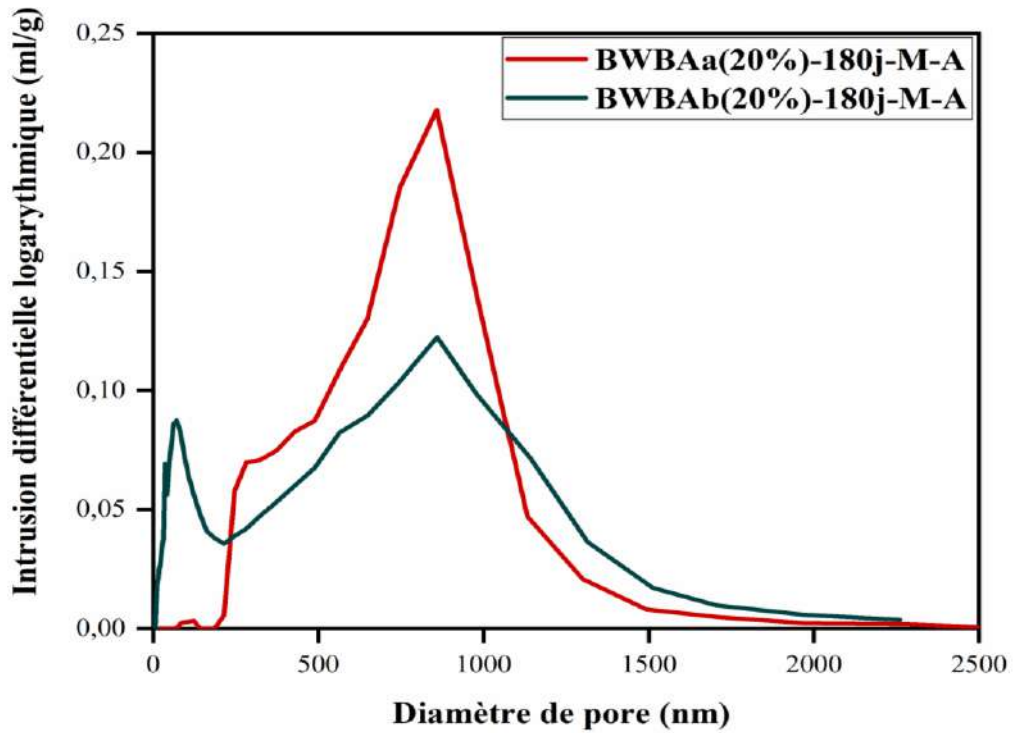


Figure III.40. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu ambiant après 180 jours.

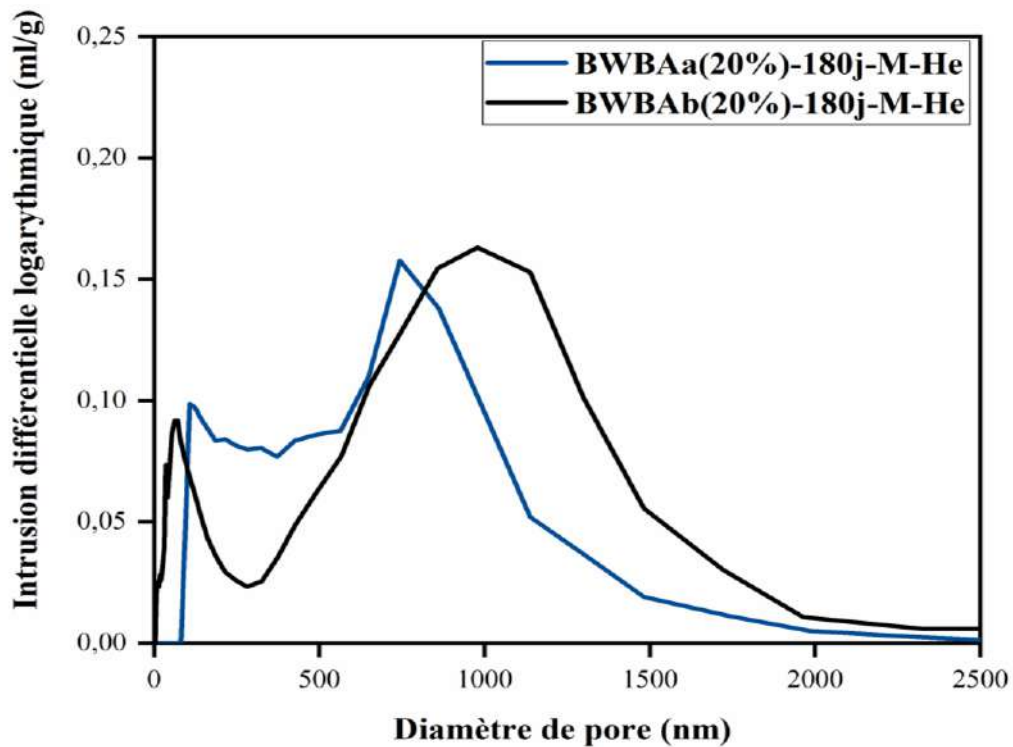


Figure III.41. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hermétique après 180 jours.

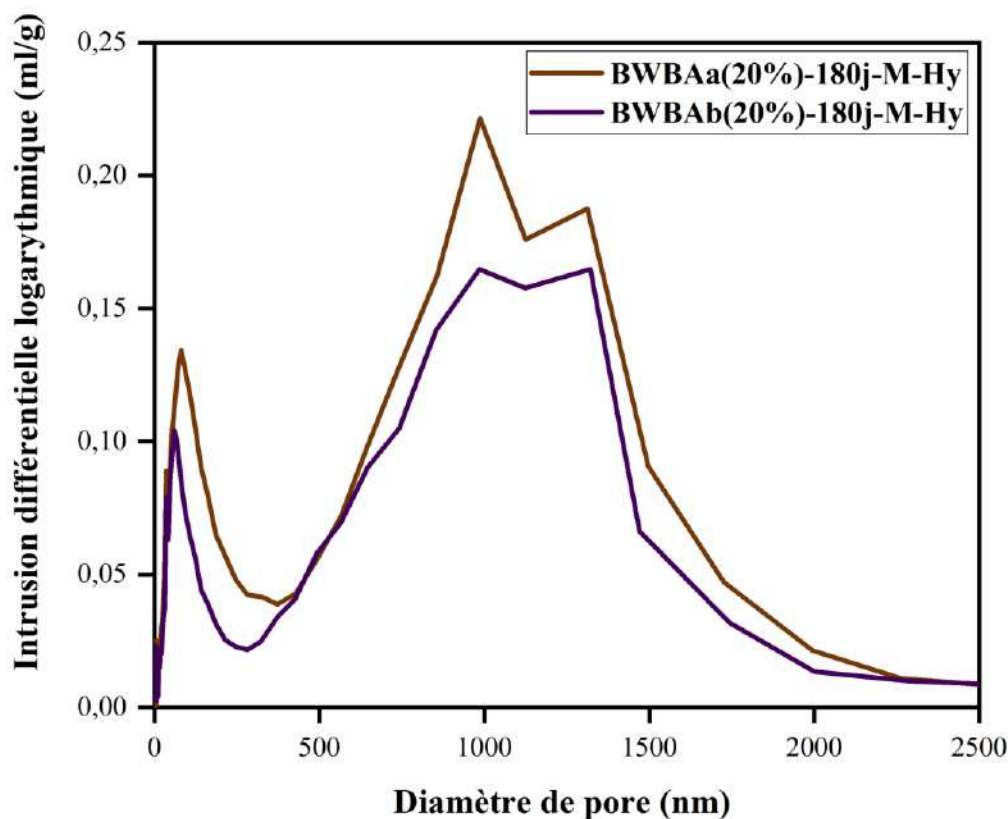


Figure III.42. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées en milieu hygrothermique après 180 jours.

III.4. Conclusion

Cette étude a examiné l'impact de l'utilisation de deux types de cendres de biomasse issues principalement de la combustion du bois domestique, comme substituants partiels d'une terre limono-argileuse déconseillée, sur les propriétés mécaniques, thermiques et la durabilité des briques en terre comprimée. Les briques ont été conservées pendant 7, 28, 60 et 180 jours dans trois environnements différents : ambiant, hermétique et hygrothermique.

Les principales conclusions sont :

- L'utilisation des cendres de biomasse contribue à réduire les déchets et les émissions de CO₂, s'inscrivant dans une démarche de développement durable visant à valoriser les ressources locales renouvelables.
- Les briques contenant 20% de cendres présentent de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure durabilité, les cendres comblant les vides et réduisant la porosité.

- La résistance mécanique augmente avec la teneur en cendres et la durée de conservation, avec des performances optimales après 180 jours en milieu hermétique et hygrothermique.
- Le milieu hygrothermique confère aux briques une meilleure résistance mécanique, conductivité thermique et résistance à la capillarité que les milieux ambiant et hermétique.
- La substitution par les cendres WBA_b (5 à 20% en poids) accroît les résistances à la compression et à la flexion, avec un maximum à 28 jours en milieu ambiant et 180 jours en hygrothermique, grâce à la densification et aux réactions pouzzolaniques. En milieu hermétique, ce sont les BWBA_a(20%) qui atteignent les meilleures résistances.
- La conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique des BWBA_a(20%) diminue avec le temps dans un milieu ambiant, hermétique et hygrothermique en raison de la faible densité des WBA_a comparativement au BWBA_a(20%).
- La baisse du coefficient de capillarité dans le temps indique une meilleure durabilité par densification de la structure interne des BWBA.
- La densité apparente des briques diminue avec l'ajout croissant de cendres, en raison de la faible densité relative des WBA.
- Les compositions chimiques et minéralogiques différenciées des deux types de cendres engendrent des réactions distinctes au sein des briques.
- Les analyses par diffraction des rayons X ont confirmé la consommation de la chaux, de l'oxyde de magnésium et de la portlandite présents dans les cendres de biomasse grâce aux réactions pouzzolaniques.
- Les observations par microscopie électronique à balayage (MEB) et analyses MEB/EDX ont mis en évidence la formation de produits liants issus des réactions pouzzolaniques, se traduisant par le développement d'une microstructure dense et consolidée au sein de ces briques en terre stabilisées aux cendres de bois.
- Les analyses thermogravimétriques ont fourni des informations détaillées sur les différentes transformations physicochimiques et réactions se produisant dans les briques en terre stabilisées lors de leur chauffage, en lien avec leur composition minéralogique initiale, confirmant ainsi les résultats mécaniques et thermiques obtenus en fonction du temps et du milieu de conservation.
- Le suivi du processus d'hydratation des mélanges terre-cendres par microcalorimétrie isotherme a mis en évidence l'impact de la composition des cendres de bois et du

milieu de conservation (ambient, hermétique et hygrothermique) sur le comportement de ces mélanges en termes de flux thermique et de chaleur d'hydratation dégagés.

- Le suivi des variations du pH dans les briques BWBA(20%) en fonction du temps et du milieu de conservation a révélé les avantages d'un pH basique pour les réactions chimiques dans les briques en terre, mais a également montré qu'un pH trop élevé peut être néfaste pour les performances des briques en terre comprimée.
- Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure après 180 jours de cure ont permis de mettre en évidence des différences notables de microstructure porale entre les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) en fonction du milieu de conservation.

En conclusion, l'utilisation des cendres de biomasse comme stabilisants physiques et chimiques dans les briques en terre comprimée, associée à un milieu hermétique et hygrothermique, améliore considérablement leurs propriétés mécaniques et leur durabilité à long terme. Ces cendres peuvent avantageusement remplacer le ciment Portland et la chaux, sources de pollution, dans la production de briques crues, offrant ainsi des matériaux de construction performants en termes de propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité.

Chapitre 4

Impact du milieu de conservation sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

IV.1. Introduction

D'après la littérature, des études expérimentales pour améliorer les performances des briques en terre comprimée stabilisées, en accordant une attention particulière au milieu de conservation, paramètre clé influençant l'hydratation des matériaux, sont nécessaires. L'utilisation des liants hydrauliques comme les ciments et la chaux nécessite une cure humide afin de conserver l'eau et permettre les réactions d'hydratation. Contrairement à certaines études qui ne réalisent aucune cure et laissent les éprouvettes sécher à l'air libre après confection comme recommandé pour les matériaux cimentaires classiques (cure de 28 jours à 20 °C et à une humidité relative HR > 95%), cette approche vise à maximiser les gains de résistances mécaniques, thermiques et durabilité des briques en terre comprimée.

L'objectif de cette approche est de produire des briques en terre crue non seulement esthétiques et bénéficiant d'une bonne inertie thermique, mais aussi de remédier à certaines de leurs lacunes intrinsèques: faibles résistances mécaniques, fissurations liées au retrait et sensibilité à l'eau. En contrôlant les conditions de cure, ces travaux visent à optimiser l'hydratation afin d'obtenir des briques en terre crue améliorées, conservant leurs atouts écologiques et économiques tout en palliant leurs déficiences en termes de tenue mécanique, de stabilité dimensionnelle et de durabilité.

Cette étude évalue l'effet de différentes conditions de cure sur les propriétés des briques stabilisées avec 5 à 20% de cendres de bois, comparées aux briques de références. Trois milieux ont été utilisés : ambiant (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), hermétique (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR) et hygrothermique (40 °C, 100% HR). L'objectif est d'assurer une hydratation complète en offrant les meilleures conditions aux réactions impliquant les cendres, tout en valorisant ces déchets de biomasse.

La conservation dans différents milieux variant la température ambiante et l'humidité relative vise à améliorer les performances et la durabilité des briques stabilisées aux cendres de bois, tout en réduisant leur impact environnemental. Ce chapitre analyse les résultats d'un programme expérimental étudiant le potentiel des cendres comme stabilisant pour des briques conservées pendant 7, 28, 60 et 180 jours dans trois milieux (ambiant, hermétique et hygrothermique). L'étude examine l'impact du mode et du temps de cure, ainsi que du milieu de conservation, sur les résistances mécaniques (flexion et compression), les propriétés thermiques (conductivité et capacité volumétrique), la durabilité, les variations de masse volumique/densité, la composition

minéralogique, le pH, les analyses DRX, MEB/EDX, ATG/DTG, microcalorimétrie et porosimétrie mercure en fonction du temps de cure et le milieu de conservation.

Cette étude met en lumière la complexité des processus de stabilisation des briques en terre par les cendres de bois, soulignant l'influence cruciale des conditions de cure et du temps sur le développement de leurs propriétés. Les analyses approfondies réalisées permettent une compréhension des mécanismes de stabilisation, ouvrant ainsi la voie à une optimisation des techniques de fabrication et de cure de ces matériaux alternatifs.

Les résultats obtenus démontrent l'importance d'une gestion précise des conditions de conservation pour maximiser les performances des briques en terre comprimée, qu'elles soient stabilisées ou non. Il paraît essentiel d'adapter les paramètres de cure en fonction de la composition spécifique des briques et de la durée de conservation envisagée.

Ces conditions favorisent une évolution continue et positive des propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec des cendres de bois, se traduisant par une amélioration globale des performances mécaniques, thermiques et de la durabilité. Ces observations ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des processus de fabrication et de cure de ces matériaux de construction écologiques.

Cette étude souligne l'importance d'une gestion minutieuse des conditions environnementales dans le développement de matériaux de construction durables et performants à base de terre. Elle contribue ainsi au développement de solutions constructives alternatives, en accord avec les principes de valorisation des ressources locales et de construction écologique, répondant aux enjeux actuels de durabilité dans le secteur du bâtiment.

IV.2. L'impact du milieu de conservations sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

IV.2.1. Propriétés mécaniques

IV.2.1.1. Résistances à la flexion

Les **Figures IV.1, IV.2, IV.3, et IV.4** illustrent l'évolution des résistances à la flexion des briques en terre comprimée stabilisées avec différents taux de substitutions de cendres de bois (de 0 à 20% en poids) conservées dans trois milieux différents : ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$

HR), hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) et hygrothermique (40 °C, 100% HR) à différents temps de cures (7, 28, 60 et 180 jours).

Concernant les briques de référence sans ajout de cendres de bois (BWBA(0%)), leur résistance à la flexion varie en fonction du milieu de conservation et de la durée de cure (de 7 à 180 jours). De 7 à 60 jours, les BWBA(0%) conservées dans un milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) présentent une meilleure résistance à la flexion que celles conservées en milieux hermétique et hygrothermique, atteignant 0.80 MPa à 60 jours. Cette augmentation de la résistance à la flexion de 7 à 60 jours en milieu ambiant est principalement due aux pressions capillaires qui s'accroissent avec l'évaporation de l'eau en fonction du temps. L. Laou et al., (2021) [159] ont rapporté que ces pressions capillaires provoquent une augmentation de la résistance mécanique.

Après 180 jours de cure, ce sont les briques de référence conservées en milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) qui affichent la meilleure résistance à la flexion, de l'ordre de 0.81 MPa, comparées à celles conservées en milieux ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) et hygrothermique (40 °C, 100% HR) qui ont des valeurs respectives de 0.64 MPa et 0.78 MPa. Cette augmentation à long terme des résistances à la flexion est due principalement aux conditions de séchage dans le milieu hermétique. Le séchage s'est fait dans des sacs hermétiques maintenus à $75 \pm 5\%$ d'humidité relative. Cela permet un séchage lent et homogène, évitant les fissurations et la fragilisation de la structure interne pouvant survenir avec un séchage trop rapide. De plus, l'environnement hermétique dans les sacs préserve le matériau du contact avec le CO₂ de l'air ambiant. Ceci prévient la carbonatation, un phénomène indésirable pour ce matériau contenant environ 14.63% de chaux dans sa composition chimique. Ainsi, la cure en milieu hermétique contrôlé en humidité et sans apport de CO₂ favorise un séchage optimal des briques, limitant les dégradations et permettant d'atteindre les meilleures résistances mécaniques à long terme.

D'autre part, la résistance à la flexion des briques BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) stabilisées avec les cendres de bois dépend directement du milieu de conservation et de la durée de cure (de 7 à 180 jours). À court terme (7 à 28 jours), les meilleures performances ont été obtenues avec une cure en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) pour les BWBAa(20%) et BWBAb(20%), atteignant respectivement 1.43 MPa et 2.50 MPa à 28 jours. Le milieu hermétique a donné 1.05 MPa et 1.94 MPa, tandis que le milieu hygrothermique présente des résistances de l'ordre de 1.28 MPa et 1.68 MPa.

Cette augmentation initiale de la résistance à la flexion en milieu ambiant est attribuée à un double effet bénéfique : d'une part, les pressions capillaires permettent de créer une structure plus dense en rapprochant les particules; d'autre part, les réactions pouzzolaniques accélérées avec les cendres de bois agissent comme un liant pour apporter de la résistance. Plusieurs études [83, 159, 197-201] ont mis en évidence le rôle clé des pressions capillaires sur l'amélioration de la résistance mécanique des géomatériaux à base de terre. D'autres auteurs ont conclu que l'augmentation des résistances observée en milieu ambiant provient des réactions pouzzolaniques entre la terre et les cendres [112]. Ces réactions génèrent des produits liants de type cimentaire qui viennent densifier la matrice poreuse des briques [108, 110]. Ainsi, le gain initial de résistance en cure ambiante résulte d'une synergie entre l'effet densifiant des pressions capillaires et l'apport de liants pouzzolaniques issus des cendres de bois.

À long terme (60 à 180 jours) en revanche, les meilleures performances proviennent d'une cure en milieu hermétique ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $75 \pm 5\%$ HR) avec 2.99 MPa et 2.27 MPa pour 20% de WBAA et WBAb respectivement. Le milieu hygrothermique ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 100% HR) arrive second avec 1.4 MPa et 2.22 MPa, tandis que le milieu ambiant donne 1.18 MPa et 2.10 MPa. Plusieurs auteurs [209-214] ont démontré les bénéfices d'un milieu hermétique (HR élevée constante) sur le développement à long terme des résistances mécaniques des briques en terre, comparé à un séchage direct à l'air.

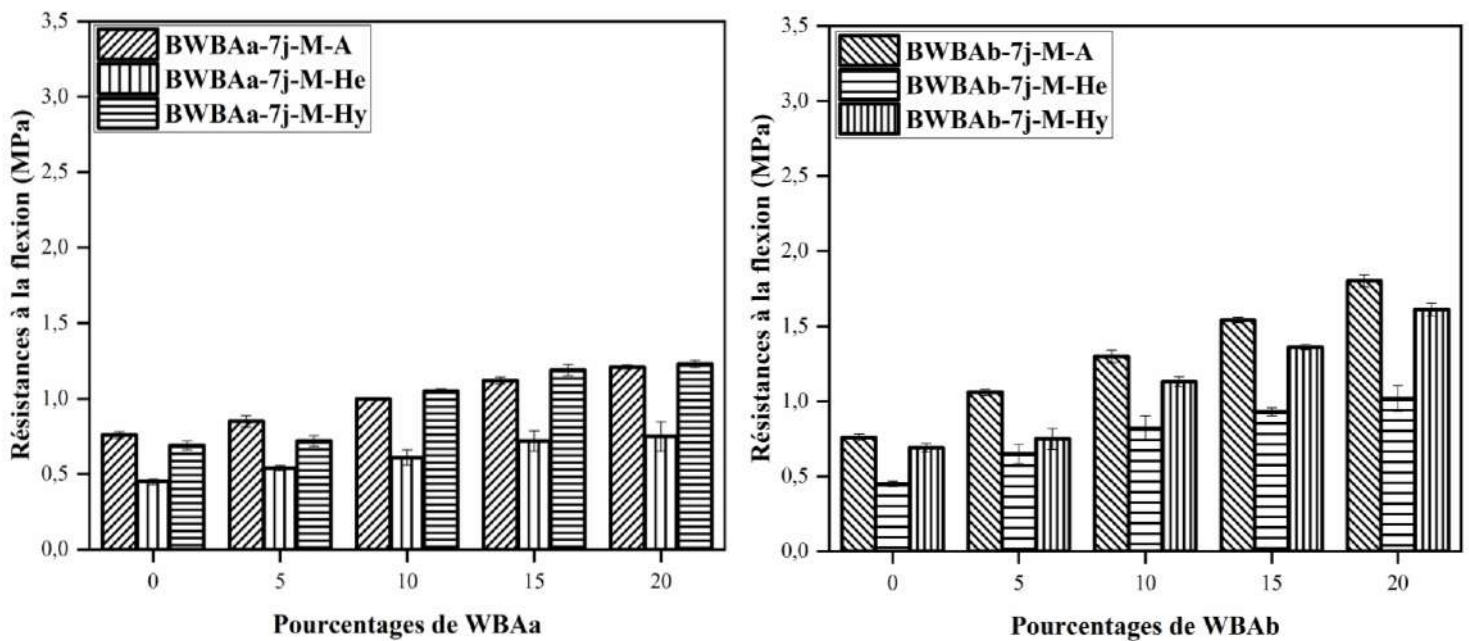


Figure IV.1. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant (A), hermétique (He) et hygrothermique (Hy) pendant 7 jours.

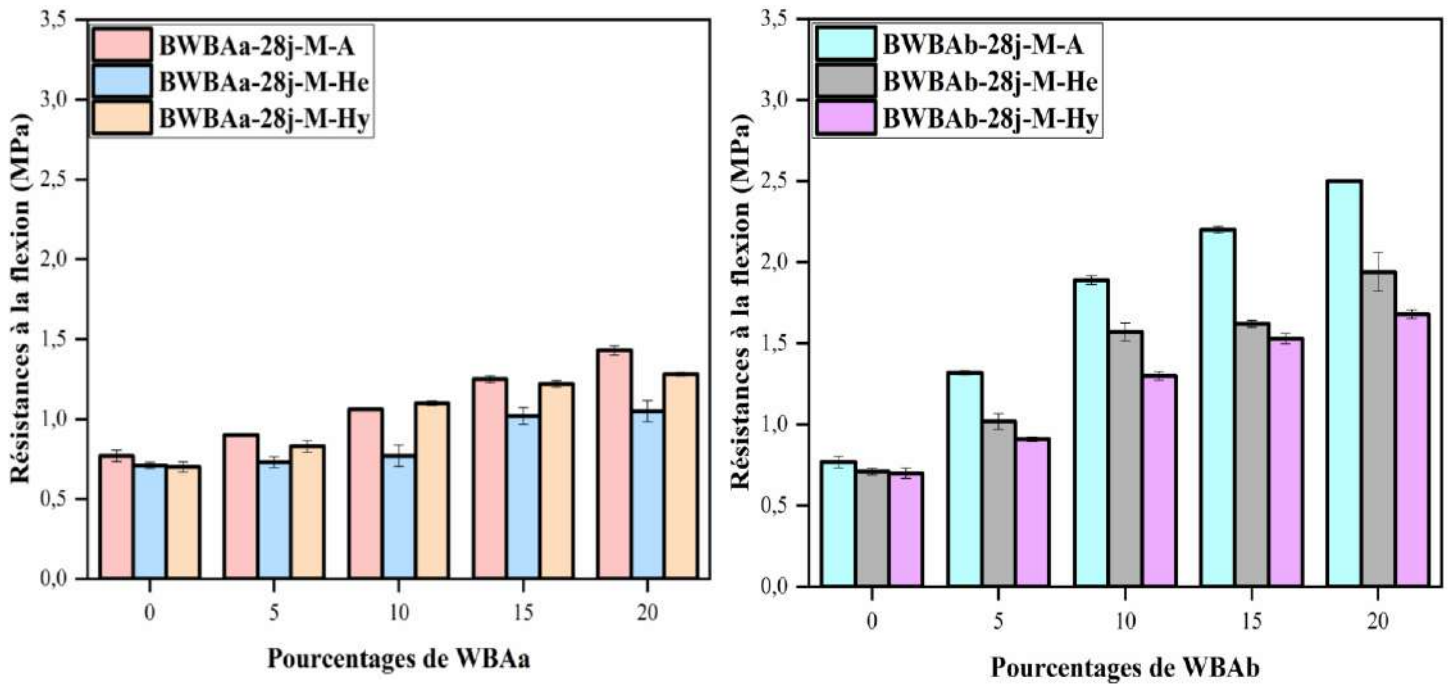


Figure IV.2. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant (A), hermétique (He) et hygrothermique (Hy) pendant 28 jours.

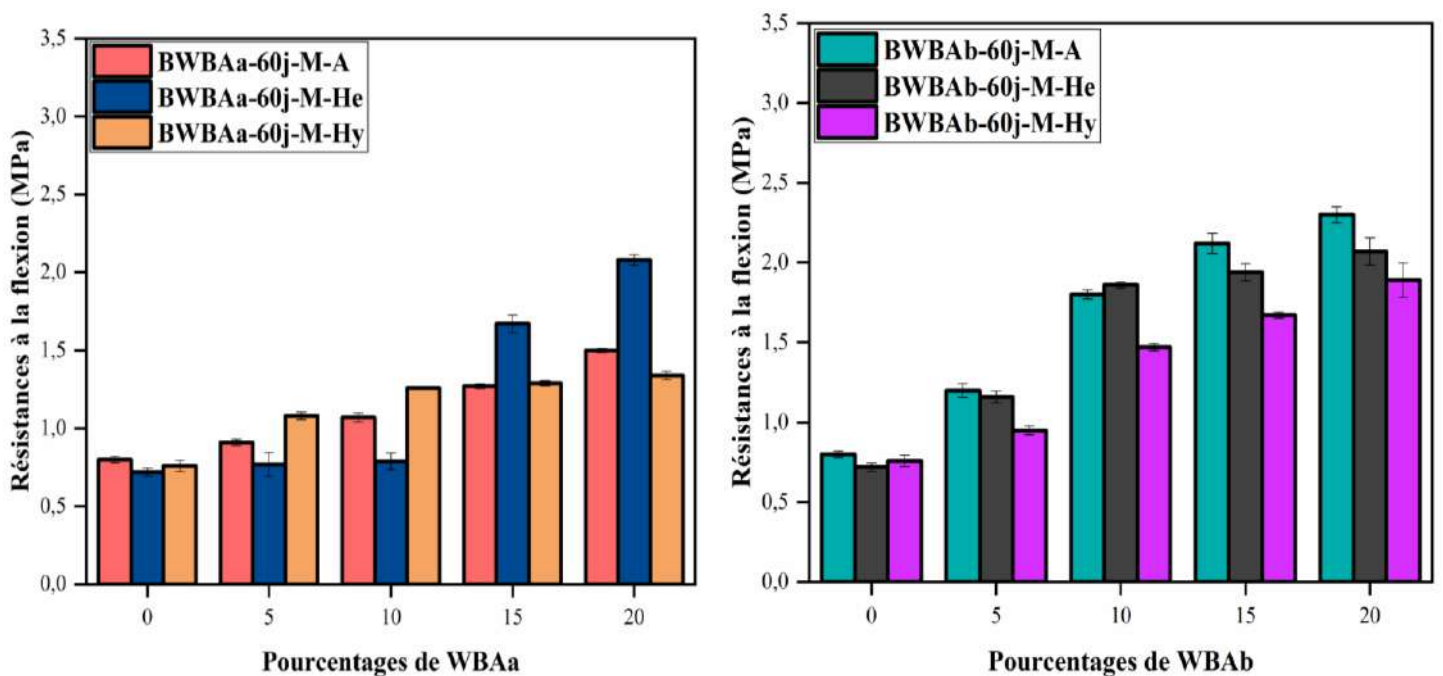


Figure IV.3. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.

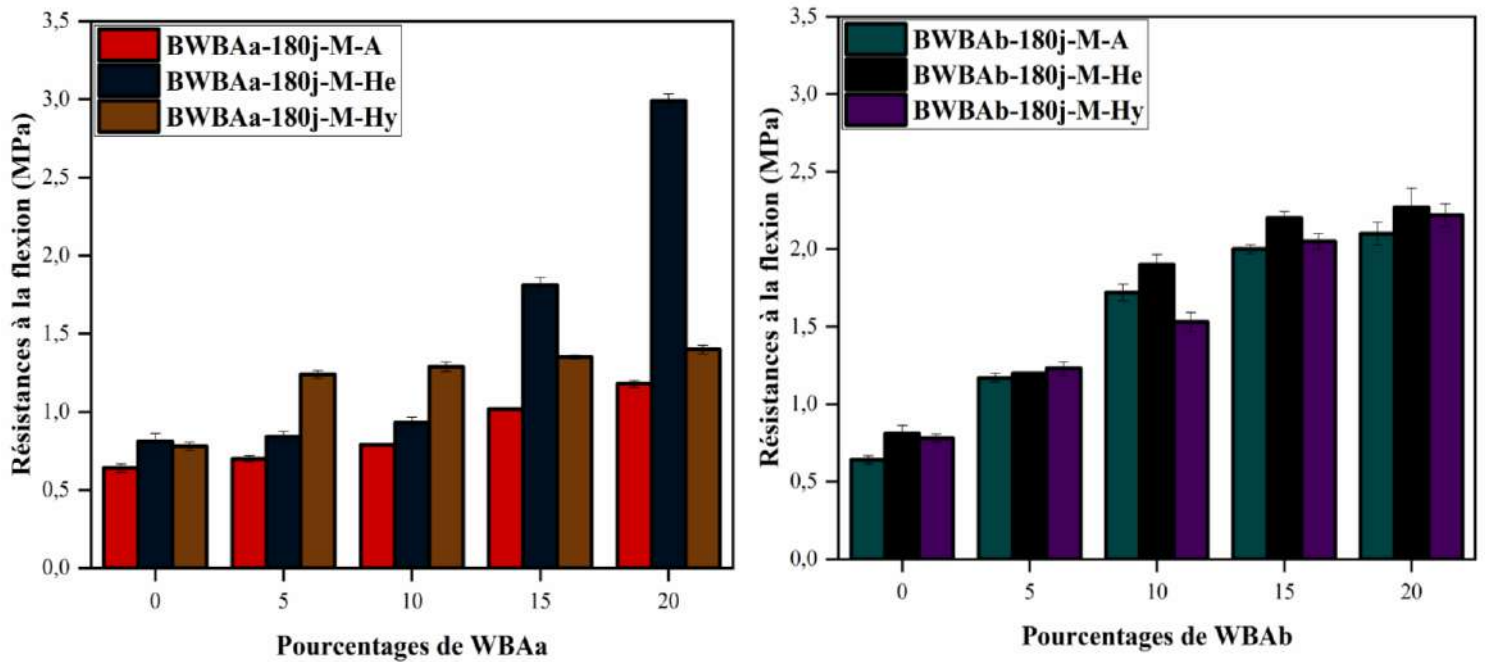


Figure IV.4. Résistance à la flexion des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.

IV.2.1.2. Résistances à la compression

Les **Figures IV.5, IV.6, IV.7** et **IV.8** montrent l'évolution de la résistance à la compression des briques en terre comprimée stabilisées avec différents teneurs en cendres de bois conservées dans trois milieux différents. Les résistances ont été mesurées après 7, 28, 60 et 180 jours de cure.

Pour les briques de référence BWBA(0%), la résistance à la compression varie selon le milieu de conservation et la durée de cure. Entre 7 et 60 jours, les briques conservées dans des conditions ambiantes présentent une meilleure résistance, atteignant 11.77 MPa à 60 jours, que celles conservées en milieux hermétique et hygrothermique. Cette augmentation jusqu'à 60 jours en milieu ambiant est principalement due aux pressions capillaires croissantes lors de l'évaporation de l'eau [165]. Après 180 jours, ce sont les briques conservées en conditions hygrothermiques qui affichent la meilleure résistance à 11.60 MPa, contre 10.02 MPa en ambiant et 10.06 MPa en hermétique. Cette augmentation à long terme en hygrothermique est principalement liée aux conditions de séchage dans cet environnement. Le milieu hygrothermique assure une meilleure hydratation des argiles présentes naturellement dans la terre, modifiant leur structure et permettant un meilleur réarrangement des particules,

augmentant ainsi la résistance. Les conditions hygrothermiques favorisent une réorganisation plus lente et optimale des particules argileuses présentes dans la terre, permettant d'obtenir une matrice plus dense et résistante à long terme, comparé à un séchage rapide. De plus, la réduction des contraintes de retrait en milieu très humide réduit les risques de fissuration par retrait, préservant l'intégrité de la structure à long terme. Selon Morel et al. (2007, 2001) [202, 27], La dissolution et la recristallisation des sels solubles dans les blocs de terre comprimée au cours du séchage peuvent contribuer au développement des résistances mécaniques. En conditions de forte humidité, les argiles continuent de réagir lentement, permettant une réorganisation des particules et un gain de résistance à long terme.

D'autre part, la résistance à la compression des briques stabilisées avec les cendres de bois BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) est directement liée au milieu de conservation et à la durée de cure (de 7 à 180 jours). À court terme, entre 7 et 28 jours, les meilleures performances ont été obtenues avec une cure en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) pour les BWBAb(20%) atteignant 25.90 MPa, et avec une cure hygrothermique pour les BWBAa(20%) atteignant 15.89 MPa, toutes deux à 28 jours pour un taux de substitution de 20%. En conditions ambiante et hygrothermique à 28 jours, les BWBAa(20%) ont atteint respectivement 14.35 MPa et 15.89 MPa, tandis que les BWBAb(20%) ont atteint 25.90 MPa et 24.34 MPa. Les résistances sont donc proches dans ces deux milieux. Enfin, les résistances les plus faibles à 28 jours ont été observées en milieu hermétique, soit 9.92 MPa pour les BWBAa(20%) et 19.91 MPa pour les BWBAb(20%).

L'augmentation de la résistance à court terme en milieu ambiant pour les BWBA(5-20%) est attribuable aux conditions spécifiques de ce milieu comparé aux autres. Cette amélioration résulte du double effet des pressions capillaires et des réactions pouzzolaniques accélérées issues des deux types de cendres. Plusieurs études récentes ont mis en évidence le rôle crucial des pressions capillaires dans l'amélioration de la résistance mécanique des matériaux à base de terre. Bruno et al. (2017) [198] ont démontré que les hautes pressions capillaires générées par la succion augmentent les liaisons interparticulaires, améliorant ainsi la résistance mécanique des matériaux en terre comprimée. Champiré et al. (2016) [203] ont observé une augmentation significative de la résistance à la compression avec l'augmentation de la succion capillaire, atteignant jusqu'à 3 MPa dans certaines conditions.

D'autres travaux, comme ceux de Bui et al. (2014) [204], ont associé les pics de résistance aux fortes pressions capillaires à des teneurs en eau intermédiaires. Ils soulignent le rôle primordial

des forces capillaires générées lors du compactage à l'optimum pour le développement des résistances. Beckett et Augarde (2012) [205] ont également mis en évidence l'importance de l'humidité relative sur la résistance à la compression des matériaux en terre, confirmant l'influence des pressions capillaires.

D'autres auteurs ont conclu que l'augmentation des résistances mécaniques des briques en terre comprimée conservées en milieu ambiant est attribuable à la réaction pouzzolanique entre les composants de la terre et les deux cendres de bois [112]. Ces réactions pouzzolaniques génèrent des produits liants qui améliorent la résistance en favorisant la formation de produits cimentaires [108]. Le gel formé a la capacité de se développer dans les espaces poreux des briques, rendant la matrice interne plus dense et compacte, améliorant ainsi les résistances mécaniques [108, 110]. Ouedraogo et al. (2020) [201] ont étudié l'effet de la stabilisation des briques en terre avec de faibles teneurs en ciment ou en chaux, montrant que ces réactions peuvent contribuer significativement à l'amélioration des propriétés mécaniques à court terme.

Cependant, à long terme, entre 60 et 180 jours, les meilleures performances ont été obtenues avec une cure en milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) pour les BWBAa(20%), atteignant 23.32 MPa à 180 jours pour un taux de substitution de 20% de WBAa. Pour les BWBAb(20%), les meilleures performances proviennent d'une cure en milieu hygrothermique, avec 33.34 MPa à 180 jours. Les BWBAb(20%) en milieu hermétique atteignent 21.77 MPa, tandis que les BWBAa(20%) en hygrothermique sont à 16.75 MPa. Les résistances les plus faibles à 180 jours ont été observées en milieu ambiant, soit 12.82 MPa pour les BWBAa(20%) et 20.21 MPa pour les BWBAb(20%).

Plusieurs études récentes ont démontré l'effet bénéfique du milieu hermétique sur les résistances mécaniques à long terme des briques en terre. Nagaraj et al. (2014) [178] ont observé que les briques curées de manière hermétique (HR élevée constante) développent de meilleures résistances comparées à celles séchées directement à l'air. Bochao Sun et al. (2021) [206] ont montré qu'un séchage contrôlé avec une humidité relative (HR) optimise le développement des résistances en évitant les fissurations par retrait trop rapide. Champiré et al. (2016) [203] ont démontré que la cure hermétique permet de conserver plus longtemps l'eau dans la matrice poreuse, favorisant une meilleure hydratation des liants et donc de meilleures performances finales. Ouedraogo et al. (2020) [201] recommandent une cure hermétique à 20 °C et 50% HR pour optimiser les résistances à long terme sans fissuration excessive.

Concernant l'effet du milieu hygrothermique, plusieurs études ont mis en évidence son impact positif sur les résistances mécaniques des briques en terre. Soudani et al. (2016) [199] ont démontré que des conditions hygrothermiques (températures élevées et forte humidité relative) favorisent le développement à long terme des résistances mécaniques des briques de terre non stabilisées par rapport à un séchage à l'air ambiant.

Seco et al. (2017) [87] ont constaté que les échantillons durcis dans des conditions humides (20 °C, 100 % d'humidité relative) présentaient des résistances mécaniques plus élevées que ceux durcis à l'air ambiant, comme étudié par Alam et al. (2015) [82]. Ils attribuent cet effet bénéfique à une meilleure hydratation des liants ainsi qu'à la formation de produits cimentaires supplémentaires dans ces conditions humides.

Ouedraogo (2019) [37] ont rapporté que la cure humide (20 °C, 50% HR) favorisait la formation de produits cimentaires supplémentaires, entraînant une augmentation des résistances mécaniques des briques de terre crue. Selon leurs observations, un environnement humide permet une meilleure hydratation des phases liantes comme la calcite et les aluminosilicates présents naturellement dans la terre, ce qui conduit à des résistances accrues après plusieurs mois de cure.

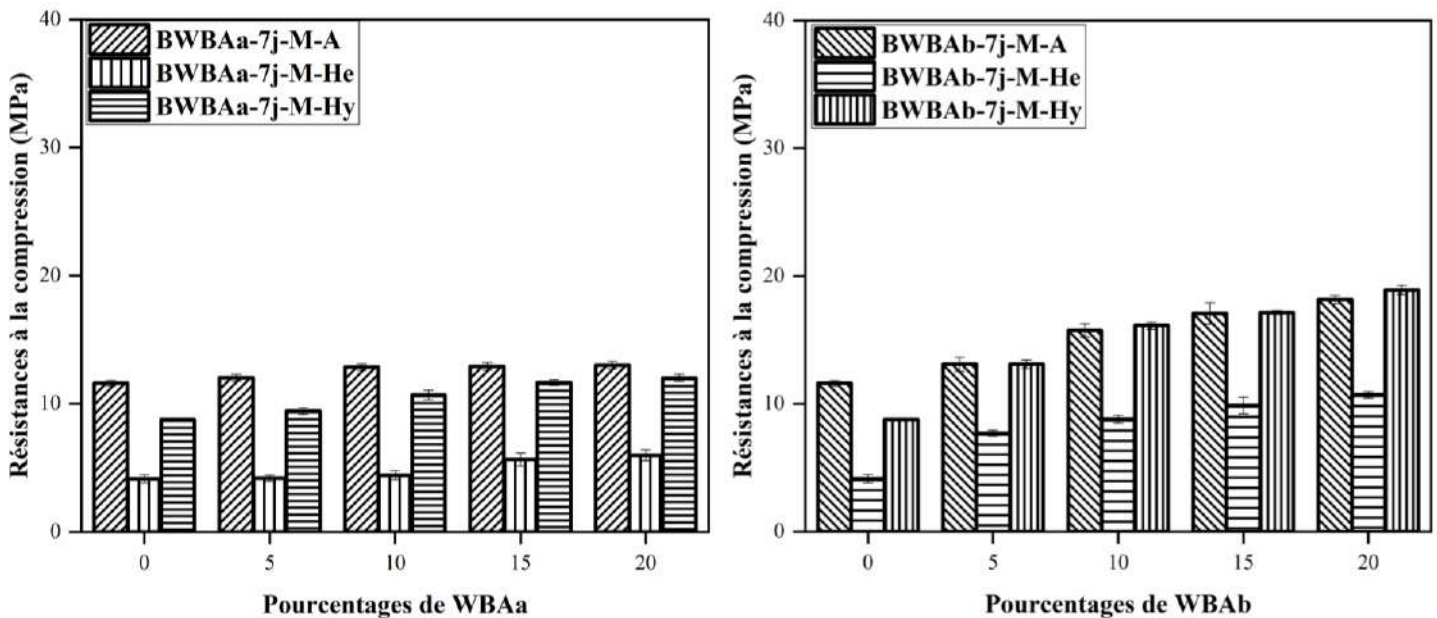


Figure IV.5. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.

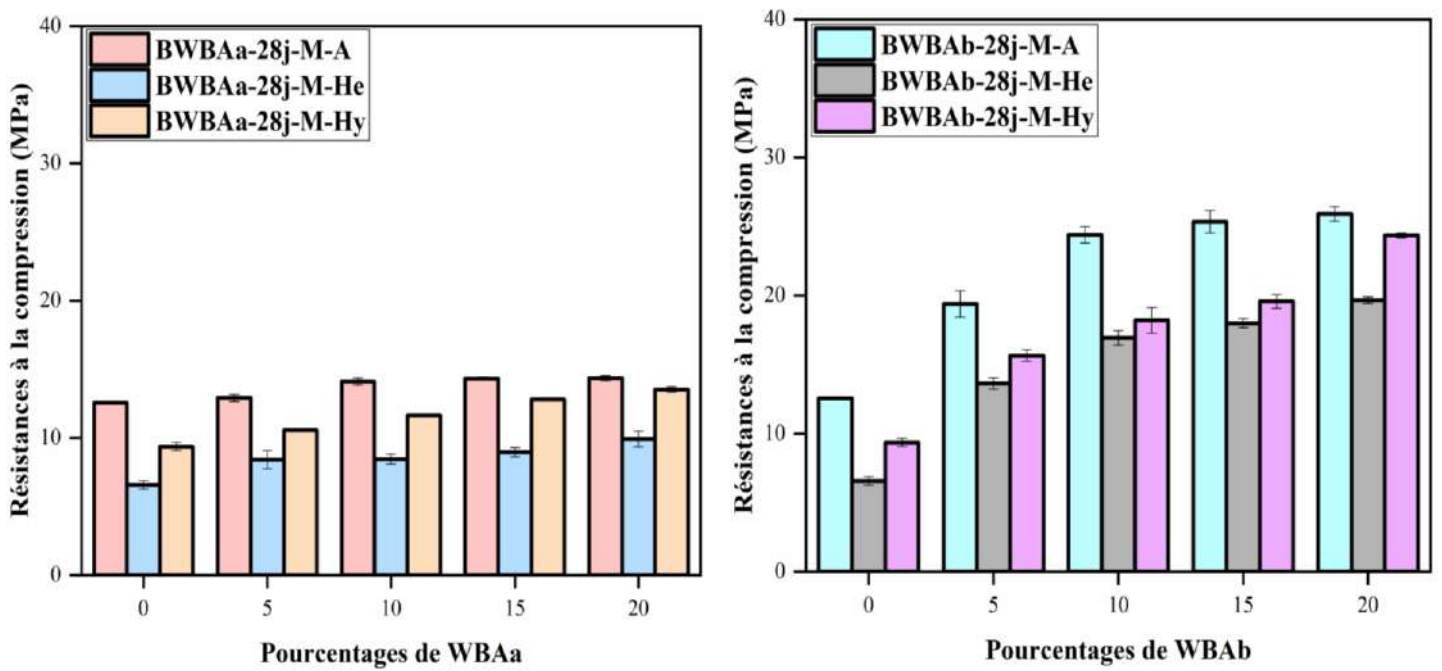


Figure IV.6. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.

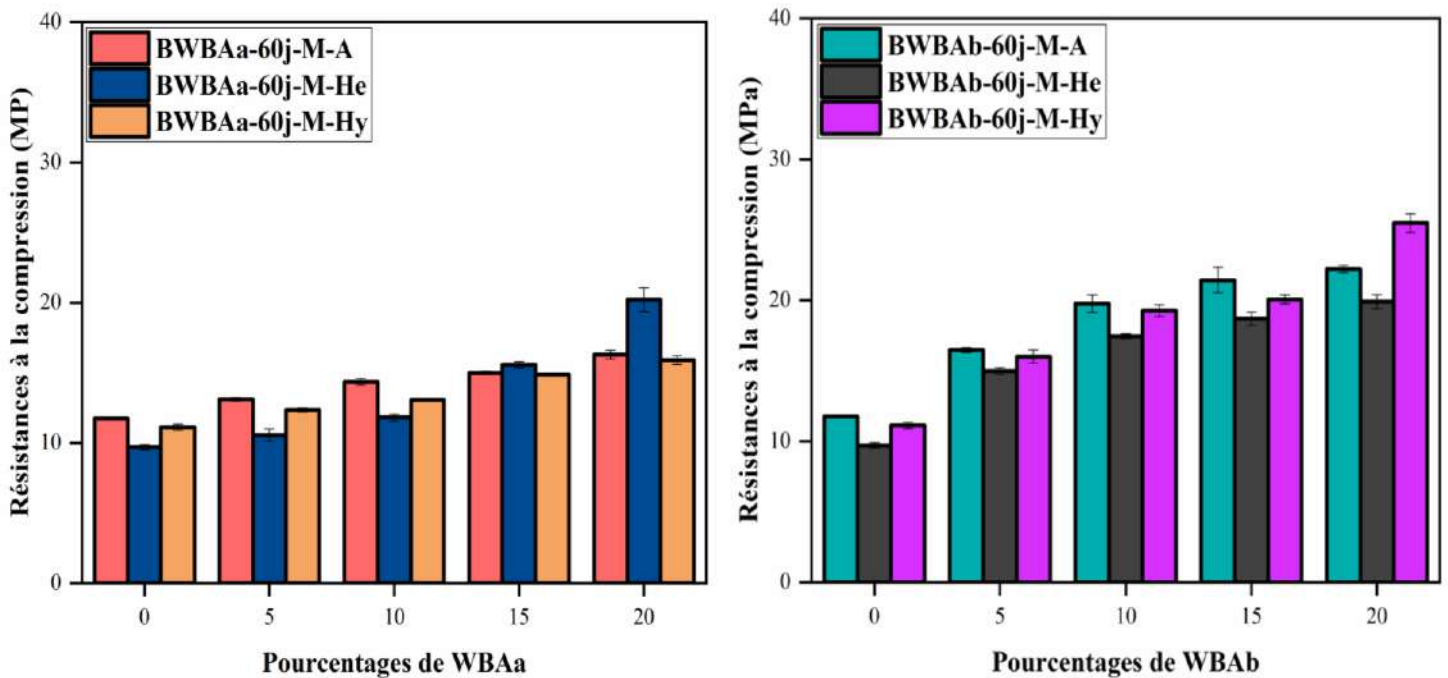


Figure IV.7. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.

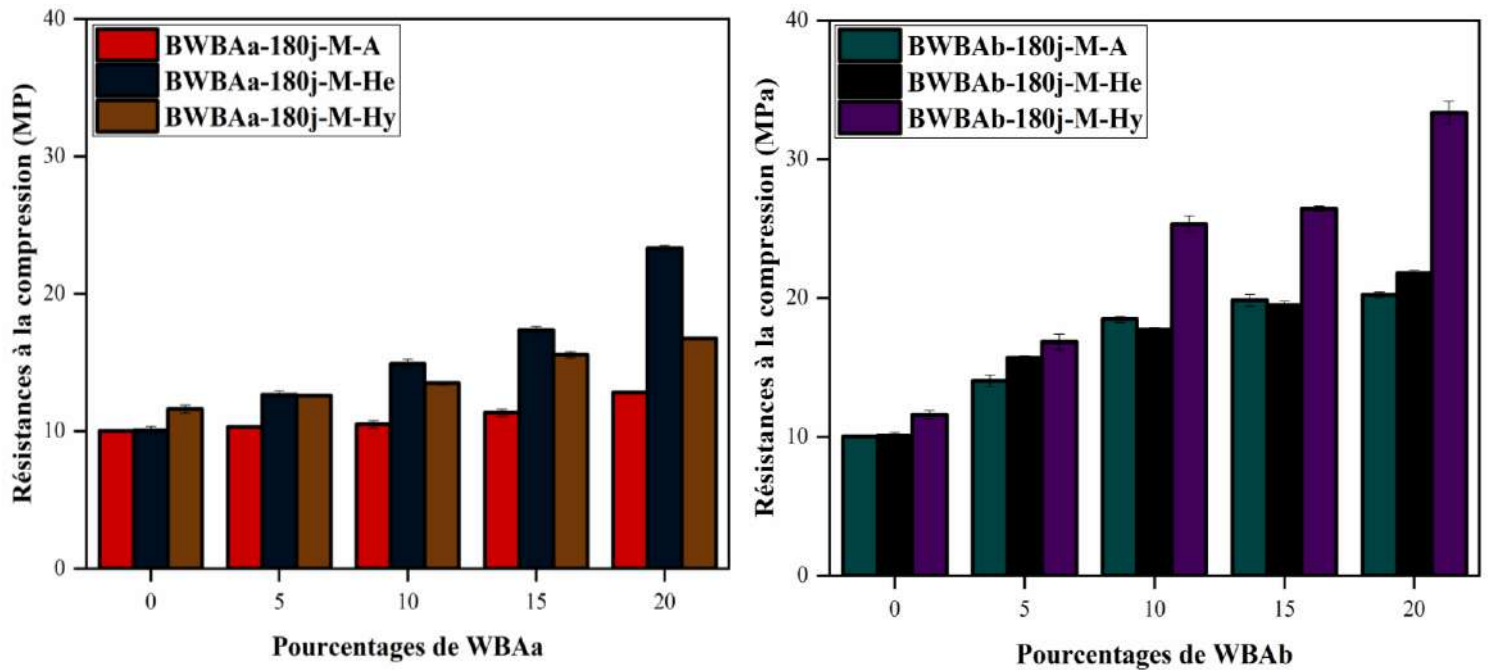


Figure IV.8. Résistance à la compression des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.

IV.2.2. Propriétés thermiques

IV.2.2.1. Conductivité thermique

Les **Figures IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12** montrent l'évolution de la conductivité thermique des briques BWBA(0-20%) en fonction du temps de cure (7, 28, 60 et 180 jours) et du milieu de conservation (ambiant, hermétique et hygrothermique).

Pour les briques de référence BWBA(0%), la conductivité thermique est la plus faible en milieu ambiant (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), atteignant 0.93 W/mK à 28 jours, contre 1.3305 W/mK en hermétique (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), et 0.9655 W/mK en hygrothermique (40 °C, 100% HR). À long terme (180 jours), les valeurs sont de 0.9505 W/mK en hermétique, 0.9520 W/mK en hygrothermique et légèrement supérieures à 0.973 W/mK en ambiant.

Les meilleures performances thermiques des BWBA(0%) ont été obtenues à 28 jours en ambiant, cette baisse étant principalement due à l'évaporation de l'eau lors du séchage. Cependant, à long terme, les meilleurs résultats proviennent des milieux hermétique et hygrothermique comparés à l'ambiant. Cela est lié à la carbonatation (14.63% de chaux) des

briques de référence au contact du CO₂ de l'air, obstruant les vides dans les éprouvettes et influençant directement la porosité. En milieu hermétique et hygrothermique, la carbonatation est limitée, préservant mieux la porosité et donc les propriétés d'isolation thermique des briques de référence à long terme.

D'autre part, la conductivité thermique des briques stabilisées avec les cendres BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) est influencée par les conditions et la durée de cure. À court terme (7-28 jours), les meilleures performances ont été observées en milieu ambiant pour les BWBAa, atteignant 0.747 W/mK à 28 jours avec 20% de substitution. En conditions hermétique et hygrothermique à 28 jours, les BWBAa(20%) ont atteint respectivement 0.91 W/mK et 0.7555 W/mK, tandis que les BWBAb(20%) ont présenté des valeurs de 0.787 W/mK (ambiant), 0.916 W/mK (hermétique) et 0.903 W/mK (hygrothermique).

Les conductivités thermiques les plus faibles à 28 jours ont été observées en milieu ambiant : 0.747 W/mK pour BWBAa(20%) et 0.787 W/mK pour BWBAb(20%). Cette tendance s'explique par l'évaporation rapide de l'eau entre 7 et 28 jours, créant un réseau de porosités qui influence la conductivité thermique. Moevus et al. (2012) [207] ont démontré que l'évaporation de l'eau lors du séchage augmente la porosité des adobes, réduisant ainsi leur conductivité thermique à court terme. Ouedraogo et al. (2020) [201] ont confirmé qu'un milieu confiné limitant la carbonatation permet d'augmenter la conductivité par rapport à un milieu ambiant où la carbonatation se produit.

À long terme (180 jours), les BWBAa(20%) ont présenté de meilleures conductivités thermiques en milieux hermétique (0.7285 W/mK) et hygrothermique (0.722 W/mK), contre 0.776 W/mK en ambiant. Ouedraogo et al. (2020) [201] expliquent qu'un milieu confiné préserve la porosité et améliore les propriétés isolantes, contrairement à un milieu ambiant où la carbonatation se produit. Cagnon et al. (2014) [208] ont également observé que la carbonatation des briques au contact de l'air ambiant réduit leur porosité, augmentant ainsi leur conductivité thermique. Ces résultats soulignent l'importance des conditions de cure et de la composition des briques sur leurs propriétés thermiques, en accord avec les études antérieures sur les matériaux de construction en terre.

En revanche, pour les BWBAb(20%) à 180 jours, les performances thermiques optimales ont été enregistrées en milieu ambiant (0.818 W/mK), suivi du milieu hygrothermique (0.828 W/mK) et hermétique (0.834 W/mK), avec des valeurs relativement proches oscillant entre 0.81

et 0.83 W/mK. Cette tendance pourrait être attribuée aux propriétés spécifiques des cendres WBAb, qui semblent plus poreuses que les WBAA. Moevus et al. (2012) [207] ont mis en évidence l'effet bénéfique de l'évaporation en milieu ambiant sur la porosité des matériaux. Dans le cas des BWBAb(20%), cet effet pourrait contrebalancer l'impact négatif de la carbonatation sur la porosité. Cette hypothèse est corroborée par les travaux de Laborel-Préneron et al. (2016) [209], qui ont démontré l'influence significative des conditions de cure sur la conductivité thermique des briques en terre. Les recherches de Boussaa et al. (2023) [112] viennent appuyer ces observations, montrant que l'incorporation de cendres de bois dans les briques de terre compressée modifie leur conductivité thermique. Ceci explique les différences constatées entre les briques BWBAA et WBAb. L'étude de Chabriac et al. (2014) [209] sur l'évolution temporelle de la conductivité thermique corrobore les changements observés entre 28 et 180 jours dans notre étude. Par ailleurs, Bui et al. (2014) [204] ont examiné l'impact de la carbonatation sur les propriétés des briques en terre, confirmant l'augmentation de la conductivité thermique due à ce phénomène en milieu ambiant, ce qui concorde avec nos observations à long terme.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de prendre en compte simultanément la nature des cendres incorporées, les conditions de cure, et l'évolution temporelle des propriétés thermiques lors de la conception et de l'utilisation de briques stabilisées aux cendres de bois.

Les analyses montrent que les cendres WBAb sont plus poreuses que les cendres WBAA. La surface spécifique mesurée par la méthode BET des cendres WBAb est supérieure à celle des cendres WBAA (**Tableau II.5**). De plus, les masses volumiques des WBAb sont également élevées que celles des WBAA (**Tableau II.6**). En revanche, les pertes de masse lors de l'analyse thermogravimétrique sont plus importantes pour les WBAA comparées aux WBAb (**Figure II.17**). Malgré cela, la porosimétrie au mercure indique que les briques BWBAA(20%) ont une porosité supérieure à celle des BWBAb(20%) (**Figures III.40, III.41, III.42**). Ces résultats suggèrent que, bien que les WBAb aient une surface spécifique plus grande et des masses volumiques plus élevées, les WBAA possèdent des pores plus nombreux ou plus grands, contribuant à une porosité globale plus élevée.

Cette caractéristique de porosité explique pourquoi les briques stabilisées avec des cendres WBAb montrent une conductivité thermique plus basse à long terme par rapport à celles stabilisées avec des cendres WBAA. La plus grande porosité globale des WBAA entraîne une meilleure isolation thermique à court terme en raison de l'évaporation rapide de l'eau et de la

formation d'un réseau de pores. Cependant, à long terme, la carbonatation dans un milieu ambiant réduit cette porosité, augmentant ainsi la conductivité thermique des briques BWBAa.

En revanche, les WBAb, avec leur surface spécifique plus élevée, favorisent une meilleure dispersion des particules dans la matrice des briques, réduisant la formation de gros pores et créant une structure plus homogène. Cela limite l'augmentation de la conductivité thermique même après un long temps de cure. De plus, les masses volumiques élevées des WBAb indiquent une densité plus importante, ce qui contribue également à une meilleure performance thermique à long terme en limitant les effets de la carbonatation.

En résumé, bien que les cendres WBAa présentent une porosité initiale plus élevée, leur structure poreuse se dégrade plus rapidement sous l'effet de la carbonatation, augmentant ainsi la conductivité thermique des briques. Les cendres WBAb, avec une surface spécifique plus élevée et une meilleure homogénéité, offrent une isolation thermique plus stable et durable, expliquant ainsi les performances thermiques observées à long terme.

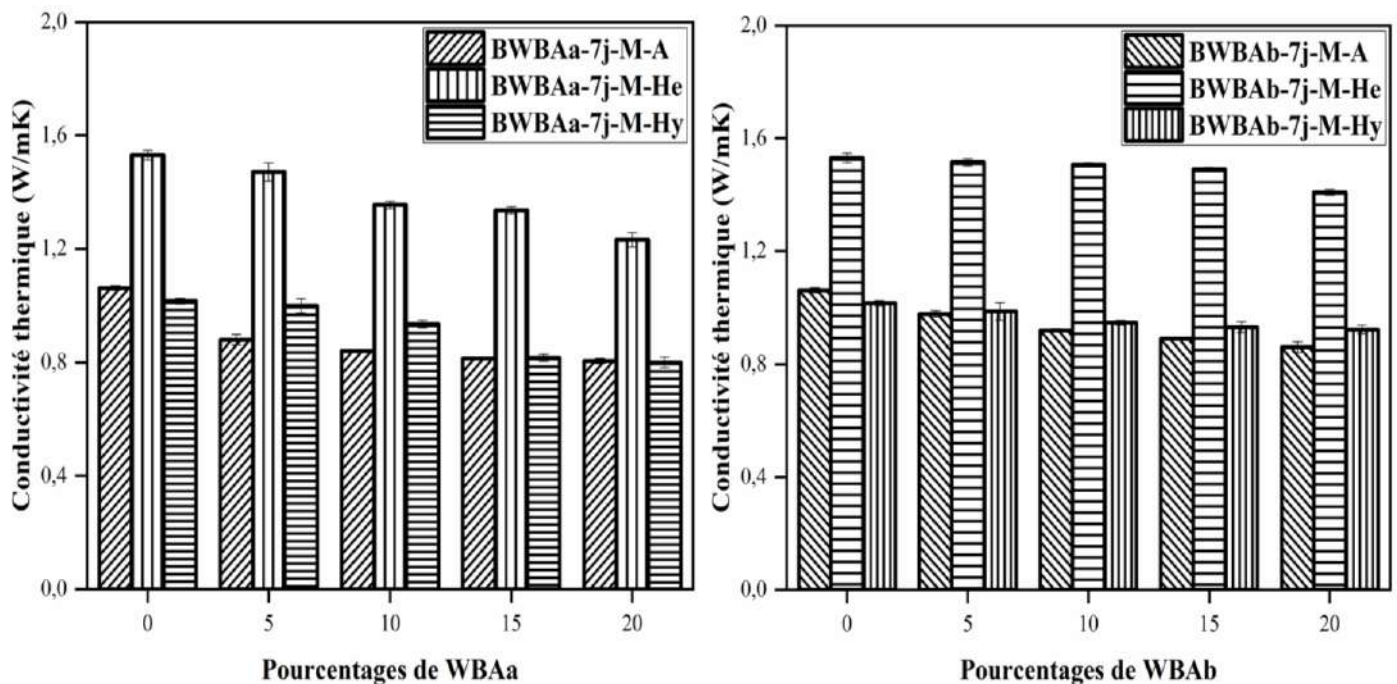


Figure IV.9. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.

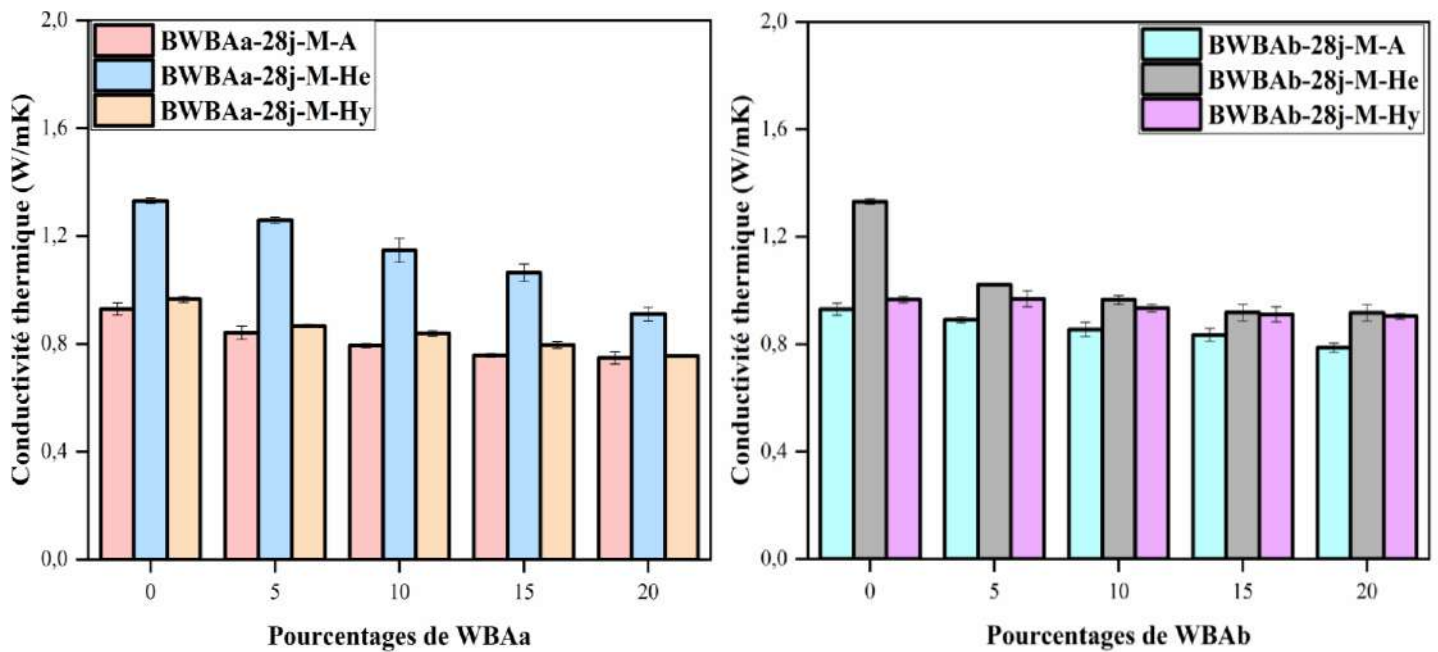


Figure IV.10. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.

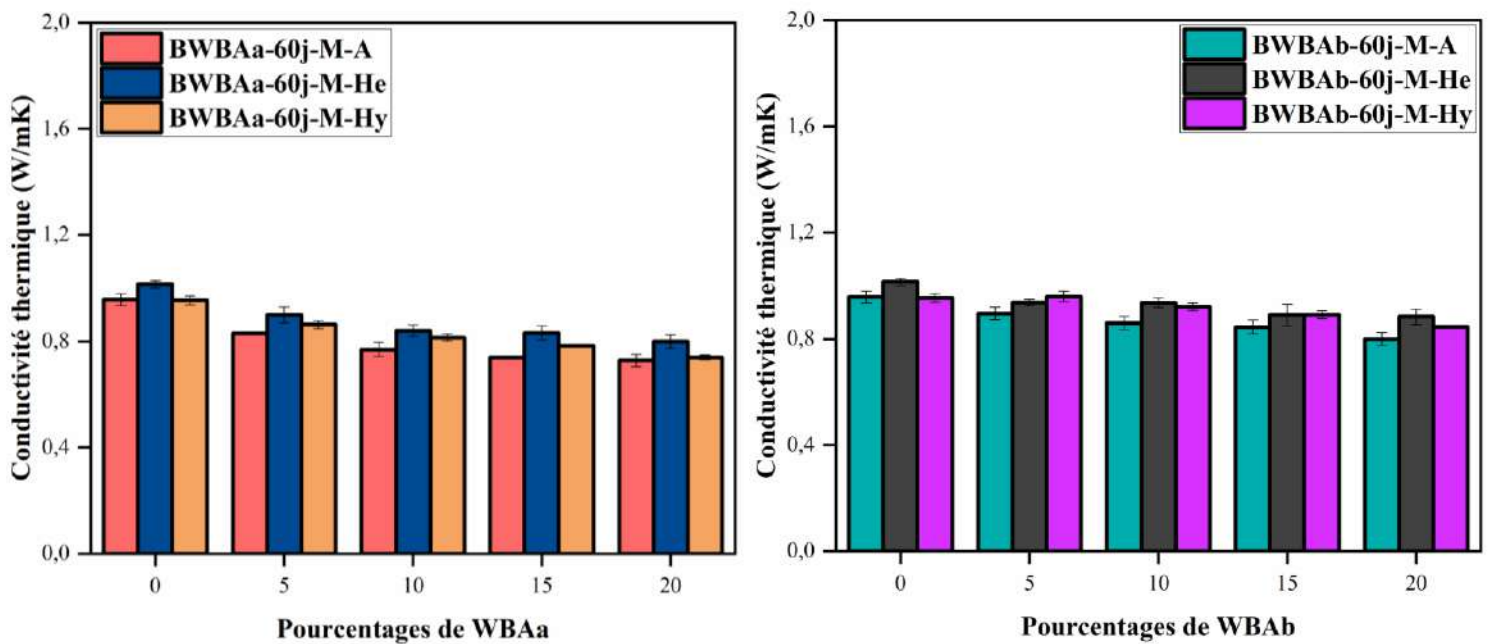


Figure IV.11. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.

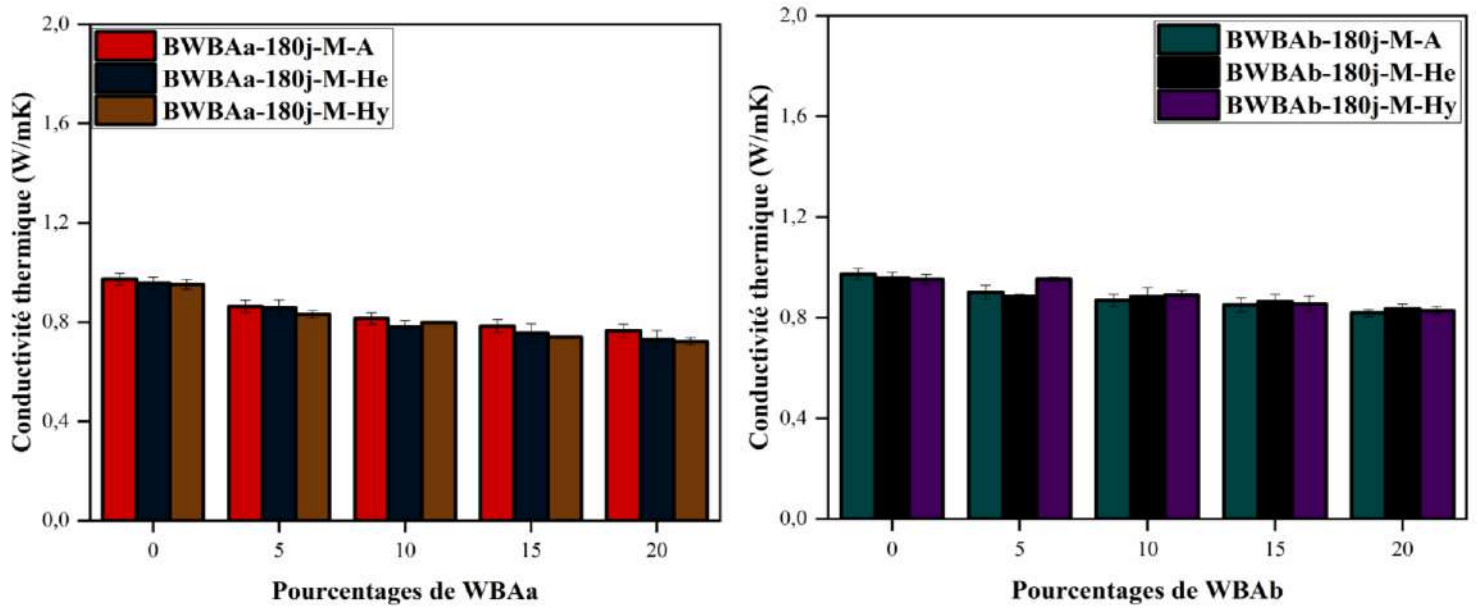


Figure IV.12. Conductivité thermique des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.

IV.2.2.2. Capacité thermique volumétrique

Les **Figures IV.13 à IV.16** présentent l'évolution de la capacité thermique volumétrique des briques BWBA(0-20%) en fonction des conditions de conservation (ambiantes, hermétiques, hygrothermiques) et du temps de cure (7, 28, 60, 180 jours). (Les figures IV.13 à IV.15 sont présentées dans l'annexe I).

Pour les briques de référence BWBA(0%), à 28 jours, la capacité est maximale en hermétique ($2782 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), intermédiaire en hygrothermique ($2347 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), et minimale en ambiant ($2235.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$). Moevus et al., (2012) [207] attribuent ces variations à l'évaporation d'eau, en cohérence avec les résultats de conductivité thermique. À 180 jours, la tendance s'inverse: la capacité augmente en ambiant ($2315 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$) par rapport à l'hermétique ($2252.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$) et l'hygrothermique ($2229.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), effet attribué à la carbonatation.

Pour les BWBAa(20%), à 28 jours, la capacité est maximale en hermétique ($2510.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), puis en ambiant ($2079.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), et minimale en hygrothermique ($2021.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$). Pour les WBAb(20%), elle est maximale en hermétique ($2307 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), puis en hygrothermique ($2218.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$), et minimale en ambiant ($2124.5 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$). Ces variations, selon Collet et al., (2014) [210], dépendent de la composition minéralogique et de la teneur en eau.

À long terme (180 jours), les variations sont faibles. Pour BWBAa(20%), on relève 1906.5 kJ/m³.K (hygrothermique), 1978.5 kJ/m³.K (hermétique) et 1980.5 kJ/m³.K (ambient). Les BWBAb(20%) donnent environ 2077 kJ/m³.K, 2145 kJ/m³.K et 2161 kJ/m³.K dans ces conditions respectives.

Les capacités optimales sont atteintes en conditions hygrothermiques: 1906.5 kJ/m³.K pour BWBAa(20%) et 2077 kJ/m³.K pour BWBAb(20%). Hall et al. (2009) [211] expliquent que l'eau dans les pores augmente significativement la capacité thermique volumétrique des matériaux en terre.

Ces résultats diffèrent de ceux de la conductivité thermique, où les meilleures performances sont observées en ambient. Jelle (2011) [212] et Collet et al. (2014) [211] expliquent que la conductivité dépend principalement de la porosité, tandis que la capacité thermique volumétrique dépend aussi de la densité et de la composition. L'eau augmente la conductivité mais aussi la capacité thermique volumétrique, expliquant les meilleures performances en hygrothermique à long terme pour cette dernière.

Les conditions hygrothermiques favorisent une évolution stable et favorable des propriétés thermiques des briques, grâce à une hydratation contrôlée et une limitation de la carbonatation. Ces facteurs, combinés aux propriétés intrinsèques des matériaux, expliquent les capacités thermiques volumétriques optimales observées à long terme dans ces conditions.

Plusieurs études complémentaires confirment l'influence de facteurs clés tels que la teneur en eau, la composition minéralogique et les conditions de conservation sur les propriétés thermiques des briques en terre stabilisée. Labat et al. (2016) [213] ont examiné l'évolution des propriétés hygrothermiques des matériaux en terre crue sous diverses conditions de cure. Leurs conclusions corroborent les observations sur les variations de la capacité thermique volumétrique en fonction des conditions de conservation. L'étude de Liuzzi et al. (2018) [214] portant sur l'influence de l'incorporation de différents types de fibres végétales sur les propriétés thermiques des briques en terre est en adéquation avec les observations concernant les différences entre les briques BWBAa et BWBAb. Taallah et Guettala (2016) [215] ont analysé l'impact des conditions de cure sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des blocs de terre comprimée. Leurs résultats concernant l'évolution de la capacité thermique volumétrique au fil du temps concordent avec les observations présentées. McGregor et al. (2014) [216] se sont penchés sur l'effet de l'humidité sur les propriétés thermiques des matériaux

en terre. Leurs conclusions appuient les observations relatives à l'influence de l'eau dans les pores sur la capacité thermique volumétrique. Enfin, Ashour et al. (2015) [217] ont étudié l'impact de divers stabilisants sur les propriétés thermiques des briques en terre. Leurs résultats concernant l'influence de la composition minéralogique et de la teneur en eau sur la capacité thermique volumétrique viennent étayer les conclusions présentées. Ces études complémentaires renforcent ainsi la validité des observations rapportées et soulignent l'importance des facteurs étudiés dans la détermination des propriétés thermiques des briques en terre stabilisée.

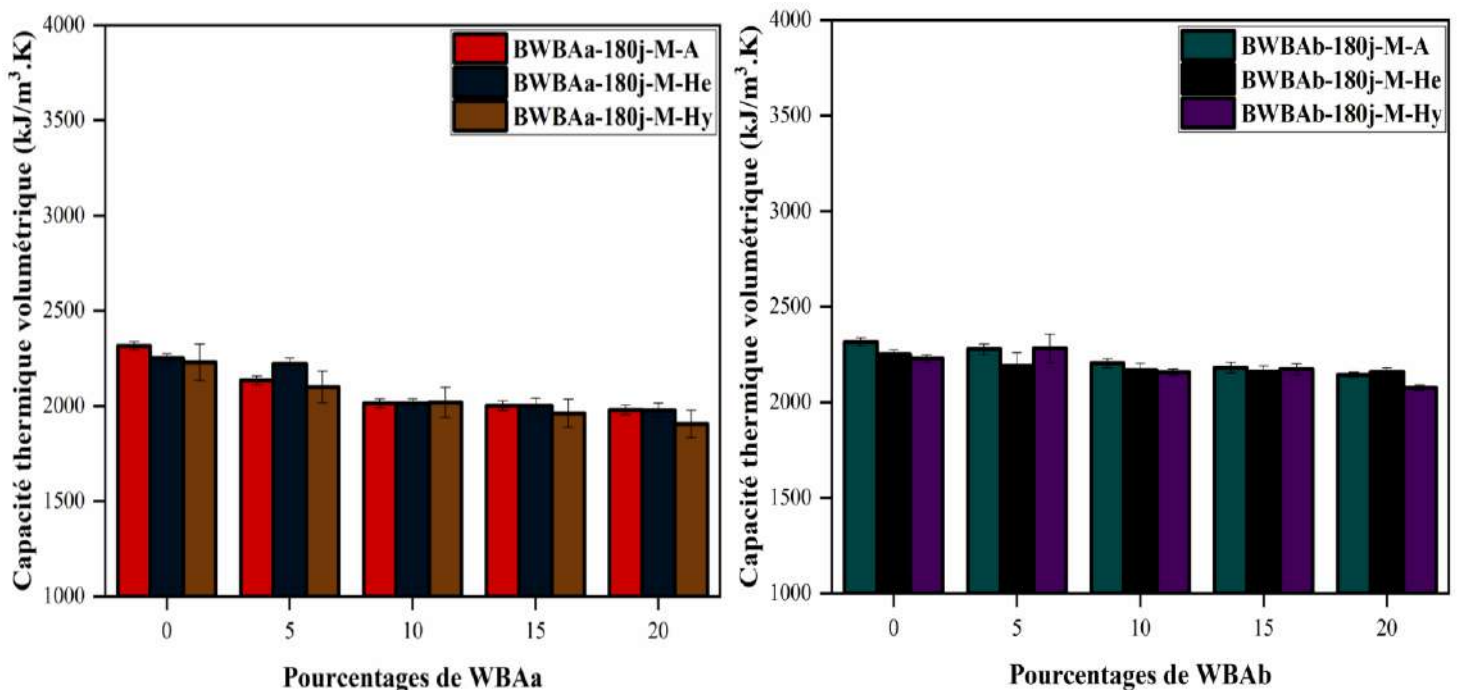


Figure IV.16. Capacités thermiques volumétriques des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.

IV.2.3. Propriétés de durabilité

Les tests d'absorption d'eau capillaire menés sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) révèlent l'influence significative des conditions de cure sur leur durabilité. Conservées en milieux ambiant (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), hermétique (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR) et hygrothermique (40 °C, 100 % HR) pendant 7, 28, 60 et 180 jours, ces briques présentent des comportements distincts, comme le montrent les **Figures IV.17** et **IV.18**. Les briques de référence BWBA(0%), sans cendres, se sont totalement dégradées, soulignant l'importance de la stabilisation.

Les BWBAa(20%) en milieu hermétique montrent de meilleures performances comparées aux milieux ambiant et hygrothermique, avec un coefficient d'absorption C_b allant de 2.37 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (7 jours) à 6.07 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (180 jours), contre 19.92 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ et 10.82 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ respectivement en milieux ambiant et hygrothermique à 180 jours. Ces résultats sont corrélés à une résistance de 23.32 MPa à 180 jours. Cette augmentation est probablement due à la consommation d'eau lors des réactions chimiques, rendant la matrice plus hygroscopique. En milieu hermétique (sacs scellés), cette dynamique est favorisée.

Pour les BWBAb(20%) en condition hygrothermique, C_b diminue de 7.12 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (7 jours) à 4.43 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (180 jours), comparé à 7.02 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ en hermétique et 14.95 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ en ambiant à 180 jours. Ces résultats sont corrélés à une résistance de 33.34 MPa à 180 jours. Cette baisse est attribuée aux réactions pouzzolaniques formant un gel densifiant, réduisant les pores et l'absorption. L'humidité à 100% et la température de 40 °C favorisent ces réactions et la formation de produits colloïdaux liants, augmentant la durabilité [112, 172, 177].

La caractérisation microstructurale des cendres WBAa et WBAb offre des clés de compréhension. Les WBAb ont une surface spécifique BET et des masses volumiques supérieures aux WBAa (**Tableaux II.5 et II.6**). Paradoxalement, la porosimétrie au mercure révèle une porosité globale plus élevée pour les briques BWBAa (**Figures III.40, III.41, III.42**), malgré des pertes de masse moindres en analyse thermogravimétrique (**Figure II.17**). Cette différence de porosité explique les performances d'absorption. Les BWBAa(20%), avec leur porosité élevée, excellent initialement en milieu hermétique: leur coefficient d'absorption C_b augmente de 2.37 (7 jours) à 6.07 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (180 jours), corrélé à une résistance mécanique de 23.32 MPa. J. Eid [18] et A. Lasledj [21] attribuent cette cinétique lente à la réaction pouzzolanique avec la chaux. En revanche, les BWBAb(20%) performant mieux en hygrothermique, avec un C_b diminuant de 7.12 (7 jours) à 4.43 $\text{g/cm}^2\text{min}^{1/2}$ (180 jours), associé à une résistance de 33.34 MPa. Cette amélioration résulte de la formation d'un gel pouzzolanique densifiant la matrice [112], favorisée par l'humidité constante [112, 172, 173].

En milieu ambiant, les deux types de briques montrent des performances moindres, probablement à cause de la carbonatation. Le CO_2 réagit d'abord avec Ca(OH)_2 pour former du calcaire (CaCO_3) insoluble, puis du bicarbonate soluble et lessivable, affectant négativement la durabilité [115].

Ces références scientifiques apportent un soutien supplémentaire aux observations citées précédemment sur l'absorption d'eau capillaire et la durabilité des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) dans différentes conditions de cure. Elles confirment également l'influence des facteurs tels que la porosité, les réactions pouzzolaniques et la carbonatation sur les propriétés des briques en terre stabilisée. Guettala et al. (2006) [218] ont étudié l'impact des conditions de cure sur la durabilité des blocs de terre comprimée. Leurs résultats confirment que les conditions de cure influencent significativement l'absorption d'eau et la résistance mécanique des briques. Prince Momar (2023) [219] ont démontré que l'incorporation de cendres dans les briques de terre améliore leur résistance à l'absorption d'eau. Leurs résultats sont cohérents avec les observations citées précédemment sur les briques BWBAa et BWBAb. Aubert et al. (2013) [220] ont étudié la relation entre la porosité et les propriétés d'absorption des matériaux en terre. Leurs conclusions soutiennent les observations sur les différences de comportement entre les briques BWBAa et BWBAb. Cizer et al. (2012) [221] ont analysé l'effet des réactions pouzzolaniques sur la durabilité des matériaux à base de chaux. Leurs résultats corroborent les observations précédentes sur la formation d'un gel densifiant la matrice. Van Gerven et al. (2004) [222] ont étudié l'impact de la carbonatation sur les propriétés des matériaux cimentaires. Leurs conclusions sur la formation de calcaire et de bicarbonate sont en accord avec les observations en milieu ambiant.

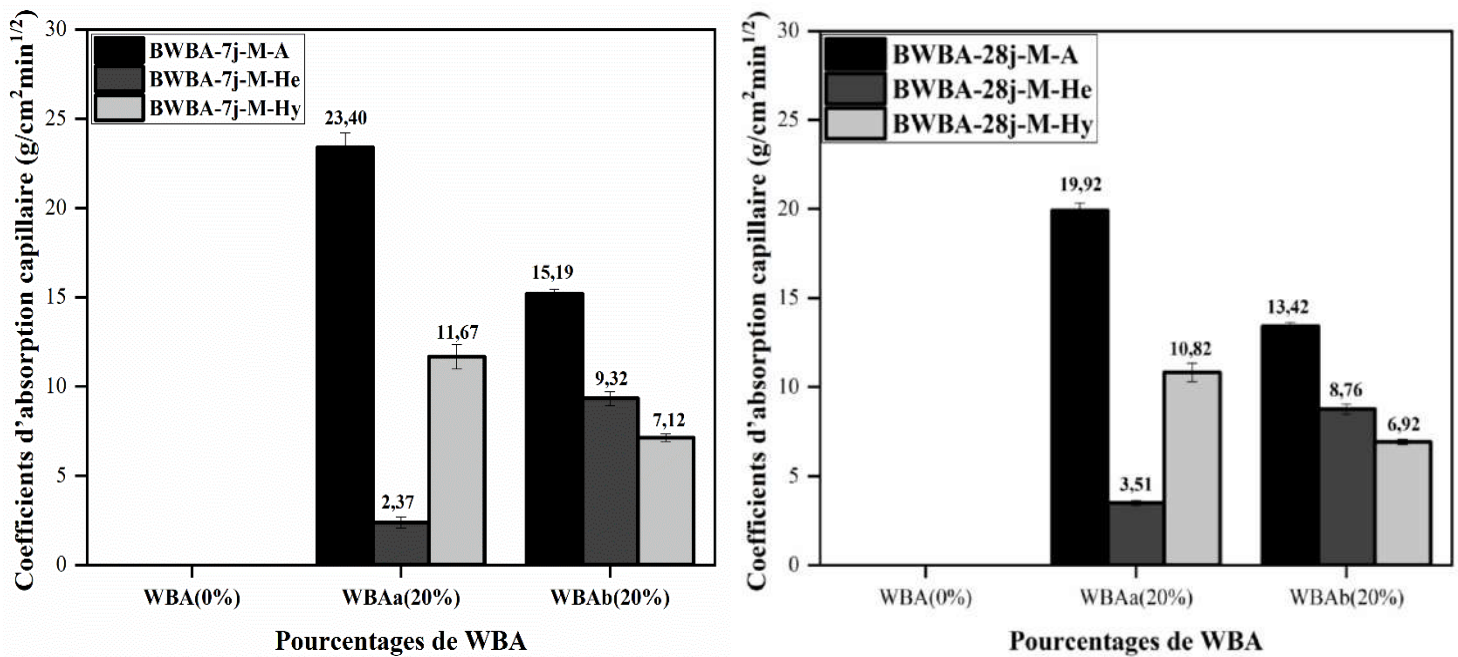


Figure IV.17. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 et 28 jours.

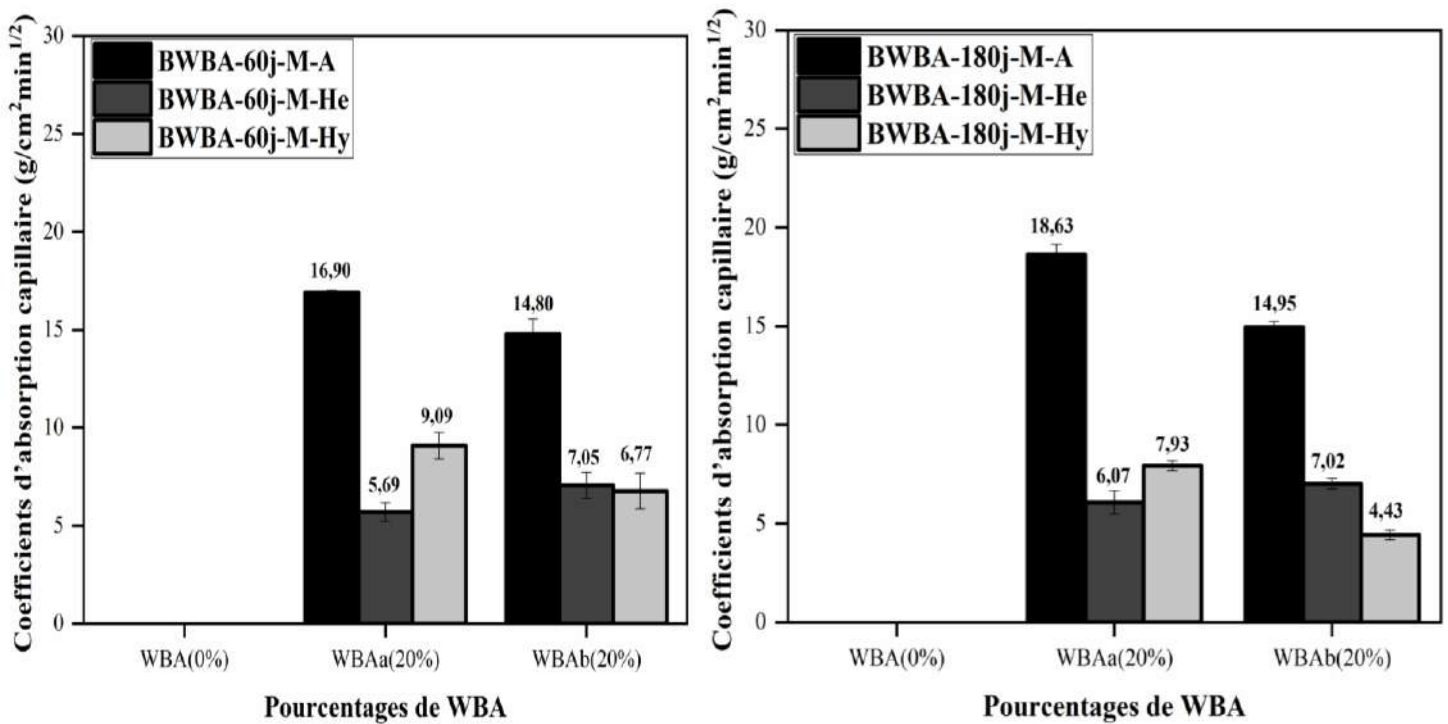


Figure IV.18. Coefficient d'absorption d'eau capillaire des briques BWBA des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 et 180 jours.

IV.2.4. Masses volumiques apparentes des briques en terre comprimée

Les Figures IV.19 à IV.22 présentent les mesures de densité des briques (5 à 20%) de WBA, après des cures allant de 7 à 180 jours dans trois environnements différents (milieu ambiant (M-A), hermétique (M-He) et hygrothermique (M-Hy)), puis comparées aux briques de référence sans cendres. (Les figures IV.19 à IV.121 sont présentées dans l'annexe II).

Pour les briques de référence BWBA(0%), leurs masses volumiques apparentes varient peu. Elle est la plus faible en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR), atteignant 310.80 g/cm^3 à 28 jours, contre 321.28 g/cm^3 en hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR), et 318.46 g/cm^3 en hygrothermique (40 °C, 100% HR). À long terme (180 jours), les valeurs sont de 311.12 g/cm^3 en ambiant, 313.36 g/cm^3 en hermétique et 315.02 g/cm^3 en hygrothermique. Cette baisse de masse volumique apparente des BWBA(0%) en milieu ambiant comparée aux autres milieux est due à l'évaporation d'eau de constitution lors du séchage durant la durée de cures allant de 7 à 180 jours à une température ambiante.

D'autre part, pour les briques stabilisées avec les cendres BWBAa(5-20%) et WBAb(5-20%), la masse volumique apparente dépend également du milieu et de la durée de cure. À court terme

entre 7 et 28 jours, les performances optimales ont été obtenues en milieu ambiant pour les BWBAa avec 294.95 g/cm^3 à 28 jours pour 20% de substitution. En conditions hermétique et hygrothermique à 28 jours, les BWBAa(20%) ont atteint 313.40 g/cm^3 et 295.05 g/cm^3 , tandis que les BWBAb(20%) ont eu 301.07 g/cm^3 en ambiant, 308.39 g/cm^3 en hermétique et 297.49 g/cm^3 en hygrothermique. Les plus faibles densités à 28 jours proviennent donc du milieu ambiant avec 294.95 g/cm^3 pour les BWBAa(20%) et 297.49 g/cm^3 pour les BWBAb(20%). Ces résultats sont en corrélation avec la conductivité thermique des briques. Selon D. Eliche-Quesada et al., (2021) [108], M. Sutcu et al., (2010) [116], J. García-Ten et al., (2010) [169, 170], la conductivité thermique dépend fondamentalement de la densité bien qu'il y ait également d'autres paramètres tels que la structure interne, l'humidité relative, la composition chimique et la température ambiante.

À long terme, entre 60 et 180 jours, les performances optimales en termes de faible masse volumique ont été obtenues en milieu hygrothermique pour les BWBAa(20%) et BWBAb(20%) avec respectivement 293.11 g/cm^3 et 291.62 g/cm^3 à 180 jours. Ces valeurs sont inférieures à celles observées dans les autres milieux: en milieu ambiant, les masses volumiques étaient de 293.95 g/cm^3 pour BWBAa(20%) et 301.86 g/cm^3 pour BWBAb(20%), tandis qu'en milieu hermétique, elles atteignaient 295.82 g/cm^3 pour BWBAa(20%) et 301.29 g/cm^3 pour BWBAb(20%) à la même échéance.

Les masses volumiques apparentes les plus faibles ont été constatées pour les briques en terre comprimée stabilisées avec 5 à 20% de cendres de bois (WBAa et WBAb) conservées en milieu hygrothermique (100% HR, $40 \text{ }^\circ\text{C}$) à long terme (180 jours). Ce phénomène peut être expliqué par deux mécanismes principaux : la formation d'une porosité capillaire élevée, favorisée par l'humidité très importante (100% HR) dans les briques contenant les cendres de bois. Cette porosité capillaire contribue à la diminution de la masse volumique apparente. L'accélération des réactions pouzzolaniques entre les cendres de bois et les composants de la terre à $40 \text{ }^\circ\text{C}$, produisant des C-S-H denses qui, bien que renforçant la microstructure et les performances mécaniques, possèdent une masse volumique intrinsèque plus faible.

Ces études collectives soutiennent l'observation selon laquelle les briques en terre comprimée stabilisées avec des cendres de bois et conservées dans un environnement hygrothermique (100% HR, $40 \text{ }^\circ\text{C}$) à long terme présentent les masses volumiques apparentes les plus faibles. Ce phénomène résulte de la combinaison de la porosité accrue induite par l'humidité et les additifs, ainsi que de la formation de C-S-H à faible densité due aux réactions pouzzolaniques

accélérées par la température élevée. Ces observations sont corroborées par plusieurs études scientifiques récentes. Oti et al. (2009) [48] et Muntohar (2011) [177] ont démontré que l'humidité élevée favorise la formation d'une porosité capillaire importante dans ces matériaux, surtout en présence d'ajouts pouzzolaniques. Cette augmentation de la porosité capillaire entraîne mécaniquement une baisse de la masse volumique apparente. Eliche-Quesada et al. (2012) [108] et Al-Fakih et al. (2019) [223] ont observé que l'incorporation d'additifs pouzzolaniques, tels que les cendres de bois, modifie significativement la microstructure des matériaux argileux. Ces additifs contribuent à la formation de pores et à la réduction de la densité globale du matériau. Carrasco-Hurtado et al. (2014) [113] ont mis en évidence que les réactions pouzzolaniques entre les cendres et les composants argileux sont activées par des températures élevées. Ces réactions conduisent à une production accrue de C-S-H (silicates de calcium hydratés) denses. Bien que ces C-S-H renforcent la microstructure, ils ont une masse volumique intrinsèquement plus faible que d'autres hydrates, contribuant ainsi à la réduction globale de la masse volumique du matériau. Bories et al. (2014) [224] ont souligné l'importance des agents porogènes dans le développement de briques d'argile poreuses écologiques. Leur étude confirme que l'introduction délibérée de porosité, similaire à celle créée par les cendres de bois, peut significativement réduire la densité tout en améliorant les propriétés thermiques.

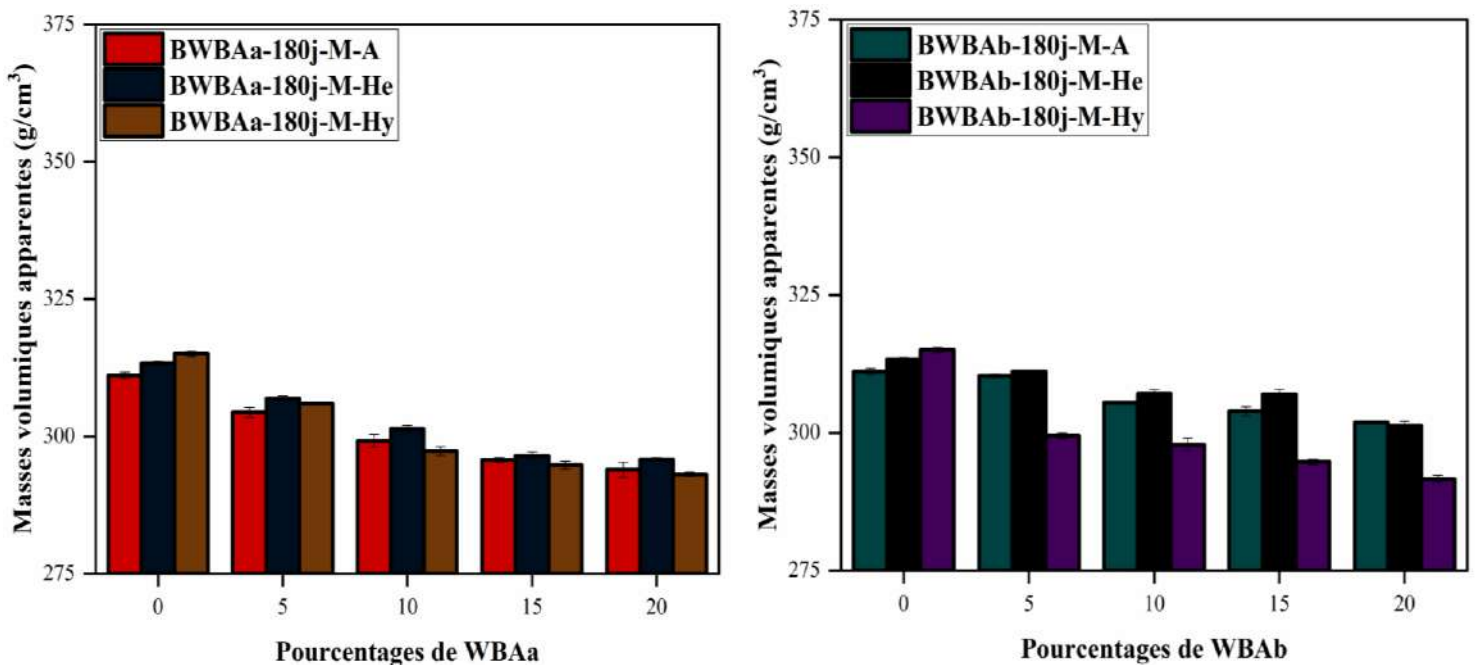


Figure IV.22. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours.

IV.3. L'impact du temps de cure (7, 28, 60 et 180 jours) sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

IV.3.1. Propriétés mécaniques

L'influence du temps de cure sur les performances des briques en terre comprimées est un paramètre crucial, comme l'ont démontré plusieurs études récentes [5, 78, 225, 226]. La durée et le milieu de conservation affectent directement les propriétés des briques selon chaque environnement.

À court terme (7 à 28 jours) en milieu ambiant, un impact positif a été observé sur la résistance mécanique en flexion et en compression. Les briques atteignent des résistances supérieures (0.77 MPa en flexion et 12.56 MPa en compression) comparées aux milieux hermétiques et hygrothermiques. Ces résultats s'expliquent par l'évaporation de l'eau qui augmente les pressions capillaires, un phénomène confirmé par L. Laou et al. (2021) [159] et corroboré par les travaux de Fabbri et al. (2019) [227], et Bui et al. (2014) [204]. Lorsque l'eau s'évapore, elle crée des ménisques d'eau entre les particules du matériau. Ces ménisques exercent des forces de traction sur les particules, les rapprochant les unes des autres. Ce rapprochement des particules augmente la cohésion interne du matériau, améliorant ainsi sa résistance mécanique.

À long terme (60 à 180 jours), les milieux hermétique et hygrothermique favorisent une meilleure hydratation des BWBA(0%), aboutissant à des résistances mécaniques supérieures à 180 jours. Cette observation est conforme aux résultats de Arrigoni et al. (2017) [228] et Beckett et al. (2014) [229], qui ont étudié l'effet du temps de cure sur les propriétés mécaniques des blocs de terre comprimée.

En milieu hermétique, l'augmentation de la résistance est attribuée aux conditions de séchage contrôlées (20 ± 2 °C de température ambiante, $75 \pm 5\%$ d'humidité relative). Ce processus lent et homogène évite les fissurations et la fragilisation de la structure interne, comme l'ont souligné Beckett et al. (2012) [230]. De plus, l'absence de contact avec le CO₂ atmosphérique prévient la carbonatation, préservant ainsi la chaux présente dans le matériau, un phénomène étudié par Bruno et al. (2017) [198].

En milieu hygrothermique, l'amélioration à long terme est liée à une meilleure hydratation des argiles naturellement présentes dans la terre, modifiant leur structure et permettant un

réarrangement optimal des particules. Cette observation est soutenue par les travaux de Lima et al. (2020) [231], qui soulignent que la dissolution et la recristallisation des sels solubles dans ces conditions contribuent au développement des résistances mécaniques. Ces résultats sont également cohérents avec les études de Rempel et al. (2019) [232] sur l'effet de l'humidité sur les propriétés des matériaux en terre.

Par contre, le milieu ambiant à long terme favorise une carbonatation des matériaux, entraînant une chute des résistances mécaniques ainsi que l'évaporation rapide de l'eau de constitution. Ce phénomène a été observé et analysé par Guettala et al. (2006) [218] dans leur étude sur la durabilité des constructions en terre.

La résistance mécanique des briques BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) stabilisées avec des cendres de bois est fortement influencée par la durée de cure (7 à 180 jours) dans différents milieux. À court terme (7-28 jours), les meilleures performances ont été observées en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR). Les BWBAa(20%) et BWBAb(20%) ont atteint respectivement 1.43 MPa et 2.50 MPa en flexion, et 14.35 MPa et 25.90 MPa en compression à 28 jours. Ces résultats surpassent ceux obtenus en milieux hermétique et hygrothermique.

L'amélioration initiale de la résistance mécanique en milieu ambiant est attribuée aux pressions capillaires qui densifient la structure en rapprochant les particules par cohésion. Plusieurs études démontrent que ces pressions augmentent les liaisons interparticulaires, améliorant ainsi la résistance mécanique due à la succion capillaire [198, 203]. Ces résultats associent les pics de résistance aux fortes pressions capillaires à des teneurs en eau intermédiaires, confirmant l'importance de l'humidité relative sur la résistance à la compression [205].

De plus, les réactions pouzzolaniques, accélérées par les cendres de bois, agissent comme un liant entre les particules. Plusieurs études ont montré que ces réactions génèrent des produits cimentaires qui densifient la matrice poreuse des briques [108, 110, 112]. Ouedraogo et al. (2020) [201] ont mis en évidence que même de faibles teneurs en ciment ou en chaux peuvent significativement améliorer les propriétés mécaniques à court terme grâce à ces réactions.

La synergie entre l'effet densifiant des pressions capillaires et l'apport de liants pouzzolaniques issus des cendres de bois explique donc le gain initial de résistance en cure ambiante. Ces observations sont corroborées par diverses études récentes qui soulignent l'importance des

conditions de cure et des additifs pouzzolaniques dans le développement des résistances mécaniques des briques en terre comprimée [83, 159, 197-201, 203-205].

Par ailleurs, d'autres recherches se concentrent sur les réactions pouzzolaniques qui améliorent les résistances mécaniques en stabilisant les blocs de terre comprimée (BTC) avec un liant géopolymère. Elles ont montré une augmentation significative de la résistance à la compression dans les premiers 28 jours de cure, passant de 3.5 MPa à 7 jours à 6.5 MPa à 28 jours. Cette amélioration rapide est comparable aux observations en milieu ambiant, attribuée à la formation rapide de produits géopolymériques similaires aux réactions pouzzolaniques observées avec les cendres de bois [5]. D'autres études ont examiné l'influence de la minéralogie de l'argile sur les propriétés des enduits à base de terre, constatant que la présence de minéraux argileux réactifs améliore les propriétés mécaniques à court terme [231].

Une revue des développements récents dans l'évaluation des performances des matériaux de construction en terre a souligné l'importance des conditions de cure, notamment l'humidité relative, sur le développement de la résistance mécanique, renforçant les observations sur l'effet bénéfique du milieu ambiant ($75 \pm 5\%$ HR) sur les propriétés mécaniques à court terme [228]. Enfin, l'influence de différents ajouts sur les propriétés des matériaux de construction en terre a été examinée. Les résultats ont montré que l'incorporation de ces additifs modifie significativement la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux [233]. L'effet du vieillissement sur la terre stabilisée compactée a également été étudié, révélant une amélioration continue des propriétés mécaniques au fil du temps, avec une augmentation significative dans les premiers mois, confirmant l'évolution des résistances mécaniques à long terme [178].

Ces références récentes confirment les résultats obtenus, soulignant l'importance des conditions de cure, des additifs pouzzolaniques et de l'évolution temporelle des propriétés mécaniques dans les matériaux de construction en terre. Elles renforcent également l'explication des mécanismes impliqués, notamment les réactions pouzzolaniques et les changements microstructuraux.

À long terme (60 à 180 jours), les meilleures performances sont obtenues par une cure en milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) avec 2.99 MPa en flexion et 23.32 MPa en compression pour les BWBAa(20%). En comparaison, en milieu ambiant, les BWBAa(20%) présentent 1.18 MPa en flexion et 12.82 MPa en compression, et en milieu hygrothermique, 1.40 MPa en flexion et 16.75 MPa en compression à 180 jours. Plusieurs études ont démontré les bénéfices d'un milieu hermétique (HR élevée constante) sur le développement des résistances mécaniques

des briques en terre à long terme, comparé à un séchage direct à l'air [209-214]. Cette augmentation des résistances mécaniques des briques BWBAa en milieu hermétique par rapport aux autres milieux est probablement due à la formation accélérée des produits cimentaires (C-S-H, C-A-H et C-A-S-H) à 180 jours en conditions de température ambiante et d'humidité relative. Il est à noter que ces résistances sont faibles à court terme (7 à 28 jours) par rapport aux milieux ambiant et hygrothermique. À long terme (60 à 180 jours), une diminution des résistances mécaniques est observée en milieu ambiant en raison de l'évaporation de l'eau de constitution et de la carbonatation des briques en contact avec le CO₂ de l'air.

En revanche, les BWBAb(20%) montrent de meilleures résistances en milieu hygrothermique avec 2.22 MPa en flexion et 33.34 MPa en compression à 180 jours, comparé à 2.21 MPa en flexion et 20.21 MPa en compression en milieu ambiant, et 2.27 MPa en flexion et 21.77 MPa en compression en milieu hermétique. Les valeurs de résistance à la flexion des BWBAb(20%) sont presque identiques, autour de 2 MPa, tandis que la résistance à la compression est meilleure en milieu hermétique (BWBAa) et en milieu hygrothermique (BWBAb). Cette augmentation des résistances mécaniques en milieu hygrothermique est due à la formation de produits cimentaires, notamment C-S-H, C-A-H, C-A-S-H et M-S-H, qui renforcent la microstructure des briques et augmentent la résistance à la compression à 180 jours.

Plusieurs études récentes ont démontré l'effet bénéfique du milieu hermétique sur les résistances mécaniques à long terme des briques en terre. Arrigoni et al. (2017) [228] ont observé que les briques curées en milieu hermétique (HR élevée constante $96 \pm 2\%$ et une température $21 \pm 1^\circ\text{C}$) développent de meilleures résistances comparées à celles séchées à l'air (conditions standards). Beckett et al. (2012) [230] ont montré qu'un séchage contrôlé avec une humidité relative (HR) optimise le développement des résistances en évitant les fissurations par retrait trop rapide. Champiré et al. (2016) [203] ont démontré que la cure hermétique permet de conserver plus longtemps l'eau dans la matrice poreuse, favorisant une meilleure hydratation des liants et donc de meilleures performances finales. Ouedraogo et al. (2020) [201] recommandent une cure hermétique à 20°C et 50% HR pour optimiser les résistances à long terme sans fissuration excessive.

Concernant l'effet du milieu hygrothermique, plusieurs études ont mis en évidence son impact positif sur les résistances mécaniques des briques en terre. Laou et al. (2016) [234] ont démontré que des conditions hygrothermiques (températures et humidité relative) favorisent le développement à long terme des résistances mécaniques des briques de terre non stabilisées par

rapport à un séchage à l'air ambiant. Izemmouren et al. (2013) [235] ont constaté que les échantillons curés dans des conditions humides (80 °C, 100% HR) avaient des résistances plus élevées à long terme que ceux curés à l'air ambiant. Ils attribuent cet effet bénéfique à une meilleure hydratation des liants et à la formation de produits cimentaires supplémentaires dans ces conditions humides chaudes. Venkatamara al. (2002) [236] ont rapporté que la cure humide chaude (60-97 °C, 100% HR) favorisait la formation de produits cimentaires supplémentaires, entraînant une augmentation des résistances mécaniques des briques de terre crue. Al Haffar et al. (2021) [176] ont examiné l'impact des conditions de cure sur le développement de la résistance à la compression des briques de terre compactée stabilisées au ciment (CSEB). Les auteurs recommandent une cure à haute HR (proche de 100%) pour optimiser le développement de la résistance des CSEB. Selon leurs observations, un environnement humide chaud (60 °C, 100% HR) permet une meilleure hydratation des phases liantes comme la calcite et les aluminosilicates présents naturellement dans la terre, ce qui conduit à des résistances accrues après plusieurs mois de cure.

IV.3.2. Propriétés thermiques

L'évolution des propriétés thermiques (conductivité thermique et capacité thermique volumétrique) des briques BWBA(0-20%) est étroitement liée aux conditions de cure (ambiantes, hermétiques et hygrothermiques), notamment à la durée (7, 28, 60 et 180 jours).

Pour les briques de référence BWBA(0%), les meilleures performances thermiques à court terme ont été observées en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR). À 28 jours, la conductivité thermique était de 0.93 W/mK et la capacité thermique volumétrique de 2235.5 kJ/m³.K. En comparaison, en conditions hygrothermiques (40 °C, 100% HR), ces valeurs étaient respectivement de 0.9655 W/mK et 2347 kJ/m³.K. Les performances thermiques les plus faibles ont été enregistrées en milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) avec 1.3305 W/mK et 2782 kJ/m³.K à 28 jours.

La diminution des performances thermiques en milieu ambiant est attribuée à l'évaporation de l'eau de constitution au cours du temps de cure (de 7 à 28 jours). Ce phénomène contribue à la création d'une structure poreuse dans les briques en terre. De plus, la faible teneur en argile (12.08%) dans la terre utilisée favorise initialement une structure poreuse.

Plusieurs auteurs confirment l'impact de l'évaporation de l'eau sur les propriétés thermiques. Moevus et al. (2012, 2015) [40, 237] ont effectivement observé que l'évaporation d'eau entraîne une diminution des propriétés thermiques des matériaux en terre. De même, Laou et al. (2020) [238] ont montré que la conductivité thermique des briques en terre crue diminue avec la réduction de la teneur en eau. Oti et al. (2010) [239] montrant que les conditions environnementales pendant la cure affectent significativement les propriétés thermiques et mécaniques des briques.

Laborel-Préneron et al. (2018) [240] ont étudié l'influence des conditions de cure sur les propriétés des matériaux en terre, confirmant l'importance d'humidité relative. Bories et al. (2014) [224] ont mis en évidence l'effet de la teneur en eau sur les propriétés thermiques des matériaux de construction à base de terre, soutenant ainsi les conclusions obtenues sur l'impact de l'évaporation de l'eau. Izemmouren et al. (2013) [235] ont analysé l'influence de la composition du sol et des conditions de cure sur les propriétés thermiques des briques en terre, renforçant les résultats observés sur l'importance de la teneur en argile et des conditions de conservation.

À long terme (180 jours), l'évolution des propriétés thermiques des briques de référence sans cendres BWBA(0%) révèle des tendances intéressantes. Les meilleures performances en termes de conductivité thermique et de capacité thermique volumétrique sont observées en milieu hermétique et hygrothermique, avec des valeurs de 0.9505 W/mK, 2252.5 kJ/m³.K en conditions hermétiques, et 0.9520 W/mK, 2229.5 kJ/m³.K en conditions hygrothermiques. Ces résultats sont légèrement supérieurs à ceux obtenus en milieu ambiant, où l'on mesure 0.973 W/mK, 2229.5 kJ/m³.K.

Il est intéressant de noter que les meilleures performances thermiques des BWBA(0%) à court terme (28 jours) ont été observées en milieu ambiant. Cette supériorité initiale peut être attribuée principalement à l'évaporation de l'eau lors du séchage, qui contribue à la formation d'une structure poreuse favorable à l'isolation thermique. Cependant, cette tendance s'inverse à long terme.

L'évolution à long terme des propriétés thermiques peut être expliquée par le phénomène de carbonatation. En effet, les briques de référence contiennent 14.63% de chaux, qui réagit avec le CO₂ atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Ce processus, plus prononcé en milieu ambiant où le CO₂ est facilement accessible, entraîne une obstruction progressive des

pores dans la structure des briques. La carbonatation affecte directement la porosité, conduisant à une augmentation de la conductivité thermique et une diminution des propriétés d'isolation.

En revanche, dans les milieux hermétiques et hygrothermiques, l'accès limité au CO₂ atmosphérique restreint le processus de carbonatation. Cette limitation préserve mieux la structure poreuse initiale des briques, maintenant ainsi leurs propriétés d'isolation thermique sur le long terme.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux de Venkatarama Reddy et Jagadish (2003) [49], qui ont étudié l'influence de la carbonatation sur les propriétés des matériaux de construction à base de terre. De plus, Beckett et Ciancio (2014) [229] ont mis en évidence l'impact des conditions de cure sur la carbonatation des matériaux stabilisés à la chaux, soulignant l'importance des environnements contrôlés pour préserver les propriétés thermiques à long terme.

Les propriétés thermiques des briques stabilisées avec les cendres de bois nommées BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) montrent une sensibilité marquée aux conditions et à la durée de cure. L'analyse des performances à court terme, sur une période de 7 à 28 jours, révèle des tendances intéressantes.

Pour les briques BWBAa incorporant 20% de cendres WBAA, les résultats à 28 jours sont particulièrement révélateurs. En milieu ambiant, ces briques affichent une conductivité thermique de 0.747 W/mK et une capacité thermique volumétrique de 2079.5 kJ/m³.K. Les conditions hygrothermiques produisent des résultats comparables, avec une conductivité thermique légèrement supérieure de 0.7555 W/mK, mais une capacité thermique volumétrique légèrement inférieure de 2021.5 kJ/m³. K. En revanche, le milieu hermétique se démarque avec des valeurs nettement plus élevées: 0.91 W/mK pour la conductivité thermique et 2510.5 kJ/m³.K pour la capacité thermique volumétrique.

Les briques BWBAb(20%) suivent une tendance similaire, bien que leurs valeurs absolues diffèrent légèrement. En conditions ambiantes, elles présentent une conductivité thermique de 0.787 W/mK et une capacité thermique volumétrique de 2124.5 kJ/m³.K. Le milieu hygrothermique induit une augmentation de ces valeurs, atteignant 0.903 W/mK et 2218.5 kJ/m³.K respectivement. Comme pour les briques BWBAa, le milieu hermétique produit les

valeurs les plus élevées, avec une conductivité thermique de 0.916 W/mK et une capacité thermique volumétrique de 2307 kJ/m³.K.

Ces résultats mettent en évidence que les meilleures performances thermiques à court terme, c'est-à-dire une conductivité thermique plus faible et une capacité thermique volumétrique modérée, sont obtenues en milieux ambiant et hygrothermique pour les deux types de briques. Le milieu hermétique, en revanche, semble favoriser des valeurs plus élevées pour ces deux propriétés, ce qui pourrait s'expliquer par une rétention d'humidité plus importante et une limitation des processus de séchage et de carbonatation.

Ces observations soulignent l'importance cruciale des conditions de cure dans l'optimisation des propriétés thermiques des briques stabilisées aux cendres, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour le contrôle et l'amélioration de leurs performances en tant que matériaux de construction. Collet et al. (2014) [241] ont souligné que ces variations dépendent de la composition minéralogique et de la teneur en eau des matériaux.

Les performances thermiques les moins favorables à 28 jours ont été observées en milieu hermétique, contrairement aux milieux ambiant et hygrothermique. Cette tendance s'explique par l'évaporation rapide de l'eau entre 7 et 28 jours dans le milieu ambiant, créant un réseau de porosités qui influence positivement les propriétés thermiques.

Moëvus et al. (2012) [207] ont démontré que l'évaporation de l'eau lors du séchage augmente la porosité des adobes, réduisant ainsi leur conductivité thermique à court terme. Parallèlement, Ouedraogo et al. (2019) [242] ont confirmé qu'un milieu confiné limitant la carbonatation permet d'augmenter la conductivité par rapport à un milieu ambiant où la carbonatation se produit.

Ces résultats corroborent les observations d'Oti et al. (2010) [239], qui ont étudié l'effet des conditions de cure sur les propriétés des briques en terre stabilisée. Leurs travaux ont mis en évidence que les conditions environnementales pendant la cure affectent significativement les propriétés thermiques des briques.

À long terme (180 jours), les briques stabilisées avec les cendres BWBAa(20%) et BWBAb(20%) présentent des comportements thermiques distincts selon les conditions de cure.

Pour les BWBAa(20%), les meilleures propriétés thermiques sont observées en milieux hermétique (0.7285 W/mK, 1978.5 kJ/m³.K) et hygrothermique (0.722 W/mK, 1906.5 kJ/m³.K), comparativement au milieu ambiant (0.776 W/mK, 1980.5 kJ/m³.K). Ouedraogo et al. (2020) [201] et Cagnon et al. (2014) [208] expliquent que les milieux confinés préservent la porosité et limitent la carbonatation, améliorant ainsi les propriétés isolantes.

En revanche, les BWBAb(20%) montrent des performances optimales en milieu ambiant pour la conductivité thermique (0.818 W/mK) et en milieu hygrothermique pour la capacité thermique (2145 kJ/m³.K). Cette différence pourrait s'expliquer par la nature plus poreuse des cendres WBAb, comme suggéré par Moevus et al. (2012) [207] et Laborel-Préneron et al. (2016) [243].

La capacité thermique volumétrique est généralement meilleure en conditions hygrothermiques, ce que Hall et al. (2009) [211] attribuent à la présence d'eau dans les pores. Jelle (2011) [212] et Collet et al. (2014) [210] soulignent que la conductivité dépend principalement de la porosité, tandis que la capacité thermique volumétrique est également influencée par la densité et la composition.

Ces observations sont corroborées par plusieurs études complémentaires, notamment celles de Labat et al. (2016) [213], Liuzzi et al. (2018) [214], Taallah et Guettala (2016) [215], McGregor et al. (2014) [216], et Ashour et al. (2015) [217]. Ces travaux confirment l'importance de facteurs tels que la teneur en eau, la composition minéralogique, et les conditions de conservation sur les propriétés thermiques des briques en terre stabilisée.

Les conditions hygrothermiques semblent favoriser une évolution stable et favorable des propriétés thermiques des briques à long terme, grâce à une hydratation contrôlée et une limitation de la carbonatation. Cependant, l'influence spécifique des différents types de cendres et des conditions de cure souligne la complexité des interactions en jeu et la nécessité d'une approche nuancée dans l'optimisation de ces matériaux de construction.

Les propriétés thermiques des briques en terre comprimée sont influencées par divers paramètres, comme le soulignent plusieurs études récentes. Fabbri et al. (2018) [244] ont mené une revue approfondie des dernières avancées dans l'évaluation des performances des matériaux de construction en terre. Leur travail met en lumière le rôle crucial de la teneur en eau et de la structure poreuse sur les propriétés thermiques de ces matériaux. Cette étude fournit un cadre

théorique solide pour comprendre les variations observées dans les performances thermiques des briques en fonction de leur composition et des conditions de cure.

Dans un contexte plus spécifique, Sore et al. (2018) [5] se sont penchés sur l'utilisation de matériaux locaux pour la stabilisation des blocs de terre comprimée. Leur recherche est particulièrement pertinente car elle examine l'impact de différents types de liants sur les propriétés des blocs, y compris leurs caractéristiques thermiques. Cette approche permet de mieux appréhender comment l'incorporation de matériaux alternatifs, tels que les cendres, peut modifier les performances thermiques des briques en terre.

Chabriac et al. (2014) [209], bien que principalement axés sur les propriétés acoustiques, apportent un éclairage complémentaire en étudiant la microstructure des matériaux de construction incorporant des sous-produits agricoles. Leur analyse de l'impact de la porosité et de la structure interne sur les propriétés des matériaux est particulièrement pertinente. Les auteurs démontrent comment la structure poreuse influence diverses propriétés des matériaux, ce qui offre des perspectives intéressantes pour interpréter les différences de performance thermique observées dans les briques en terre comprimée.

IV.3.3. Propriétés de durabilités

Les essais d'absorption d'eau capillaire menés sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) révèlent une influence significative des conditions et de la durée de cure sur leur durabilité. Ces résultats mettent en lumière des mécanismes physico-chimiques complexes qui régissent le comportement de ces matériaux.

Pour les briques BWBAa(20%), le milieu hermétique s'avère le plus performant. Le coefficient d'absorption C_b augmente de 2.37 à 6.07 $\text{g}/\text{cm}^2\text{min}^{1/2}$ entre 7 et 180 jours, tout en restant inférieur aux valeurs observées en milieux ambiant et hygrothermique. Cette évolution est attribuée à plusieurs facteurs : la conservation de l'eau favorisant les réactions pouzzolaniques et l'hydratation continue de la chaux, la modification de la structure poreuse, et l'hygroscopicité des produits d'hydratation formés, notamment les gels C-S-H. Ces mécanismes, décrits par Cizer et al. (2012) [221], Bernal et al. (2011) [245], et Jennings (2008) [246], expliquent l'augmentation modérée de l'absorption d'eau malgré une densification de la matrice.

En revanche, les briques BWBAb(20%) montrent des performances optimales en conditions hygrothermiques. Le coefficient C_b diminue de 7.12 à 4.43 $\text{g}/\text{cm}^2\text{min}^{1/2}$ entre 7 et 180 jours, significativement inférieur aux valeurs observées en milieux hermétique et ambiant. Cette

amélioration est attribuée à l'activation thermique des réactions pouzzolaniques, comme l'expliquent Escalante-García et Sharp (2001) [247]. La température élevée (40 °C) et l'humidité constante (100%) favorisent la formation d'un gel densifiant, réduisant la porosité et l'absorption d'eau.

Les différences de comportement entre BWBAa et BWBAb soulignent l'influence de la composition des cendres sur les mécanismes de durcissement et de densification. Fernández-Jiménez et Palomo (2003) [248] notent que la composition chimique et la finesse des cendres affectent leur réactivité et leur sensibilité aux conditions de cure.

La corrélation entre la diminution de l'absorption d'eau et l'augmentation de la résistance mécanique (atteignant 33.34 MPa pour BWBAb à 180 jours) confirme la densification de la matrice. Comme le souligne Neville (2011) [249], il existe généralement une relation inverse entre la résistance et l'absorption d'eau.

IV.3.4. Masses volumiques apparentes

L'étude de l'évolution des masses volumiques apparentes des briques BWBA(0-20%) révèle une forte influence des conditions et de la durée de cure. Les expériences, menées dans des environnements ambiants, hermétique et hygrothermique sur des périodes allant de 7 à 180 jours, ont mis en évidence des comportements distincts selon le type de brique et les conditions de cure.

Pour les briques BWBA(0%), les variations de masse volumique sont faibles, avec les valeurs les plus basses en milieu ambiant. À 28 jours, la masse volumique varie de 310.80 g/cm³ en ambiant, 321.28 g/cm³ en hermétique et 318.46 g/cm³ en hygrothermique. À 180 jours, cette tendance persiste avec des valeurs de 311.12 g/cm³ en ambiant, 313.36 g/cm³ en hermétique et 315.02 g/cm³ en hygrothermique. Cette différence s'explique principalement par l'évaporation de l'eau de constitution lors du séchage en milieu ambiant. Ce phénomène est attribué à l'évaporation de l'eau, comme l'expliquent Ouedraogo et al. (2019) [242]. D'autres facteurs influençant ces variations incluent la rétention d'eau [243], l'effet de la température et de l'humidité sur la microstructure [5], et le rôle de la porosité [250].

Les briques stabilisées avec les cendres BWBAa(5-20%) et BWBAb(5-20%) présentent des comportements plus complexes. À court terme (7-28 jours), les meilleures performances en termes de faible masse volumique sont obtenues en milieu ambiant, particulièrement pour les

BWBAA avec 294.95 g/cm^3 à 28 jours pour 20% de substitution. Les BWBAb(20%) affichent des valeurs légèrement supérieures dans les mêmes conditions.

Cependant, à long terme (60-180 jours), la tendance s'inverse. Les performances optimales sont alors observées en milieu hygrothermique pour les deux types de briques stabilisées. À 180 jours, les BWBAA(20%) et BWBAb(20%) atteignent respectivement 293.11 g/cm^3 et 291.62 g/cm^3 , des valeurs inférieures à celles observées dans les autres milieux. Cette inversion s'explique par deux mécanismes principaux: la formation d'une porosité capillaire élevée due à la forte humidité, et l'accélération des réactions pouzzolaniques à haute température.

La nature spécifique des cendres WBAA et WBAb utilisées influence également les différences observées entre BWBAA et BWBAb, comme l'ont montré Ouedraogo et al. (2019) [242]. L'importance du temps de cure et l'interaction entre les cendres et la matrice argileuse sont soulignées par Vissac et al. (2017) [250] et Laborel-Préneron et al. (2016) [243]. Bories et al. (2014) [224] ont mis en évidence que la porosité peut réduire la densité tout en améliorant les propriétés thermiques.

La combinaison d'une porosité accrue et de la formation de C-S-H (et M-S-H dans le cas des BWBAb) à faible densité explique la faible masse volumique apparente observée dans les briques en terre comprimée stabilisées avec des cendres de bois et conservées dans un environnement hygrothermique à long terme. Ce phénomène ouvre des perspectives pour le développement de matériaux de construction écologiques alliant légèreté et performances thermiques améliorées.

IV.4. L'impact des conditions du milieu de conservation (température ambiante et humidité relative) sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

IV.4.1. Milieu ambiant ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $75 \pm 5\% \text{ HR}$)

L'étude de l'impact des conditions ambiantes sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec des cendres de bois est d'une importance cruciale. La température ambiante et l'humidité relative jouent un rôle déterminant dans le développement des caractéristiques de ces briques.

À court terme, entre 7 et 60 jours, un environnement contrôlé (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) s'avère bénéfique pour les briques de référence sans ajout de cendres de bois. Ces conditions favorisent une meilleure homogénéisation et hydratation des sels minéraux présents dans la terre [209]. De plus, elles encouragent l'évaporation progressive de l'eau de constitution, entraînant une augmentation des pressions capillaires et un rapprochement des particules [165, 212-214, 239]. Ce phénomène renforce la cohésion interne du matériau, améliorant ainsi sa résistance mécanique tout en diminuant sa résistance thermique et sa masse volumique.

Cependant, à long terme (180 jours), ces mêmes conditions deviennent défavorables pour les briques de référence. Une chute des résistances mécaniques, accompagnée d'une augmentation des propriétés thermiques et des masses volumiques a été observée. Cette dégradation des performances est principalement attribuée à deux facteurs. Premièrement, le manque de cohésion entre les particules de terre, dû à un faible pourcentage d'argile (12.08%). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bui et al. (2009) [32]. Deuxièmement, les réactions de carbonatation résultant de l'interaction entre la chaux présente dans la terre et le CO₂ de l'environnement, produisant des liaisons faibles [199, 218].

D'autre part, les briques BWBAa(5-20%) présentent une évolution similaire à celle des briques de référence. Leurs performances s'améliorent de 7 à 60 jours, atteignant un pic à 60 jours en termes de résistance mécanique, propriétés thermiques, durabilité et densité. Cependant, une dégradation de ces propriétés à 180 jours a été observée, probablement due à la carbonatation des briques riches en chaux au contact du CO₂ atmosphérique, formant des liaisons faibles entre les particules de terre et de cendres [112, 178, 179, 181, 180, 251].

En revanche, les briques BWBAb(5-20%) montrent une évolution différente. Leurs performances optimales sont atteintes plus rapidement, entre 7 et 28 jours, avec un pic à 28 jours. Une diminution des performances est observée à 60 et 180 jours, attribuable à la carbonatation des briques riches en chaux et en périclase. Cette réaction avec le CO₂ atmosphérique forme de la calcite et de la magnésite, résultant en des liaisons faibles entre les particules [112, 178, 179, 181, 180, 251].

Les WBAa et WBAb, riches en chaux et en périclase, jouent également un double rôle de stabilisant physique et chimique. Elles produisent des gels cimentaires de type C-S-H et M-S-H qui comblent les vides, réduisant la porosité et améliorant les propriétés mécaniques et la

durabilité. Ce processus n'influence pas significativement les propriétés thermiques ni la masse volumique en raison de la faible densité des liaisons formées.

Les résultats obtenus concernant l'influence de la température ambiante (20 ± 2 °C) et de l'humidité relative ($75 \pm 5\%$ HR) sur les propriétés des briques en terre comprimée, avec ou sans ajout de cendres de bois, montrent des effets variables selon la composition et la durée de cure.

Pour les briques en terre seule (BWBA(0%)) et BWBAa(5-20%), ces conditions environnementales s'avèrent bénéfiques à court terme, entre 7 et 60 jours. Elles favorisent une évaporation lente et contrôlée de l'eau, permettant une meilleure hydratation des minéraux argileux et une consolidation progressive de la structure interne, comme l'ont observé Morel et al. (2007) [202]. L'humidité élevée ralentit le processus de séchage, réduisant les risques de retrait et de fissuration, tout en favorisant les réactions chimiques entre les composants de la terre, conformément aux travaux de Bui et al. (2009) [32].

Ces conditions entraînent une augmentation de la résistance mécanique, une diminution de la résistance thermique due à la densification du matériau, et une légère baisse de la masse volumique liée à l'évaporation progressive de l'eau. Beckett et al. (2014) [229] ont confirmé l'importance du contrôle de l'humidité pendant la cure pour améliorer la résistance à la compression.

Cependant, pour les briques BWBAb(5-20%), l'évolution optimale est observée sur une période plus courte, de 7 à 28 jours, avec des performances maximales atteintes à 28 jours.

À long terme (180 jours pour BWBA(0%) et BWBAa(5-20%), 60 et 180 jours pour BWBAb(5-20%)), une dégradation des performances a été constatée. Ce phénomène est attribué à la carbonatation des briques au contact du CO₂ atmosphérique, formant des liaisons faibles entre les particules. Cette observation est cohérente avec les recherches de Venkatarama et al. (2010) [252] sur l'importance de la composition chimique du sol et des interactions avec l'environnement.

L'utilisation de cendres de bois comme stabilisant alternatif s'inscrit dans une tendance visant à améliorer les performances des briques en terre comprimée, comme le soulignent les travaux Eliche - Quesada et al. (2021) [108] et Boussaa et al. (2023) [252]. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion minutieuse des conditions de conservation pour optimiser les

performances des briques en terre comprimée, avec ou sans stabilisant. Ils mettent en évidence la nécessité d'adapter les conditions de cure en fonction de la composition spécifique des briques et de la durée de conservation souhaitée, conformément aux observations d'Arrigoni et al. (2017) [197] sur la durabilité de la terre stabilisée.

IV.4.2. Milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR)

L'étude de l'évolution des propriétés des briques en terre comprimée, avec ou sans ajout de cendres de bois, révèle des variations significatives en fonction des conditions hermétiques. En milieu hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR), les briques de référence BWBA(0%) et les BWBAa(5-20%) montrent une évolution initiale lente entre 7 et 28 jours, probablement due au milieu scellé qui limite les échanges avec l'extérieur, ralentissant initialement les réactions chimiques. Dans ce cas, le milieu hermétique spécifiquement la température ambiante freine et ralentit les réactions pouzzolaniques a une humidité relative de $75 \pm 5\%$.

Ensuite, une accélération entre 60 et 180 jours a été observée, attribuée à la poursuite des réactions pouzzolaniques dans un environnement contrôlé [252]. Cette accélération tardive affecte la résistance mécanique, les propriétés thermiques, la durabilité et la masse volumique en intensifiant les réactions pouzzolaniques [252]. Les briques contenant un pourcentage plus élevé de cendres de bois BWBAa(15-20%) montrent une évolution plus marquée à long terme, probablement due à la formation continue de C-S-H [108]. À long termes ce milieu devient très favorable pour les BWBAa(15-20%), atteignant les meilleures valeurs des résistance mécanique pour les briques stabilisées avec les WBAa comparé à d'autres environnements, le milieu hermétique favorise les réactions pouzzolaniques de la chaux présente dans les cendres à long termes.

Les briques BWBAb(5-20%) présentent une évolution plus rapide dès les premiers jours, attribuée aux réactions pouzzolaniques produisant des C-S-H et M-S-H. La formation de brucite, observée dans ces briques (**Figure III.34**), est en accord avec les travaux de Kitamura et al. (1995) [151] et Dünzen (2017) [152] sur l'hydratation du MgO dans des atmosphères saturées en vapeur d'eau, retentissant ainsi les réactions chimiques. Dans ce cas, l'évolution de la résistance mécanique est faible à cause de la formation de la brucite plutôt que de M-S-H.

La température modérée et l'humidité élevée favorisent une hydratation continue et contrôlée, conduisant à une amélioration progressive de la résistance mécanique [87]. Le milieu

hermétique semble favoriser le développement d'une microstructure qui améliore les propriétés isolantes des briques. L'humidité constante pourrait contribuer à la formation de pores fins, influençant positivement les propriétés thermiques [228].

L'environnement contrôlé permet une hydratation continue et une formation prolongée de composés cimentaires (C-S-H, M-S-H), améliorant la résistance à l'eau. Cette amélioration de la durabilité est cohérente avec les observations de Bui et al. (2009) [32] sur la performance à long terme des structures en terre. L'évolution de la masse volumique est complexe. La formation continue de C-S-H et M-S-H peut initialement augmenter la densité, mais à long terme, la création d'une porosité plus fine peut conduire à une légère diminution de la masse volumique apparente.

La température modérée (20 ± 2 °C) permet une progression lente mais constante des réactions chimiques, évitant les problèmes liés à une hydratation trop rapide ou trop lente. De plus, l'humidité élevée ($75 \pm 5\%$ HR) assure une disponibilité constante d'eau pour les réactions d'hydratation et pouzzolaniques, cruciales pour le développement des propriétés à long terme. Le milieu hermétique empêche la carbonatation précoce, permettant aux réactions pouzzolaniques de se poursuivre sur une période plus longue.

IV.4.3. Milieu hygrothermique (40 °C, 100% HR)

L'étude de l'évolution des propriétés des briques en terre comprimée et l'importance cruciale des conditions hygrothermiques sur leurs performances. Les résultats révèlent qu'un environnement contrôlé à 40 °C et 100% d'humidité relative exerce un impact particulièrement bénéfique sur l'évolution des caractéristiques de ces briques sur une période allant de 7 à 180 jours.

Pour les briques de référence et les BWBAa(5-20%), une amélioration continue des performances a été observée, comparativement à celle constatée en milieu ambiant durant 7, 28 et 60 jours. Cependant, à 180 jours, cette progression se poursuit sans signe de carbonatation, phénomène attribué principalement aux réactions pouzzolaniques conduisant à la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H).

Les briques BWBAb(5-20%) présentent une évolution similaire à celles conservées en milieu ambiant à court terme (7 à 28 jours), résultant des réactions pouzzolaniques formant à la fois

des C-S-H et des silicates de magnésium hydratés (M-S-H). À long terme, le milieu hygrothermique favorise une accélération remarquable des propriétés mécaniques, culminant avec une résistance à la compression atteignant 33.34 MPa à 180 jours. Cette amélioration significative est attribuée aux réactions pouzzolaniques impliquant la chaux et le périclase présents dans les cendres WBAb.

Ces observations s'alignent avec les travaux de Kitamura et al. (1995) [151] qui ont décrit le processus d'hydratation du MgO en trois phases distinctes dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau. La première phase, caractérisée par une hydratation lente due à la formation d'une fine couche de brucite polycristalline, correspond aux résultats observés à court terme dans tous les milieux étudiés. La deuxième phase, marquée par une accélération de l'hydratation, ce qui explique les résultats obtenus à long terme en milieu hygrothermique, où la couche de brucite se brise, permettant une diffusion accrue de l'eau à la surface du MgO.

Un aspect particulièrement intéressant de cette étude dénote que l'amélioration des résistances mécaniques et de la durabilité des briques BWBA(5-20%) en milieu hygrothermique n'ont pas eu d'impact négatif sur leurs propriétés thermiques ou leur densité. Au contraire, les meilleures performances thermiques ont été observées dans ce milieu, notamment pour les briques BWBAa(20%).

L'impact du milieu hygrothermique sur les diverses propriétés des briques peut être synthétisé comme suit;

Les propriétés mécaniques bénéficient de la formation continue de C-S-H et M-S-H, conduisant à une amélioration progressive de la résistance au fil du temps. Les propriétés thermiques sont influencées positivement par le développement d'une microstructure spécifique et d'une porosité favorable, améliorant ainsi les capacités isolantes des briques. Selon Cagnon et al. (2014) [208], les briques de terre conservées en milieu hygrothermique sont capables de réguler l'humidité relative de l'air intérieur. Ils peuvent améliorer le comportement thermique des bâtiments grâce à leur forte inertie thermique.

La durabilité est renforcée par la formation continue de C-S-H, augmentant la résistance à l'eau. L'évolution de la masse volumique apparente se révèle complexe, avec une possible augmentation initiale suivie d'une diminution à long terme, due à la création d'une porosité plus fine et à la formation de composés hydratés moins denses. Chen et al. (2022) [253] soulignent

l'importance des conditions de durcissement. La température et l'humidité durant ce processus affectent significativement la distribution des pores et la qualité du béton. Des températures et une humidité plus basse lors du durcissement favorisent la formation de macropores et de microfissures, ce qui nuit à la résistance au gel du béton.

Ces résultats s'inscrivent dans la lignée des recommandations d'Al Haffar et al. (2021) [176], qui préconisent une cure à haute humidité relative pour optimiser le développement de la résistance des briques de terre compactée stabilisées au ciment. Bien que ces auteurs suggèrent des températures modérées pour la résistance à long terme, cette étude montre que des températures plus élevées (40 °C) peuvent également conduire à des améliorations significatives des performances.

En conclusion, cette étude démontre que les conditions hygrothermiques contrôlées favorisent une évolution continue et positive des propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec des cendres de bois. Cette évolution se traduit par une amélioration globale des performances mécaniques, thermiques et de la durabilité, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'optimisation des processus de fabrication et de cure de ces matériaux de construction écologiques. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion minutieuse des conditions environnementales dans le développement de matériaux de construction durables et performants à base de terre.

IV.5. Caractérisation des briques en terre comprimée conservées dans différentes conditions de cure (ambiantes, hermétiques et hygrothermiques)

IV.5.1. Analyse minéralogique par une diffraction aux rayons X des BWBA(20%)

Les résultats de l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de conservation dans trois milieux différents (ambiant, hermétique et hygrothermique) sont présentés dans les **Figures IV.23 à IV.25**.

L'évolution des courbes DRX varie selon les conditions de conservation. Pour les milieux ambiants et hygrothermique, les spectres DRX des deux types de briques sont similaires aux trois échéances, avec des intensités presque identiques. Ces observations corroborent les résultats mécaniques proches obtenus dans ces deux milieux.

En milieu hermétique, bien que les pics identifiés restent les mêmes, une augmentation de leur intensité a été constatée. Ceci est en accord avec la faible évolution des résistances mécaniques observée dans ce milieu par rapport aux autres.

Dans tous les cas, quel que soit le milieu ou la durée de conservation, on observe des pics caractéristiques du quartz, de la calcite, de la muscovite et de la kaolinite dans les deux types de briques. Des pics de calcite et de chaux, provenant des cendres de bois incorporées (WBA), sont également visibles.

Pour les BWBA_b(20%), des pics de périclase (MgO) sont identifiés à 28 jours, mais disparaissent aux échéances ultérieures (60 et 180 jours). Ceci s'explique par la consommation du MgO dans les réactions pouzzolaniques avec la silice et l'alumine de la terre.

Dans le cas des BWBA_a(20%), la portlandite (Ca(OH)₂) initialement présente est totalement consommée au fil du temps, probablement par des réactions pouzzolaniques similaires.

Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs interconnectés. Tout d'abord, la disparition des pics de périclase (MgO) dans les BWBA_b(20%) et la consommation totale de la portlandite (Ca(OH)₂) dans les BWBA_a(20%) au fil du temps indiquent des réactions pouzzolaniques actives. Ces réactions, impliquant la silice et l'alumine présentes dans la terre, contribuent significativement au développement de la résistance mécanique des briques.

Les conditions de conservation exercent une influence cruciale sur l'évolution des briques. Les milieux ambiant et hygrothermique montrent des résultats similaires, suggérant que ces conditions favorisent des processus de durcissement comparables. En revanche, le milieu hermétique présente une évolution différente, caractérisée par une augmentation de l'intensité des pics. Cela pourrait indiquer une cristallisation plus importante des composés, mais avec une moindre évolution des propriétés mécaniques.

La stabilité des composés principaux est un autre paramètre ayant un impact important. La présence constante de quartz, calcite, muscovite et kaolinite dans tous les échantillons, indépendamment des conditions et de la durée de conservation, témoigne de la stabilité de ces composés et de leur rôle fondamental dans la structure de base des briques. De plus, l'effet des cendres de bois (WBA) ne doit pas être négligé : la présence de pics de calcite et de chaux provenant des WBA montre l'incorporation effective de ces cendres dans la matrice des briques, contribuant potentiellement à leurs propriétés.

Les changements observés entre 28, 60 et 180 jours indiquent que les réactions chimiques et les processus de durcissement se poursuivent sur une longue période, affectant la composition minéralogique et potentiellement les propriétés mécaniques des briques. Ces résultats suggèrent un processus complexe de durcissement et de maturation des briques, influencé par la composition initiale, les additifs (cendres de bois) et les conditions de conservation. La compréhension approfondie de ces mécanismes pourrait permettre d'optimiser la formulation et les conditions de cure pour améliorer les propriétés finales des briques.

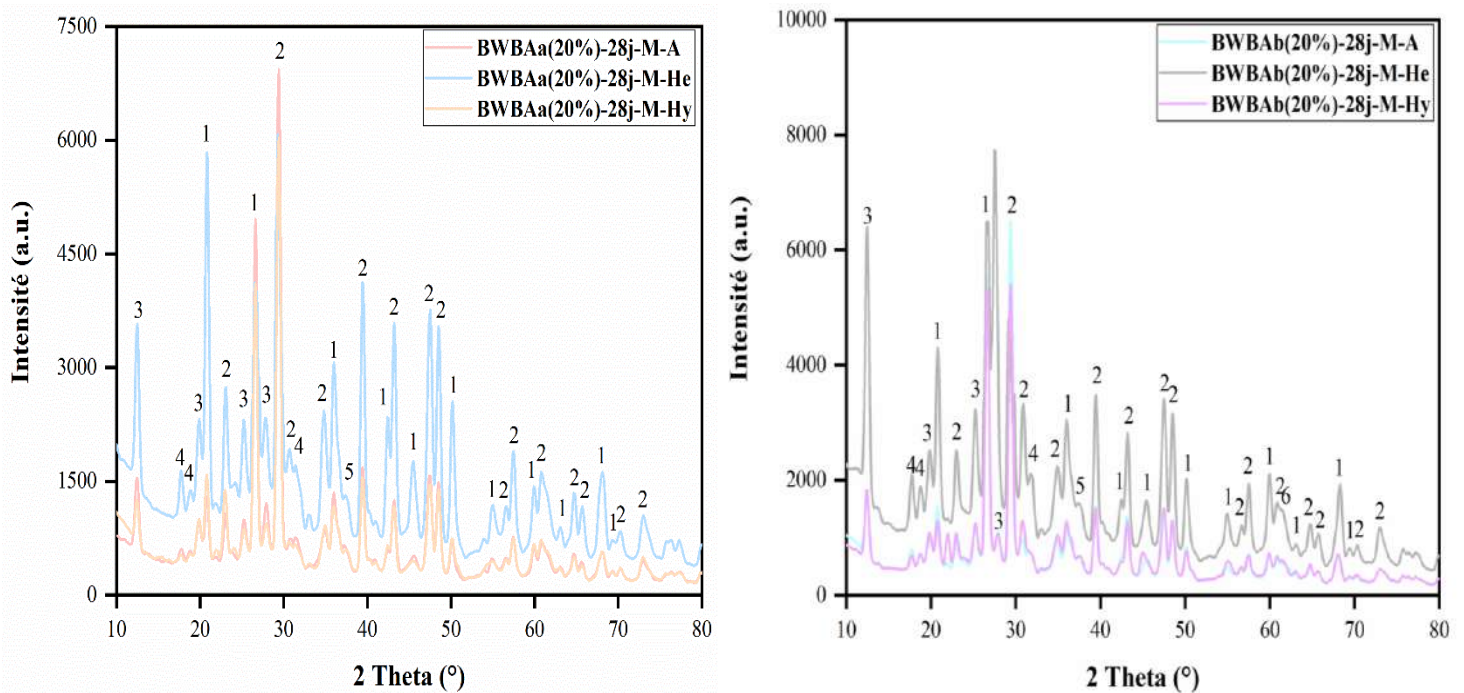


Figure IV.23. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

Chapitre IV: Impact du milieu de conservation sur les propriétés des briques en terre comprimée stabilisées avec les cendres de bois

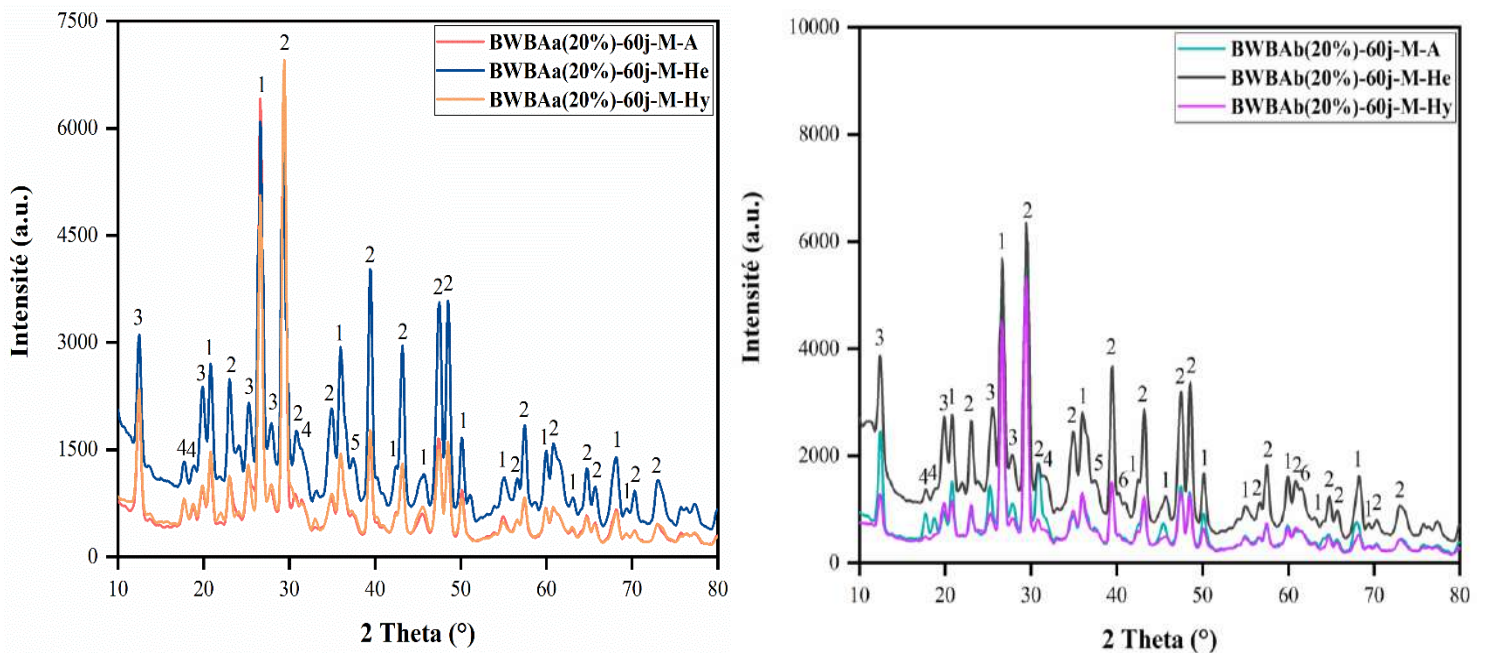


Figure IV.24. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

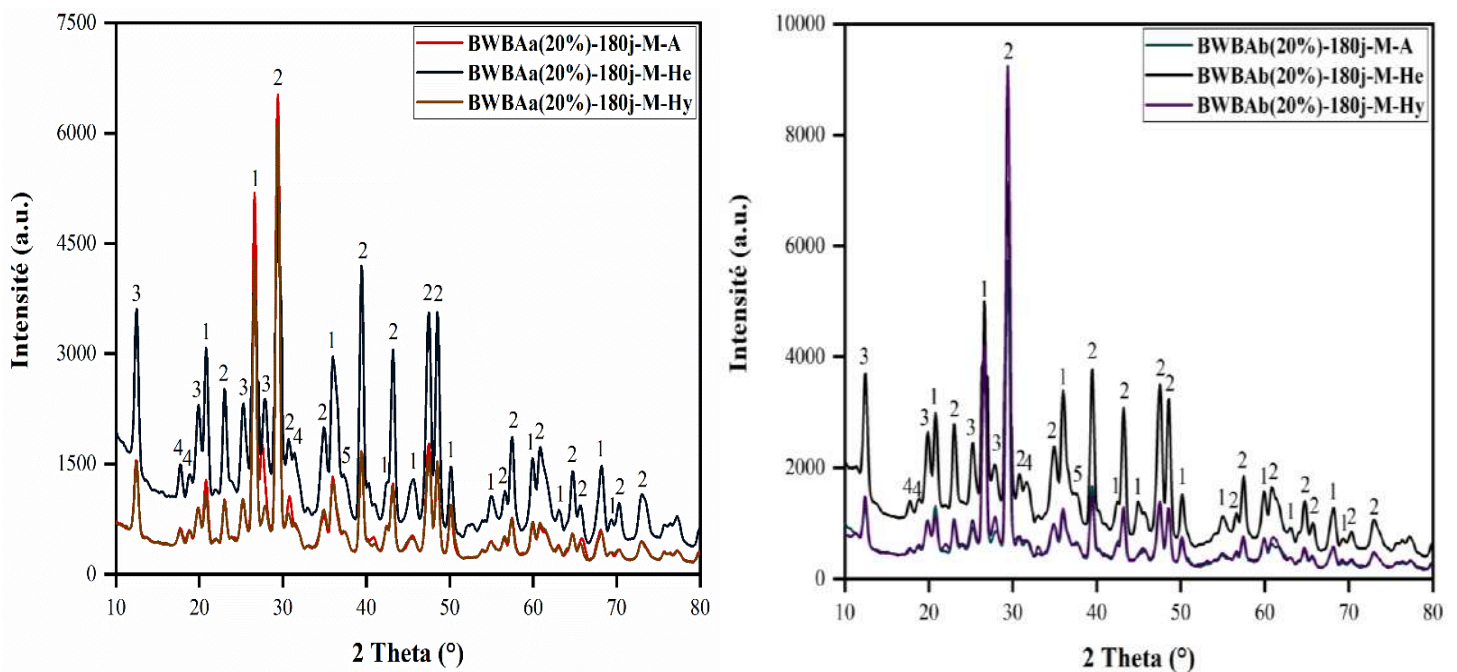


Figure IV.25. DRX des briques BWBA(20%) conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 180 jours, avec (1: Quartz, 2: Calcite, 3: Kaolinite, 4: Muscovite, 5: Chaux et 6: Périclase).

IV.5.2. Caractérisations microstructurales (MEB et MEB/EDX) des BWBA(20%)

Les analyses microstructurales par MEB des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%), effectuées après 28, 60 et 180 jours de cure dans trois environnements différents (ambient, hermétique et hygrothermique), ont révélé des informations importantes sur leur évolution structurale.

Les micrographies, présentées dans les **Figures IV.26 à IV.31**, montrent la formation d'une structure consolidée dans les briques, évoluant au fil du temps, indépendamment des conditions de conservation. Une variété de particules (sphériques, angulaires, alvéolaires) dispersées dans les échantillons a été observée, avec une distribution granulométrique principalement serrée et condensée au sein de la matrice.

L'évolution microstructurale des briques varie en fonction du milieu de conservation et du temps. À 28 jours, les BWBAa(20%) conservées en milieu ambient et hygrothermique présentent une structure en couches ressemblant à du coton, probablement due à la formation de C-S-H issus des réactions pouzzolaniques. Cette structure est différente de celle observée dans le milieu hermétique à la même échéance. À 60 et 180 jours, la microstructure des BWBAa(20%) dans tous les milieux montre des structures plus denses en C-S-H, résultant des réactions pouzzolaniques entre la chaux des WBAa et les composants de la terre.

Les BWBAb(20%) montrent également une évolution des formes différentes de C-S-H et M-S-H de 28 à 180 jours. Cette densification progressive confirme l'amélioration des propriétés mécaniques observée au fil du temps.

Les images MEB des briques BWBA(20%) révèlent des différences morphologiques selon les conditions de cure. En milieu ambient, une microstructure relativement poreuse avec des formations de C-S-H et M-S-H visibles mais moins denses a été observée. Le milieu hermétique présente une microstructure plus dense avec des formations de C-S-H et M-S-H mieux définies et une porosité réduite. Enfin, le milieu hygrothermique montre une microstructure très dense avec des formations abondantes et bien définies de C-S-H et M-S-H, indiquant une hydratation et des réactions pouzzolaniques optimales.

Cette étude microstructurale met en évidence l'importance cruciale des conditions de cure et du temps dans le développement de la structure interne des briques. L'évolution de la formation et de la distribution des phases C-S-H et M-S-H influence significativement les propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité des briques en terre comprimée. Ces résultats

soulignent l'importance d'optimiser les conditions de cure pour améliorer les performances des briques stabilisées avec des cendres de bois.

La formation des C-S-H (silicates de calcium hydratés) et M-S-H (silicates de magnésium hydratés) observée au microscope électronique à balayage (MEB) présente diverses formes caractéristiques, influencées par plusieurs facteurs tels que l'âge de l'échantillon, les conditions de cure (température, humidité), la composition chimique du mélange initial et la présence d'autres composés ou additifs, notamment les deux types de cendres de bois dans cette étude.

Les **Figures IV.26 à IV.28** illustrent l'évolution structurale des briques BWBAa(20%) de 28 à 180 jours en fonction du milieu de conservation. À 28 jours, les C-S-H apparaissent principalement sous forme de structure fibreuse, avec des fibres enchevêtrées ou de fines aiguilles, caractéristique des premiers stades d'hydratation. Avec le temps, une évolution vers des structures en feuillets ou en couches, ressemblant à des pétales de fleur ou des écailles superposées, a été observée. Dans certains cas, les C-S-H forment une structure en gel, apparaissant comme une masse amorphe et dense, comblant les espaces interparticulaires. À des stades plus avancés, une morphologie en réseau tridimensionnel, semblable à un nid d'abeilles, est observée, indiquant la maturation des C-S-H.

En ce qui concerne les BWBAb(20%) représentées sur les **Figures IV.29 à IV.31**, la formation de M-S-H de 28 à 180 jours se manifeste sous diverses formes. Une structure en plaquettes, avec des plaquettes fines et allongées, parfois enchevêtrées a été observée. Des structures en feuillets, similaires aux C-S-H mais généralement plus fines et délicates, sont également présentes. Dans certains cas, les M-S-H apparaissent sous forme de fibres très fines, plus délicates que celles des C-S-H. Enfin, la présence de structures en rosette, où les M-S-H forment des agrégats avec des plaquettes ou des fibres rayonnant à partir d'un point central.

Ces observations sont corroborées par plusieurs études scientifiques. Richardson et al. (2004) [254] ont détaillé la structure et la morphologie des C-S-H dans divers systèmes cimentaires. Bernard et al. (2017) [255] ont examiné l'influence du magnésium sur la formation et la structure des C-S-H. Zhang et al. (2011) [256] se sont concentrés sur la formation et les caractéristiques des M-S-H, tandis que Li et al. (2014) [257] ont fourni des informations détaillées sur leur formation et morphologie. Pardal et al. (2009) [258] ont étudié la structure des C-S-H avec différentes compositions, et Lothenbach et al. (2015) [259] ont comparé les caractéristiques des C-S-H et M-S-H.

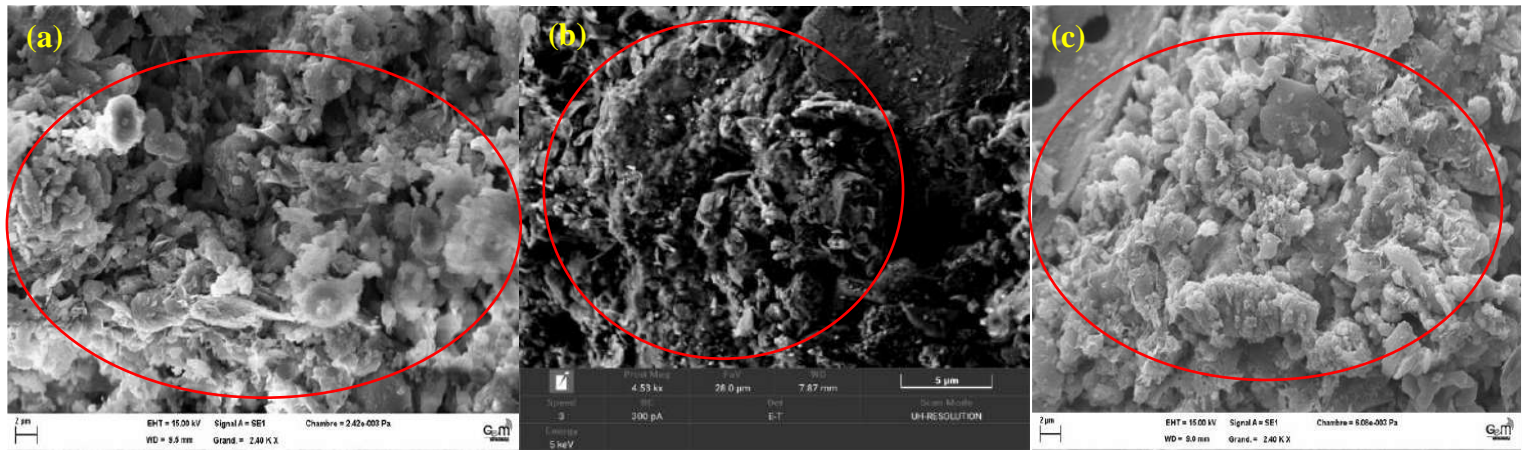


Figure IV.26. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

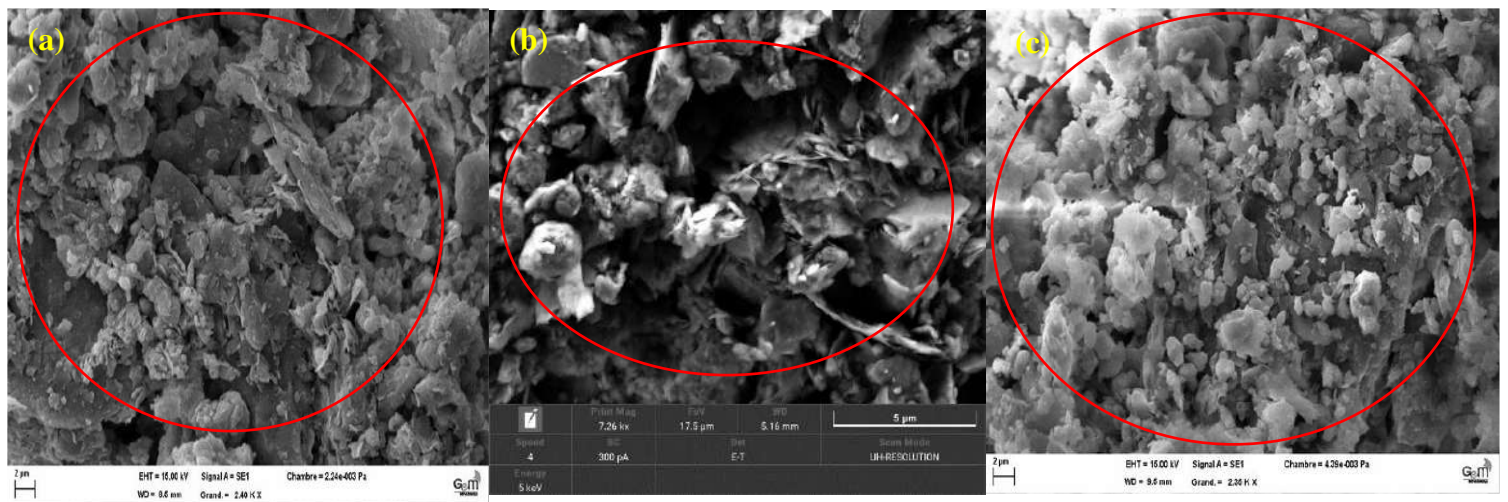


Figure IV.27. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

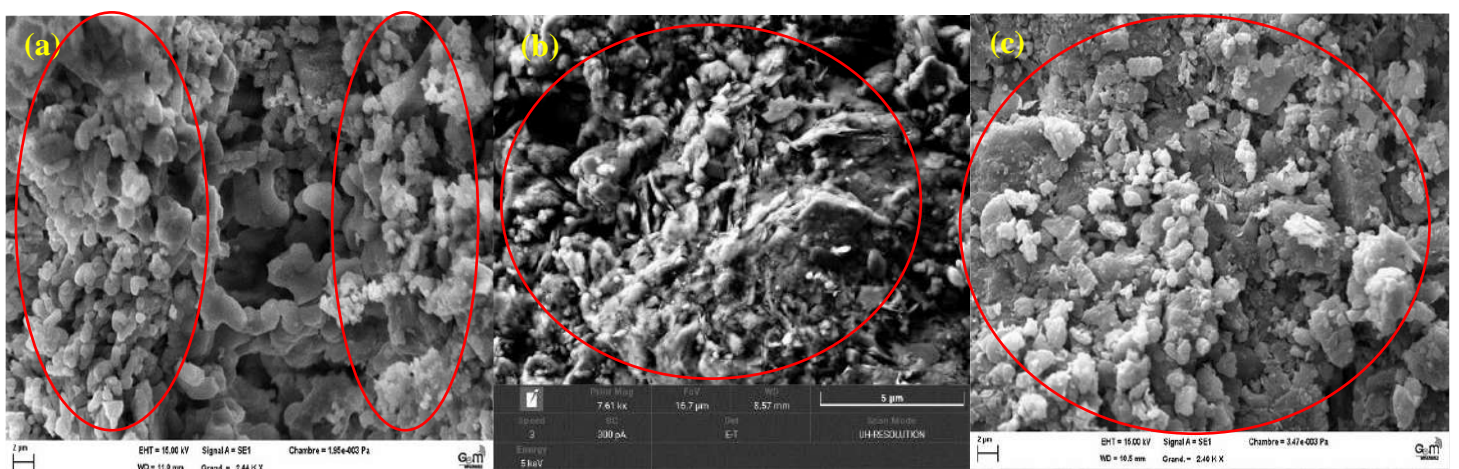


Figure IV.28. Images MEB de BWBAa(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

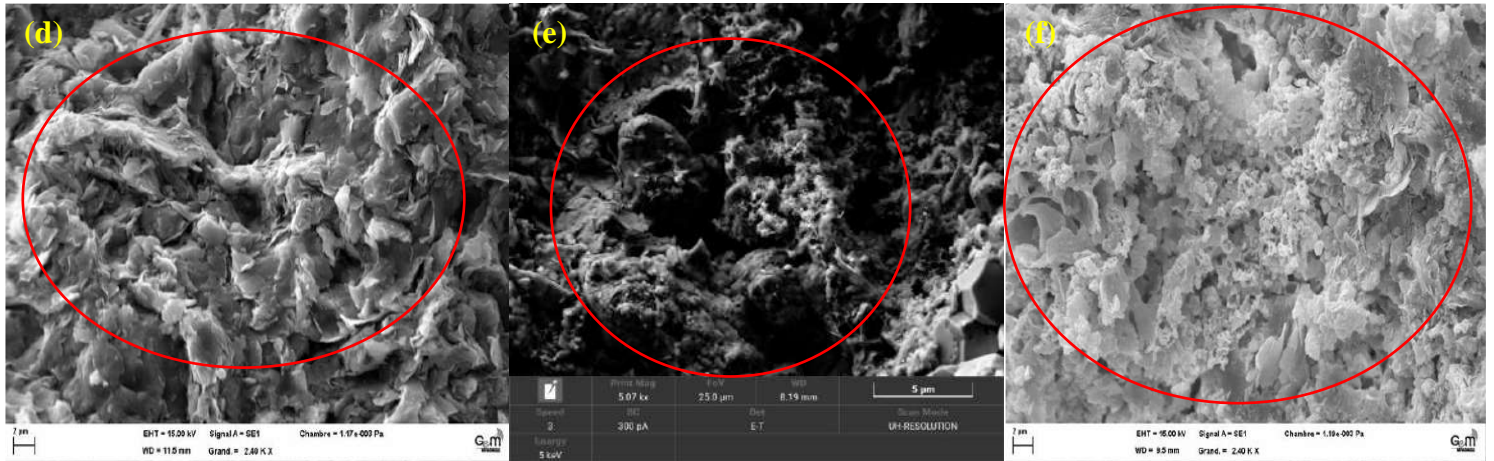


Figure IV.29. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

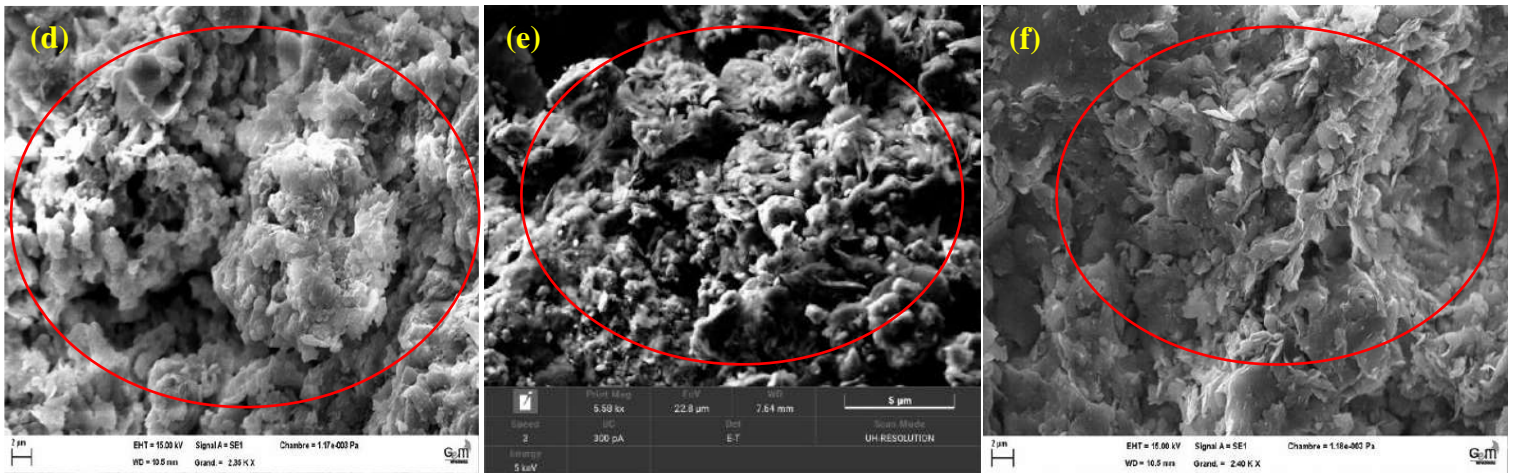


Figure IV.30. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

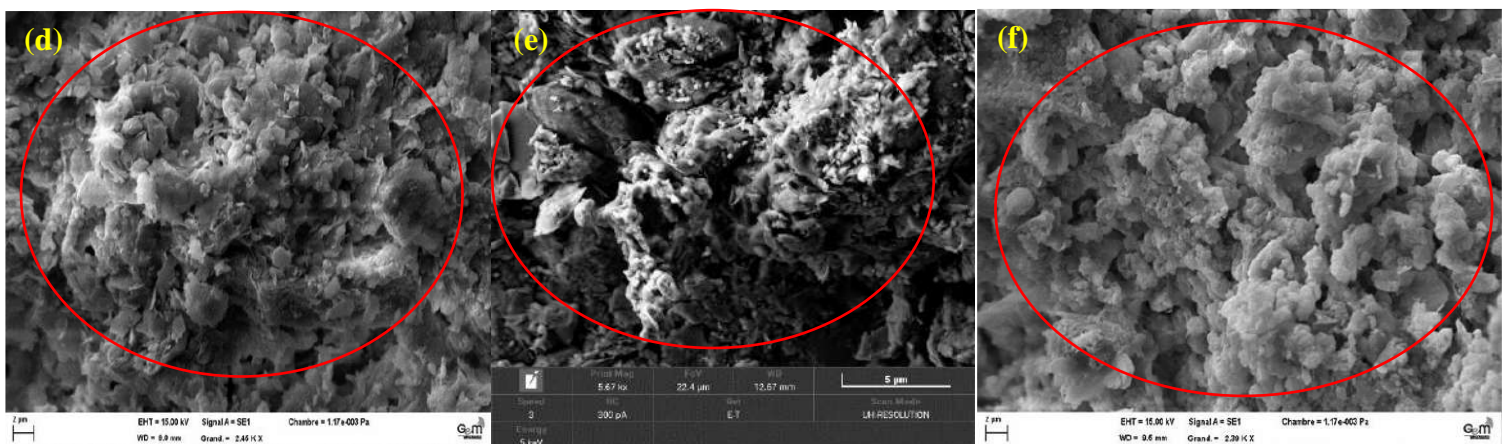


Figure IV.31. Images MEB de BWBAb(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

Les **Figures IV.32 à IV.37** présentent une analyse détaillée de la morphologie microscopique MEB/EDX des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 28, 60 et 180 jours de cure dans trois milieux distincts. Cette analyse révèle l'évolution structurale des briques et la formation de composés hydratés au fil du temps.

Pour les BWBAa(20%), l'évolution des C-S-H est clairement visible. À 28 jours, ils apparaissent sous forme de structures fibreuses, caractéristiques des premiers stades d'hydratation. Avec le temps, ces structures évoluent vers des formes en feuillets ou en couches, puis vers une structure en gel dense. Aux stades avancés, une morphologie en réseau tridimensionnel semblable à un nid d'abeilles indique la maturation des C-S-H.

Les BWBAb(20%) montrent une formation de M-S-H sous diverses formes. Des structures en plaquettes fines et allongées ont été observées, des feuillets plus délicats que les C-S-H, des fibres très fines, et des structures en rosette avec des agrégats rayonnants.

La densification microstructurale observée est attribuée aux réactions pouzzolaniques entre les constituants des briques. Les analyses EDX ont confirmé la présence d'éléments clés (K, Ca, Al, Si, O, Fe, Na, Mg) dont les concentrations varient selon le temps et les conditions de conservation.

L'utilisation combinée du MEB et de l'EDX s'avère cruciale pour distinguer et caractériser précisément les C-S-H et M-S-H, dont la morphologie peut parfois être similaire. Cette approche permet de visualiser et de comprendre la microstructure consolidée et dense qui se développe dans ces briques stabilisées aux cendres de bois.

Ces observations microscopiques témoignent des réactions pouzzolaniques en cours et du processus de durcissement des briques. Elles mettent en évidence l'influence du temps de cure et des conditions environnementales sur le développement de la microstructure, soulignant ainsi l'importance de ces facteurs dans l'optimisation des propriétés des briques en terre stabilisées aux cendres de bois.

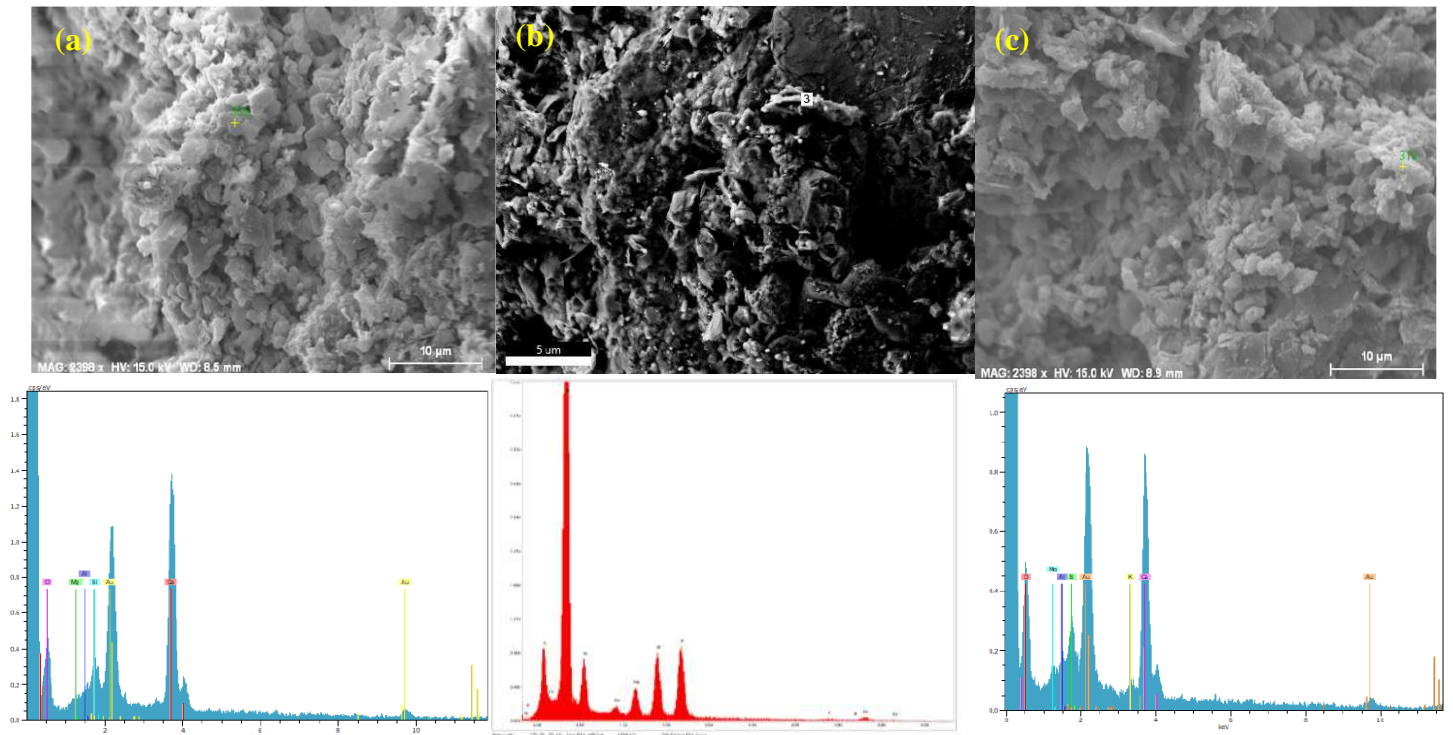


Figure IV.32. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

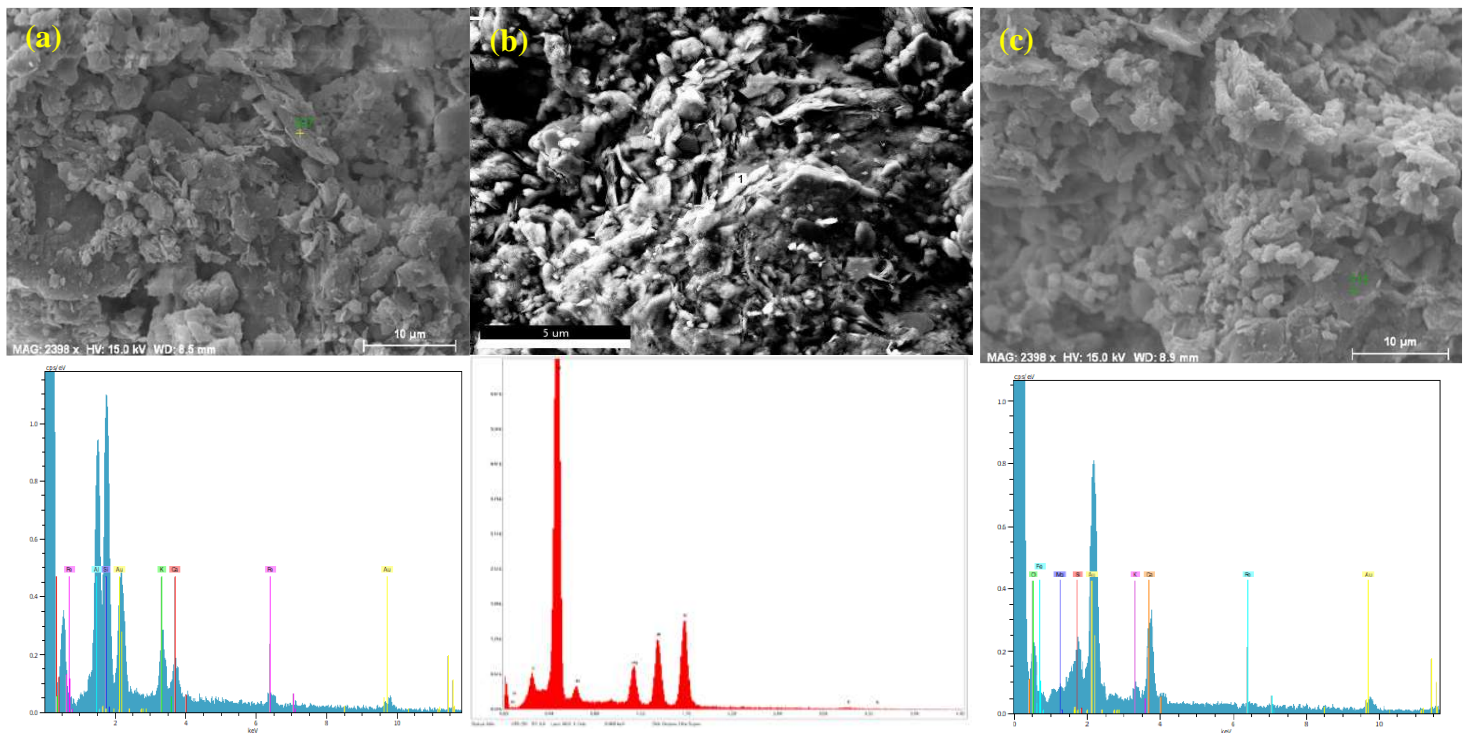


Figure IV.33. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

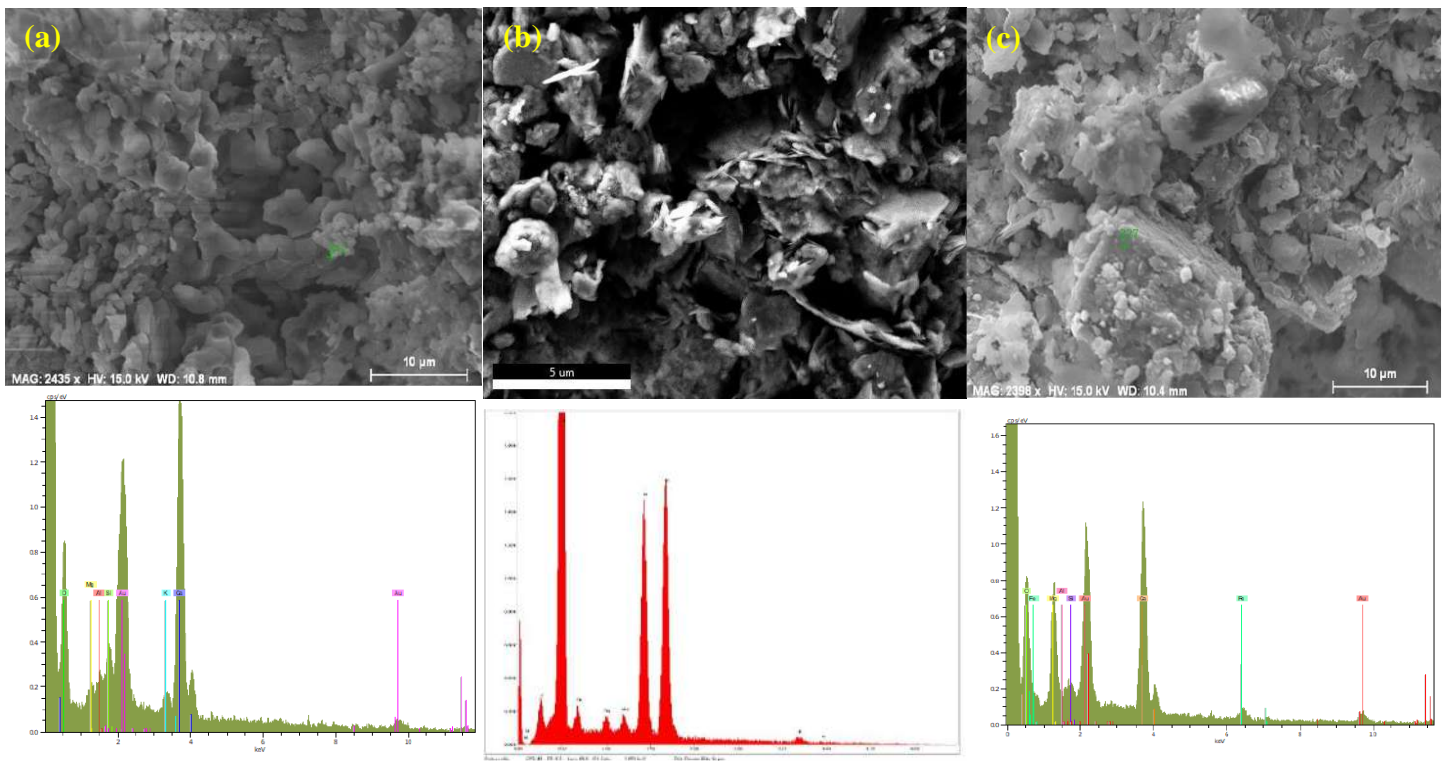


Figure IV.34. Images MEB/EDX de BWBAa(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (a) milieu ambiant, (b) milieu hermétique, (c) milieu hygrothermique.

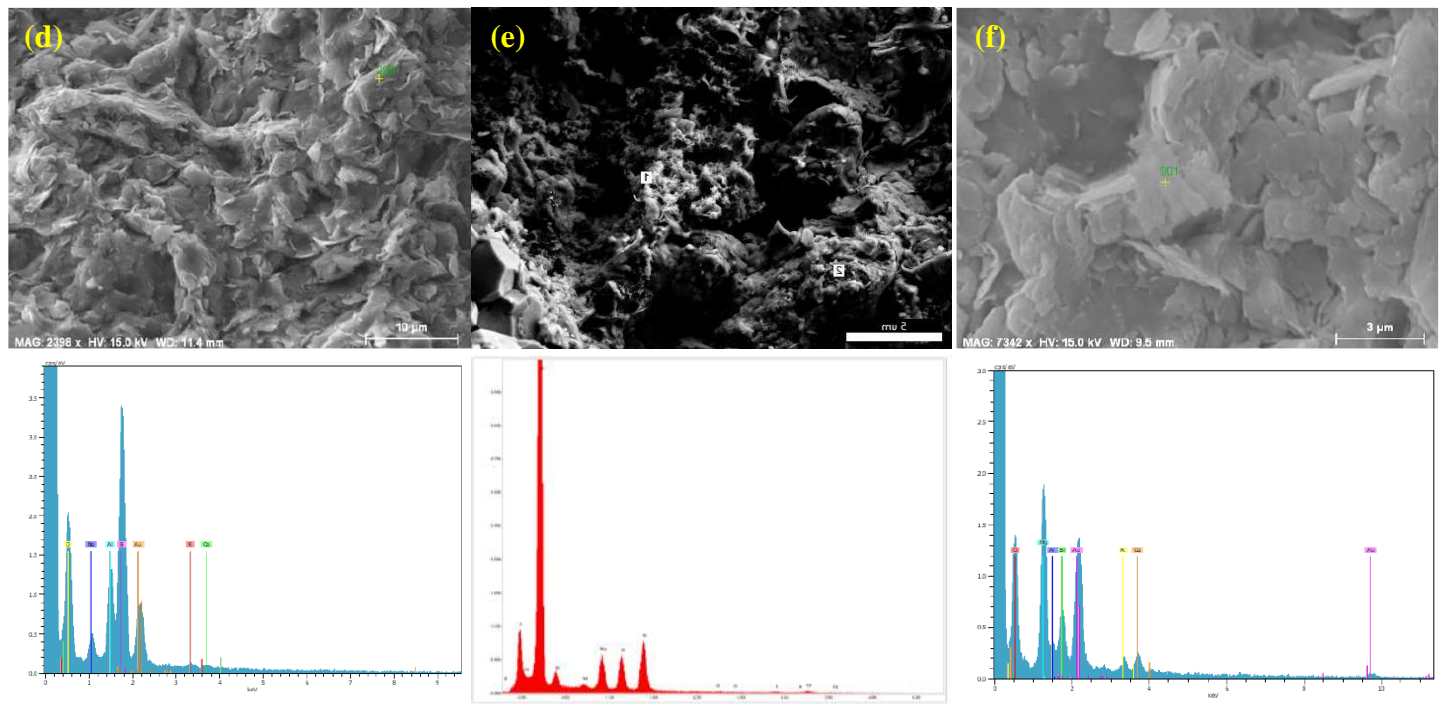


Figure IV.35. Images MEB/EDX de BWBAb(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

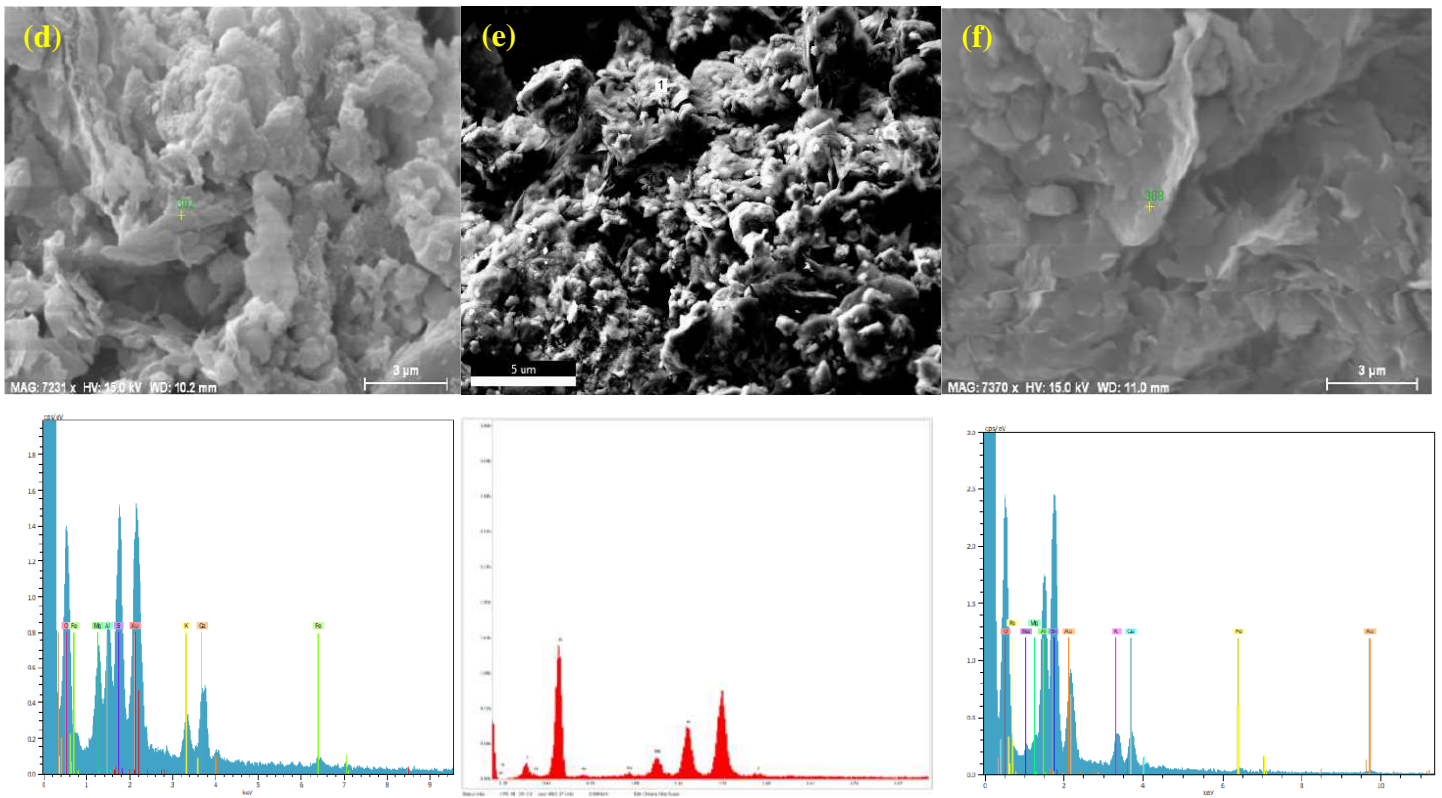


Figure IV.36. Images MEB/EDX de BWBA(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

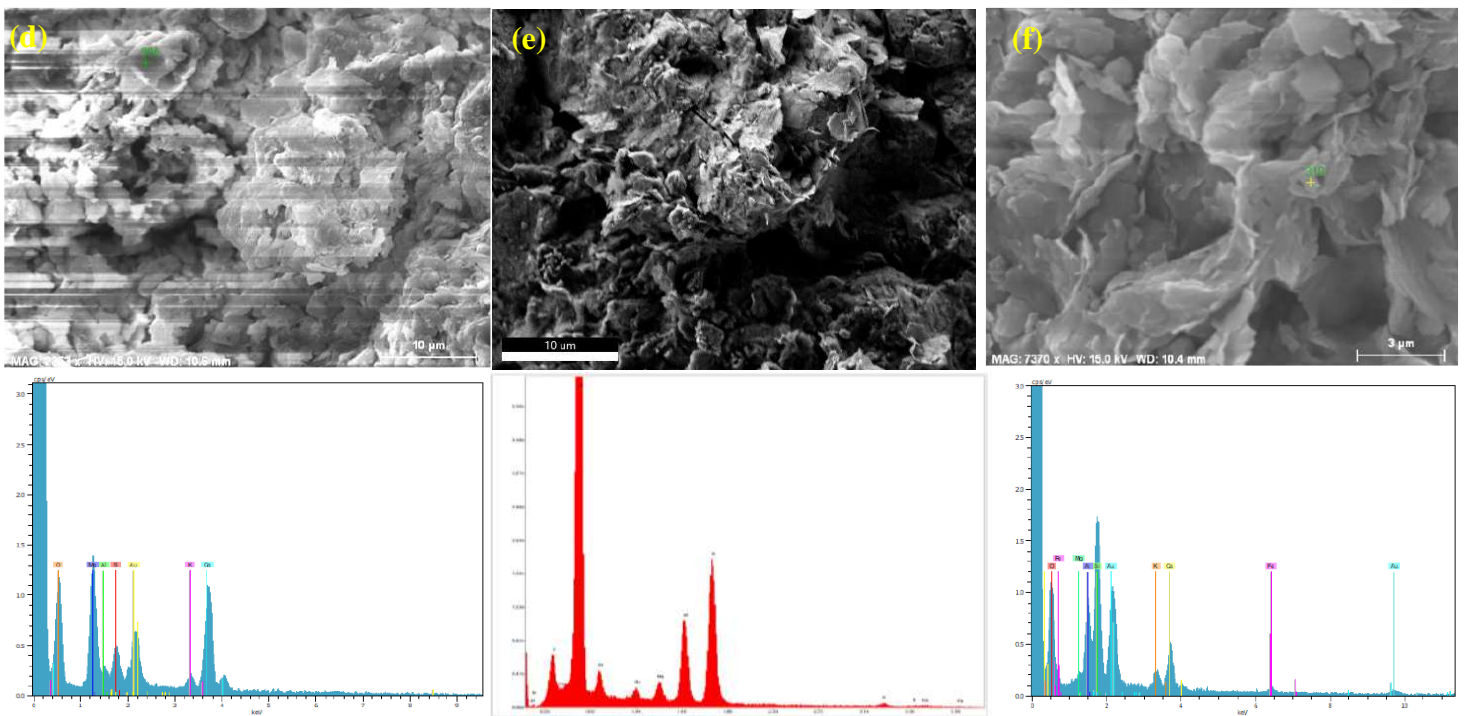


Figure IV.37. Images MEB/EDX de BWBA(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions; (d) milieu ambiant, (e) milieu hermétique, (f) milieu hygrothermique.

IV.5.3. Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) des BWBA(20%)

Les essais d'analyse thermogravimétrique (ATG/DTG) effectués sur les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) ont révélé des informations essentielles sur les transformations physico-chimiques de ces matériaux lors de leur chauffage. Conservées dans des conditions ambiantes, hermétiques et hygrothermiques pendant 28, 60 et 180 jours, ces briques ont montré des comportements thermiques variables selon le milieu de conservation et la durée de cure.

Les résultats, illustrés dans les **Figures IV.38, IV.39 et IV.40**, montrent une évolution complexe des pertes de masse à différentes plages de température. Pour les briques BWBAa(20%), riches en chaux, des phénomènes intéressants ont été observés entre 400 °C et 800 °C. Entre 400 °C et 600 °C, les échantillons BWBAa(20%) conservés en milieu hermétique pendant 28 à 60 jours présentent une perte de masse significative, atteignant 3.73% à 4.07% à 180 jours (**Tableau III.1**). Cette perte de masse, supérieure à celle observée dans d'autres conditions de conservation, est attribuée à la décomposition de la kaolinite en métakaolinite et à la déshydroxylation de la portlandite [260, 261].

Entre 600 °C et 800 °C, une autre perte de masse importante pour les BWBAa(20%) a été constatée, variant selon les conditions de conservation et le temps de cure. À 28 jours, cette perte est plus prononcée en milieu ambiant, tandis qu'à 60 jours, elle est maximale en milieu hermétique. À 180 jours, c'est en milieu hygrothermique que la perte de masse est la plus significative. Cette perte résulte de la réorganisation structurale de la métakaolinite, du début de la recombinaison et de la cristallisation des composés céramiques en phase solide, ainsi que de la décomposition des carbonates de calcium avec libération de CO₂ [262].

Les BWBAb(20%), riches en chaux et en oxyde de magnésium, présentent un comportement distinct. Une perte de masse maximale est observée entre 350 °C et 450 °C en milieu ambiant à 28 jours. À 60 et 180 jours, la perte maximale est obtenue en milieu hermétique, atteignant 1.61% à 180 jours. Les courbes des BWBAb(20%) montrent un pic supplémentaire dans la gamme 350-450 °C, correspondant à la décomposition ou déshydroxylation de la brucite Mg(OH)₂ [263, 264].

Pour les BWBAb(20%), des pertes de masse maximales entre 400-600 °C ont été observées : 4.20% en milieu hermétique à 28 jours, 4.54% en milieu hygrothermique à 60 jours, et 4.65% en milieu hermétique à 180 jours. Entre 600-800 °C, les pertes maximales sont de 13.04% en milieu hermétique à 28 jours, 15.43% en milieu hygrothermique à 60 jours, et 14.59% en milieu

hermétique à 180 jours. Ces variations selon les conditions de conservation et le temps de cure soulignent l'importance de ces paramètres dans l'évolution des propriétés des briques.

La diversité des résultats observés dans les analyses thermogravimétriques des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) reflète la complexité des processus physico-chimiques à l'œuvre dans ces matériaux. Cette diversité s'explique par l'interaction de plusieurs facteurs clés, chacun jouant un rôle déterminant dans les transformations observées. La composition initiale des cendres, particulièrement leur teneur en chaux (CaO), est un facteur primordial. Comme l'a démontré Taylor (1997) [192] dans ses travaux sur la chimie du ciment, la chaux réagit vigoureusement avec l'eau, formant de l'hydroxyde de calcium (portlandite). Cette réaction est fortement influencée par les conditions environnementales, expliquant les différences observées entre les divers milieux de conservation. Les conditions de conservation (ambiante, hermétique et hygrothermique) créent des environnements distincts pour les réactions chimiques. En milieu hermétique, l'humidité piégée favorise une hydratation continue de la chaux, conduisant à une formation plus importante de portlandite [261]. En milieu ambiant, l'exposition au CO₂ atmosphérique favorise la carbonatation [265]. Le milieu hygrothermique, avec son humidité élevée et constante, favorise des réactions à long terme, expliquant les pertes de masse plus importantes observées à 180 jours.

Le temps de cure joue également un rôle crucial. L'évolution des pertes de masse au fil du temps (28, 60 et 180 jours) reflète la progression des réactions chimiques. Cizer et al. (2012) [221] ont démontré que ces réactions d'hydratation et de carbonatation se poursuivent sur de longues périodes dans les liants à base de chaux, expliquant les variations observées à différents stades de cure.

Les interactions avec les minéraux argileux présents dans la terre limono-argileuse contribuent également à la complexité des résultats. La décomposition de la kaolinite en métakaolinite entre 400°C et 600°C, un phénomène étudié par Fernandez et al. (2011) [260], participe aux pertes de masse observées dans cette plage de température.

La formation de composés complexes, notamment entre 600°C et 800°C, résulte de plusieurs processus simultanés, comme l'ont montré Moropoulou et al. (2005) [261]. Ces processus incluent la réorganisation structurale de la métakaolinite, le début de la recombinaison et la cristallisation des composés céramiques, ainsi que la décomposition des carbonates de calcium. Enfin, l'influence de la teneur en eau, tant initiale que son évolution dans les différents milieux de conservation, joue un rôle significatif dans les réactions d'hydratation et de carbonatation.

Cultrone et al. (2004) [262] ont souligné l'importance de ce facteur dans le vieillissement des briques.

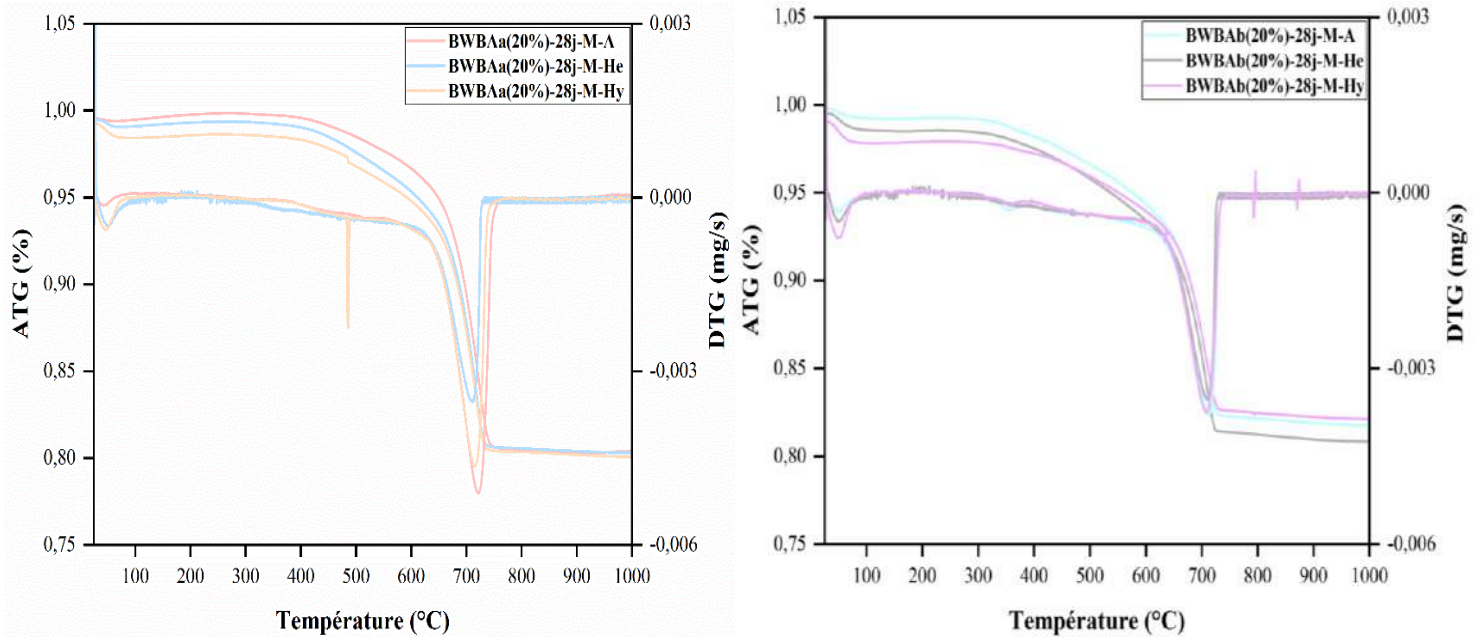


Figure IV.38. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 28 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hygrothermique).

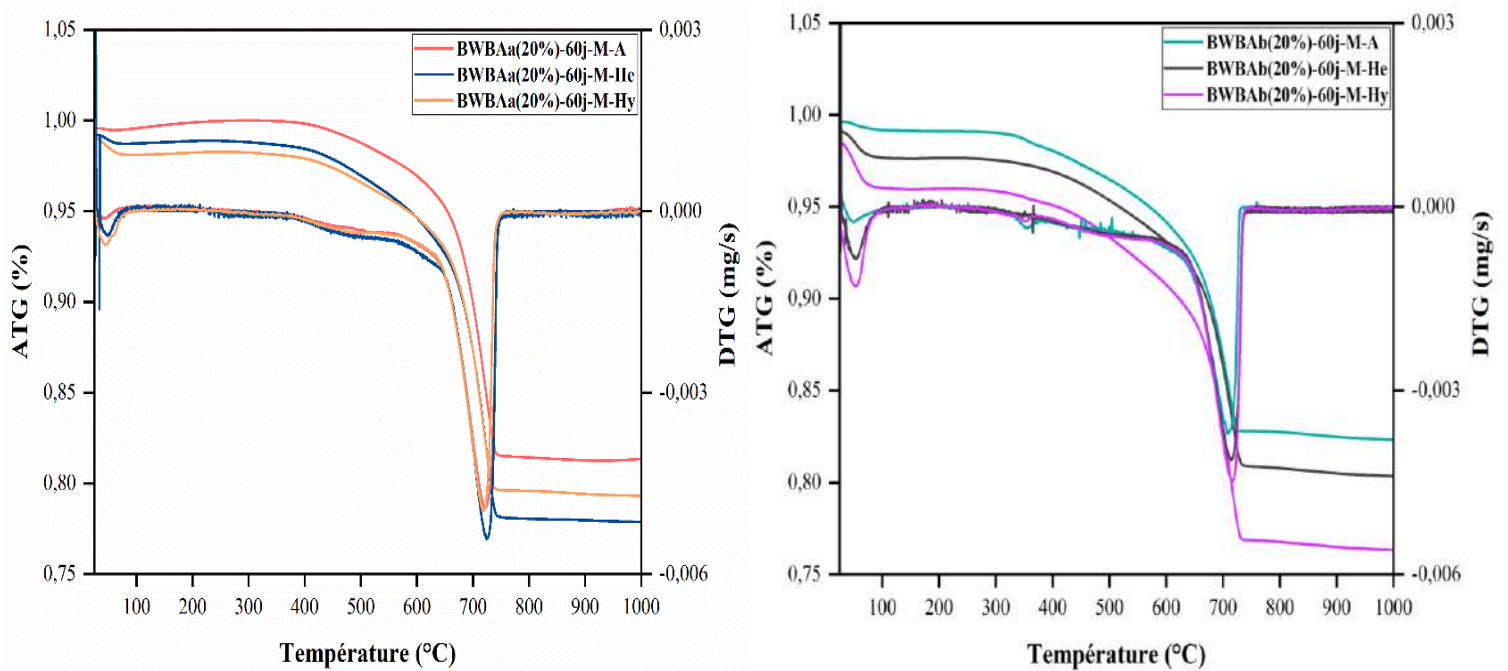


Figure IV.39. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 60 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hygrothermique).

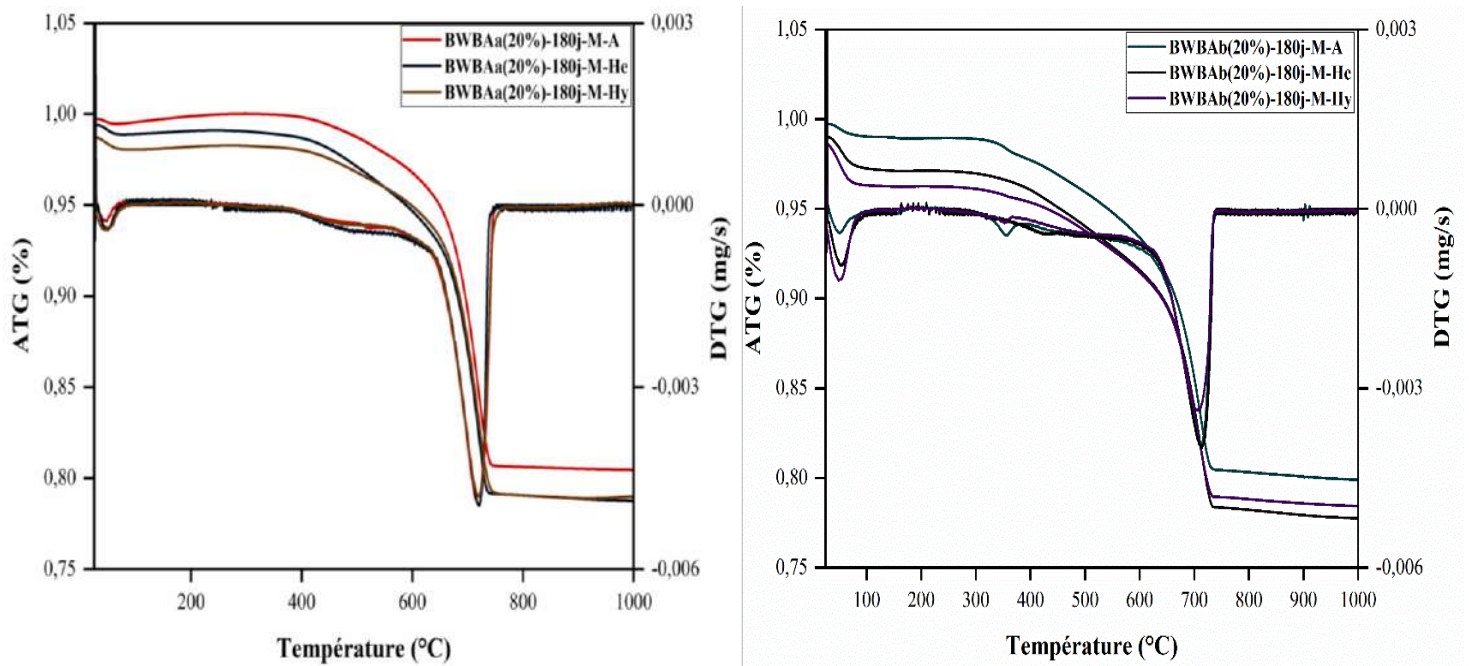


Figure IV.40. Courbes ATG/DTG des BWBA(20%) conservées pendant 180 jours dans différentes conditions (ambiantes, hermétiques et hydrothermique).

IV.5.3.1. Calcul des pourcentages de calcite, de portlandite et de brucite

Les **Figures IV.41 à IV.43** présentent l'évolution des pourcentages de calcite (CaCO_3), portlandite (Ca(OH)_2) et brucite (Mg(OH)_2) dans les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) sur une période de 28, 60 et 180 jours, en fonction de trois conditions de conservation : ambiantes, hermétiques et hydrothermiques.

Pour les briques BWBAa(20%), des tendances distinctes selon le milieu de conservation a été observées. En milieu hermétique, le pourcentage de portlandite augmente progressivement de 15.22% à 16.50% entre 28 et 180 jours. En revanche, en milieu ambiant, la portlandite augmente initialement puis diminue à 180 jours, tandis qu'en milieu hydrothermique, elle décroît continuellement, suggérant sa consommation dans les réactions pouzzolaniques.

Concernant la calcite dans les BWBAa(20%), le milieu hydrothermique montre une faible teneur initiale, suivie d'une augmentation significative atteignant 36.12% à 180 jours. Le milieu ambiant présente une diminution suivie d'une augmentation, alors qu'en milieu hermétique, une hausse jusqu'à 60 jours (37.69%) puis une légère baisse à 180 jours (35.49%) a été notée.

Pour les briques BWBAb(20%), la dynamique de formation des composés est plus complexe. À 28 jours, la portlandite est la moins présente en milieu hygrothermique (13.56%). Cette tendance s'inverse à 60 jours, où les milieux ambiant et hermétique présentent les teneurs les plus faibles. À 180 jours, le milieu hygrothermique affiche à nouveau la plus faible teneur en portlandite, coïncidant avec la résistance à la compression maximale de 33.34 MPa.

La formation de calcite dans les BWBAb(20%) varie également selon les conditions. Initialement plus faible en milieu hygrothermique (26.07% à 28 jours), elle augmente dans ce milieu et en milieu hermétique à 60 jours, tandis qu'elle diminue en milieu ambiant. À 180 jours, une augmentation en milieux ambiant et hermétique a été observée, mais une diminution en milieu hygrothermique.

La brucite dans les BWBAb(20%) présente une teneur minimale en milieu hygrothermique, variant de 2.94% à 3.47% entre 28 et 180 jours. Cette faible teneur est attribuée à sa consommation dans les réactions pouzzolaniques, contribuant aux performances mécaniques optimales. En milieu ambiant, la formation de brucite augmente progressivement, probablement due à l'interaction avec le CO₂ atmosphérique. Le milieu hermétique montre une diminution initiale suivie d'une augmentation à 5.02% à 180 jours.

Les résultats observés dans l'étude des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) révèlent une interaction complexe entre la composition des matériaux, les conditions de conservation et le temps. Ces facteurs influencent de manière significative l'évolution des composés minéraux et, par conséquent, les propriétés mécaniques des briques.

La variation des teneurs en portlandite, calcite et brucite selon les conditions de conservation (ambiantes, hermétiques et hygrothermiques) met en évidence l'impact crucial de l'environnement sur la chimie des briques. En milieu ambiant, l'exposition au CO₂ atmosphérique favorise la carbonatation, expliquant l'augmentation de la calcite et la diminution de la portlandite à long terme. Le milieu hermétique, en limitant les échanges avec l'extérieur, ralentit ce processus, permettant une persistance de la portlandite. Le milieu hygrothermique, combinant chaleur et humidité, semble accélérer les réactions pouzzolaniques, ce qui se traduit par une consommation rapide de la portlandite et une formation plus lente de calcite.

La diminution de la portlandite, particulièrement marquée en conditions hygrothermiques, couplée à l'amélioration des propriétés mécaniques, suggère une consommation active de

Ca(OH)₂ dans les réactions pouzzolaniques. Ces réactions produisent des gels C-S-H supplémentaires, renforçant la structure de la brique. Parallèlement, la carbonatation progressive, visible par l'augmentation de la calcite notamment en milieu ambiant, peut contribuer à densifier la structure, expliquant certaines améliorations de résistance mécanique.

Le comportement de la brucite, notamment dans les BWBAb(20%), ajoute une dimension supplémentaire à la complexité des interactions. Sa consommation en milieu hygrothermique, coïncidant avec de meilleures performances mécaniques, pourrait indiquer son implication dans la formation de gels M-S-H, contribuant ainsi à la résistance du matériau.

Les variations observées au fil du temps (28, 60, 180 jours) démontrent que les réactions chimiques au sein des briques sont continues et évolutives. La non-linéarité de certaines tendances souligne la complexité des interactions entre les différents composés et l'environnement. De plus, les différences notables entre BWBAa(20%) et BWBAb(20%) suggèrent que la composition initiale des briques, en particulier la nature et la quantité des additifs pouzzolaniques, joue un rôle déterminant dans leur comportement chimique et mécanique au cours du temps.

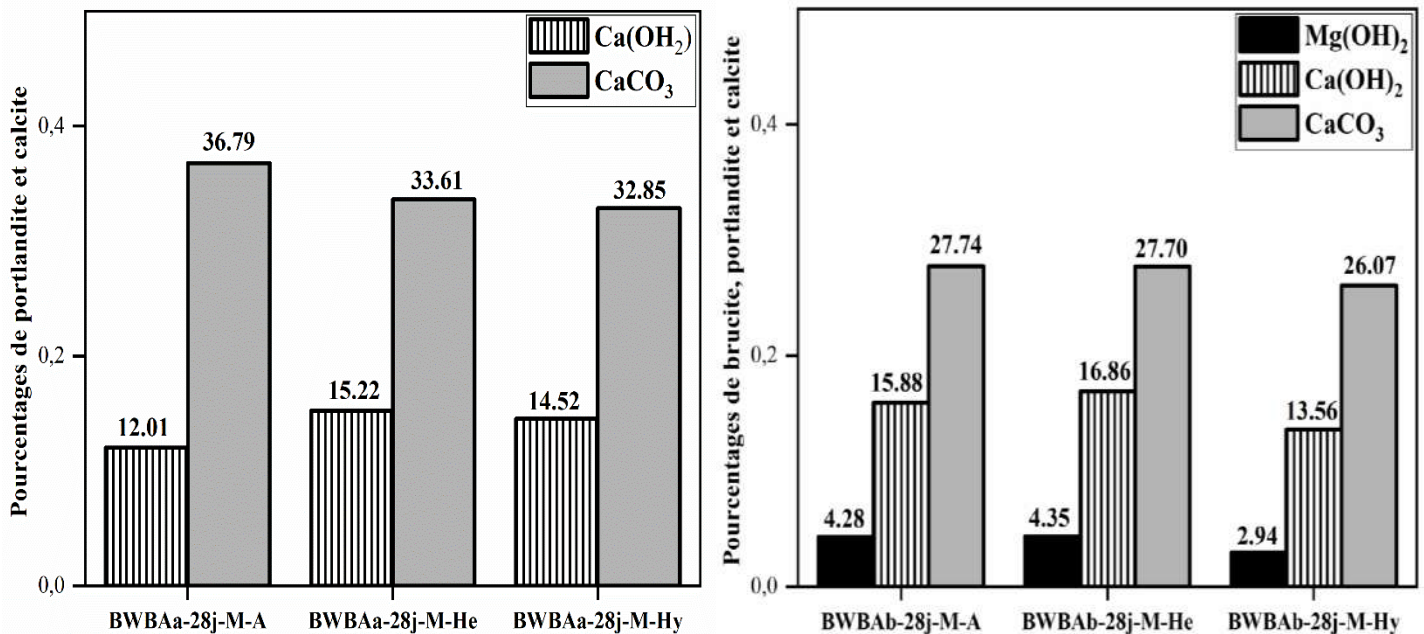


Figure IV.41. Résultats des pourcentages de Mg(OH)₂, Ca(OH)₂ et CaCO₃ contenus dans les BWBA(20%) après 28 jours dans les différents milieux de conservations.

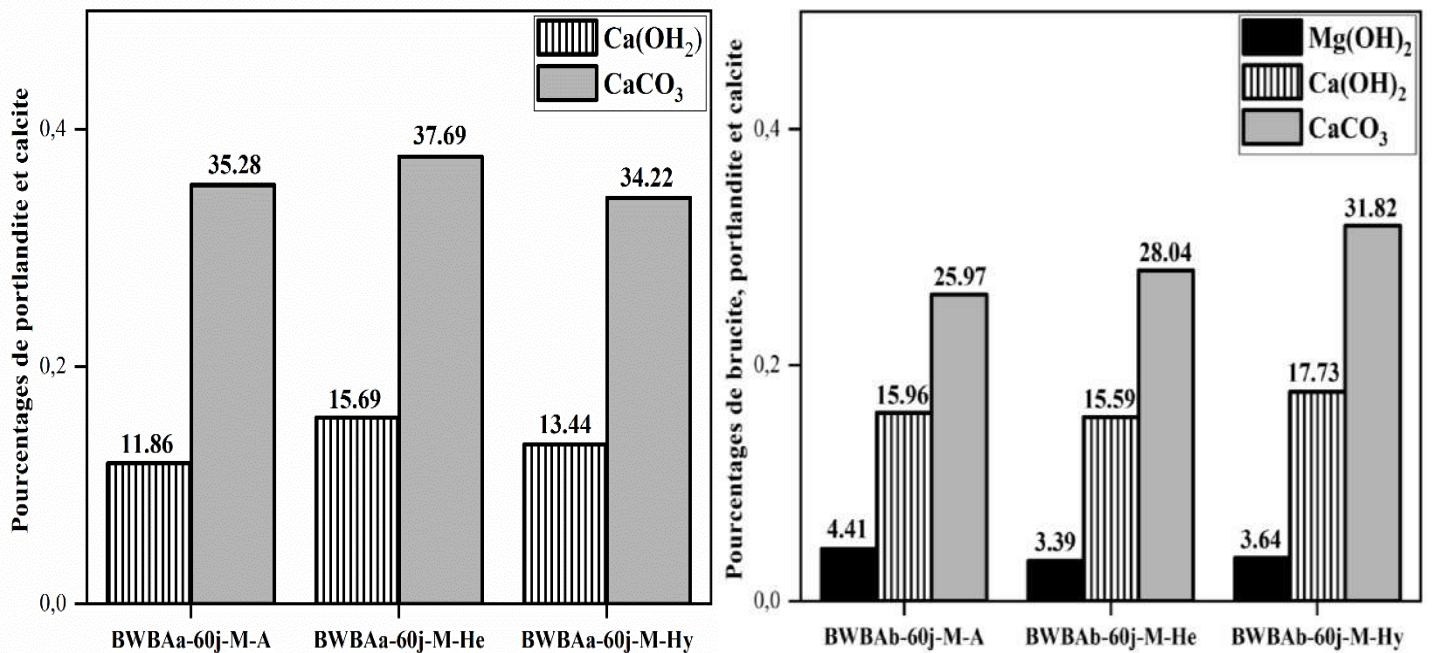


Figure IV.42. Résultats des pourcentages de Mg(OH)₂, Ca(OH)₂ et CaCO₃ contenus dans les BWBA(20%) après 60 jours dans les différents milieux de conservations.

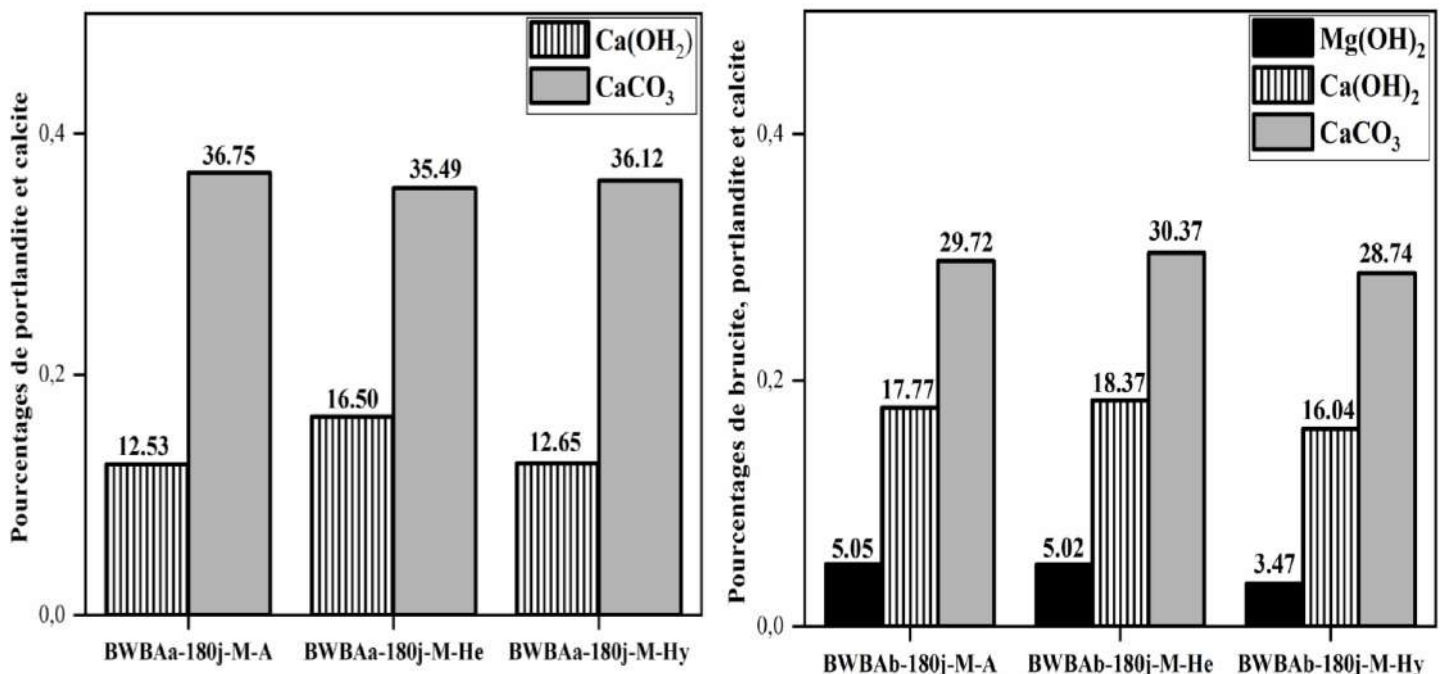


Figure IV.43. Résultats des pourcentages de Mg(OH)₂, Ca(OH)₂ et CaCO₃ contenus dans les BWBA(20%) après 180 jours dans les différents milieux de conservations.

IV.5.4. Suivi du processus d'hydratation par microcalorimétrie isotherme

Les essais de microcalorimétrie réalisés sur des mélanges de terre limono-argileuse et de cendres (WBAa et WBAb), représentés sur la **Figure IV.44** ont révélé des comportements thermiques complexes et distincts. Ces résultats peuvent être interprétés à la lumière de la composition spécifique des matériaux et des conditions expérimentales.

Pour les mélanges contenant les cendres WBAa, riches en chaux (CaO), les BWBAa(20%) en conditions hermétique ou hygrothermique ont présenté le flux thermique maximal. Ce phénomène s'explique par la réaction vigoureuse de la chaux avec l'eau, produisant de l'hydroxyde de calcium dans un processus exothermique, comme l'a décrit Taylor (1997) [192]. L'abondance d'eau dans ces conditions favorise l'hydratation complète de la chaux. De plus, la nature limono-argileuse de la terre offre une grande surface spécifique et une capacité d'échange cationique élevée, facilitant les réactions pouzzolaniques avec la chaux hydratée, un processus bien documenté par Mitchell et al. (2005) [266] dans leurs travaux sur le comportement des sols.

Les mélanges avec WBAb, riches en chaux et en oxyde de magnésium (MgO), ont montré une réponse thermique plus nuancée. Comme l'expliquent Bullard et al. (2011) [267] dans leur étude sur les mécanismes d'hydratation du ciment, la présence combinée de chaux et de MgO conduit à des réactions d'hydratation complexes. L'hydratation du MgO, bien que moins rapide que celle de la chaux, contribue au flux thermique global sur une période plus longue, ce qui explique les différences observées entre les mélanges terre-WBAa et terre-WBAb.

L'influence significative des conditions de conservation sur l'activité thermique des mélanges, notamment l'effet bénéfique des conditions hermétiques et hygrothermiques, est cohérente avec les observations de Douba et al. (2023) [268]. Leur étude a démontré l'impact crucial de l'humidité relative sur l'hydratation et la résistance à la compression des pâtes de ciment. Dans ce cas, ces conditions favorisent une activité thermique plus élevée car l'eau est abondante et retenue dans le système, permettant une hydratation continue et des réactions pouzzolaniques prolongées.

La différence de comportement observée entre les cendres WBAa et WBAb peut également s'expliquer par les variations de leur composition et de leur finesse, un phénomène étudié par Chindaprasirt et al. (2005) [193]. Leur travail a mis en évidence comment la finesse des cendres

volantes affecte la résistance à la compression et la taille des pores dans les pâtes de ciment mélangées, ce qui pourrait expliquer les différences de réactivité et de mécanismes d'hydratation entre les deux types de cendres.

Le flux thermique maximal observé pour la terre seule en milieu ambiant peut être attribué à la solubilité élevée des oxydes présents dans sa composition minéralogique riche en argiles. Cette interprétation est soutenue par les travaux de Mitchell et al. (2005) [266] sur le comportement fondamental des sols, qui expliquent comment la composition minéralogique influence les propriétés physico-chimiques des matériaux terreux.

L'utilisation du microcalorimétrie comme méthode d'analyse de ces processus d'hydratation est validée par les travaux de Wadsö (2010) [269], qui a étudié en détail les aspects opérationnels de la calorimétrie isotherme appliquée aux matériaux cimentaires. Cette technique a permis de suivre avec précision l'évolution du flux de chaleur au cours des premières heures de l'hydratation, fournissant ainsi des informations précieuses sur la cinétique des réactions dans les mélanges terre-cendres.

Ces résultats soulignent l'importance cruciale de l'eau dans les réactions d'hydratation et les interactions sol-cendres. La composition spécifique des cendres (WBAA riche en chaux, WBAb riche en chaux et MgO) et la nature limono-argileuse de la terre influencent significativement le comportement thermique des mélanges. Ces observations offrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation des propriétés des briques BWBA dans diverses conditions de cure, ouvrant la voie à une meilleure compréhension et maîtrise des processus physico-chimiques impliqués dans la stabilisation des sols et la fabrication de matériaux de construction alternatifs.

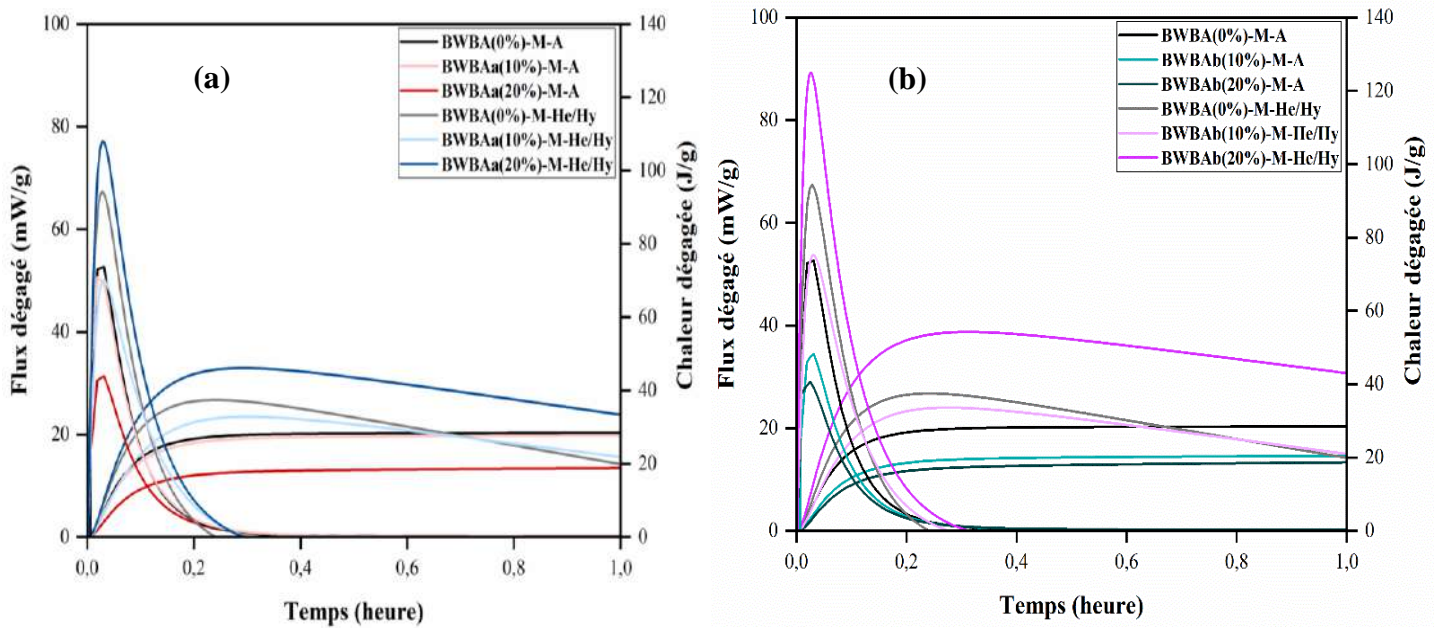


Figure IV.44. Flux thermique et chaleur d'hydratation des mélanges de terre et de cendres de bois à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique), (a) WBAA, (b) WBAB.

IV.5.5. Variation du pH dans les briques BWBAa(20%) et BWBA(20%)

L'évolution du pH dans chaque milieu de conservation pour les briques BWBAa(20%) et BWBA(20%) est influencée par la composition spécifique des cendres utilisées (WBAA riches en chaux et WBAB riches en chaux et MgO) et les conditions environnementales (ambiantes, hermétiques et hygrothermiques).

En milieu ambiant (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), pour les BWBAa(20%) principalement riches en chaux, le pH augmente de 11.92 à 12.24 entre 28 et 180 jours, probablement en raison de la carbonatation formant de la calcite à long terme [200]. La réaction de carbonatation libère des ions OH⁻, augmentant ainsi le pH. Pour les BWBA(20%) riches en CaO et MgO, le pH diminue légèrement de 11.16 à 10.96 entre 28 et 180 jours, probablement en raison de la consommation des ions OH⁻ dans les réactions pouzzolaniques et d'hydratation du MgO, ainsi que de la formation de brucite Mg(OH)₂ [256].

En milieu hermétique (20 ± 2 °C, 75 ± 5 % HR), les deux types de briques montrent les valeurs de pH les plus faibles, avec une diminution progressive au fil du temps. Pour les BWBAa(20%), le pH atteint 9.93 après 180 jours, probablement en raison de la consommation des ions OH⁻ dans les réactions d'hydratation et pouzzolaniques de la chaux [195]. Pour les BWBA(20%),

le pH atteint 10.43 après 180 jours, la présence de MgO ralentissant la baisse du pH par la formation continue de $Mg(OH)_2$ [151].

En milieu hygrothermique (40 °C, 100% HR), pour les BWBAa(20%), le pH se maintient autour de 11, l'humidité élevée favorisant les réactions d'hydratation de la chaux et maintenant un pH alcalin [270]. Pour les BWBAb(20%), le pH baisse à 10.44 après 180 jours. Malgré cette baisse, les BWBAb(20%) présentent les meilleures résistances mécaniques dans ce milieu, probablement en raison de l'hydratation accélérée du MgO dans ces conditions. Cette observation corrobore les travaux de Rahhal et Talero (2008) [196], qui ont démontré qu'un milieu de cure humide accélère les réactions pouzzolaniques, améliorant ainsi les résistances à long terme. Un pH supérieur à 10 reste favorable aux réactions d'hydratation, comme l'ont souligné plusieurs études sur les matériaux cimentaires [195].

Dans tous les cas, l'évolution du pH est influencée par plusieurs facteurs : la composition des cendres, les réactions pouzzolaniques, les conditions environnementales et le temps de cure. La chaux (CaO) présente dans les deux types de cendres tend à augmenter initialement le pH par la formation de $Ca(OH)_2$, tandis que le MgO dans les WBAb influence différemment l'évolution du pH par la formation de $Mg(OH)_2$. Les réactions pouzzolaniques consomment les ions OH^- , entraînant une baisse progressive du pH. L'humidité, la température et l'exposition au CO_2 influencent la vitesse et la nature des réactions chimiques, affectant ainsi l'évolution du pH. Le temps de cure permet la progression de ces réactions, mais leur évolution n'est pas linéaire et varie selon la durée de cure, reflétant les différentes phases des réactions chimiques en cours. L'évolution du pH dans ces briques stabilisées aux cendres de bois est un processus complexe qui dépend de l'interaction entre la composition des cendres, les conditions de conservation et le temps. Cette évolution joue un rôle crucial dans le développement des propriétés mécaniques et la durabilité des briques, soulignant l'importance d'une gestion précise des conditions de cure pour optimiser les performances de ces matériaux de construction alternatifs.

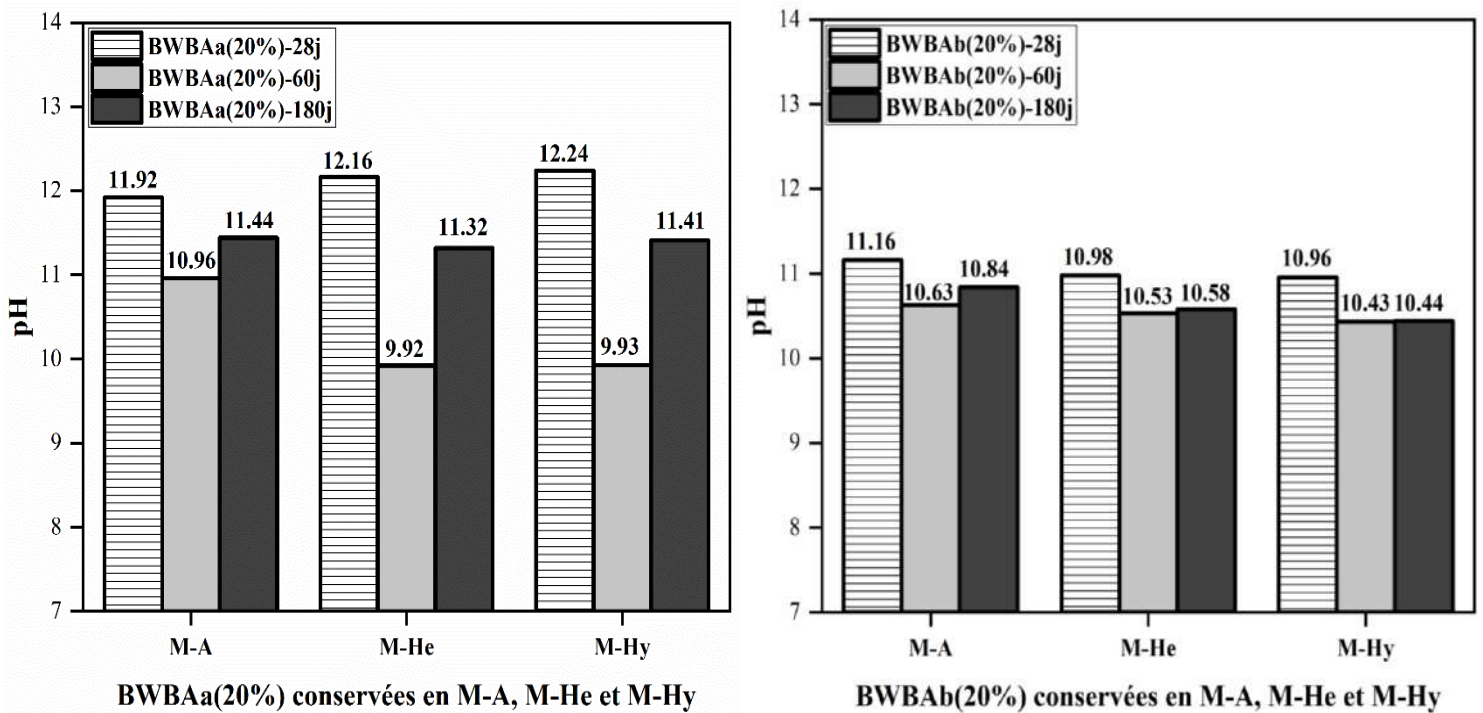


Figure IV.45. Variation du pH des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique) pendant 28, 60 et 180 jours.

III.5.6. Porosimétrie par intrusion de mercure

La **Figure IV.46** présente les résultats de porosité au mercure pour les échantillons BWBAa(20%) et BWBAb(20%) après 180 jours de conservation dans trois conditions différentes: ambiantes, hermétiques et hygrothermiques.

Les courbes de distribution granulaire des briques BWBA révèlent effectivement une structure bimodale, caractérisée par deux pics distincts. Cette observation fournit des informations précieuses sur la microstructure des matériaux et leur évolution en fonction des conditions de cure. Le premier pic, situé entre 30 et 300 nm, correspond aux pores de petite taille. Cette gamme de pores joue un rôle crucial dans les propriétés des matériaux cimentaires, notamment en ce qui concerne la perméabilité et la durabilité [271]. La présence de ce pic dans tous les échantillons (sauf les BWBAa conservées en milieu ambiant), quelle que soit la condition de cure, suggère qu'il s'agit d'une caractéristique intrinsèque de la microstructure des BWBA.

Pour les BWBAa, la distribution de ces petits pores est similaire en milieu hermétique et hygrothermique. Cette constance indique que ces conditions de cure n'affectent pas

significativement la formation des pores de petite taille dans les BWBAa. Cela pourrait être lié à une hydratation stable et continue dans ces environnements contrôlés, comme suggéré par Lothenbach et al. (2007) [272].

Pour les BWBAb, une légère variation dans la distribution des petits pores selon les conditions de cure a été observée. L'augmentation en milieu hygrothermique, suivie du milieu ambiant, puis du milieu hermétique, suggère une sensibilité accrue de cette formulation aux conditions environnementales. Cette hiérarchie pourrait s'expliquer par :

En milieu hygrothermique (40 °C, 100% HR), l'augmentation de la porosité fine pourrait être due à une accélération des réactions d'hydratation, conduisant à une structure plus fine mais potentiellement plus dense [247]. En milieu ambiant (20 ± 2 °C, 75 ± 5% HR), la position intermédiaire de cette condition suggère un équilibre entre l'hydratation continue et les effets de la carbonatation, qui peut modifier la structure poreuse [273]. En milieu hermétique (20 ± 2°C, 75 ± 5% HR), la plus faible porosité fine dans ce milieu pourrait indiquer une hydratation plus lente mais plus contrôlée, sans interférence externe.

D'autre part, pour les BWBAa(20%), la porosité est plus importante dans les conditions ambiantes et hygrothermiques a été observée. Le pic maximal de distribution des pores se situe autour de 750 nm pour les échantillons conservés en milieu ambiant, tandis qu'il atteint 1000 nm pour ceux en milieu hygrothermique. Les échantillons conservés en milieu hermétique présentent la plus faible distribution de pores, avec un pic maximal vers 750 nm.

Concernant les BWBAb(20%), la distribution maximale des pores se situe autour de 1000 nm pour tous les milieux de conservation, sans décalage notable. Cependant, pour les échantillons conservés en milieu ambiant, un décalage vers des pores plus petits a été observé, accompagné d'une diminution de l'intensité du pic de porosité vers 750 nm. Cette réduction de la porosité est attribuée au phénomène de carbonatation des briques dans ce milieu de conservation.

La porosité et les propriétés mécaniques des briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%) varient significativement en fonction des conditions de cure, reflétant l'influence complexe de l'environnement sur le développement de la microstructure des matériaux cimentaires alternatifs.

Pour les BWBAa(20%), la cure en milieu hermétique (20 ± 2 °C, 75 ± 5% HR) produit les meilleures résistances mécaniques, associées à une distribution de pores plus fine (pic maximal

vers 750 nm). Ce phénomène peut être attribué à une hydratation continue et contrôlée, sans interférence de la carbonatation, conduisant à une structure poreuse plus homogène [274]. En revanche, en milieu ambiant (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR), la diminution des résistances mécaniques observée à 180 jours coïncide avec une porosité plus élevée, suggérant un impact négatif de la carbonatation sur la microstructure à long terme [273].

Les BWBAb(20%) présentent un comportement différent, avec de meilleures performances mécaniques en conditions hygrothermiques (40 °C, 100% HR). Malgré une distribution de pores similaire dans les trois conditions (pic vers 1000 nm), la température élevée et l'humidité saturée semblent favoriser une hydratation plus complète et rapide, conduisant à une structure plus dense et résistante [279]. La carbonatation précoce observée en milieu ambiant dès 60 jours explique le décalage vers les petits pores et la diminution de l'intensité du pic de porosité vers 750 nm, conformément aux observations de Ngala et Page (1997) [275] sur l'effet de la carbonatation sur la structure poreuse des matériaux cimentaires.

Un aspect particulièrement intéressant est la distribution trimodale des pores observés en milieu hygrothermique pour les deux types de briques. Cette structure, caractérisée par trois pics distincts avec un maximum vers 1500 nm, indique une microstructure plus hétérogène. Cette hétérogénéité pourrait résulter d'interactions complexes entre l'humidité élevée et les composés spécifiques des cendres, menant à divers mécanismes de formation des pores [272].

Les grands pores (pic maximal vers 1500 nm) présents dans les échantillons BWBAa(20%) et BWBAb(20%) peuvent être dus à une macroporosité résiduelle ou à des vides créés par l'interaction entre l'humidité élevée et les composés des cendres. Paradoxalement, cette microstructure plus hétérogène coïncide avec les performances mécaniques maximales obtenues pour les BWBAb(20%) après 180 jours dans ces conditions hygrothermiques. Cette apparente contradiction pourrait s'expliquer par une hydratation plus complète : la température élevée et l'humidité saturée pourraient favoriser une réaction pouzzolanique plus efficace des cendres, compensant l'effet potentiellement négatif de la porosité élevée [247]. Une meilleure interconnexion des produits d'hydratation, malgré la présence de pores plus grands, la formation de produits d'hydratation pourrait être plus uniforme, créant un réseau plus cohésif [273]. Un effet de cure interne, les grands pores pourraient agir comme réservoirs d'eau, permettant une hydratation continue même après le durcissement initial [276].

La différence de comportement entre BWBAa(20%) et BWBAb(20%) en termes de résistance mécanique, malgré une distribution poreuse similaire en milieu hygrothermique, souligne l'importance de la composition spécifique de chaque mélange. Les BWBAb(20%) semblent mieux exploiter ces conditions pour développer une structure plus résistante, possiblement grâce à une meilleure réactivité de leurs composants dans ces conditions.

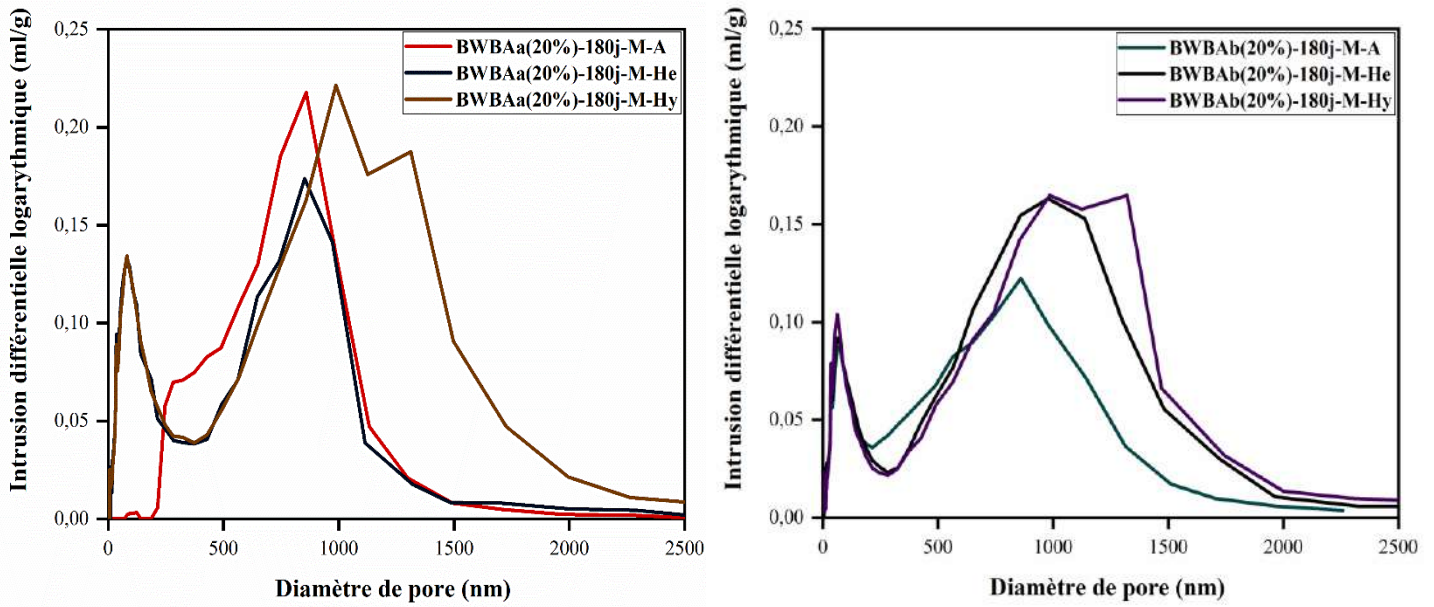


Figure IV.46. Courbes de porosité par intrusion de mercure des BWBAa(20%) et BWBAb(20%) conservées à différentes conditions (ambiantes, hermétiques ou hygrothermique) pendant 180 jours.

IV.6. Conclusion

Cette étude a examiné l'impact de différentes conditions de conservation sur les propriétés des briques en terre comprimées stabilisées avec des cendres de biomasse. Les résultats montrent que chaque milieu de conservation (ambient (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR), hermétique (20 ± 2 °C, $75 \pm 5\%$ HR) et hygrothermique (40 °C, 100% HR)) a des effets spécifiques sur les propriétés des briques. Le milieu ambiant s'est révélé bénéfique à court terme, tandis que les milieux hermétique et hygrothermique ont favorisé de meilleures performances mécaniques à long terme. La conductivité thermique a varié selon le type de cendres et les conditions de conservation, avec des performances optimales observées dans différents milieux selon la composition des briques. La durabilité s'est généralement améliorée au fil du temps, avec des performances particulières en milieux hermétique et hygrothermique. La masse volumique s'est

avérée plus faible en milieu hygrothermique à long terme. L'évolution temporelle des propriétés a montré des tendances différentes entre le court et le long terme, notamment pour les briques sans cendres. Le milieu hermétique a induit une évolution lente initiale suivie d'une accélération, tandis que le milieu hygrothermique s'est montré particulièrement bénéfique sur l'ensemble de la période d'étude. Ces résultats soulignent l'importance des conditions de conservation dans l'optimisation des propriétés des briques en terre comprimées stabilisées avec des cendres de biomasse.

Les essais de caractérisation des briques confirment et détaillent les résultats mécaniques, thermiques, de durabilité et de densité obtenus en fonction du temps et des conditions de conservation. Les analyses par diffraction des rayons X ont confirmé la consommation des minéraux présents dans les cendres de biomasse grâce aux réactions pouzzolaniques, produisant des liants cimentaires (C-S-H et M-S-H). Les observations par microscopie électronique à balayage (MEB) et analyses MEB/EDX ont révélé la formation de produits liants issus des réactions pouzzolaniques, aboutissant à une microstructure dense de différentes formes dans les briques en terre stabilisées aux cendres de bois. Les analyses thermogravimétriques ont révélé des informations précises sur les transformations physicochimiques et les réactions dans les briques en terre stabilisées lors de leur chauffage. Ces résultats, liés à leur composition minéralogique initiale, ont confirmé les observations mécaniques et thermiques en fonction du temps et des conditions de conservation. Le suivi du processus d'hydratation des mélanges terre-cendres par microcalorimétrie isotherme a révélé l'importance cruciale de l'eau, de la composition des cendres de bois et des conditions de conservation (ambient, hermétique et hygrothermique) sur le comportement de ces mélanges, en termes de flux thermique et de chaleur d'hydratation dégagés. L'évolution du pH dans ces briques stabilisées aux cendres de bois, en fonction du temps et des conditions de conservation, est un processus complexe qui dépend de l'interaction entre la composition des cendres, les conditions de conservation et la durée. Cette évolution joue un rôle essentiel dans le développement des propriétés mécaniques et la durabilité des briques. Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure après 180 jours de cure ont mis en évidence des différences notables de microstructure porale entre les briques BWBAa(20%) et BWBAb(20%), influencées par la composition des cendres et leur comportement dans chaque milieu de conservation.

Conclusion générale et perspectives

La construction en terre crue représente une technique ancestrale utilisée à l'échelle mondiale, particulièrement répandue encore aujourd'hui dans les pays en développement. Cette méthode de construction traditionnelle doit son succès historique à plusieurs facteurs clés: la disponibilité immédiate des matières premières, la simplicité de mise en œuvre, d'excellentes propriétés thermiques et acoustiques, ainsi qu'un coût de production particulièrement avantageux. Ces caractéristiques en ont fait un matériau de construction privilégié pendant des siècles.

Cependant, l'avènement de l'ère industrielle dans les pays développés a marqué un tournant significatif. Au début du XXe siècle, les progrès technologiques et l'augmentation de la capacité économique ont conduit à l'abandon progressif de ces techniques traditionnelles au profit de matériaux modernes comme le béton et les briques cuites. Paradoxalement, le début du XXIe siècle a vu renaître un intérêt marqué pour les briques en terre comprimée (BTC), même dans les pays développés. Cette renaissance s'explique par leurs nombreux avantages environnementaux: une empreinte carbone réduite, une faible consommation énergétique lors de la production, la possibilité de valoriser des déchets et sous-produits, ainsi que leurs qualités techniques et leur impact positif sur la santé des occupants.

Malgré ces atouts indéniables, les briques en terre comprimée présentent certaines limitations techniques importantes. Leur grande affinité pour l'eau, leur tendance au retrait et leur faible résistance mécanique peuvent compromettre leur durabilité et leurs propriétés structurelles. Traditionnellement, ces problèmes étaient résolus par l'utilisation d'additifs cimentaires, l'application d'une énergie de compactage élevée, l'optimisation de la granulométrie du sol et la protection contre l'eau. Les additifs cimentaires, en particulier, se sont révélés efficaces grâce à la formation de gels créant une matrice résistante autour des particules de sol, augmentant ainsi la densité et améliorant les propriétés mécaniques. Ils contribuent également à réduire la plasticité des sols argileux et à limiter les mouvements d'eau. Néanmoins, l'utilisation de ces additifs pose des problèmes environnementaux significatifs.

Face à ces enjeux, une nouvelle approche de recherche se développe, centrée sur l'utilisation innovante de cendres de bois comme alternative écologique aux stabilisants traditionnels. Cette étude approfondie examine spécifiquement l'incorporation de différentes proportions de cendres de bois (5% à 20% en masse) dans la fabrication des briques en terre crue. La méthodologie expérimentale se distingue par sa rigueur, impliquant trois environnements de

cure distincts: ambiant ($20\text{ °C} \pm 2$, $75 \pm 5\%$ HR), hermétique ($20\text{ °C} \pm 2$, $75 \pm 5\%$ HR), et hygrothermique (40 °C , 100% HR), avec un suivi s'étendant de 7 à 180 jours.

Les résultats de cette recherche sont particulièrement prometteurs. Les analyses exhaustives, comprenant l'évaluation des propriétés mécaniques, thermiques, et de la durabilité, ainsi que des analyses techniques approfondies (DRX, MEB/EDX, ATG/DTG, microcalorimétrie, porosimétrie mercure), démontrent l'influence cruciale des conditions de cure sur le développement des propriétés des briques. L'utilisation des cendres de bois comme stabilisant permet non seulement d'améliorer significativement les performances globales des briques en terre crue, mais offre également une solution écologique innovante en valorisant les déchets agricoles. Cette approche s'inscrit dans une évolution significative de la construction durable, marquant une avancée importante dans le domaine des briques en terre comprimée. Elle représente une synthèse réussie entre tradition et innovation, combinant les pratiques ancestrales de construction en terre avec des techniques modernes de stabilisation utilisant des ressources locales. Cette démarche innovante contribue ainsi au développement de matériaux de construction durables qui répondent non seulement aux défis environnementaux contemporains mais préservent également les avantages économiques traditionnels de la construction en terre crue, tout en valorisant efficacement les ressources locales disponibles.

Les études expérimentales ont démontré que l'incorporation optimale de 20% de cendres de bois conduit à une amélioration substantielle des performances mécaniques et de la durabilité des briques en terre comprimée. Cette amélioration s'explique par plusieurs mécanismes complémentaires: le comblement efficace des vides, la réduction de la porosité, et surtout le développement de réactions pouzzolaniques générant des liants cimentaires (C-S-H et M-S-H) qui contribuent à la densification progressive de la structure interne.

Les conditions de conservation se révèlent déterminantes dans l'optimisation des propriétés. Le milieu hygrothermique (40 °C , 100% HR) s'avère particulièrement efficace pour les performances à long terme, tandis que le milieu hermétique favorise une évolution progressive et que le milieu ambiant présente des avantages à court terme. La durée de cure optimale de 180 jours permet d'atteindre les performances maximales, notamment en termes de résistance mécanique et de durabilité.

Les analyses physico-chimiques et microstructurales révèlent une évolution complexe mais maîtrisée des propriétés. La densité apparente diminue proportionnellement à l'augmentation

de la teneur en cendres, s'accompagnant d'une amélioration notable de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumétrique. Les analyses approfondies par DRX, MEB/EDX et ATG/DTG confirment la formation de produits liants issus des réactions pouzzolaniques, aboutissant à une microstructure dense et consolidée, dont les performances sont influencées par l'évolution du pH et les transformations physicochimiques successives.

Le suivi du processus d'hydratation des mélanges terre-cendres par microcalorimétrie isotherme a mis en évidence l'impact crucial de la composition des cendres de bois et du milieu de conservation sur le comportement thermique des mélanges. Les essais de porosimétrie par intrusion de mercure après 180 jours de cure ont révélé des différences significatives de microstructure porale entre les différentes compositions, influencées par la nature des cendres et leur comportement dans chaque milieu de conservation.

Au-delà des performances techniques, cette approche présente des avantages environnementaux et économiques significatifs. Elle permet la réduction des déchets et des émissions de CO₂, la valorisation des ressources locales renouvelables, et offre une alternative viable aux liants traditionnels comme le ciment Portland et la chaux. L'amélioration des performances thermiques et mécaniques, couplée à ces bénéfices environnementaux, positionne les briques en terre comprimée stabilisées aux cendres de bois comme une solution constructive d'avenir, particulièrement en conditions hermétiques et hygrothermiques.

Cette recherche ouvre des perspectives prometteuses pour une utilisation plus large de ce matériau dans la construction durable, répondant ainsi au triple objectif de performance technique, de responsabilité environnementale et de valorisation des ressources locales. Cette approche innovante démontre qu'il est possible de développer des matériaux de construction performants tout en respectant les principes du développement durable, offrant ainsi une réponse concrète aux défis contemporains de l'industrie de la construction.

En effet, les perspectives qui émergent de cette étude sont multiples et prometteuses, s'articulant autour de plusieurs axes complémentaires de développement:

Sur le plan technique, les recherches futures pourraient se concentrer sur l'optimisation des processus de fabrication, notamment en affinant les proportions optimales de cendres de bois pour différents types de sols, en développant des protocoles standardisés pour les conditions de cure, et en explorant l'automatisation des processus de production pour une mise en œuvre à plus grande échelle. Les investigations pourraient également s'étendre à l'exploration d'autres

types de déchets agricoles ou de biomasse pour la stabilisation, à l'étude de la durabilité sur des périodes encore plus longues, et à l'amélioration des performances en conditions climatiques extrêmes.

Du point de vue pratique, le développement de normes spécifiques, la création de guides techniques pour les professionnels, et la mise en place de projets pilotes démonstratifs apparaissent comme des étapes cruciales pour la diffusion de cette technologie. Les aspects environnementaux et économiques méritent également une attention particulière, notamment à travers la quantification précise de l'impact environnemental, l'étude de la viabilité économique à grande échelle, et l'analyse du cycle de vie complet des briques stabilisées.

Enfin, le transfert de technologie représente un enjeu majeur, impliquant l'adaptation de cette technique aux pays en développement, la formation des artisans locaux, et la création de réseaux de partage d'expériences, le tout soutenu par des partenariats étroits entre la recherche et l'industrie, ouvrant ainsi la voie à une transformation durable des pratiques de construction à l'échelle mondiale.

Références bibliographiques

- [1] B. Taallah. Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie, 2014.
- [2] R.A. Silva, E. Soares, D.V. Oliveira, T. Miranda, N.M. Cristelo, D. Leitão, Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 349–358.
- [3] T. Balasubramaniam, P.M. Sharan Karthik, S. Sureshkumar, M. Bharath, M. Arun, Effectiveness of industrial waste materials used as ingredients in fly ash brick manufacturing, *Mater. Today: Proc.* 45 (2021) 7850–7858.
- [4] M. Saidi, A.S. Cherif, B. Zeghmati, E. Sediki, Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks, *Constr. Build. Mater.* 167 (2018) 566–577.
- [5] S. Omar Sore, A. Messan, E. Prud'homme, G. Escadeillas, F. Tsobnang, Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso, *Constr. Build. Mater.* 165 (2018) 333–345.
- [6] E. Hany, N. Fouad, M. Abdel-Wahab, E. Sadek, Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement, *Constr. Build. Mater.* 281 (2021) 122535.
- [7] B. Rajwade, N. Netam, Investigation of effects of corncob ash in fly ash bricks, *Mater. Today: Proc.* 28 (2020) 2431–2434.
- [8] S.h. Masuka, W. Gwenzi, T. Rukuni, Development, engineering properties and potential applications of unfired earth bricks reinforced by coal fly ash, lime and wood aggregates, *J. Build. Eng.* 18 (2018) 312–320.
- [9] Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables (MEER). "Rapport National sur l'État et l'Avenir de l'Environnement" (2020).
- [10] AND (2022). "Rapport annuel sur la gestion des déchets en Algérie", Agence Nationale des Déchets.
- [11] Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) - Publications et rapports techniques sur la biomasse en Algérie.
- [12] FAO (2023). Global assessment of biomass waste resources. Food and Agriculture Organization.

- [13] IEA (2023). Renewables 2023 Analysis and forecast to 2028, International Energy Agency.
- [14] S. H. LEWIS LOPES. (2024). RENEWABLE ENERGIES AND ANAEROBIC CO-DIGESTION: A SYSTEMIC APPROACH TO PROMOTE CIRCULAR BIOECONOMY IN ORGANIC WASTE GENERATING INDUSTRIES. Thèse de doctorat à l'université de Lisbonne, Portugal.
- [15] ADEME (2023). Guide méthodologique du compostage à grande échelle.
- [16] World Bank (2023). Waste Management in North Africa: Challenges and Opportunities
- [17] Houben, H., 2006. Traité de construction en terre, Parenthèses. ed. 72 cours Julien 13006 Marseille.
- [18] J. Eid, Élaboration d'un éco-géo-matériau à base de terre crue. Thèse de doctorat. Génie Civil, Université du Havre, France, 2016.
- [19] A. Bouchet, A. Meunier et P. Sardini, Minéraux argileux : structure cristalline, identification par diffraction de rayons X, Pau: Elf Exploration, 2000.
- [20] M. Gautier, Interactions entre argile ammonie et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets., Thèse de doctorat Université d'Orléans, 2008.
- [21] A. Lasledj, Traitement des sols argileux à la chaux: processus physicochimique et propriétés géotechniques, Thèse de l'Université d'Orléans, Orléans, 2009.
- [22] C. Fontaine, Cristalochimie, Minéralogie et Origine des Argiles, Poitiers, 2014c.
- [23] K. L. Konana, Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium, Thèse de l'Université de Limoges, Limoges, 2006.
- [24] A. Hibouche, Sols traités aux liants. Performances hydro-mécaniques et hygrothermiques. Applications en BTP, Le Havre, 2013.
- [25] R.D. Holtz, W.D. Kovacs. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditeur Éditions de l'École polytechnique de Montréal. p 808. ISBN 255300222X, 9782553002229.

- [26] K. S. Pelagie. Membranes Céramiques à base d'argile kaolinitique, de coques de noix de coco et de coquilles d'œufs: Elaboration, caractérisation et mise en œuvre pour la désinfection des eaux destinées à la consommation. Thèse de l'Université de Yaoundé I, Cameroun, 2022.
- [27] Morel, J.C., A Mesbah, M Oggero. P Walker. (2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction *Building and Environment*. Volume 36, Issue 10, Pages 1119-1126.
- [28] H Van Damme, H. Houben. (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*. Volume 114, Pages 90-102.
- [29] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials* Volume 29, Pages 512-519.
- [30] Minke G. (2006). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.
- [31] Reddy B.V., Venkatarama K., Prasanna P. Embodied energy in cement stabilized rammed earth walls. *Energ. Build.* 2010, 42, 380–385.
- [32] Bui Q. B., Morel J. C., Venkatarama Reddy B. V., & Ghayad W. (2009). Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. *Building and Environment*, 44(5), 912-919.
- [33] Anger, R., & Fontaine, L. (2009). *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*. Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. 223 p. ISBN 978-2-7011-5204-2.
- [34] Rael R. (2009). *Earth Architecture*. Princeton Architectural Press. New York, USA
- [35] E. Hamard, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.C. Morel. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment* Volume 106, Pages 103-119.
- [36] Guillaud, H., & Houben, H. (1995). *Traité de construction en terre (2ème édition)*. Marseille, Editions Parenthèses.
- [37] K.A. Jérémy Ouedraogo. (2019). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts

environnementaux. Thèse de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), France.

[38] Pinel A. (2017). Transition liquide-solide dans des dispersions d'argiles contrôlée par un biopolymère: Application à la construction en terre 235.

[39] McGregor, F., Fabbri, A., Ferreira, J., Simões, T., Faria, P., Morel, J.-C., 2017. Procedure to determine the impact of the surface film resistance on the hygric properties of composite clay/fibre plasters. *Mater. Struct.* 50, 193.

[40] Moevus M., Fontaine L., Anger R., Doat P. 2013. Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E.).

[41] P Walker, R Keable, J Martin, V Maniatidis. (2005). *Rammed earth: design and construction guidelines.* (first ed.), IHS BRE Press, London (2005)

[42] Houben, H. and Guillaud, H. (1994) *Earth Construction—A Comprehensive Guide.* Intermediate Technology, London.

[43] Olivier M, Mesbah A (1987) Influence of different parameters on the resistance of earth, used as a building material. In: International conference on mud architecture, Trivandrum, India

[44] K. Ghavami, R.D. Toledo Filho, N.P. Barbosa. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites.* Volume 21, Issue 1, 1999, Pages 39-48.

[45] Burroughs, S. (2008). Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 20:3(264).

[46] Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology.* Volume 42, Issue 4, Pages 223-237.

[47] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A.Teixeira Pinto. (2012). Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation. *Construction and Building Materials.* Volume 29, April 2012, Pages 167-174.

[48] J.E. Oti, J.M. Kinuthia, R.B. Robinson. (2009). The development of unfired clay building material using Brick Dust Waste and Mercia mudstone clay. *Applied Clay Science* 102 (2014) 148–154

- [49] Venkatarama Reddy B. V., & Jagadish K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and Technologies. *Energy and Buildings*. Volume 35, Issue 2, Pages 129-137.
- [50] Heath A, Walker P, Fourie C & Lawrence M. 2009, Compressive strength of extruded unfired clay masonry units'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Construction Materials*, vol. 162, no. 3, pp. 105-112.
- [51] Delgado M. C. J., & Guerrero I. C. (2007) The selection of soils for unstabilised earth building. *Construction and Building Materials*. Volume 21, Issue 2, Pages 237-251.
- [52] Maniatidis, V., & Walker, P. (2003). A Review of Rammed Earth Construction.
- [53] A. W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, J. Mendes. Effect of stabilisation on mechanical properties, moisture buffering and water durability of hypercompacted earth. *Construction and Building Materials*. Volume 149, 2017, Pages 733-740.
- [54] S. Ola. The potentials of lime stabilization of lateritic soils. *Engineering Geology*, vol. 11, pp. 305-317, 1977.
- [55] N. Loganathan, A. Salehi, J.A. Chalmers, D.D. Belsham. Bisphenol A Alters Bmal1, Per2, and Rev-Erba mRNA and Requires Bmal1 to increase neuropeptide Y expression in hypothalamic neurons. *Endocrinology*, 160 (2019), pp. 181-192.
- [56] Boardman D. I., Glendinning S., & Rogers C. D. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. *Géotechnique*, 51(6), 533-543.
- [57] J. L. Eades and R. E. Grim. Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. *Highway Research Board*, No. 262, 1960, pp. 51-63.
- [58] Diamond S., Kinter E.B. (1965). Mechanisms of soil-lime stabilization. *Highway Research Record*, n°92, pp. 83-102
- [59] J. Eades et R. Grim, A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. *Highway Research Record*, n° 1139, pp. 61-72, 1966.
- [60] J. Locat, H. Tremblay et S. Lerouel. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, n°14, pp. 654-669, 1996.
- [61] S. Khattab. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de l'Université d'Orléans, Orléans, 2002.

- [62] N. Cabane. Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation. Thèse de l'École National Supérieur des Mines, Saint Étienne, 2004.
- [63] F. Bell. Lime stabilization of clay minerals and soil. *Engineering Geology*, vol. 42, n° 14, pp. 223-237, 1996.
- [64] G. Hill et D. D.T. Lime fixation in clayey soils. *Highway Research Board Bulletin*, n° 1262, pp. 20-32, 1960.
- [65] H. Clara et R. Handy. Characteristics of lime retention by montmorillonitic clays. *Highway Research Record*, n° 129, pp. 55-69, 1963. -29
- [66] M. Arabi et W. S. Microstructural development in cured soil-lime composites. *Journal of material science*, vol. 21, pp. 497-503, 1986.
- [67] J. Locat, B. André et M. Choquette. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, pp. 294-304, 1990.
- [68] GTS Guide Technique. Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques. LCPC-SETRA, 2000.
- [69] S. Rao et P. Shivananda, Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 23, n° 11, pp.79-85, 2005.
- [70] Boynton, R.S. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. John Wiley and Sons, New York.
- [71] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddeepong. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*. Volume 24, Issue 10, October 2010, Pages 2011-2021.
- [72] L. Saussaye, Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification, Caen: Thèse de l'Université de Caen Basse Normandie, 2012.
- [73] Y. Guney, D. sari, M. Cetin et M. Tuncan, Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, vol. 42, pp. 681-688, 2007.

- [74] A. Basma et E. Tuncer. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation research record*, n° % 11295, pp. 52-61, 1990.
- [75] A. Delfault. Traitement à la chaux vive et au ciment des argiles plastiques du Sparnacien et de la région parisienne: étude de laboratoire., LCPC, n° % 1169, pp. 16-20, 1990.
- [76] M. Afès et G. Didier. Stabilization of expansive soils: the case of clay in the area of Mila (Algeria). *Bulletin of Engineering Geological Environment*, vol. 59, n° % 11, pp. 75-83, 2000.
- [77] Z. Nalbantoglu et E. Tuncer. Compressibility and hydraulic conductivity of chemically treated expansive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 38, pp. 154-160, 2001.
- [78] A. Al-Rawas, A. Hago et H. Al-Sarmi. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, vol. 40, n° % 15, pp. 681-687, 2005.
- [79] Danso H., Martinson D. B., Ali M., & Williams J. B. (2015). Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks. *Construction and Building Materials*, 93, 957-963.
- [80] Van Damme H., Houben H., 2017. Earth concrete. Stabilization revisited. *Cem. Concr.*
- [81] Alavéz-Ramírez R., Montes-García P., Martínez-Reyes J., Altamirano-Juárez D.C., Gochi-Ponce Y. 2012. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Constr. Build. Mater.* 34, 296–305.
- [82] Alam I., Naseer A., Shah A.A. 2015. Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Constr. Build. Mater.* 77, 154–159.
- [83] Dao K., Ouedraogo M., Millogo Y., Aubert J.-E., Gomina M., 2018. Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Constr. Build. Mater.* 158, 84–96.
- [84] Bahar, R., Benazzoug, M., Kenai, S., 2004. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cem. Concr. Compos.* 26, 811–820.
- [85] Millogo, Y., Hajjaji, M., Ouedraogo, R., 2008. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Constr. Build. Mater.* 22, 2386–2392.
- [86] Eires, R., Camões, A., Jalali, S., 2014. Ancient Materials and Techniques to Improve the Earthen Building Durability. *Key Eng. Mater.* 634, 357–366.

- [87] Seco, A., Urmeneta, P., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., Miqueleiz, L., 2017. Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Constr. Build. Mater.* 131, 600–605.
- [88] Aubert, J.E., Maillard, P., Morel, J.C., Al Rafii, M., 2016. Towards a simple compressive strength test for earth bricks? *Mater. Struct.* 49, 1641–1654.
- [89] Medjo Eko, R., Offa, E.D., Yatchoupou Ngatcha, T., Seba Minsili, L., 2012. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 35, 340–346.
- [90] Lima, S.A., Varum, H., Sales, A., Neto, V.F., 2012. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Constr. Build. Mater.* 35, 829–837.
- [91] Tran, K.Q., Satomi, T., Takahashi, H., 2018. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Constr. Build. Mater.* 178, 204–210.
- [92] Morel, J.C., Aubert, J.-E., Millogo, Y., Hamard, E., Fabbri, A., 2013. Some observations about the paper "Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction" by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Constr. Build. Mater.* 44, pp.419-421.
- [93] Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P., Casey, S.P., 2013. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate.
- [94] AFNOR XP P 13-901. (2001). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception.
- [95] Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.
- [96] Pode, R. (2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468-1485.
- [97] B.N. Shirazi, A. Almutlaqah, B. Balzano, R. Maddalena. 2024. Agricultural Waste as a Cementitious Material — Rice Husk Ash. Conference: Cardiff University Engineering Research Conference 2023.

- [98] K.Y. Chiang, P.H. Chou, C.R. Hua, K.L. Chien, C. Cheeseman. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 171, Issues 1–3, 1 2009, Pages 76-82
- [99] Hossain, K.M.A., Mol, L., 2011. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Constr. Build. Mater.* 25, 3495–3501.
- [100] C. B. Cheah, W. K. Part, M. Ramli, The long-term engineering properties of cementless building block work containing large volume of wood ash and coal fly ash, *Construct. Build. Mater.* 143 (2017) 522-536.
- [101] A. N. Raut, C. P. Gómez, Development of thermally efficient fibre-based eco-friendly brick reusing locally available waste materials, *Constr. Build. Mater.* 133 (2017) 275-284.
- [102] L. Lang, B. Chen, Y. Pan, Engineering properties evaluation of unfired sludge bricks solidified by cement-fly ash-lime admixed nano- SiO₂ under compaction forming technology, *Construct. Build. Mater.* 259 (2020) 119879.
- [103] E.A. Basha, R. Hashim, H.B. Mahmud, AS Muntohar, Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 448-453.
- [104] P. Turgut, Manufacturing of building bricks without Portland cement. *J. Clean. Prod.* 37 (2012) 361-367.
- [105] J. Rivera, R.M. Gutiérrez, S. Ramirez-Benavides, A. Orobio, Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated cements. *Constr. Build. Mater.* 264 (2020) 120285.
- [106] D. Leitão, J. Barbosa, E. Soares, T. Miranda, N. Cristelo, A. Briga-Sá, Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash. *Energy and Buildings.* 139 (2017) 44-52.
- [107] S. Naganathan, A. Y. O. Mohamed, K. N. Mustapha, Performance of bricks made using fly ash and bottom ash, *Constr. Build. Mater.* 96 (2015) 576-580.
- [108] D. Eliche - Quesada, M.A. Felipe – Sesé, M. J. Fuentes - Sánchez, Biomass bottom ash waste and by-products of the acetylene industry as raw materials for unfired bricks. *J. Built Eng.* 38 (2021) 102191.

- [109] D. Eliche-Quesada, J. Sánchez-Martínez, M. A. Felipe-Sesé, A. Infantes-Molina, Silica-Calcareous non fired bricks made of biomass ash and dust filter from gases purification, *Waste Biomass Valorization* 10 (2019) 417-431.
- [110] D. Eliche-Quesada, J. A. Sandalio-Pérez, S. Martínez-Martínez, L. Pérez-Villarejo, P. J. Sánchez-Soto, Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks, *Ceram. Int.* 44 (2018) 4400-4412.
- [111] M. A. Felipe - Sesé, L. Pérez - Villarejo, E. Castro, D. Eliche – Quesada, Wood bottom ash and GeoSilex: a by - product of the acetylene industry as alternative raw materials in calcium silicate units. *Materials.* 13 (2020) 489.
- [112] N. Boussaa, F. Kheloui, N. Chelouah, Mechanical, thermal and durability investigation of compressed Earth bricks stabilized with wood biomass ash. *Constr. Build. Mater.* 364 (2023)129874.
- [113] B. Carrasco-Hurtado, F. A. Corpas-Iglesias, N. Cruz- Pérez, J. Terrados-Cepeda, L. Pérez-Villarejo, Addition of bottom ash from biomass in calcium silicate masonry units for use as construction material with thermal insulating properties, *Contr. Build. Mater.* 52 (2014) 155-165.
- [114] S. Layachi, O. Izemmouren, A. Dakhia, B. Taallah, E. Atiki, K.S. Almeasar, M. Layachi, A. Guettala, Effect of incorporating Expanded polystyrene beads on Thermophysical, mechanical properties and life cycle analysis of lightweight earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 375 (2023) 130948.
- [115] B. Šavija, M. Luković. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, *Constr. Build. Mater.* 117 (2016) 285-301.
- [116] M. Sutcu, S. Akkurt, The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity, *Ceram. Int.* 35 (2009) 2625-2631.
- [117] J. García Ten, M.J. Orts, A. Saburit, G. Silva, Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: influence of bulk density and firing temperature, *Ceram. Int.* 36 (6) (2010) 1951–1959.

- [118] B. Carrasco, N. Cruz, J. Terrados, F.A. Corpas, L. P´erez, An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks, *Fuel* 118 (2014) 272–280.
- [119] T. Çiçek, Y. Çinçin, Use of fly ash in production of light-weight building bricks, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 521–527.
- [120] P. Nshimiyimana (2020), Effect of the type of clay earthen materials and substitution materials on the physico-mechanical properties and durability of compressed earth block.
- [121] A. Laborel-Préneron, P. Faria, J.E. Aubert, C. Magniont. Assessment of Durability of Bio-based Earth Composites. *Recent Progress in Materials* 2021; 3(2)
- [122] J. Rosales, M. Cabrera, M.G. Beltràn, M. Lopez, F. Agrela. (2017) Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. *J. Clean. Prod.* 154: 424-435.
- [123] ISO 13320-1:1999, Analyse granulométrique - Méthodes par diffraction laser - Partie 1: Principes généraux.
- [124] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux. (1991). *Building with earth*. New Delhi: The Mud Village Society.
- [125] AFNOR NF P 94-050. (1995). Sols: reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
- [126] AFNOR NF P 94-051. (1993). Sols: reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.
- [127] CRATerre-EAG, CDI. (1998). *Compressed earth blocks: Standards-Technology series No.11*, Brussels: CDI.
- [128] AFNOR NF P 94-068. (1993). Sols: reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.
- [129] Classification des sols GTR NF P11-300. (1992). *Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières*.

- [130] AFNOR NF EN 196-6. (2018). Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse.
- [131] S. Brunauer, P.H. Emmet, E. Teller. (1983). Adsorption of gases in multimolecular layers. Contribution from the Bureau of Chemistry and Soils and George Washington University; 1983: 60: 309-319.
- [132] AFNOR NF P 94-053. (1991). Sols: reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.
- [133] A. Guettala (2003). Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p.
- [134] D. Eliche-Quesada, M. A. Felipe-Sesé, A. Infantes-Molina (2016). Olive Stone Ash as Secondary Raw Material for Fired Clay Bricks. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 8219437, 9 pages.
- [135] S. Arezki, N. Chelouah, A. Tahakourt. (2016). The effect of the addition of ground olive stones on the physical and mechanical properties of clay bricks. *Materiales de Construcción*, vol. 66, no. 322, article n°. e082.
- [136] Kornmann M. (2005). Matériaux de construction en terre cuite; fabrication et propriétés. Editions Septima. Paris, Genève.
- [137] F. El Fgaier. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue". Thèse de doctorat. Université de Lille Nord-de-France.
- [138] E. Drouet. (2010). Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques. Thèse de doctorat. École Normale Supérieure de Cachan, France.
- [139] M. Thiery. (2005). Modelling of atmospheric carbonation of cement-based materials considering the kinetic effect and modifications of the microstructure and the hydric state. Thèse de doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées-France.

- [140] G. Villain, M. Thiery, G. Platret, (2007). Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research* 37, 1182–1192.
- [141] M. R. Boudchicha, S. Achour, J. P. Bonnet. (2012). Comportement thermique des mélanges Kaolin-Dolomie. *Verres, Céramiques & Composites*, Vol.2, N°1, 26-33.
- [142] N.C. Collier, N.B. Milestone. (2010). The encapsulation of $Mg(OH)_2$ sludge in composite cement. *Cement and Concrete Research* 40 (2010) 452–459.
- [143] A. Mesbah, J.C. Morel, M. Olivier. (1999). Behaviour of fine clay soils during a static compaction test: determination of relevant parameters, *Mater. Constr.* 32 (223).
- [144] A. P’Kla. (2002). Characterization in simple compression of compressed earth blocks (BTC): Application to masonry: BTC-Earth mortar, National Institute of Applied Sciences of Lyon, France. Doctoral thesis.
- [145] Center for the Development of Enterprise (CDE). (1982). Compressed Earth Blocks: Test Procedures. Technology Series n°16. CDE, CRA Terre-EAG, ENTPE, p. 121.
- [146] M. Cabrera, A.P. Galvin, F. Agrela, M.D. Carvajal, J. Ayuso, Characterization and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures. *Constr. Build. Mater.* 58 (2014) 234-244.
- [147] L. Andrade, (2004). Methodology of Assessment to Use of Bottom Ash of Thermoelectric Power Plants as Aggregate in Concrete. M. Sc. Thesis. Department of Civil Engineering Federal University of Santa Catarina, Brazil (in Portuguese).
- [148] M.J.R. Hinojosa, A.P. Galvín, F. Agrela, M. Perianes, A. Barbudo, Potential use of biomass bottom ash as alternative construction material: conflictive chemical parameters according to technical regulations. *Fuel.* 128 (2014) 248-259.
- [149] M. Cabrera, J. Rosales, J. Ayuso, J. F. Estaire, Agrela Feasibility of using olive biomass bottom ash in the sub-bases of roads and rural paths. *Construction and Building Materials.* 181 (2018) 266-275.

- [150] M.G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, J.R. Jiménez, J. de Brito, Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 699-707.
- [151] A. Kitamura, K. Onizuka, K. Tanaka. Hydration Characteristics of Magnesia Taikabutsu Overseas 16 (1995), No. 3, 3-11.
- [152] C. Dünzen. (2017). Die Hydratation von Magnesiumoxid - α -Aluminiumoxid - Mischungen und deren Verwendung als hydraulisches Bindemittel. Thèse de doctorat. Université de Technologie Clausthal, Allemagne.
- [153] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, R. Chebili. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [154] I. Bouchefra, F.Z. EL Bichri, H. Chehouani, B. Benhamou, Mechanical and thermophysical properties of compressed earth brick reinforced by raw and treated doum fibers. *Construction and Building Materials.* 318 (2022) 126031.
- [155] AFNOR NF EN 196-1. (2016). Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances.
- [156] AFNOR NF EN 993-15. (2005). Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15: détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)
- [157] ISO 8894-1. (1987). Refractory materials-Determination of thermal conductivity-Part 1: Hot wire method (brace).
- [158] D. Khoudja, B. Taallah, O. Izemmouren, S. Aggoun, O. Herihiri, A. Guettala, Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste, *Constr. Build. Mater.* 270 (2021) 121824.
- [159] L. Laou, J.-E. Aubert, S. Yotte, P. Maillard, and L. Ulmet. Hygroscopic and mechanical behaviour of earth bricks. *Mater. Struct.*, vol. 54, n° 3, pp. 1–15, 2021.
- [160] J. Torkaman, A. Ashori, A. Sadr Momtazi, Using wood fiber waste, rice husk ash, and lime stone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks, *Construct. Build. Mater.* 50 (2014) 432-436.

- [161] P. Chindaprasirta, K. Pimraksa, A study of fly ash -lime granule unfired brick, *Power Techn* 182 (2008) 33-41.
- [162] T. Miranda, R.A. Silva, D.V. Oliveira, D. Leitão, N. Cristelo, J. Oliveira, E. Soares, ICEBs stabilised with alkali-activated fly ash as a renewed approach for green building: Exploitation of the masonry mechanical performance. *Constr. Build. Mater*, 155 (2017) 65-78.
- [163] D. Nagrockiene, A. Dauge, Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash. *Constr. Build. Mater*. 174 (2018) 369-375.
- [164] S. Siddiqua, P.N.M. Barreto, Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash. *Constr. Build. Mater*. 169 (2018) 364-371.
- [165] J. Rivera, J. Coelho, R. Silva, T. Miranda, F. Castro, N. Cristelo, Compressed earth blocks stabilized with glass waste and fly ash activated with a recycled alkaline cleaning solution. *J. Clean. Prod*. 284 (2021) 124783.
- [166] M. E. Rahman, A. L. Boon, A. S. Muntohar, M. N. Hashem Tanim, V. Pakrashi, Performance of masonry blocks incorporating palm oil fuel ash, *J. Clean. Prod*. 78 (2014) 195-201.
- [167] L. Zhang, Production of bricks from waste materials- a review, *Construct. Build. Mater*. 47 (2013) 643-655.
- [168] V. V. Sakhare, R. V. Ralegaonkar, Use of bio - briquette ash for the development of bricks, *J. Clean. Prod*. 112 (2015) 684-689.
- [169] J. García-Ten, M. J. Orts, A. Saburit, G. Silva, Thermal conductivity of traditional ceramics. Part I: influence of bulk density and firing temperature, *Ceram. Int*. 36 (2010) 1951-1959.
- [170] J. García-Ten, M. J. Orts, A. Saburit, G. Silva, Thermal conductivity of traditional ceramics. Part II: influence of mineralogical composition, *Ceram. Int*. 36 (2010) 2017-2024.
- [171] S. Djadouf, N. Chelouah, A. Tahakourt. The influence of the addition of ground olive stone on the thermo-mechanical behavior of compressed earth blocks. *Matériaux & Techniques* 108, 203 (2020).

- [172] S. Espuelas, J. Omer, S. Marcelino, A. M. Echeverría, A. Seco, Magnesium oxide as alternative binder for unfired clay bricks manufacturing. *Applied Clay Science*. 146 (2017) 23-26.
- [173] I. Türkmen, E. Ekinçi, F. Kantarcı, T. Sarıcı, The mechanical and physical properties of unfired earth bricks stabilized with gypsum and Elazığ Ferrochrome slag. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6 (2017) 565-573.
- [174] Ogunye, F.O., Boussabaine, H. (2002). Diagnosis of separate effects of cracking and water/moisture uptake in RC beams using compliance technique. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), 335-344.
- [175] Maskell, D., Heath, A., Walker, P. (2014). Comparing the Environmental Impact of Stabilisers for Unfired Earth Construction. *Key Eng Mater*. 600, 132–143.
- [176] N. Al Haffar., A. Fabbri., F. McGregor. (2021). Curing conditions impact on compressive strength development in cement stabilized compacted earth. *Materials and Structures*. 54:103.
- [177] Muntohar, A. S. (2011). Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4215-4220.
- [178] Nagaraj H. B., Sravan M. V., Arun T. G., & Jagadish K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54-61.
- [179] Rahgozar M.A., Saberian, M., Li J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transp. Geotech*. 14, 52–60.
- [180] Rahhal, V., & Talero, R. (2004). Influence of two different fly ashes on the hydration of Portland ciments. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 78, 191–205.
- [181] Muntohar, A.S. and Hantoro, G. (2000). Influence of Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of a Clayey Subgrade. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 5, 1-13.
- [182] Elinwa, A.U., Mahmood, Y.A. (2002). Ash from timber waste as a cement replacement material. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 219-222.

- [183] Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2012). Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 276-281.
- [184] Adesanya, D.A., Raheem, A.A. (2009). Development of corn cob ash blended cement. *Construction and Building Materials*, 23(1), 347-352.
- [185] A. Pkla, "Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimés : application aux maçonneries 'BTC-mortier de terre,'" INSA Lyon, 2002.
- [186] A. Seco, F. Ramirez, L. Miqueleiz, B. García, Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*. 51 (3) (2011) 348-352.
- [187] M.A. García, J.M. Chimenos, A.I. Fernandez, L. Miralles, M. Segarra, F. Espiell Low-grade MgO used to stabilize heavy metals in highly contaminated soils. *Chemosphere* 56 (5) (2004) 481-491.
- [188] A. Navarro, J.M. Chimenos, D. Muntaner, I. Fernández, Permeable reactive barriers for the removal of heavy metals: lab-scale experiments with low-grade magnesium oxide. *Groundwater Monit. Remediat.* 26 (4) (2006) 142-152.
- [189] R. Del Valle-Zermeño, J. Giro-Paloma, J. Formosa, J.M. Chimenos, Low-grade magnesium oxide by-products for environmental solutions: characterization and geochemical performance. *J. Geochem. Explor.* 152 (2015) 134-144.
- [190] G.S. Xeidakis, Stabilization of swelling clays by Mg(OH)₂. Factors affecting hydroxy-Mg-interlayering in swelling clays. *Eng. Geol.* 44 (1-4) (1996) 93-106.
- [191] Shi, C., & Day, R. L. (1995). A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1333-1346.
- [192] Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford.
- [193] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials* 21(7):1534-1541. repetition)

- [194] M. Jia, Y. Zhao, X. Wu, X. Ma. (2024). The effect of carbonation accelerator on enhancing the carbonation process and mechanical strength of air-hardening lime mortars. *Construction and Building Materials*. 425, 136067.
- [195] F. Sajedi, H. Abdul Razak. 2011, Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. *Construction and Building Materials*. Volume 25, Issue 4, Pages 2036-2045.
- [196] Rahhal, V., & Talero, R. (2008). Calorimetry of Portland cement with metakaolins, quartz and gypsum additions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(3), p 825.
- [197] Arrigoni A., Beckett C., Ciancio D., & Dotelli G. (2017). Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 142, 128-136.
- [198] Bruno A. W., Gallipoli D., Perlot C., & Mendes J. (2017). Mechanical behaviour of hypercompacted earth for building construction. *Materials and Structures*, 50(2), 160.
- [199] Soudani L., Fabbri A., Morel J. C., Woloszyn M., Chabriac P. A., Wong H., & Grillet A. C. (2016). Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. *Energy and Buildings*, 116, 498-511.
- [200] Gallipoli D., Bruno A. W., Perlot C., & Mendes J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463-478.
- [201] Ouedraogo K. A. J., Aubert J. E., Tribout C., & Escadeillas G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578.
- [202] Beckett J. C., Pkla A., & Walker P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303-309.
- [203] Champiré F., Fabbri A., Morel J. C., Wong H., & McGregor F. (2016). Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110, 70-78.

- [204] Bui Q. B., Morel J. C., Hans S., & Walker P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163-169.
- [205] Beckett C. T. S., & Augarde C. E. (2012). The effect of humidity and temperature on the compressive strength of rammed earth. In *Unsaturated Soils: Research and Applications* (pp. 287-292). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [206] B. Sun, T. Noguchi, G. Cai, W. Zhao. Effect of temperature and relative humidity on the development of the compressive strength of surface-layer cement mortar. *Construction and Building Materials* 281 (2021) 122626.
- [207] M. Moevus, R. Anger, L. Fontaine. Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. *Terra 2012*, XIth International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage, 2012, Lima, Peru.
- [208] Cagnon H., Aubert J. E., Coutand M., & Magniont C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208-217.
- [209] Chabriac P. A., Gourdon E., Gle P., Fabbri A., & Lenormand H. (2014). Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112, 158-167.
- [210] F. Collet S. Prétot (2014). Thermal conductivity of hemp concrete: variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, 612-619.
- [211] Hall M. R., & Allinson D. (2009). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4), 740-747.
- [212] Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563.
- [213] Labat M., Magniont C., Oudhof N., & Aubert J. E. (2016). From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Building and Environment*, 97, 69-81.

- [214] Liuzzi S., Rubino C., Stefanizzi P., Petrella A., Boghetich G., Casavola, C., & Pappalettera G. (2018). Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 24-32.
- [215] Taallah B., & Guettala A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52-62.
- [216] McGregor F., Heath A., Shea A., & Lawrence M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607.
- [217] Ashour T., Korjenic A., Korjenic S., & Wu W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139-146.
- [218] Guettala A., Abibsi A., & Houari H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119-127.
- [219] Prince Momar Gueye. 2023. Étude des cendres de l'omni processor en vue d'une valorisation en matériaux de construction. Thèse de doctorat en cotutelle de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- [220] Aubert J. E., Fabbri A., Morel J. C., & Maillard P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa! *Construction and Building Materials*, 47, 366-369.
- [221] Cizer Ö., Van Balen K., Elsen J., & Van Gemert D. (2012). Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation. *Construction and Building Materials*, 35, 741-751.
- [222] Van Gerven T., Van Baelen D., Dutre V., & Vandecasteele C. (2004). Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 149-156.
- [223] Al-Fakih A., Mohammed B. S., Liew M. S., & Nikbakht E. (2019). Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review. *Journal of Building Engineering*, 21, 37-54.

- [224] Bories C., Borredon M. E., Vedrenne E., & Vilarem G. (2014). Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. *Journal of Environmental Management*, 143, 186-196.
- [225] Gandia R. M., Gomes F. C., Corrêa A. A. R., Rodrigues M. C., & Mendes R. F. (2019). Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1036-1048.
- [226] Riza F. V., Rahman I. A., & Zaidi A. M. A. (2011). A brief review of compressed stabilized earth brick (CSEB). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7), 6-12.
- [227] Fabbri A., Morel J. C., & Gallipoli D. (2019). Assessing the performance of earth building materials: a review of recent developments. *Construction and Building Materials*, 199, 512-519.
- [228] Arrigoni A., Pelosato R., Dotelli G., Beckett C. T., & Ciancio D. (2017). Weathering's beneficial effect on waste-stabilised rammed earth: a chemical and microstructural investigation. *Construction and Building Materials*, 140, 157-166.
- [229] Beckett C., & Ciancio D. (2014). Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials. *Construction and Building Materials*, 58, 36-44.
- [230] C. Beckett, C. Augarde. *The Effect of Relative Humidity and Temperature on the Unconfined Compressive Strength of Rammed Earth. Unsaturated Soils: Research and Applications*, 2012.
- [231] Lima J., Faria P., & Santos Silva A. (2020). Earth-based plasters: the influence of clay mineralogy. *Journal of Building Engineering*, 29, 101155.
- [232] Rempel, A. R., & Rempel, A. W. (2019). Intrinsic evaporative cooling by hygroscopic earth materials. *Geosciences*, 9(4), 177.
- [233] Laborel-Préneron, A., Magniont, C., & Aubert, J. E. (2018). Characterization of barley straw, hemp shiv and corn cob as resources for bioaggregate based building materials. *Waste and Biomass Valorization*, 9(7), 1095-1112.

- [234] Laou, L., Ait-Ali Said, S., Yotte, S., Ulmet, L., Maillard, P., & Rossignol, S. (2016). Evaluation des propriétés mécaniques des briques en terre crue à différentes hygrométries. *Journal of Advanced Concrete Engineering*, 35(1), 168-17.
- [235] Izemmouren, O., Gadrib, K., & Guettala, A. (2013). Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée. 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 août 2013.
- [236] Venkatamara R. Hubli, Propriétés of lime satbilised steam-cured Blocks for masonry, *Matériaux et constructions*: pp293-300, 2002.
- [237] Moevus M., Jorand Y., Olagnon C., Maximilien S., & Anger R. (2015). Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. *Materials and Structures*, 49(4), 1555–1568.
- [238] LAOU, L., AIT ALI SAID, S., YOTTE, S., ULMET, L., MAILLARD, P., & ROSSIGNOL, S. (2020). Evaluation des propriétés mécaniques des briques en terre crue à différentes hygrométries. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(1), 809-812.
- [239] Oti J. E., Kinuthia J. M., & Bai J. (2010). Design thermal values for unfired clay bricks. *Materials & Design*, 31(1), 104-112.
- [240] Aurélie Laborel-Préneron, Camille Magniont, Jean-Emmanuel Aubert. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and Buildings*, 2018, 178, pp.265-278.
- [241] Collet F., Chamoin J., Pretot S., & Lanos C. (2014). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings*, 62, 294-303.
- [242] Ouedraogo M., Dao K., Millogo Y., Aubert J. E., & Gomina M. (2019). Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *Journal of Building Engineering*, 23, pp.250-258.
- [243] Laborel-Préneron A., Aubert J. E., Magniont C., Tribout C., & Bertron A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719-734.

- [244] Fabbri A., Morel J. C., & Gallipoli D. (2018). Assessing the performance of earth building materials: a review of recent developments. *RILEM Technical Letters*, 3, 46-58.
- [245] Bernal S. A., Mejía de Gutiérrez R., Pedraza, A. L., Provis J. L., Rodriguez E. D., & Delvasto S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 1-8.
- [246] Jennings H. M. (2008). Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II. *Cement and Concrete Research*, 38(3), 275-289.
- [247] Escalante-García J. I., & Sharp J. H. (2001). The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 695-702.
- [248] Fernández-Jiménez A., & Palomo A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82(18), 2259-2265.
- [249] Neville A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- [250] Vissac, A., Bourgès, A., Gandreau, D., Anger, R., & Fontaine, L. (2017). *Argiles et biopolymères: Les stabilisants naturels pour la construction en terre*. CRAterre éditions.
- [251] Zhang P., Zhao Y., Liu J., Qu J., Pan D., Lin Y. (2014). Field investigation of a soil treated by biomass-ash and cementing agents. *Construction and Building Materials*, 68, 455-460.
- [252] Venkatarama Reddy B. V., & Prasanna Kumar P. (2010). Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. *Energy and Buildings*, 42(3), 380-385.
- [253] J. Chen, Y. Li, Y. Li, L. Wen. (2022). Effects of curing conditions with different temperature and humidity on damage evolution of concrete during freeze–thaw cycling. *Materials and Structures*. 55:80.
- [254] Richardson I. G. (2004). Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, β -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1733-1777.

- [255] Bernard E., Lothenbach B., Le Goff F., Pochard I., & Dauzères A. (2017). Effect of magnesium on calcium silicate hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research*, 97, 61-72.
- [256] Zhang T., Cheeseman C. R., & Vandeperre L. J. (2011). Development of low pH cement systems forming magnesium silicate hydrate (M-S-H). *Cement and Concrete Research*, 41(4), 439-442.
- [257] Li Z., Zhang T., Hu J., Tang Y., Niu Y., Wei J., & Yu Q. (2014). Characterization of reaction products and reaction process of MgO–SiO₂–H₂O system at room temperature. *Construction and Building Materials*, 61, 252-259.
- [258] Pardal X., Pochard I., & Nonat A. (2009). Experimental study of Si–Al substitution in calcium-silicate-hydrate (C-S-H) prepared under equilibrium conditions. *Cement and Concrete Research*, 39(8), 637-643.
- [259] Lothenbach B., Nied D., L'Hôpital E., Achiedo G., & Dauzères A. (2015). Magnesium and calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 77, 60-68.
- [260] Fernandez R., Martirena F., & Scrivener K. L. (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 113-122.
- [261] Moropoulou A., Bakolas A., & Anagnostopoulou S. (2005). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites*, 27, 295-300.
- [262] Cultrone G., Sebastián E., Elert K., de la Torre M. J., Cazalla O., & Rodriguez-Navarro C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(3), 547-564.
- [263] Gao P., Lu X., Geng F., Li X., Hou J., Lin H., & Shi N. (2008). Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products. *Building and Environment*, 43(4), 453-457.
- [264] Wang L., Chen L., Cho D. W., Tsang D. C., Yang J., Hou D., ... & Poon C. S. (2019). Novel synergy of Si-rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 695-706.

- [265] K. Van Balen. (2005). Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature. *Cement and Concrete Research*. Volume 35(4), 647-657
- [266] Mitchell J. K., & Soga K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [267] Bullard J. W., Jennings H. M., Livingston R. A., Nonat A., Scherer G. W., Schweitzer J. S., Scrivener K. L., & Thomas J. J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1208-1223.
- [268] A.E. Douba, P. Hou, S. Kawashima. (2023). Hydration and mechanical properties of high content nano-coated cements with nano-silica, clay and calcium carbonate. *Cement and Concrete Research*. Volume 168, 107132.
- [269] Wadsö L. (2010). Operational issues in isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1129-1137.
- [270] Cabrera, J., & Rojas, M. F. (2001). Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 177-182.
- [271] Mindess S., Young J.F., et Darwin D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [272] Lothenbach B., Winnefeld F., Alder C., Wieland E., et Lunk P. (2007). Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 483-491.
- [273] Bernal S.A., Provis J.L., Brice D.G., Kilcullen A., Duxson P., et van Deventer J.S.J. (2012). Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*, 59, 1-13.
- [274] Mehta P.K. et Monteiro P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
- [275] Ngala V.T. et Page C.L. (1997). Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 27(7), 995-1007.
- [276] Bentz D.P., et Weiss W.J. (2011). *Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review*. NIST IR 7765, U.S. Department of Commerce.

Annexe I

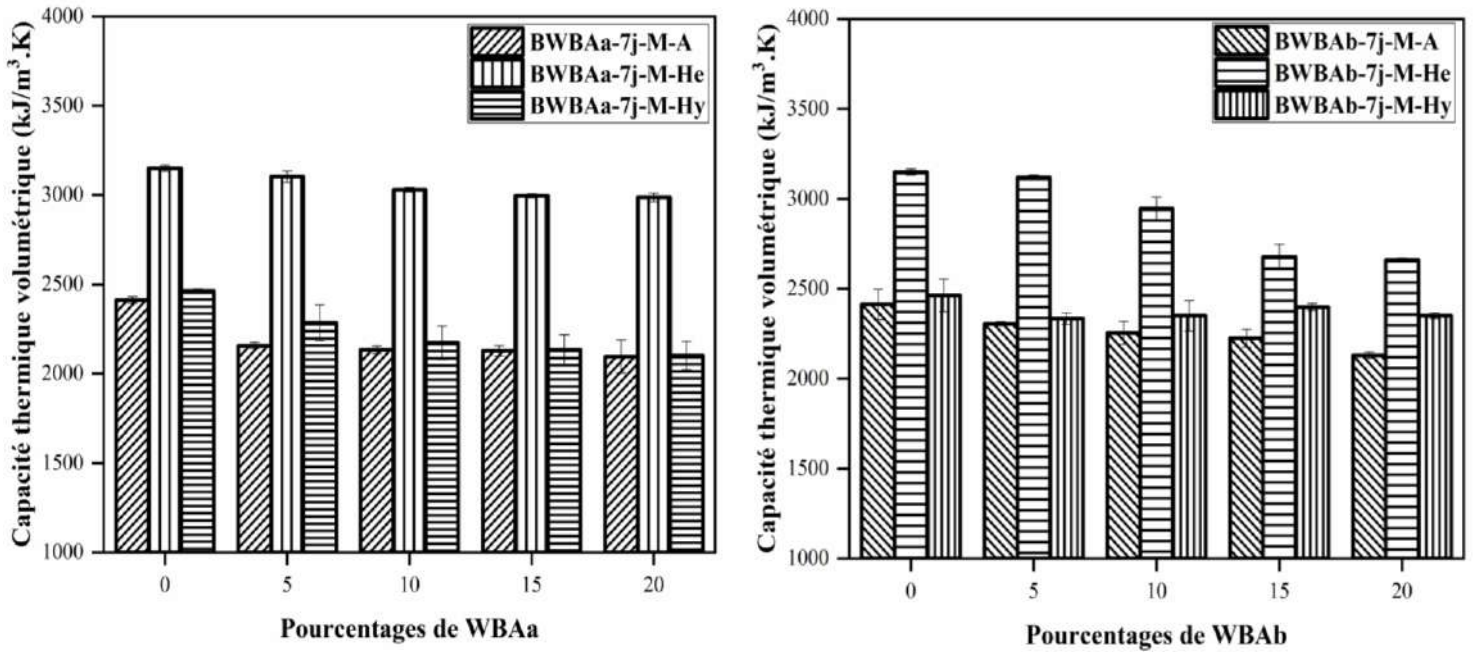


Figure IV.13. Capacités thermiques volumétriques des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.

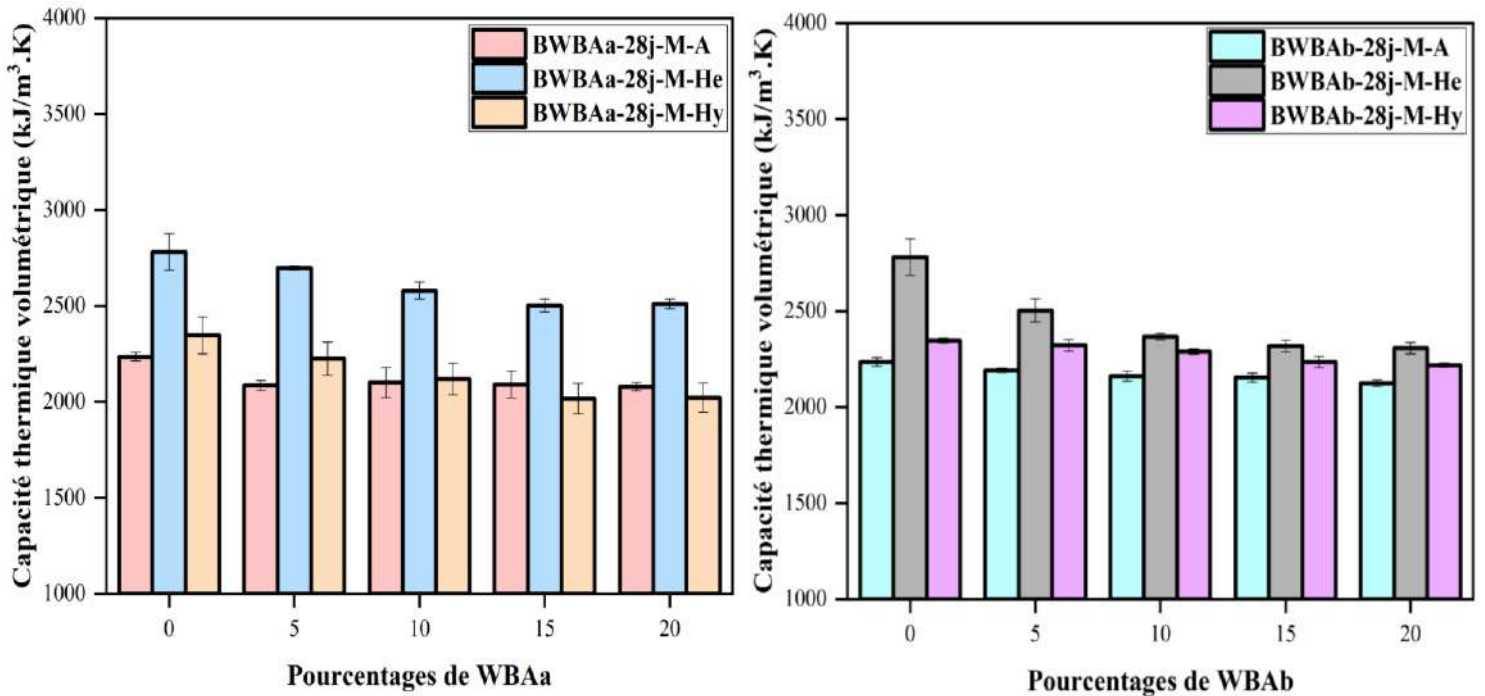


Figure IV.14. Capacités thermiques volumétriques des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.

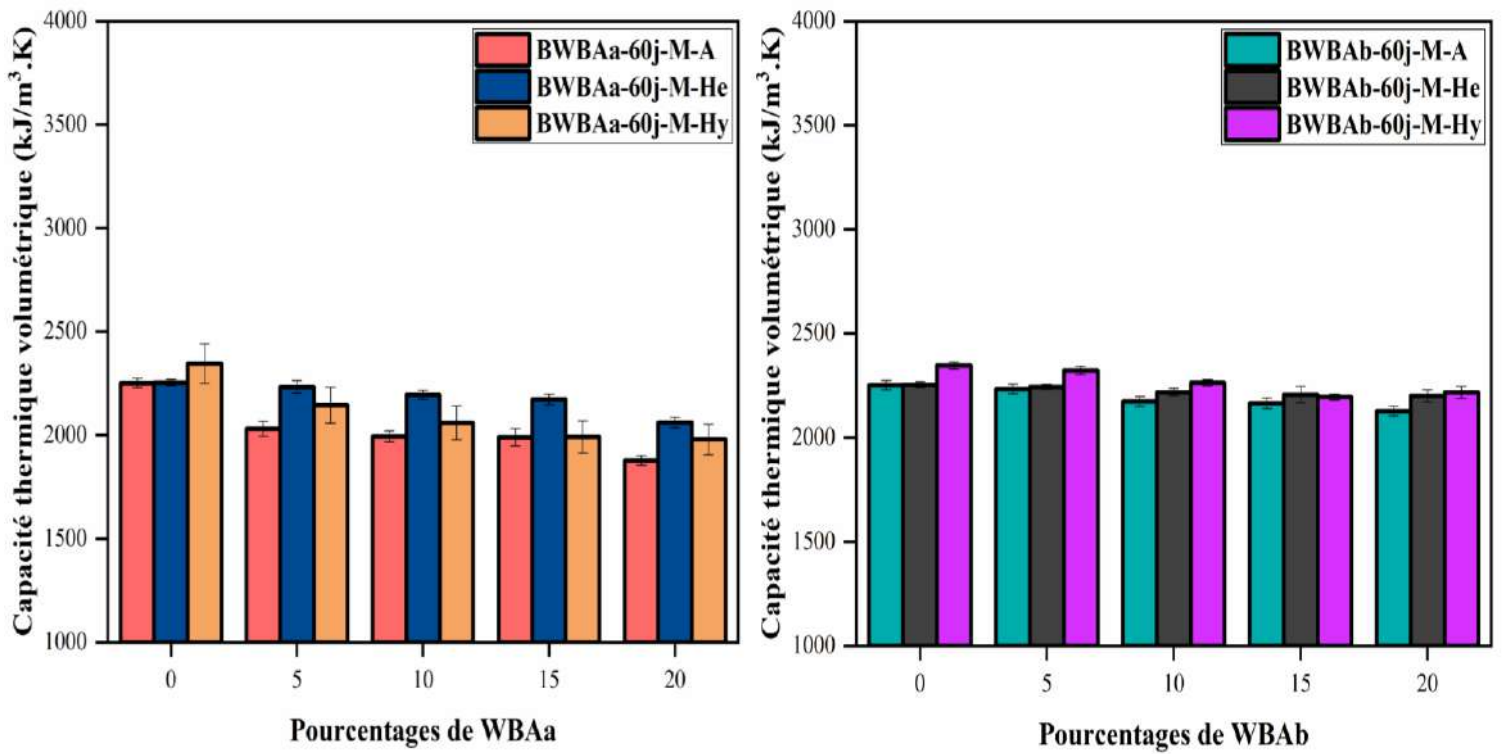


Figure IV.15. Capacités thermiques volumétriques des BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.

Annexe II

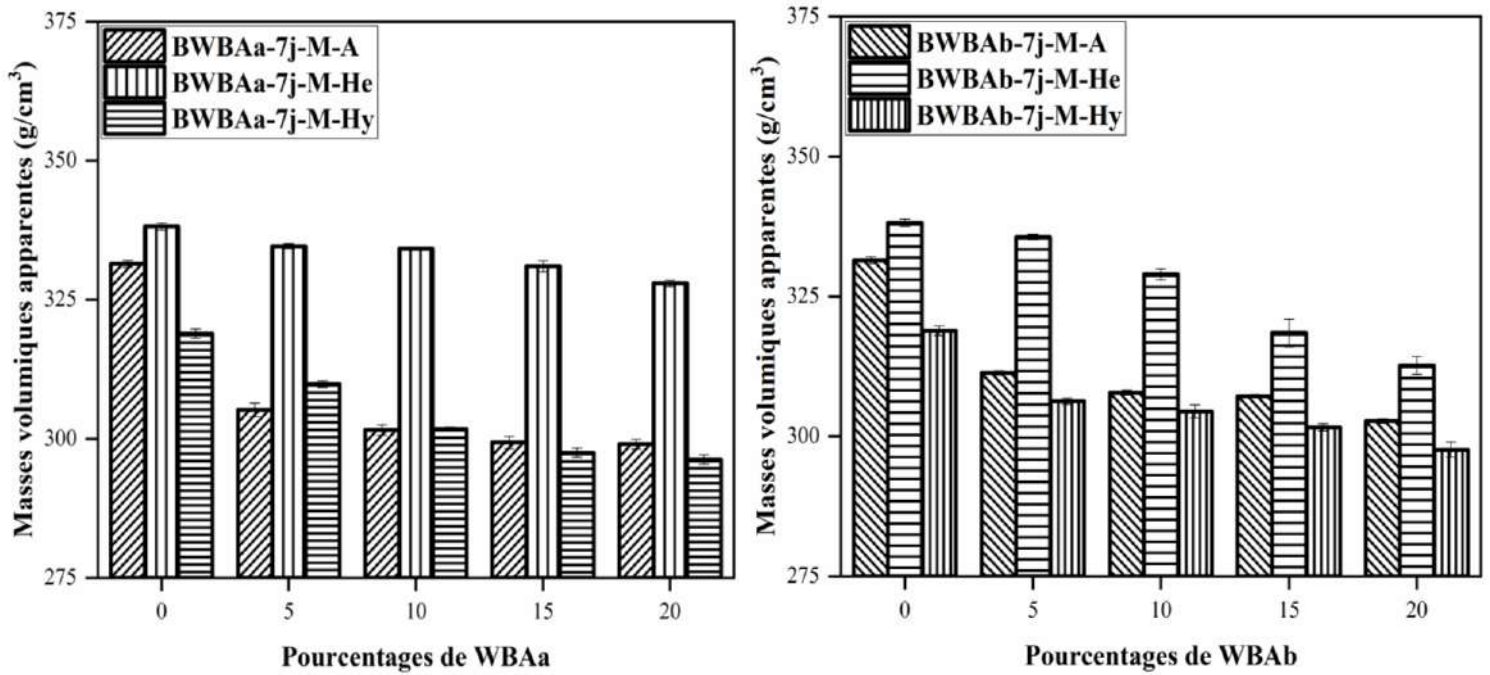


Figure IV.19. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 7 jours.

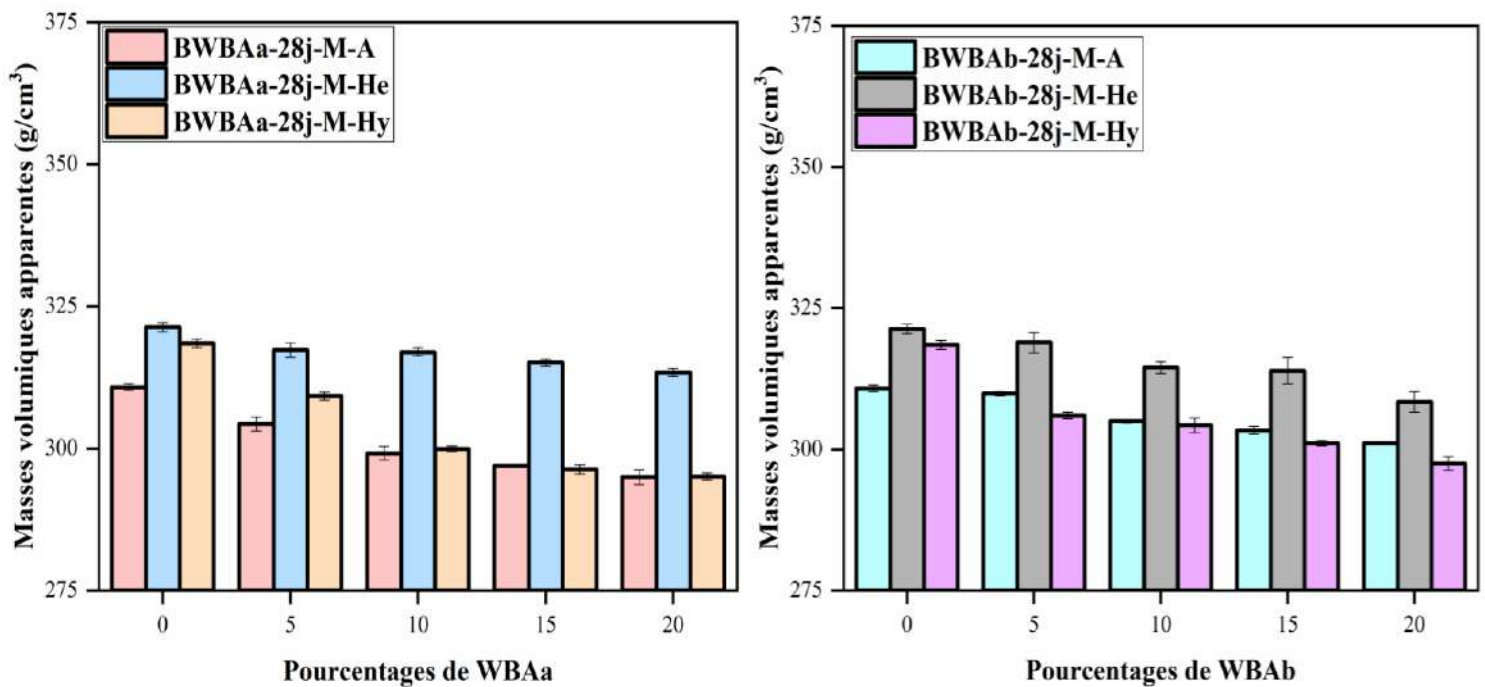


Figure IV.20. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 28 jours.

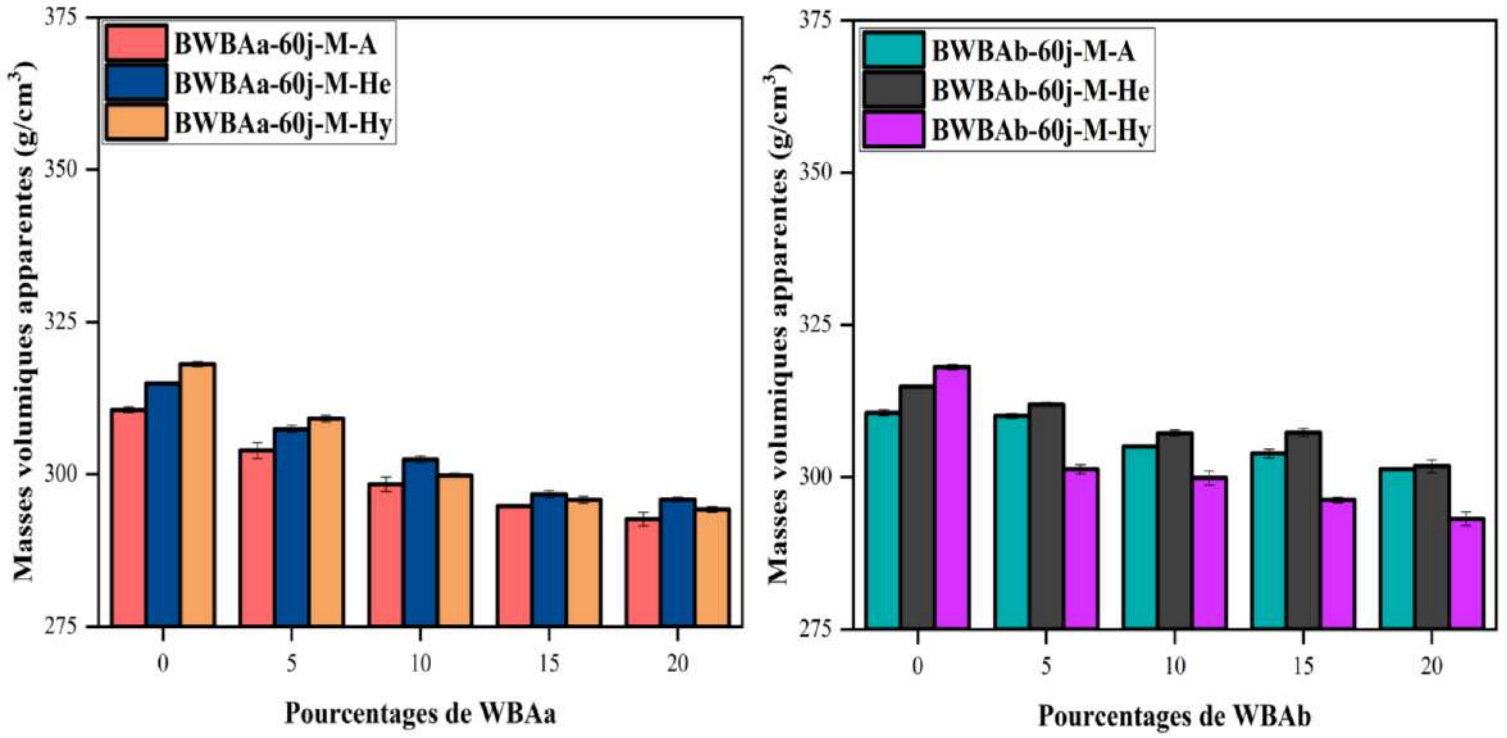


Figure IV.21. Masses volumiques apparentes des briques BWBA conservées dans des milieux ambiant, hermétique et hygrothermique pendant 60 jours.

Résumé: Face aux défis environnementaux et économiques croissants dans le secteur de la construction, notamment concernant les coûts énergétiques et l'impact écologique des matériaux traditionnels, une étude novatrice s'est penchée sur la valorisation des cendres de déchets agricoles comme solution alternative durable. Cette recherche a spécifiquement évalué le potentiel de deux types de cendres issues de la combustion de bois domestique (WBAA et WBAb) comme stabilisant pour les briques en terre comprimée. L'approche expérimentale a consisté à fabriquer des briques en incorporant différentes proportions de cendres de bois (de 0 à 20% en poids) dans une terre limono-argileuse, compactées à 10 MPa. Ces briques ont été soumises à trois environnements distincts: ambiant ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $75 \pm 5\%$ HR), hermétique ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $75 \pm 5\%$ HR), et hygrothermique (40°C , 100% HR), avec un suivi s'étendant de 7 à 180 jours. Les résultats se sont révélés particulièrement prometteurs. Les cendres WBAb ont permis d'atteindre une résistance à la compression exceptionnelle de 33.34 MPa avec 20% de substitution en conditions hygrothermiques. Les cendres WBAA, quant à elles, ont démontré leur efficacité dans l'amélioration des propriétés thermiques, réduisant significativement la conductivité. La durabilité des matériaux s'est également améliorée, avec une réduction notable du coefficient de capillarité et une densification progressive de la structure. L'influence des conditions de conservation s'est avérée déterminante dans l'évolution des propriétés. Si le milieu ambiant s'est montré favorable à court terme, et le milieu hermétique a permis une évolution progressive des caractéristiques, c'est le milieu hygrothermique qui a offert les meilleures performances sur l'ensemble de la période d'étude, malgré une légère diminution de la masse volumique à long terme. Cette étude démontre ainsi le potentiel considérable des cendres de biomasse comme stabilisant alternatif dans la production de briques en terre. Cette approche innovante répond à un double objectif: valoriser les déchets agricoles tout en développant des matériaux de construction performants et écologiques. Elle établit ainsi un équilibre optimal entre excellence technique et responsabilité environnementale, ouvrant la voie à une construction plus durable.

Mots clés; briques en terre comprimées, cendres de bois, performances mécaniques, propriétés thermiques, durabilités,

Abstract: In the face of growing environmental and economic challenges in the construction sector, particularly regarding energy costs and the ecological impact of traditional materials, a groundbreaking study has looked at the recovery of agricultural waste ash as a sustainable alternative. This research evaluated the potential of two types of wood ash from domestic wood burning (WBAA and WBAb) as a stabilizer for compressed earth bricks. The experimental approach consisted of making bricks by incorporating different proportions of wood biomass ash (from 0 to 20% by weight) in silty-clay soil, compacted to 10 MPa. These bricks were subjected to three distinct environments: ambient (20°C , 75% RH), hermetic (20°C , 75% RH), and hygrothermal (40°C , 100% RH), with a follow-up from 7 to 180 days. The results were particularly promising. WBAb ash achieved an exceptional compressive strength of 33.34 MPa with 20% substitution under hygrothermal conditions. WBAA ash, on the other hand, has demonstrated its effectiveness in improving thermal properties, significantly reducing conductivity. The durability of the materials has also improved, with a noticeable reduction in the coefficient of capillarity and a gradual densification of the structure. The influence of conservation conditions has proved to be decisive in the evolution of the properties. While the ambient environment was favorable in the short term, and the hermetic environment allowed a gradual evolution of the characteristics, it was the hygrothermal environment that offered the best performance over the entire study period, despite a slight decrease in density in the long term. This study thus demonstrates the considerable potential of biomass ash as an alternative stabilizer in the production of mud bricks. This innovative approach meets a dual objective: to recover agricultural waste while developing high-performance and ecological construction materials. In this way, it strikes an optimal balance between technical excellence and environmental responsibility, paving the way for more sustainable construction.

Keywords: Wood Biomass Ash, Compressed earth bricks, Mechanical properties, Thermal properties, Durability.