

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE

ANNEE : 2023/2024



N° D'ENREGISTERMENT:

/...../...../...../...../

Thèse

PRESENTEE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT 3^{ème} Cycle

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

THEME :

Contribution à L'étude du Mode de Fabrication et du Design des Briques en Terre et Leurs Effets sur L'isolation Thermique

Présentée et Soutenue Publiquement

Par : Mr. BALI Youcef

Le : 09/05/2024

Devant le jury composé de :

M. BOUBEKRI Abdelghani	Pr Université de Ouargla	Président
M. KRIKER Abdelouahed	Pr Université de Ouargla	Encadreur/Reporteur
M. ABIMOULOUD Youcef	MCB	Université de Ouargla Co-Encadreur
M. CHAIB Hachem	MCA	Université de Ouargla Examineur
M. MANI Mohamed	MCA	Université d'EL Oued Examineur
M. MEKHERMECHE Abdessalam	MCA	Université de Ouargla Examineur
M. REKBI Fares Mohammed Laid	MRA	Centre De Recherche En Technologies Industrielles-CRTI Examineur

Dédicace

«قُلْ إِنَّ صَلَاتِي وَنُسُكِي وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ ﴿١٦٢﴾ لَا شَرِيكَ لَهُ وَبِذَلِكَ أُمِرْتُ وَأَنَا أَوَّلُ الْمُسْلِمِينَ»

الآية 162-163 سورة الأنعام

«En vérité, ma Salât, mes actes de dévotion, ma vie et ma mort appartiennent à Allah, Seigneur de l'Univers ﴿١٦٢﴾ A Lui nul associé Et voilà ce qu'il m'a été ordonné, et je suis le

premier à me soumettre.»

Verset 162-163 Sourate Al-Anaam

Je dédie ce travail à l'âme de ma chère mère qui nous a quittés soudainement pendant que j'écrivais cette thèse, à mon cher père béni. à mes frères, mes sœurs, mes amis et mes collègues, et je prie Dieu Tout-Puissant de le rendre sincère pour Sa noble face.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Kriker Abdelouahed pour avoir accepté de superviser cette thèse, ainsi que pour son soutien et ses conseils. Je remercie également le Maître de conférences Abimouloud Youcef pour son assistance dans l'encadrement de cette thèse. Nous exprimons notre reconnaissance aux membres du comité d'examen : M. Boubekri Abdelghani, M. Chaib Hachem, M. Mani Mohamed, M. Mekhermeche Abdessalam et M. Rekbi Fares Mohammed Laid, pour avoir accepté d'évaluer cette thèse. Nos remerciements vont aussi aux membres du projet de recherche coopérative algéro-tunisienne (Contribution à la Maitrise des Aspects Énergétiques Liés aux Opérations de Séchage et de Cuisson dans les Chaînes de Fabrication de Briques d'Argile) pour avoir enrichi le sujet de recherche. Nous tenons également à remercier les ouvriers de l'usine STB de brique à Temacine, wilaya de Touggourt, ainsi que les ouvriers de l'usine Ganaouba de brique à Sidi Slimane, Touggourt, en particulier les honorables Messieurs Boukhandeg Elfadhel, Khemici Imad et Chafou Erretmi, pour leur contribution à la réussite de ce travail.

Sommaire

Introduction générale	4
Partie1: Etude Bibliographique	
Chapitre I: Synthèse Bibliographique	
A) Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques	
1. Introduction	7
2. Brique de terre crue	7
2.1. Adobe	8
2.1.1. Définition.....	8
2.1.2. Mode de fabrication et les produits d'adobe.....	10
2.1.3. Caractéristiques de la technique de l'adobe	11
2.1.4. Avantages et inconvénients de l'adobe	11
2.2. Pisé.....	13
2.2.1. Définition.....	13
2.2.2. Mode de fabrication et les produits de pisé	14
2.2.3. Propriétés du pisé	16
2.2.4. Avantages et inconvénients de pisé.....	17
2.3. Blocs de terre comprimée (BTC)	18
2.3.1. Définition.....	18
2.3.2. Mode de fabrication et les produits de BTC	18
2.3.3. Diverses variétés de blocs de terre comprimée [20]	20
2.3.4. Caractéristiques de la technique de BTC.....	21
2.3.5. Avantages et inconvénients du BTC	22
2.4. Torchis	23
2.4.1. Définition.....	23
2.4.2. Mode de fabrication et les produits de torchis	23
2.4.3. Propriétés de la technique de torchis	25
2.4.4. Avantages et inconvénients de torchis.....	26
2.5. Bauge.....	26
2.5.1. Définition.....	26
2.5.2. Mode de fabrication et les produits de bauge	26
2.5.3. Propriétés de la technique de bauge	28
2.5.4. Avantages et inconvénients de bauge	29

3. Briques de terre cuite	30
3.1. Définition de brique en terre cuite	30
3.2. Étapes du procédé de fabrication	30
3.3. Produits de brique en terre cuite	38
3.4. Propriétés et caractéristiques de brique en terre cuite.....	42
3.5. Avantages et inconvénients de brique en terre cuite	43
4. Briques silico-calcaires	44
4.1. Définition	44
4.2. Mode de fabrication de brique silico-calcaire [29].....	45
4.3. Propriétés de brique silico-calcaire	48
4.4. Avantages et inconvénient des briques silico-calcaires [31].....	49
4.5. Briques silico calcaires en Algérie	50
5. Conclusion	50

Chapitre I: Synthèse Bibliographique

B) Synthèse des études antérieures pour amélioration de l'isolation thermique des briques de terre

1. Introduction	52
2. Études antérieures sur le développement de l'isolation thermique des briques en terre et des certains autres matériaux de construction.....	52
3. Conclusion	66

Chapitre II

A) Introduction au transfert de chaleur et aux propriétés thermiques

1. Introduction	67
2. Chaleur et modes de transfert de chaleur	67
2.1. Conduction	67
2.2. Convection	68
2.3. Rayonnement.....	69
3. Transfert de chaleur stationnaire et transfert de chaleur transitoire	69
4. Transfert de chaleur stationnaire unidimensionnel	70
5. Quelques définitions thermiques.....	71
5.1. Flux thermique (φ) et la fuite de la chaleur	71
5.2. Conductivité thermique(λ)	72
5.3. Résistance thermique (R)	73
5.4. Capacité thermique (C)	75
5.5. Diffusivité thermique (a) ou (D)	75
5.6. Effusivité thermique (E)	76
5.7. Inertie thermique	76

5.8. Coefficient de transmission calorifique (U)	76
5.9. Chaleur latente	76
5.10. Déphasage thermique	76
5.11. Capacité hygrothermique.....	77
5.12. Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)	77
6. Conclusion	77
Chapitre II	
B) Analyse climatologique et déterminants du confort thermique	
1. Introduction	78
2. Climat	78
2.1. Définition du climat	78
2.2. Définition de la météo	78
2.3. Éléments du climat.....	78
3. Confort thermique dans les bâtiments	80
3.1. Facteurs affectant le confort thermique	81
3.2. Stratégies de confort thermique	84
3.2.1. Confort hivernal.....	84
3.2.2. Confort d'été.....	85
3.3. Exigences de confort hygrothermique	87
4. Climat de la zone d'étude.....	88
4.1. Présentation de la zone étude.....	88
4.2. Classification climatique	88
4.3. Présentation climat et météo moyenne toute l'année à El Oued.....	89
5. conclusion	92
Partie 2: Etude expérimentale	
Chapitre III: Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes des essais thermiques, mécaniques et physiques de briques	
1. Introduction	93
2. Propriétés des matériaux	93
2.1. Argile.....	93
2.2. Sable de dune.....	99
2.3. La Chaux	102
2.4. L'eau.....	103
2.5. Additifs et déchets	104
3. Préparation des échenillons	110
3.1. Expérience préliminaire	110
3.1.1. Proportions des composants des mélanges	111

3.1.2. Préparation des échantillons	112
3.2. Expérience finale 1.....	115
3.2.1. Proportions des composants des mélanges	116
3.2.2. Préparation des échantillons	117
3.3. Expérience finale 2.....	118
3.4. Expérience finale 3.....	120
4. Essais et procédures expérimentales.....	122
5. Conclusion	128
Chapitre IV: Résultats et interprétations	
1. Introduction	129
2. Résultats des tests de l'expérience préliminaire.....	130
2.1. Densité apparente (ρ)	132
2.2. Retrait	133
2.3. Conductivité thermique (λ) et chaleur spécifique (C_p)	134
2.4. Diffusivité thermique (D ou α)	137
2.5. Résistance thermique (R_t)	138
2.6. Résistance à la compression(R_c).....	139
2.7. Résistance à la flexion (R_f).....	140
2.8. Absorption totale d'eau (A_T).....	141
2.9. Absorption capillaire d'eau (A_c)	142
3. Résultats des tests de l'expérience finale 1	144
3.1. Expérience de Proctor	144
3.2. Retrait	146
3.3. Densité apparente (ρ).....	147
3.4. Conductivité thermique (λ)	149
3.5. Chaleur spécifique (C_p).....	151
3.6. Diffusivité thermique (D ou α).....	153
3.7. Résistance à la compression (R_c).....	155
3.8. Résistance à la flexion (R_f).....	156
3.9. Absorption totale d'eau (A_T)	158
3.10. Absorption capillaire d'eau (A_c)	160
3.11. Analyse microstructurale	162
3.12. Optimisation avec le programme Statgraphics.....	165
4. Résultats des tests de l'expérience finale 2	175
5. Résultats des tests de l'expérience finale 3	186

6. Réalisation des prototypes et leur étude thermique	196
6.1. Propriétés des prototypes	196
6.2. Etude thermique des prototypes.....	199
6.2.1. Températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique en été.....	200
6.2.2. Écarts des températures internes et externes des prototypes en été (Text- Tint)	202
6.2.3. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2 en été (P1-P2)	203
6.2.4. Températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique en hiver.....	204
6.2.5. Écarts des températures internes et externes des prototypes en hiver (Text- Tint)	206
6.2.6. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2 en hiver (P1-P2) ..	207
7. Conclusion	208
Conclusion générale.....	209
Références bibliographiques.....	212
Annexe	217

Liste Des Figures

Figure I.1. Moyens de stabilisation des terres remaniées	8
Figure I.2. Méthode de fabrication de l'adobe.....	9
Figure I.3. Constructions en adobe plus célèbres dans le monde.....	10
Figure I.4. Méthode de construction du pisé	14
Figure I.5. Centre d'interprétation du désert Nk'Mip, Canada.....	14
Figure I.6. Maison de Palmier à Marrakech, Maroc	19
Figure I.7. Domaine de la Terre à l'Isle d'Abeau, France	19
Figure I.8. Différentes variétés de briques en terre compressée BTC	20
Figure I.9. Méthode de fabrication de torchis	24
Figure I.10. Bâtiments construits selon la technique du torchis dans le village de Pérouges, en France et Havelange, en Belgique.....	25
Figure I.11. Construction en Bauge en 1982 à Cesson-Sévigné.....	27
Figure I.12. Poulailier à Saint-Grégoire 20e siècle et Clayes, maison du 18e siècle ...	28
Figure I.13. Étapes du procédé de fabrication de brique de terre cuite.....	31
Figure I.14. Gisement d'argile aux alentours du village de Gouge, Province de Touggourt.....	32
Figure I.15. Broyage de l'argile et mélange des composants	34
Figure I.16. Façonnage de brique.....	35
Figure I.17. Séchage de brique	35
Figure I.18. Séchoir-tunnel	36
Figure I.19. Cuisson de brique	36
Figure I.20. Principe de fonctionnement d'un four-tunnel.....	37
Figure I.21. Coupe schématique d'un four-tunnel	37
Figure I.22. Exemples de briques creuses en terre cuite	39
Figure I.23. Produits de brique en terre cuite.....	41
Figure I.24. Exemples de briques pleines ou perforées	41
Figure I.25. L' autoclaves.....	47
Figure I.26. Produits de briques silico-calcaires.....	47
Figure II.1. Transfert de chaleur par conduction	68
Figure II.2. Transfert de chaleur par convection	68
Figure II.3. Transfert de chaleur par rayonnement.....	69
Figure II.4. Transfert de chaleur stationnaire et transitoire.....	70
Figure II.5. Transfert de chaleur à travers le mur unidirectionnel	70
Figure II.6. Flux de chaleur	71
Figure II.7. Conductivité thermique	72
Figure II.8. Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels	73
Figure II.9. Résistance thermique	73
Figure II.10. Épaisseur équivalente pour obtenir avec différents matériaux une résistance thermique de $R= 2,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$	74
Figure II.11. Épaisseur équivalente moyenne pour une résistance thermique $R=5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$	74

Figure II.12. Perspirant	77
Figure II.13. Ce que reçoit la terre du soleil	79
Figure II.14. Pertes thermiques du corps humain dépendent de 6 paramètres physiques	81
Figure II.15. Températures de confort pour différentes activités (d'après O. Fanger)	81
Figure II.16. Température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois.....	82
Figure II.17. Plage de confort pour une activité de bureau.....	83
Figure II.18. Ligne des températures de confort pour un sujet nu, en fonction de l'humidité relative,(d'après O. Fanger)	84
Figure II.19. Principes du confort d'hiver.....	85
Figure II.20. Principes du confort d'été.....	86
Figure II.21. Zones climatiques en Algérie (en hiver)	88
Figure II.22. Zones climatiques en Algérie (en été)	89
Figure II.23. Température moyenne maximale et minimale à El Oued.....	90
Figure II.24. Température horaire moyenne à El Oued	90
Figure II.25. Moyenne mensuelle des précipitations à El Oued.....	91
Figure II.26. Niveaux de confort d'humidité à El Oued	92
Figure III.1. Argile utilisée pour fabriquer les échantillons	93
Figure III.2. Courbe d'analyse granulométrique de l'argile	96
Figure III.3. Abaque de Casagrande	97
Figure III.4. Courbe DRX de l'argile.....	98
Figure III.5. Sable de dune utilisé pour la fabrication des échantillons.....	99
Figure III.6. Courbe d'analyse granulométrique du sable de dune.....	100
Figure III.7. Courbe DRX du sable de dune	102
Figure III.8. La chaux éteinte utilisée pour faire des échantillons.....	102
Figure III.9. Déchets de pneus , granulés et poudre de caoutchouc synthétique.....	104
Figure III.10. Déchets de verre et poudre de verre	105
Figure III.11. Déchets de polystyrène et granulés de polystyrène.....	105
Figure III.12. Déchets de bois de palmier dattier 1 et poudre de bois de palmier dattier 1.....	106
Figure III.13. Déchets de bois de palmier dattier 2 et poudre de bois de palmier dattier 2.....	106
Figure III.14. Plante Alfa, Processus de broyage et poudre de plante Alfa	107
Figure III.15. Dispositif de pression utilisé pour effectuer les échantillons exerce une pression allant jusqu'à 1,2 MPa	113
Figure III.16. Cuisson des échantillons dans un four Tunnel, à une température allant jusqu'à 850 degrés Celsius	113
Figure III.17. Échantillons complétés	114
Figure III.18. Interface du logiciel statistique utilisé dans la modélisation expérimentale	116
Figure III.19. Échantillons complétés sous forme finie.....	118
Figure III.20. Déchets et poudre de bois de palmier dattier 2.....	119

Figure III.21. Moule d'expérimentation de Proctor Normal avec son marteau	122
Figure III.22. CT mètre et sa Sonde	123
Figure III.23. Essai de résistance à la compression et à la flexion	125
Figure III.24. Test d'absorption totale et capillaire d'eau	126
Figure IV.1. Densité Apparente	132
Figure IV.2. Retrait	133
Figure IV.3. Conductivité thermique.....	134
Figure IV.4. Chaleur spécifique	135
Figure IV.5. Diffusivité Thermique	137
Figure IV.6. Résistance thermique.....	138
Figure IV.7. Résistance à la compression	139
Figure IV.8. Résistance à la flexion.....	140
Figure IV.9. Absorption totale d'eau	141
Figure IV.10. Absorption capillaire d'eau.....	142
Figure IV.11. Courbe d'essai de Proctor Normal	144
Figure IV.12. Diagramme à barres de la retrait longitudinale et diagonale.....	146
Figure IV.13. Diagramme à barres de la densité apparente.....	147
Figure IV.14. Diagramme de Pareto Normalisé pour la densité apparente.....	147
Figure IV.15. Maillage de surface de réponse estimé pour la densité apparente	148
Figure IV.16. Diagramme à barres de la conductivité thermique	149
Figure IV.17. Diagramme de Pareto Normalisé pour la conductivité thermique	149
Figure IV.18. Maille de surface de réponse estimée de la conductivité thermique ...	150
Figure IV.19. Diagramme à barres de la chaleur spécifique.....	151
Figure IV.20. Diagramme de Pareto Normalisé pour la chaleur spécifique	152
Figure IV.21. Maille de surface de réponse estimée pour la chaleur spécifique.....	152
Figure IV.22. Diagramme à barres de la diffusivité thermique	153
Figure IV.23. Diagramme de Pareto Normalisé pour la diffusivité thermique	153
Figure IV.24. Maille de surface de réponse estimée pour la diffusivité thermique... 	154
Figure IV.25. Diagramme à barres de la résistance à la compression.....	155
Figure IV.26. Diagramme de Pareto Normalisé pour la résistance à la compression	155
Figure IV.27. Maille de surface de réponse estimée pour la résistance à la compression.....	156
Figure IV.28. Diagramme à barres de la résistance à la flexion	156
Figure IV.29. Diagramme de Pareto Normalisé pour la résistance à la flexion	157
Figure IV.30. Maille de surface de réponse estimée pour la résistance à la flexion ..	157
Figure IV.31. Diagramme à barres de l'absorption totale d'eau	158
Figure IV.32. Diagramme de Pareto Normalisé pour l'absorption totale d'eau.....	159
Figure IV.33. Maille de surface de réponse estimée de l'absorption totale d'eau	159
Figure IV.34. Diagramme à barres de l'absorption capillaire d'eau	160
Figure IV.35. Diagramme de Pareto Normalisé pour l'absorption capillaire d'eau .	161
Figure IV.36. Maille de surface de réponse estimée pour l'absorption capillaire d'eau	161

Figure IV.37. Images au microscope électronique à balayage (MEB) des briques fabriquées	163
Figure IV.38. Image EDS et composition chimique des briques fabriquées.....	165
Figure IV.39. Désirabilité optimisée pour la première optimisation	166
Figure IV.40. Tracé de désirabilité pour la première optimisation	167
Figure IV.41. Tracé de désirabilité pour la deuxième optimisation	168
Figure IV.42. Tracé de désirabilité pour la troisième optimisation.....	170
Figure IV.43. Tracé de désirabilité pour la quatrième optimisation	172
Figure IV.44. Images au microscope électronique à balayage (MEB) et spectrométrie de dispersion d'énergie (EDX) des briques fabriquées optimisées.....	174
Figure IV.45. Retrait longitudinal et diagonale.....	177
Figure IV.46. Densité apparente	178
Figure IV.47. Absorption totale d'eau	179
Figure IV.48. Absorption capillaire d'eau.....	180
Figure IV.49. Conductivité thermique.....	181
Figure IV.50. Chaleur spécifique	182
Figure IV.51. Diffusivité thermique.....	183
Figure IV.52. Résistance à la compression	184
Figure IV.53. Résistance à la flexion.....	185
Figure IV.54. Retrait	188
Figure IV.55. Densité apparente	189
Figure IV.56. Absorption totale d'eau	190
Figure IV.57. Absorption capillaire d'eau.....	191
Figure IV.58. Conductivité thermique.....	192
Figure IV.59. Chaleur spécifique	193
Figure IV.60. Diffusivité thermique	194
Figure IV.61. Résistance à la compression	195
Figure IV.62. Résistance à la flexion.....	196
Figure IV.63. Étapes de réalisation des prototypes	198
Figure IV.64. Diagramme montrant les températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique.....	201
Figure IV.65. Écarts des températures internes et externes des prototypes	202
Figure IV.66. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2	203
Figure IV.67. Diagramme montrant les températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique.....	205
Figure IV.68. Diagramme montrant les écarts des températures internes et externes des prototypes	206
Figure IV.69. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2	207

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Caracteristiques de la technique de l'adobe	11
Tableau I.2. Valeurs courantes des principales caractéristiques du pisé.....	16
Tableau I.3. Caractéristiques de la technique de BTC	21
Tableau I.4. Propriétés de la technique de torchis	25
Tableau I.5. Propriétés de la technique de bauge.....	28
Tableau I.6. Exemples de briques creuses en terre cuite	40
Tableau I.7. Exemples de briques pleines ou perforées	42
Tableau I.8. Propriétés de la brique pleines et perforés	42
Tableau I.9. Résistance thermique des briques pleins et perforés	43
Tableau I.10. Propriétés de brique creuse.....	43
Tableau I.11. Résistance thermique de brique creuse.....	43
Tableau I.12. Propriétés de brique silico-calcaire	48
Tableau I.13. Études antérieures pour améliorer les propriétés thermiques des briques de terre et autres matériaux de construction	62
Tableau III.1. Densité apparent et densité absolue	94
Tableau III.2. Analyse granulométrie et sédimentométrie de l'argile.....	95
Tableau III.3. Résultats des expériences sur les limites d'Atterberg.....	96
Tableau III.4. Composition chimique de l'argile	97
Tableau III.5. Densité apparent et densité absolue	99
Tableau III.6. Analyse granulométrie de sable de dune	100
Tableau III.7. Propriétés physiques du sable de dune	101
Tableau III.8. Analyse chimique du sable de dune.....	101
Tableau III.9. Analyse Physique de la chaux	103
Tableau III.10. Analyse Chimique de la chaux.....	103
Tableau III.11. Concentrations des éléments minéraux dans l'eau.....	104
Tableau III.12. Propriétés physiques des additifs et déchets.....	108
Tableau.III.13. Analyse granulaire des additifs et déchets.....	109
Tableau III.14. Pourcentages des compositions des échantillons.....	112
Tableau III.15. Pourcentages des compositions des échantillons.....	117
Tableau III.16. Pourcentages des compositions des échantillons.....	120
Tableau III.17. Pourcentages des compositions des échantillons.....	121
Tableau IV.1. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience préliminaire	130
Tableau IV.2. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 1	144
Tableau IV.3. Paramètres des facteurs optimaux pour la première optimisation ...	167
Tableau IV.4. Valeurs de réponse à l'optimum pour la première optimisation	167
Tableau IV.5. Paramètres des facteurs optimaux pour la deuxième optimisation ...	169
Tableau IV.6. Valeurs de réponse à l'optimum pour la deuxième optimisation	169
Tableau IV.7. Paramètres des facteurs optimaux pour la Troisième optimisation...	170
Tableau IV.8. Valeurs de réponse optimales pour la Troisième optimisation.....	171
Tableau IV.9. Paramètres des facteurs optimaux pour la quatrième optimisation ..	172
Tableau IV.10. Valeurs de réponse à l'optimum pour la quatrième optimisation	173

Tableau IV.11. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 2 ...	175
Tableau IV.12. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 3 ...	186
Tableau IV.13. Propriétés des prototypes	197
Tableau IV.14. Résultat du premier test des prototypes (Pour été).....	200
Tableau IV.15. Résultat du deuxième test des prototypes (Pour hiver)	204

Liste Des Notations

m : masse	(kg)
MF : module de finesse	(%)
Es : Équivalent de sable.....	(Sans Unité)
Q , ΔQ : quantité d'énergie	(J,cal)
Rt : résistance à la traction.....	(MPa)
Rc : résistance à la compression.....	(MPa)
Rf : résistance à la flexion.....	(MPa)
Rth : résistance thermique	(m ² .k/w)
T : température	(°C,K)
U : coefficient de transmission calorifique	(W/m ² .K)
W : Taux d'humidité	(%)
λ ou CT : Conductivité thermique	(w/m.k)
Φ : flux de chaleur	(W/m ²)
φ : flux thermique	(W/cal.s)
ρ : densité apparente.....	(kg/m ³)
C : capacité thermique(J/K)
c ou C_P : Chaleur spécifique	(j/kg.K)
D ou a : diffusivité thermique	(m ² /s)
E : effusivité thermique	(W/m ² .K.s ^{0.5})
L : chaleur latente(J/kg)
W_L : limite de liquidité	(%)
W_p : limite de plasticité	(%)
I_P : indice de plasticité	(%)
R : retrait.....	(%)
A_T : absorption totale de l'eau.....	(%)
A_C : absorption capillaire de l'eau.....	(g/cm ² .min ^{0.5})
μ : résistance à la diffusion de vapeur d'eau.....	(Sans Unité)

Résumé

Les régions désertiques de notre pays se distinguent par un climat très chaud en été et froid en hiver. Les matériaux de construction utilisés dans différents domaines de la construction ont une isolation thermique faible, ce qui affecte négativement le confort thermique des bâtiments et leur consommation énergétique. Il était donc nécessaire d'intensifier les recherches pour améliorer l'isolation thermique de ces matériaux ou produire des matériaux de construction alternatifs, soit en améliorant leur composition, forme et conception, soit en adaptant leur mode et leur processus de fabrication. Les régions désertiques sont très riches en matières premières tels que l'argile et le sable des dunes, actuellement utilisés dans la production des briques rouges. Le processus de fabrication, la méthode de production, ainsi que l'installation, la forme et la conception jouent un rôle très important dans la détermination des propriétés thermiques, mécaniques et physiques des briques en terre cuite. Cette étude vise à améliorer les performances thermiques des briques en terre cuite tout en préservant leurs propriétés mécaniques et physiques conformément aux recommandations, ainsi qu'à optimiser l'utilisation des ressources naturelles disponibles dans la région d'étude. L'étude a été divisée en cinq axes principaux. Le premier axe consiste à réaliser des expériences préliminaires, impliquant la fabrication d'échantillons des briques en terre cuite composés principalement d'argile et de sable des dunes, avec l'incorporation des divers types des additifs et des déchets industriels et agricoles à un pourcentage fixe dans le corps de la brique pour développer sa composition poreuse. Ensuite, évaluer l'impact des additifs sur les performances thermiques, mécaniques et physiques des échantillons. Dans le deuxième axe, les additifs qui ont donné les meilleurs résultats dans la première étape ont été utilisés pour fabriquer de nouveaux échantillons en utilisant la méthode des plans d'expérience pour déterminer les ratios optimaux du mélange, ainsi que pour évaluer l'impact de chaque additif sur les propriétés des briques en terre cuite fabriquées. Le troisième axe a impliqué la sélection des additifs qui ont donné les meilleurs résultats dans la première étape, puis la modification de leurs ratios dans la plage de 0 à 15% du poids de la matrice du sol, principalement composée d'argile et de sable des dunes. Les ratios ajoutés étaient de 0, 5, 8, 10, 12 et 15%, puis le choix du ratio optimal qui a atteint un équilibre thermique, mécanique et physique. Dans la quatrième étape, l'échantillon, les additifs et les ratios pour l'échantillon optimal obtenu dans la troisième étape ont été sélectionnés, et des ajustements ont été apportés à ses composants en ajoutant des ratios de chaux de 2, 4 et 6% pour évaluer l'impact de cet ajout sur les propriétés thermiques des échantillons. Enfin, dans la cinquième et dernière étape, nous avons réalisé un prototype en utilisant la brique en terre cuite innovante modifiée, ainsi qu'un prototype utilisant la brique en terre cuite commerciale à des fins de comparaison. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité des performances thermiques de la brique modifiée, illustrée par les tests des prototypes, montrant une différence de température entre les deux prototypes à 15:00h en été de 2.5 degrés et à 16:00h en hiver de 3.1 degrés.

Mots clé :

Brique en terre cuite, l'isolation thermique, la conductivité thermique, la résistance mécanique, les propriétés physiques, le recyclage des déchets.

Abstract

The desert regions of our country are characterized by a very hot climate in summer and cold in winter. The construction materials used in various construction fields have poor thermal insulation, negatively impacting the thermal comfort of buildings and their energy consumption. It was therefore necessary to intensify research to improve the thermal insulation of these materials or to produce alternative construction materials, either by improving their composition, form, and design or by adapting their positioning and manufacturing process. Desert regions are rich in raw materials such as clay and dune sand, which are currently used in the production of red bricks. The manufacturing process, production method, as well as installation, shape, and design play a very important role in determining the thermal, mechanical, and physical properties of earth bricks. This study aims to enhance the thermal performance of earth bricks while preserving their mechanical and physical properties as recommended, and optimizing the use of natural resources available in the study region. The study has been divided into five main axes. The first axis involves conducting preliminary experiments, including the fabrication of samples of clay bricks primarily composed of clay and dune sand, with the incorporation of various types of additives as well as industrial and agricultural waste at a fixed percentage into the brick body to develop its porous composition. Then, we evaluate the impact of additives on the thermal, mechanical, and physical performance of the samples. In the second axis, the additives that yielded the best results in the first stage were used to manufacture new samples using the experimental design method to determine the optimal ratios of the mixture and to assess the impact of each additive on the properties of the manufactured clay bricks. The third axis involved selecting the additives that produced the best results in the first stage, followed by modifying their ratios in the range of 0 to 15% of the weight of the soil matrix, mainly composed of clay and dune sand. Ratios added were 0, 5, 8, 10, 12, and 15%, then the choice of the optimal ratio that achieved thermal, mechanical, and physical balance. In the fourth stage, the sample, additives, and ratios for the optimal sample obtained in the third stage were selected, and adjustments were made to its components by adding lime ratios of 2, 4, and 6% to assess the impact of this addition on the thermal properties of the samples.

Finally, in the fifth and final stage, a prototype was developed using the modified innovative clay brick, as well as a prototype using commercial clay bricks for comparison purposes. The obtained results demonstrated the effectiveness of the thermal performance of the modified brick, as illustrated by prototype tests, showing a temperature difference between the two prototypes at 15:00 PM in summer of 2.5 degrees and at 16:00 PM in winter of 3.1 degrees.

Keywords:

Fired earth brick, thermal insulation, thermal conductivity, mechanical resistance, physical properties, waste recycling .

ملخص

تتميز المناطق الصحراوية في بلدنا بمناخ حار جدا صيفا وبارد شتاء، مواد البناء المستخدمة في مجالات البناء المختلفة لها عزل حراري ضعيف مما يؤثر سلبا على الراحة الحرارية للمباني وفاتورتها الطاقوية. لذا كان لزاما تكثيف البحوث لتحسين العزل الحراري لهذه المواد أو إنتاج مواد بناء بديلة، إما عن طريق تحسين تكوينها وشكلها وتصميمها أو عن طريق تكييف وضعها وعملية تصنيعها. تعتبر المناطق الصحراوية غنية جدا بالمواد الخام مثل الطين ورمل الكثبان الذان يستخدمان حاليا في انتاج الطوب الأحمر. تلعب عملية وطريقة التصنيع وكذلك التركيب والشكل والتصميم دورا مهما للغاية في تحديد الخصائص الحرارية والميكانيكية والفيزيائية للطوب الترابي. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير الأداء الحراري للطوب الطيني المحروق مع المحافظة على خصائصه الميكانيكية والفيزيائية داخل مجالات التوصيات، وكذا الاستغلال الأمثل للموارد الطبيعية الموجودة بمنطقة الدراسة، تم تقسيم الدراسة إلى خمس محاور رئيسية، تمثل المحور الأول في إجراء تجارب أولية تمثلت في تصنيع عينات من الطوب الطيني تكونت أساسا من الطين ورمل الكثبان وتم دمج عديد الأنواع من الإضافات والنفائيات الصناعية والزراعية في جسم الطوب بنسب ثابتة قصد تطوير التركيبة المسامية له، ثم تقييم أثر الإضافات على الأداء الحراري والميكانيكي والفيزيائي للعينات، في المحور الثاني تم استخدام الإضافات التي حققت أفضل النتائج في المرحلة الأولى وتم تصنيع عينات جديدة عبر الاستعانة بطريقة خطط التجارب لتحديد النسب المثلى للخليط وكذا تقييم تأثير كل مضاف على خصائص الطوب الطيني المحروق المصنع. في المحور الثالث تم اختيار الإضافات التي حققت أفضل النتائج في المرحلة الأولى ثم تم تغيير نسب إضافتها في المجال من 0 الى 15 بالمئة من وزن مصفوفة التربة المتكون أساسا من الطين ورمل الكثبان، حيث تم إضافتها بنسب 0، 5، 8، 10، 12، و15 بالمئة، ثم تحديد النسبة المثلى التي حققت أداء حراريا وميكانيكيا وفيزيائيا متوازنا. في المرحلة الرابعة تم اختيار العينة والإضافات والنسب للعينة المثلى المتحصل عليها في المرحلة الثالثة و تم إجراء تعديل على مكوناتها من خلال إضافة نسب 2، 4 و6 بالمئة من الجير لتقييم أثر إضافته على خصائص العينات خاصة الحرارية. في المرحلة الخامسة والأخيرة قمنا بإنجاز نموذج أولي باستخدام الطوب الطيني المحروق المستحدث ونموذج آخر باستخدام الطوب الطيني المحروق التجاري لأغراض المقارنة. لقد أظهرت النتائج المتحصل عليها نجاعة الأداء الحراري للطوب المستحدث المعدل وتجسد ذلك من خلال اختبارات النماذج الأولية المنجزة حيث وصل فرق درجة الحرارة بين النموذجين على الساعة الثالثة مساء في فصل الصيف الى 2.5 درجة و 3.1 درجة على الساعة الرابعة مساء في فصل الشتاء.

كلمات مفتاحية:

الطوب الطيني المحروق، العزل الحراري، الناقلية الحرارية، المقاومة الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، تدوير النفائيات.

Introduction générale

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie(AIE), les bâtiments représentent le secteur le plus consommateur d'énergie de l'économie, avec plus d'un tiers de toute l'énergie finale et la moitié de l'électricité mondiale consommée [1].

34% et 40% de cette consommation sont dépensés dans les bâtiments résidentiels et commerciaux, respectivement, à des fins de refroidissement et de chauffage [2], car cette consommation est directement liée à l'efficacité thermique de l'enveloppe du bâtiment, car les murs sont responsables de 25% de l'échange de chaleur entre les espaces internes et externes du bâtiment et les toits sont responsables de 30% [3, 4].

Cette consommation excessive d'énergie entraîne une grande partie des émissions de CO₂ à l'origine du réchauffement climatique, l'Agence Internationale de l'Énergie estimant que le secteur du bâtiment est responsable d'un tiers des émissions mondiales de CO₂ [1]. Des études ont prouvé que le pourcentage de CO₂ dans l'air en 2015 atteignait 400 parties par million et causé par une augmentation de la température de la surface de la terre de 0,9 °C, et ce pourcentage a augmenté d'année en année, sa concentration en 2019 atteignant 410 parties par million. Si les choses restent telles qu'elles sont, on s'attend à ce que sa concentration en 2050 atteigne 650 parties par million, augmentant la température de la surface de la terre de 3 °C [5, 6].

Dans cette situation, il fallait que la communauté scientifique réfléchisse à trouver des solutions pour améliorer le rendement thermique des constructions en général et de leur enveloppe en particulier, freiner leur consommation excessive d'énergie et réduire le risque de pollution environnementale causé par leurs émissions. L'idée d'améliorer l'efficacité thermique repose sur l'encouragement de l'utilisation de matériaux d'isolation thermique et de matériaux respectueux de l'environnement dont la production ne provoque pas d'autres émissions, ainsi que sur l'exploitation du recyclage des déchets dans leur production.

La brique de terre est l'un des matériaux avec une bonne efficacité thermique, car son processus d'isolation thermique résulte de la grande inertie thermique du sol brut, qui est causée par le fin réseau de nanopores et par la grande surface spécifique de l'argile, ce qui renforce la tendance de ce matériau à adsorber et à libérer la vapeur des environnements humides et secs, respectivement, lors de la libération et du stockage de la chaleur latente [7]. Il est également considéré comme respectueux de l'environnement car il se compose principalement d'argile et de sable, qui sont considérés comme des matériaux respectueux de l'environnement en raison de leur facilité de décomposition en déchets et de la possibilité de les recycler. Mais malgré l'efficacité thermique acceptable de la brique de terre, notamment par rapport aux blocs de béton, son isolation reste insuffisante pour atteindre les progrès souhaités de l'isolation thermique des bâtiments.

Plusieurs études de recherche ont été lancées pour tenter d'améliorer les performances thermiques de la brique de terre à travers l'idée d'améliorer sa structure poreuse, qui est étroitement liée au concept de conductivité thermique en incorporant des éléments légers et faciles à brûler à l'intérieur de la matrice du sol ou en ajoutant des éléments chimiques qui travailleront par leur interaction pour provoquer une porosité à l'intérieur de la structure de la brique.

Introduction générale

Dans le cas de la brique de terre cuite, les déchets peuvent avoir d'autres rôles positifs, tels que l'économie d'énergie de combustion grâce à son auto-combustion à l'intérieur de la structure en brique, augmente la température locale, ainsi que les déchets ajoutés peuvent améliorer la plasticité du mélange de fabrication, et réduire le besoin en eau [8].

Notre travail consiste en une étude expérimentale pour évaluer l'effet de l'incorporation de certains déchets végétaux et industriels dans la composition des briques de terre cuite qui se compose principalement d'argile et de sable de dune largement répartis dans la zone d'étude, sur leurs propriétés thermiques, mécaniques et physiques. Ainsi que le choix des déchets optimaux pour les performances thermiques tout en maintenant les propriétés physiques et mécaniques des échantillons dans le champ des recommandations et en déterminant les proportions du mélange de matériaux pour atteindre ces performances.

À cet effet, nous avons utilisé plusieurs types de déchets végétaux et industriels représentés dans : granulés de caoutchouc synthétique, poudre de caoutchouc synthétique, poudre de verre, granulés de polystyrène, poudre de plante d'alfa, poudre de bois de palmier dattier.

Nous avons d'abord déterminé les propriétés physiques et chimiques des matières premières et des déchets usagés. Après avoir terminé les échantillons, ils ont été soumis à des expériences thermiques pour déterminer la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, la résistance thermique, des expériences physiques pour déterminer la densité apparente, le retrait longitudinal et diagonal, l'absorption totale et capillaire de l'eau, des expériences mécaniques pour déterminer la résistance à la compression et résistance à la flexion.

Nous avons ensuite construit un prototype de blocs de briques de terre cuite optimaux qui ont obtenu les meilleurs résultats, et nous avons également construit un autre prototype de briques commerciales à des fins de comparaison.

Nous pouvons résumer cette recherche dans les étapes et chapitres suivants :

Le premier chapitre : Introduction aux méthodes de fabrication des briques et leurs caractéristiques physiques et thermomécaniques, et une étude bibliographique dans lequel nous abordons des études antérieures et de leurs tentatives pour améliorer les propriétés des briques en terre.

Le deuxième chapitre : Généralités sur les propriétés thermiques et les modes de transfert de la chaleur et l'influence du climat sur la zone d'étude.

Le troisième chapitre : Les caractéristiques des matériaux et méthode des essais thermiques, mécaniques et physiques de briques.

Le quatrième chapitre : Résultats et interprétations.

La présente thèse se termine par une conclusion et quelques recommandations dans le souci de mieux valoriser ce nouveau type de matériau de construction.

Grâce à ces travaux, nous sommes impatients de découvrir des produits de construction qui offrent des solutions environnementales en réduisant la consommation d'énergie et en réduisant les impacts environnementaux (émissions) et peuvent également avoir un impact économique en investissant dans des matériaux de construction bon marché et en se dispensant de matériaux industriels coûteux.

Introduction générale

Ce travail fait également partie d'un projet de recherche commun entre l'Algérie et la Tunisie intitulé Contribution à la Maitrise des Aspects Énergétiques Liés aux Opérations de Séchage et Cuisson dans les Chaines de Fabrication de Briques d'Argile.

Partie1

Etude Bibliographique

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

A) Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

1. Introduction

Le matériau de la terre (argile) est classé comme le deuxième matériau de construction le plus répandu au monde, après le bambou. Les habitants des maisons en terre représentent environ 30% de la population mondiale [9], de sorte que les techniques de fabrication de l'argile varient d'une région à l'autre, avec un nombre infini de variables qui reflètent l'identité des lieux et des cultures.

Dans ce chapitre, nous discutons les techniques les plus célèbres utilisées dans les bâtiments en terre et dans différentes parties du monde, représentées par des briques de terre crue, des briques de terre cuite et des briques autoclavées, ainsi que les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces produits.

2. Brique de terre crue

La brique de terre crue est fabriquée en mélangeant de l'argile, du sable, de l'eau et éventuellement de quelques ajouts pour améliorer la cohésion. Ce mélange est ensuite façonné manuellement dans des moules pour obtenir des briques de forme rectangulaire. Ces briques sont ensuite laissées à sécher naturellement à l'air libre, sans nécessité de cuisson. Certaines modifications peuvent être apportées pour améliorer les propriétés des briques de terre crue grâce à des processus appelés stabilisation. Les processus principaux de stabilisation peuvent être résumés comme suit:

- La stabilisation mécanique : elle est réalisée en appliquant des pressions de compactage sur le matériau afin de diminuer la porosité, renforcer la résistance mécanique et améliorer l'étanchéité.
- La stabilisation physique : elle est obtenue en ajustant la granulométrie du matériau. Par exemple, dans le cas d'un matériau argileux, il est essentiel d'incorporer du sable à gros grains. Pour les matériaux plus grossiers, l'ajout d'éléments fins est requis.
- La stabilisation chimique : Dans le cadre de la stabilisation chimique, on recourt à des liants minéraux ainsi qu'au bitume. Ces éléments entrent en réaction avec le sol afin d'optimiser les propriétés du matériau [9].

Dans la figure I.1, nous montrons les plus célèbres moyens de stabilisation des terres remaniées.

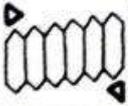
MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE		PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE
SANS APPORT DE STABILISANT			MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES	
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE A TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
				IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
	HYDRO-PHOBANTS		HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU		

Figure I.1. Moyens de stabilisation des terres remaniées [9]

Les briques de terre crue ont de nombreuses formes et types, notamment : l'adobe, le pisé , les blocs de terre comprimée, les torchis et les bauge.

Dans ce qui suit, nous énumérons la nature de chaque type, la méthode de sa fabrication, ses propriétés physiques, mécaniques et thermiques, ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

2.1. Adobe

2.1.1. Définition

L'adobe est un mot anglais signifie briques non brûlées. Il est préparé en mélangeant la pâte essentiellement d'argile, de sable et de l'eau à la paille, au foin ou à certaines fibres qui remplissent chacune leur rôle. L'argile joue le rôle du lien entre les différentes molécules avec l'eau et le sable diminue la probabilité de fissures et de rétrécissement et la fibre augmente la flexibilité et améliore les propriétés mécaniques (résistance à la traction et à la flexion) et diminue le rétrécissement ainsi, On commence par humidifier la terre, puis on la pétrit avec les pieds jusqu'à obtenir une pâte uniforme. Ensuite, cette pâte est versée dans des moules, généralement en bois. Une fois versée, la terre est compactée manuellement. (Des presseurs mécaniques peuvent être utilisés, à condition que la pression ne dépasse pas 20 bar [9]), puis lissée à la main ou à la règle en bois, ensuite démouler et sécher sous le soleil pendant deux à trois jours (éviter les endroits très froids et très chauds) (Figure I.2) [9-11] .



Figure I.2. Méthode de fabrication de l'adobe

L'adobe, une technique utilisée depuis des milliers d'années dans le monde entier, où en Mésopotamie (Irak) il y a des structures de boue datant de plus de 10.000 ans, et les constructions les plus célèbres dans cette technique que nous trouvons :

- (a) Ville de Shibam, Yémen(16^{ème} siècle après JC)
- (b) Grande Muraille de Chine, Chine(476-771 avant JC)
- (c) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique(200 après JC)
- (d) Grande Mosquée de Djenné, Mali(1907 après JC)
- (e) Citadelle de Bam, Iran.(1501-1736 après JC) (figure I.3) [11].

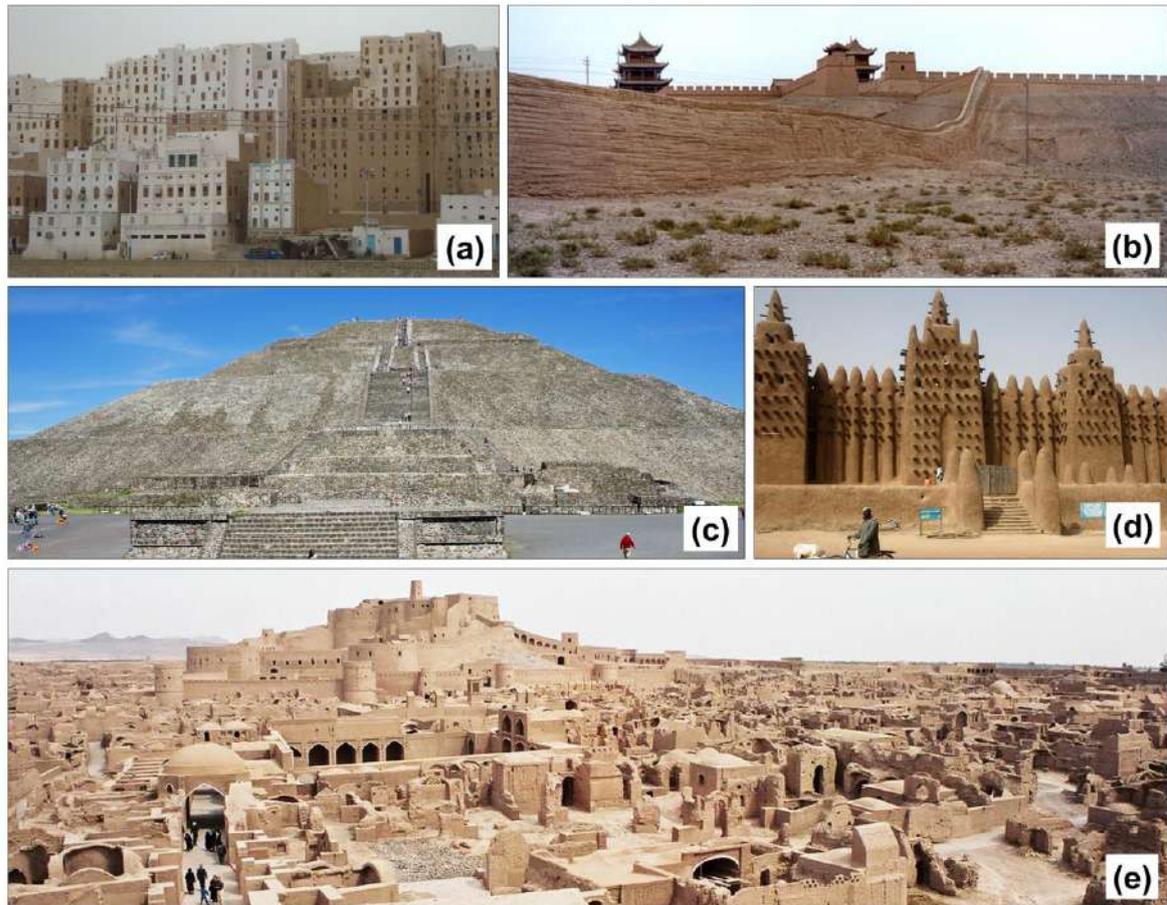


Figure I.3. Constructions en adobe plus célèbres dans le monde [11]

2.1.2. Mode de fabrication et les produits d'adobe

Il existe deux méthodes les plus répandues pour la production de briques d'adobe

La méthode manuelle et la méthode automatique moderne, les deux méthodes utilisent des moules, qu'ils soient simples ou multiples [9].

Une autre façon de produire des briques d'adobe consiste à étaler une grande surface de pâte jusqu'à quatre mètres carrés en la confinant à l'intérieur de dalles, puis en la découpant dans les formes souhaitées, où le processus de découpe est effectué soit par un fil métallique serré, par un tampon en acier ou par des disques en acier.

Les dimensions de moules sont en général de $10 \times 25 \times 36 \text{ cm}^3$, bien que l'on rencontre d'autres tailles telles que : $10 \times 30 \times 60$, $10 \times 30 \times 30$, $15 \times 40 \times 40$, $10 \times 15 \times 25 \text{ cm}^3$ [9, 10].

On distingue globalement trois principaux types de produits :Produits classique, produits spéciaux, produits antisismiques [9].

2.1.3. Caractéristiques de la technique de l'adobe

Dans le tableau suivant, nous décrivons les propriétés physiques, thermiques et mécaniques les plus importantes de l'adobe.

Tableau I.1. Caracteristiques de la technique de l'adobe [12],[13].

Les Propriétés	Adobe	Adobe allégé
Masse volumique(kg/m ³)	1700	1000
Chaleur spécifique c(J/kg.k)	1700	1700
Epaisseur (m)	0.2	0.2
Résistance thermique (m ² /K.W)	0.25	0.5
Déphasage thermique (h)	8.7	9.5
Facteur de résistance à la vapeur d'eau	$6 < \mu < 10$	/
Caractéristique acoustique(dB)	$40 \text{ dB} < R_w < 50 \text{ dB}$	/
Résistance à la compression (MPa)	3MPa	/
Réaction au feu	M0 - Incombustible	/
Retrait au séchage (mm /m)	1	/
Capacité thermique(kj/m ³ .°c)	1350	/
Conductivité thermique λ (W/m°c)	0.46-0.81	/
Absorption d'eau (%)	5	/

2.1.4. Avantages et inconvénients de l'adobe

❖ **Avantages [10],[14]**

- Facilité de fabrication et de mise en œuvre : Les briques d'adobe sont fabriquées à partir de matériaux naturels tels que l'argile, le sable et l'eau, ce qui les rend faciles à produire localement. Leur mise en œuvre est également relativement simple, ne nécessitant pas beaucoup de compétences spécialisées.

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

- Coût abordable : En raison de leur fabrication à partir de matériaux locaux et abondants, les briques d'adobe sont économiquement avantageuses, ce qui les rend accessibles à un large éventail de personnes.
 - Respect de l'environnement : Les briques d'adobe sont non polluantes pour l'environnement, car elles sont fabriquées à partir de matériaux naturels et ne nécessitent pas de processus de cuisson énergivores comme les briques cuites.
 - Régulation de l'humidité de l'air : Les briques d'adobe ont la capacité de réguler naturellement l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments, ce qui crée un environnement intérieur plus confortable et sain.
 - Haute inertie thermique et masse thermique : Les briques d'adobe ont une grande capacité à stocker la chaleur et la libérer lentement, ce qui permet de maintenir une température plus stable à l'intérieur des bâtiments et de réduire les fluctuations de température.
 - Rôle de murs porteurs : Les briques d'adobe peuvent être utilisées comme murs porteurs solides, ce qui les rend adaptées à la construction de bâtiments résistants et durables.
 - Réduction de la consommation d'énergie : Grâce à leur capacité à stocker la chaleur et à réguler l'humidité, les briques d'adobe peuvent contribuer à réduire la consommation d'énergie nécessaire pour chauffer ou refroidir les bâtiments, ce qui les rend plus économes en énergie .
- ❖ **Inconvénients[10],[14]**
- Sensibilité à l'humidité : Les briques d'adobe sont vulnérables aux dommages causés par l'eau, ce qui les rend inadaptées aux régions avec des précipitations élevées ou des conditions humides. L'humidité excessive peut entraîner le gonflement, la déformation et la détérioration des briques.
 - Vulnérabilité aux insectes et à la détérioration : Les structures en adobe sont sujettes aux attaques d'insectes et à la détérioration biologique, ce qui peut affaiblir les murs et compromettre leur intégrité structurelle.
 - Résistance limitée aux variations de température : Les fortes variations de température peuvent provoquer des fissures dans les briques d'adobe, réduisant ainsi leur durabilité et leur solidité.
 - Résistance mécanique limitée: La brique en adobe se caractérise par une faible résistance aux forces de compression, de traction et de flexion, ce qui a un impact significatif sur la durabilité de ses structures.
 - Poussière : Les briques d'adobe ont tendance à produire de la poussière, ce qui peut être un inconvénient pour la santé des occupants et nécessite un entretien régulier pour maintenir la propreté des surfaces.
 - Faible résistance aux séismes : Les structures en adobe ont une résistance limitée aux forces sismiques, ce qui les rend moins adaptées aux régions sujettes aux tremblements de terre.

- Aspect rugueux : Les murs en adobe ont souvent une surface rugueuse, ce qui peut nécessiter une finition supplémentaire, comme un enduit, pour obtenir une apparence plus lisse et esthétique.
- Temps de séchage : La fabrication des briques d'adobe implique un temps de séchage prolongé, ce qui peut ralentir le processus de construction par rapport à d'autres matériaux de construction plus rapides à mettre en place.
- Limitations architecturales : En raison de leur méthode de fabrication, les briques d'adobe peuvent présenter des limitations en termes de forme et de taille, ce qui peut restreindre la créativité architecturale dans certaines conceptions de bâtiments.

2.2. Pisé

2.2.1. Définition

Le pisé est une technique de construction qui implique le compactage de couches successives de terre crue à l'intérieur d'un coffrage, créant ainsi des murs entre un soubassement et un grand toit.

Cette méthode de construction utilise de la terre crue sans nécessiter de soutien par des pièces de bois, ni l'ajout de paille ou de bourre. Le processus consiste à compacter, couche par couche et entre des planches, de la terre spécialement préparée pour cet usage, jusqu'à atteindre l'épaisseur typique des murs en moellons. Une fois bien compactée, la terre prend de la cohésion et forme une masse homogène qui peut être utilisée pour ériger des habitations à différentes hauteurs.

La terre utilisée pour le pisé est généralement extraite à proximité du chantier. Avant utilisation, elle est purifiée pour en retirer toute matière végétale, puis légèrement humidifiée et malaxée. Ensuite, elle est versée dans un coffrage par couches d'épaisseur égale, généralement de 15 à 20 cm maximum. Chaque couche est compactée à l'aide d'un pilon ou d'un psoir, puis ramenée à une épaisseur réduite d'environ 7 à 10 cm. Ces différentes couches de terre compactée forment une masse solide et homogène qui constitue, une fois décoffrée, une portion monolithique de mur porteur.

Pour construire un mur complet d'une hauteur de 80 à 90 cm, appelé "banchée", il faut compter environ dix couches de terre compactée, avec une longueur variant de 200 cm à 400 cm et une épaisseur moyenne de 50 cm.

Le pisé est considéré comme le mode de construction en terre le plus pur et le plus direct. On le retrouve traditionnellement dans de nombreux pays à travers le monde. En France, c'est principalement dans la région Rhône-Alpes et certaines régions du Canada que l'on trouve un patrimoine architectural construit en pisé [9], [15].

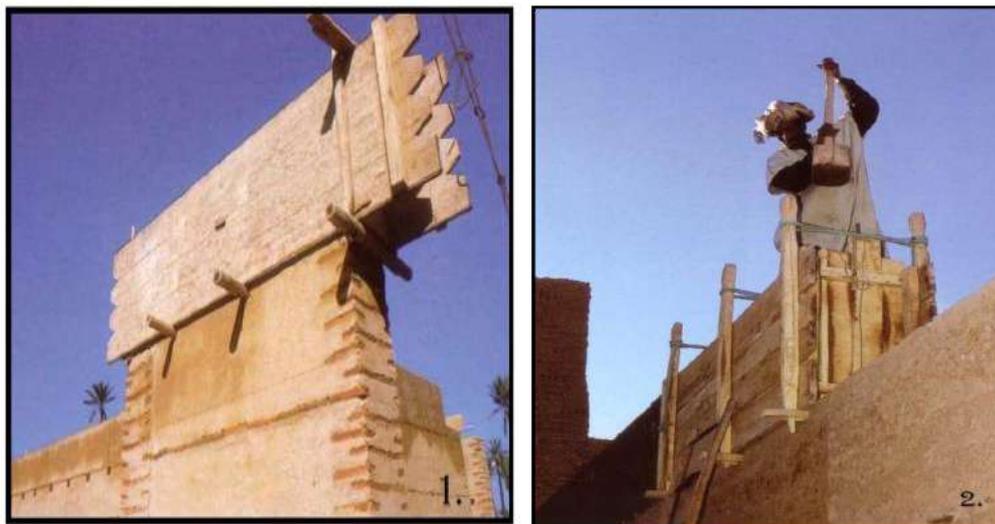


Figure I.4. Méthode de construction du pisé [15]



Figure I.5. Centre d'interprétation du désert Nk'Mip, Canada

2.2.2. Mode de fabrication et les produits de pisé

Le pisé est un procédé de construction où la terre utilisée est faiblement humidifiée, généralement à un taux de 8 à 12 %, et mise en œuvre sans aucun autre composant tel que le ciment ou la chaux. La mise en place de la terre se fait traditionnellement dans un coffrage en bois, où elle est damée en couches successives. La hauteur du coffrage varie généralement de 0,80 à 1,00 m, avec une longueur variant de 2,00 m à 4,00 m, et une épaisseur moyenne de 0,50 m. Pour compacter la terre, on utilise un outil manuel appelé psoir.

La cohésion de la terre est obtenue par le compactage. Une fois la première levée de terre terminée, le coffrage est démonté, puis remonté pour réaliser la levée suivante. Parfois, il est nécessaire d'attendre quelques jours pour que le pisé ait atteint sa pleine solidité avant de procéder à la levée supérieure. Les différentes banchées (couches) sont alternées avec les banchées inférieures pour renforcer la stabilité de la construction.

Dans certains cas, un cordon de mortier de chaux peut être utilisé pour renforcer les zones de fragilité, telles que l'interface entre le soubassement et la première banchée, entre les

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

différentes banchées, ou encore aux endroits où des reprises de banche sont effectuées (soit verticalement, soit en biais selon la technique de banche employée). Ce mortier de chaux peut également être utilisé dans les angles et au niveau des encadrements de biais pour améliorer la structure et limiter le risque de fissuration. Cependant, de nos jours, il est moins courant d'utiliser des joints entre les couches, mais il peut y en avoir dans les coins pour des raisons spécifiques.

Dans les constructions neuves en pisé, on peut trouver l'utilisation de coffrages métalliques intégraux et coulissants, ainsi que des fouloirs pneumatiques pour augmenter la densité du pisé par rapport à une mise en œuvre manuelle. Parfois, le pisé peut être préfabriqué en atelier ou directement sur le site de construction pour faciliter le processus [16, 17].

2.2.3. Propriétés du pisé

Tableau I.2. Valeurs courantes des principales caractéristiques du pisé [12]

Propriété	Symbole	Valeurs courantes		Unité
		Min	Max	
Densité	d	1.7	2.2	Sans Unité
Masse volumique	ρ	1700	2200	Kg/m ³
Retrait linéaire		0	5	mm/m
Résistance à la compression	σ_c	0.9	1.7	MPa
Module d'élasticité	E	500	800	MPa
Conductivité thermique	λ	0.46	0.81	W/m.K
Chaleur spécifique ou capacité thermique massique	c	1000	1500	J/kg.K
Capacité thermique volumique	Pc	500	900	Wh/m ³ .K
Diffusivité	D	0.25	0.27	$\times 10^{-8}$ m ² /s
Effusivité	E	15	27	Wh ^{0.5} /m ² .K
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ	4	10	Sans Unité
Coefficient d'absorption d'eau	w	6	13	Kg/m ² .h ^{0.5}

2.2.4. Avantages et inconvénients de pisé

❖ Avantages [12],[13]

- Durabilité : Les structures en pisé peuvent être très durables, surtout si elles sont correctement entretenues.
- Régulation thermique : Le pisé a d'excellentes propriétés de régulation thermique, ce qui signifie qu'il peut aider à maintenir une température intérieure confortable tout au long de l'année, ce qui peut réduire les besoins de chauffage ou de climatisation.
- Faible coût : La terre crue est un matériau abordable et largement disponible dans de nombreuses régions du monde. Cela en fait une option économique pour la construction.
- Matériau écologique : Le pisé est un matériau de construction écologique, car il est fabriqué à partir de ressources naturelles, ne nécessite pas beaucoup d'énergie pour sa production et génère peu de déchets.
- Isolation acoustique : Le pisé peut offrir une isolation acoustique efficace, réduisant ainsi le bruit provenant de l'extérieur ou entre différentes pièces.

❖ Inconvénients [12, 13]

Le pisé présente une bonne résistance à la compression, mais sa résistance aux efforts de traction est beaucoup plus faible, environ 1/10^{ème} de sa résistance à la compression. En raison de cette caractéristique, le pisé est sensible à certains types de contraintes et nécessite une conception appropriée pour éviter les désordres.

Parmi les contraintes auxquelles le pisé est sensible, on trouve :

- Le cisaillement et les charges ponctuelles : Le pisé est sensible aux forces qui agissent de manière latérale et aux charges concentrées en un point spécifique. Des charges ponctuelles importantes peuvent provoquer des déformations ou des ruptures.
- Les tassements différentiels : Les variations de tassement à différents endroits de la construction peuvent entraîner des concentrations de contraintes, ce qui peut affaiblir certains points du bâtiment.
- L'abrasion et les frottements : L'utilisation de la structure ou d'éléments en contact répété avec d'autres surfaces peut provoquer de l'usure ou des détériorations locales.
- L'arrachement : Lorsque des éléments sont fixés au pisé, comme des attaches ou des supports, cela peut provoquer des efforts d'arrachement qui peuvent endommager le matériau.

Concernant l'absorption d'eau, le pisé a une certaine capacité à retenir l'eau, mais il est important de prendre des précautions pour éviter certains problèmes :

- Accumulation d'eau : L'accumulation d'eau dans ou autour de la structure peut entraîner une perte de cohésion du matériau et des problèmes de stabilité.

- Cycles de gel et de dégel : Si le pisé est anormalement humide et est soumis à des cycles de gel et de dégel, cela peut endommager ses caractéristiques mécaniques et causer des fissures.

2.3. Blocs de terre comprimée (BTC)

2.3.1. Définition

Le bloc de terre comprimée représente une avancée contemporaine par rapport au bloc de terre moulée, souvent appelé adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la solidité des blocs de terre moulée remonte pourtant à une époque ancienne, où l'on utilisait des pilons en bois pour produire les premiers blocs de terre comprimée.

Cette méthode est encore largement employée à travers le monde. Les premières machines pour comprimer la terre auraient été envisagées au cours du 18^e siècle. En France, François Cointeraux, inventeur et fervent promoteur d'une technique de "nouveau pisé", a conçu ce qu'il appelait "la crécise", une déclinaison d'un pressoir à vin. Toutefois, ce n'est qu'au début du 20^e siècle que les premières presses mécaniques ont été envisagées, utilisant des couvercles massifs rabattus avec vigueur dans le moule. Certaines de ces presses ont même été motorisées. Par la suite, l'industrie de la brique cuite a adopté des presses à compression statique, où la terre était comprimée entre deux plateaux se rapprochant. Cependant, le véritable essor de l'utilisation des presses et de l'exploitation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a débuté qu'en 1952 avec la création de la célèbre petite presse "CINVA-RAM" par l'ingénieur Raul Ramirez, au sein du centre CINVA de Bogota, en Colombie. Elle a connu une utilisation à l'échelle mondiale.

Les années soixante-dix et quatre-vingts du siècle dernier ont vu l'émergence d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées, contribuant ainsi à l'essor actuel d'un marché florissant dédié à la production et à l'utilisation du bloc de terre comprimée [18].

2.3.2. Mode de fabrication et les produits de BTC

La matière première consiste en une terre sablo-argileuse souvent mélangée avec du ciment ou de la chaux (6 à 8%). L'utilisation d'une presse permet d'obtenir des éléments parfaitement dimensionnés. Le modèle le plus fréquemment produit a les dimensions suivantes : 29,5×14×9 cm³, cependant, il suffit de changer le moule de la presse pour produire d'autres modèles de blocs de terre comprimée (BTC). La mécanisation du processus de fabrication des blocs de terre comprimée (BTC) assure des briques parfaitement calibrées, offrant une qualité relativement homogène. La compression de la terre dans le moule est à l'origine de sa solide résistance mécanique après le séchage.

Le rendement de production est bien entendu bien supérieur à celui de la fabrication manuelle des adobes. Les BTC sont assemblés avec un mortier composé de terre et de chaux hydraulique (de préférence au ciment). Ils peuvent être utilisés comme murs porteurs en fonction de leur épaisseur, ou comme cloisons [19].

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

En tirant parti de ces bénéfiques économiques, écologiques, esthétiques et environnementaux, de nombreux bâtiments ont été érigés à travers le monde. Citons par exemple : La Maison Palmier à Marrakech, Maroc (voir figure I.6) ; le Domaine de la Terre à l'Isle d'Abeau, France (voir figure I.7).



Figure I.6. Maison de Palmier à Marrakech, Maroc



Figure I.7. Domaine de la Terre à l'Isle d'Abeau, France

2.3.3. Diverses variétés de blocs de terre comprimée [20]

Pour diverses applications, la figure I.8 présente différents produits en bloc de terre comprimée.

- Blocs pleins : Ils sont généralement de forme prismatique (parallélépipèdes, hexagones multiples, rectangles, cubes, etc.) et sont utilisés pour divers usages tels que les murs extérieurs et les cloisons dans la construction.
- Blocs creux : Ces blocs, qui présentent un vide de 15% à 30%, sont allégés et améliorent l'adhérence du mortier.
- Blocs alvéolaires : Leur fabrication requiert un moule spécial et une pression nettement supérieure par rapport aux blocs standards. Ils ont l'avantage d'être légers.
- Blocs à emboîtement : Ils permettent la construction de murs sans l'utilisation de mortier. Cependant, leur fabrication nécessite des moules spécifiques et une pression élevée.
- Blocs parasismiques : Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes parasismiques.
- Blocs spéciaux : Ces blocs sont fabriqués exclusivement pour des applications très spécifiques.

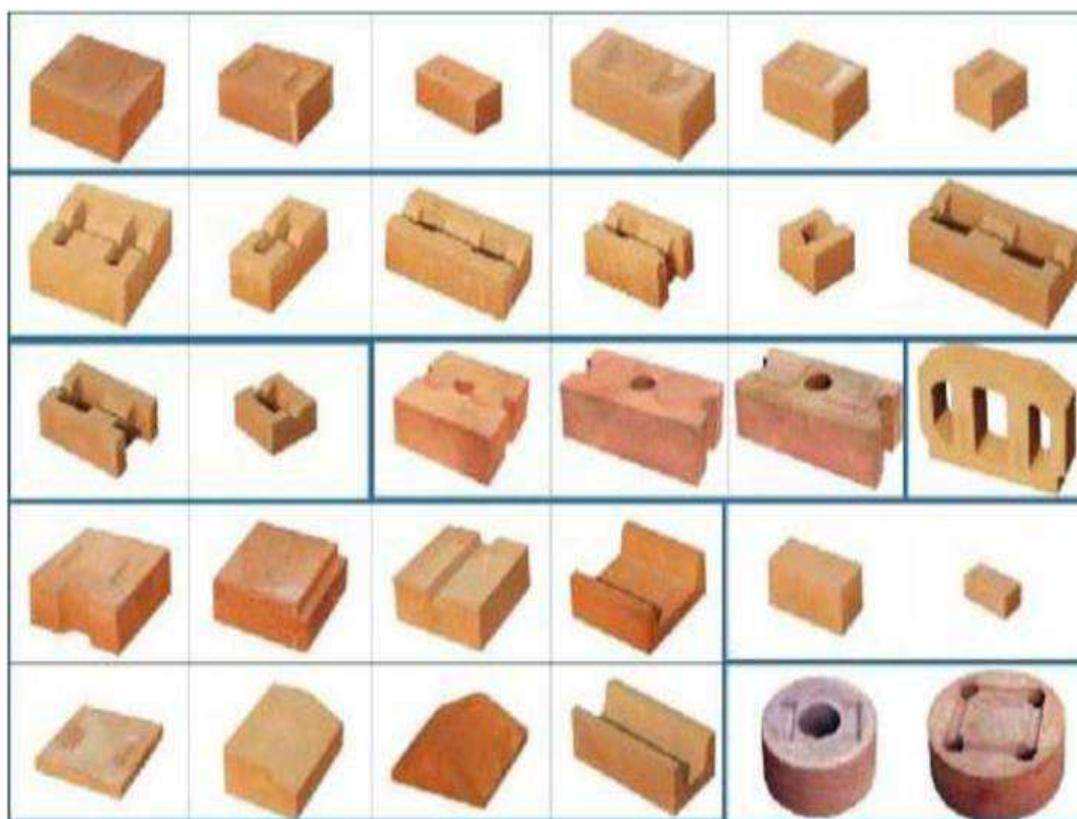


Figure I.8. Différentes variétés de briques en terre comprimée BTC [20]

2.3.4. Caractéristiques de la technique de BTC

Tableau I.3. Caractéristiques de la technique de BTC [21],[22]

Propriété	symbole	BTC20	BTC40	BTC60
Masse volumique	ρ	1800 à 2100 kg/m ³		
Resistance moyenne a la compression	σ_c	2 MPa	4 MPa	6 MPa
Resistance moyenne a la traction	σ_t	0.2 MPa	0.4 MPa	0.6MPa
Cisaillement(G=0.4 .E)	G	0.6 GPa	1 GPa	1.6 GPa
Module du Young	E	1.5 GPa	2.5 GPa	4 GPa
Coefficient de poisson	ν	0.2	0.25	3
Resistance au cisaillement de la maçonnerie à l'origine		0.1 MPa	0.1 MPa	0.1 MPa
Coefficient de fluage ultime	ϕ_c	2 à 3	2 à 3	2 à 3
Retrait/Gonflement à l'humidité ou à long terme		-0.45 à +0.3 mm/m	-0.45 à +0.3 mm/m	-0.45 à +0.3 mm/m
Coefficient de dilatation thermique		6 à 12×10 ⁻⁵ /k	6 à 12×10 ⁻⁵ /k	6 à 12×10 ⁻⁵ /k
Teneur en eau massique		0.5 à 2 %		
Conductivité thermique	λ	0.416 W/m.K		
Capacité thermique	C	800 J/kg.K		

Coefficient d'absorptivité	α	de 0.55 à 0.65
Perméabilité à la vapeur d'eau	δ	1.27×10^{-20} kg/ m.s.Pa
Resistance à la vapeur d'eau	μ	15
Coefficient de transport capillaire	A	$A \leq 0.7$ kg/m ² .s ^{0.5}

2.3.5. Avantages et inconvénients du BTC

❖ Avantages [18]

La méthode du bloc de terre comprimée offre plusieurs avantages :

- Isolation thermique efficace : La brique de terre compressée se distingue par sa capacité à conserver la chaleur, contribuant ainsi à améliorer l'isolation des bâtiments et à réduire la transmission de la chaleur.
- Durabilité et robustesse : Les BTC sont plus rigide et résistante que la brique d'argile traditionnelle, la rendant robuste et résistante à la compression et à l'usure.
- Soutenabilité : La BTC est produite à partir de matériaux naturels, en faisant un choix respectueux de l'environnement. De plus, elle utilise des quantités moindres de ressources non renouvelables par rapport à certaines autres options.
- Facilité de mise en forme : La BTC peut être façonnée facilement pour obtenir diverses conceptions et formes, permettant ainsi une variété dans les conceptions architecturales.
- Réduction de la nécessité de peinture : La couleur de BTC peut faire partie de son aspect esthétique, réduisant ainsi le besoin de peinture supplémentaire.
- Régulation de la température : La BTC contribue à réguler la température à l'intérieur du bâtiment, favorisant ainsi l'économie d'énergie et rendant l'environnement intérieur plus confortable.
- Facilité d'installation : La BTC peut être installée facilement, réduisant ainsi les coûts de main-d'œuvre et le temps nécessaires à la construction.

❖ Inconvénients [18],[21], [22]

Effectivement, les blocs de terre comprimée (BTC) présentent certains inconvénients et limitations, dont voici les principaux :

- Sensibilité à l'eau : Les BTC peuvent être sensibles à l'eau et à l'humidité. Lorsqu'ils sont exposés à des pluies fréquentes ou à une humidité élevée, ils risquent de se désintégrer ou de se déformer, à moins qu'ils ne soient correctement protégés avec des enduits appropriés ou une bonne étanchéité.

- Résistance à la compression : Comparés aux matériaux de construction conventionnels tels que le béton, les BTC ont une résistance à la compression relativement faible. Cela signifie que des murs plus épais ou des renforts structurels supplémentaires peuvent être nécessaires dans certains cas.
- Érosion : L'érosion peut être un problème pour les BTC, en particulier si le mélange de terre n'est pas suffisamment stabilisé ou si les blocs sont exposés à des conditions climatiques difficiles.
- Uniformité : Les BTC peuvent présenter une certaine variation en termes de couleur, de texture et de dimensions, ce qui peut rendre la construction avec ces blocs un peu plus délicate par rapport aux briques industrielles standard.
- Temps de fabrication : La fabrication des BTC peut être plus lente que la production de briques cuites, car elle implique souvent un processus manuel de remplissage et de compression des moules.
- Disponibilité des matériaux : Dans certaines régions, il peut être difficile de trouver des matériaux de qualité appropriée pour la fabrication des BTC. La composition du sol et la disponibilité de sable et de fibres appropriées peuvent limiter leur utilisation dans certains endroits.
- Réglementations du bâtiment : Dans certaines régions, les BTC peuvent ne pas être reconnus ou approuvés par les codes du bâtiment locaux, ce qui peut restreindre leur utilisation dans les projets de construction officiels.

2.4. Torchis

2.4.1. Définition

Le torchis est une construction faite de colombages et de claires de bois, recouvertes d'une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, mélangée à de la paille ou d'autres fibres, forme les parois de l'édifice.

Il est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire, car il combine une matrice plastique (la terre) et des renforts (fibres végétales). Il a été utilisé dès l'ère néolithique comme matériau de construction pour les habitations. Les Celtes en faisaient usage pour édifier leurs murs. Bien que cette technique ait connu son essor principalement du 14^e au 16^e siècle, elle a persisté jusqu'à l'après-Seconde Guerre mondiale, avec des colombages plus simples.

Le torchis représente une méthode de construction de type ossature remplissage (pan de bois). Traditionnellement, l'ossature principale est constituée de colombes en bois, complétée par un treillis formé de petits morceaux de bois de châtaignier ou de noisetier, appelés fuseaux, éclisses, jonc, roseau ou bambou [15].

2.4.2. Mode de fabrication et les produits de torchis

La terre utilisée pour le torchis est une terre plutôt argileuse, humidifiée et souvent mélangée à des fibres d'origine végétale ou animale. Cette terre est d'abord soigneusement mélangée, traditionnellement en utilisant les pieds, ensuite, une première couche est délicatement appliquée et enroulée à la main autour des fuseaux de bois, la deuxième couche recouvre l'ensemble du mur (Figure I.9). Pour projeter et lisser le torchis, on utilise

un outil spécifique appelé un "Litré", qui est une longue palette équipée d'un manche recourbé [15] .

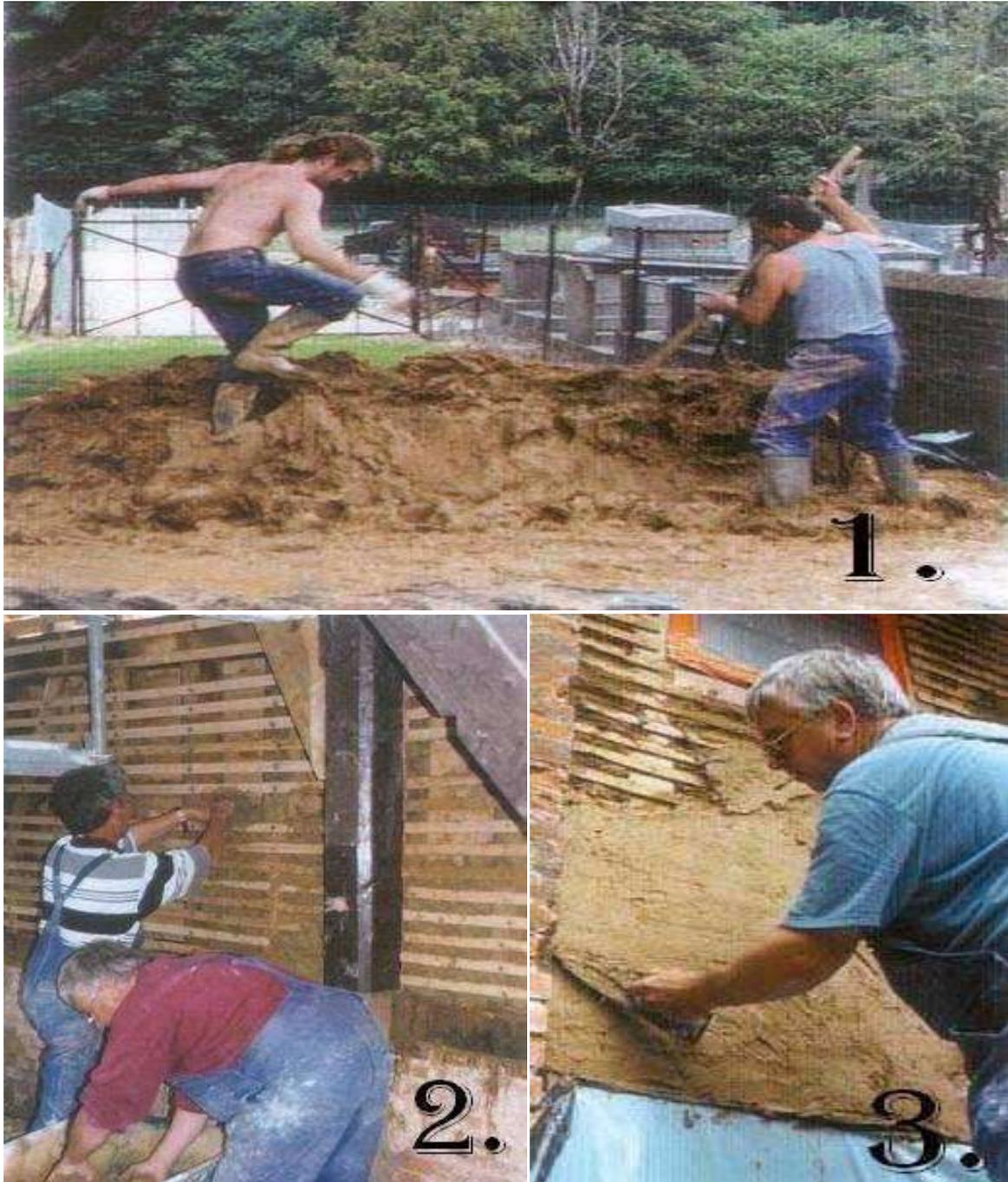


Figure I.9. Méthode de fabrication de torchis [15]

Il existe de nombreux bâtiments dans le monde construits avec la technique du torchis, parmi les plus célèbres, on trouve les bâtiments du village de Pérouges en France et les bâtiments des villages de Havelange en Belgique.



Figure I.10. Bâtiments construit selon la technique du torchis dans le village de Péruges, en France et Havelange, en Belgique

2.4.3. Propriétés de la technique de torchis

Tableau I.4. Propriétés de la technique de torchis [12]

Propriété	symbole	Valeur courant		Unité
		Min	Max	
Masse volumique	ρ	600	1800	Kg/m ³
Conductivité thermique	λ	0.15	0.8	W/m.K
Capacité thermique massique	Cp	830	1600	J/kg.K
Resistance à la diffusion de la vapeur d' eau	μ	3	12	Sans Unité
Isolation acoustique(mur sans enduite d'une épaisseur de 10 à 25 cm)	R'w	Entre 40 et 46	Entre 47 et 56	dB

2.4.4. Avantages et inconvénients de torchis

❖ **Avantages [12]**

- **Matériau écologique :** Le torchis est un matériau naturel qui utilise des ressources locales, telles que l'argile et la paille, réduisant ainsi l'empreinte carbone associée à la construction.
- **Isolation thermique :** Le torchis offre une bonne isolation thermique, ce qui signifie qu'il aide à maintenir une température confortable à l'intérieur des bâtiments en été comme en hiver, ce qui peut réduire les coûts de chauffage et de climatisation.
- **Régulation de l'humidité :** Le torchis a la capacité d'absorber et de relâcher l'humidité de manière naturelle, contribuant ainsi à réguler l'humidité intérieure et à améliorer la qualité de l'air.
- **Faible coût :** Les matériaux de base nécessaires pour le torchis (terre, paille) sont souvent peu coûteux et facilement accessibles, ce qui en fait une option économique pour la construction.
- **Facilité de réparation :** En cas de dommages mineurs, le torchis peut être facilement réparé en ajoutant de nouveaux matériaux et en les mélangeant avec l'ancien.

❖ **Inconvénients [12]**

- **Sensibilité à l'eau :** Le torchis peut être vulnérable à l'eau s'il n'est pas protégé correctement. L'exposition prolongée à l'humidité peut entraîner la décomposition de la paille et de l'argile, ce qui peut endommager la structure.
- **Risque de fissures :** Comme le torchis est un matériau naturel et flexible, il peut se fissurer au fil du temps en raison des mouvements du bâtiment ou des changements climatiques.
- **Entretien régulier :** Les constructions en torchis nécessitent un entretien régulier pour assurer leur durabilité. Cela peut impliquer la réapplication de couches de finition protectrices périodiquement.
- **Normes de construction :** Dans certaines régions, les constructions en torchis peuvent ne pas répondre aux normes de construction modernes, ce qui peut rendre difficile l'obtention d'autorisations de construction ou d'assurances.
- **Résistance structurelle limitée :** Le torchis peut ne pas avoir la même résistance structurelle que d'autres matériaux de construction modernes, ce qui peut limiter la hauteur ou la taille des bâtiments pouvant être construits.

2.5. Bauge

2.5.1. Définition

Cette technique implique d'assembler des boules de terre les unes sur les autres et de les compacter légèrement à l'aide des mains ou des pieds pour créer des murs monolithiques. Généralement, on mélange la terre avec divers types de fibres [12],[15] .

2.5.2. Mode de fabrication et les produits de bauge

La bauge est un mode de construction monolithique qui repose sur l'empilement de terre crue. Cette terre se trouve dans un état malléable, souvent mélangée à des fibres d'origine

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

végétale ou animale. Les surfaces verticales sont façonnées par découpe après un bref temps de séchage, lorsque le matériau n'a pas encore durci complètement.

Généralement, on prélevait la terre sur le site de construction (ce qui explique la présence fréquente de dépressions autour des maisons en bauge) en dessous de la couche de terre végétale. Cette terre devait posséder une teneur en argile modérée, assez pour garantir une bonne cohésion, mais pas trop pour éviter les fissures. Ensuite, elle était tassée par les hommes ou des animaux afin d'y incorporer des matériaux végétaux tels que la paille, la bruyère, l'ajonc, la fougère, etc.

Après avoir préparé ce mélange, on applique des couches successives sur le mur, en les compactant progressivement à l'aide d'une trique (sorte de manche en bois). Ces couches dépassent largement de la largeur finale du mur, créant ainsi une "levée" d'environ 60 cm de hauteur. On laisse ensuite reposer pendant deux semaines pour que la levée se tasse, puis on corrige la rectitude du mur à l'aide d'un outil tranchant, la paroir (sorte de bêche plate). Pour cela, on se tient debout sur le dessus de la levée et on coupe l'excédent de terre. Les encadrements de fenêtres et les portes sont installés au fur et à mesure de l'avancement de la construction.

Cette méthode confère une grande liberté au constructeur, car il n'est pas restreint par l'utilisation d'un coffrage, comme c'est le cas pour le pisé par exemple. Avec la bauge, la réalisation de murs courbes et sinueux ne pose plus de problème.

Tout comme pour le torchis, on ne trouve pas de monuments en bauge inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO, mais de nombreux pays, notamment la France, abritent un certain patrimoine en bauge. En Bretagne, l'architecture en terre prédomine principalement dans la région de Rennes, couvrant une zone allant de Rennes à Merdrignac. Bien que cette méthode de construction en terre semble émerger au milieu du 16e siècle, les plus anciens édifices connus datent du début du 17e siècle. [15], [16]



Figure I.11. Construction en Bauge en 1982 à Cesson-Sévigné [15]



Figure I.12. Poulailler à Saint-Grégoire 20e siècle et Clayes, maison du 18e siècle [15]

2.5.3. Propriétés de la technique de bauge

Les propriétés hygrothermiques de la bauge sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau I.5. Propriétés de la technique de bauge [12]

Propriété	symbole	Valeur moyenne Min	Valeur moyenne Max	Unité
Masse volumique	ρ	1400	1800	Kg/m ³
Conductivité thermique	λ	0.4	0.6	W/m.K
Chaleur spécifique	c	1000	1500	J/kg.K
Capacité thermique volumique	ρc	400	750	Wh/m ³ .K
Diffusivité thermique	D	0.22	0.28	$\times 10^{-8}$ m ² /s
Effusivité thermique	E	12	21	Wh ^{0.5} /m ² .K
Resistance à la diffusion de vapeur d'eau	μ	4	10	Sans Unité
Coefficient d'absorption d'eau	w	6	13	Kg/m ² .h ^{0.5}

2.5.4. Avantages et inconvénients de bauge

❖ Avantages [12]

- **Matériau écologique :** La bauge est une construction écologique car elle utilise des matériaux naturels disponibles localement, tels que la terre, le sable, et les fibres végétales, réduisant ainsi l'empreinte environnementale.
- **Isolation thermique :** Les murs en bauge offrent une excellente isolation thermique, permettant de maintenir des températures confortables à l'intérieur des bâtiments en régulant les variations de chaleur.
- **Isolation phonique :** Les propriétés acoustiques de la bauge permettent de réduire la transmission du bruit, ce qui peut être bénéfique pour créer un environnement intérieur calme.
- **Coût réduit :** La bauge est souvent moins coûteuse que d'autres méthodes de construction car elle utilise des matériaux locaux abondants et nécessite moins d'énergie pour sa mise en œuvre.
- **Durabilité :** Correctement entretenues, les constructions en bauge peuvent être durables et résistantes, en particulier dans les climats appropriés.
- **Régulation de l'humidité :** La bauge peut réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments, absorbant et libérant l'excès d'humidité de l'air, ce qui peut améliorer le confort intérieur.

❖ Inconvénients [12]

- **Vulnérabilité à l'eau :** La bauge est sensible à l'eau et peut se détériorer rapidement en cas d'exposition prolongée à l'humidité ou aux fortes pluies. Un bon drainage et des toits bien conçus sont essentiels pour protéger les constructions en bauge.
- **Résistance structurelle :** Bien que les murs en bauge puissent être solides, ils peuvent avoir une résistance mécanique inférieure à celle d'autres matériaux de construction, tels que le béton ou la brique.
- **Préparation de la terre :** Le processus de préparation de la terre pour la construction en bauge peut être laborieux et exiger un savoir-faire spécifique.
- **Limitations architecturales :** La bauge peut limiter les possibilités architecturales, car elle est généralement utilisée pour des constructions simples avec des murs droits.
- **Temps de construction :** La construction en bauge peut prendre plus de temps que certaines autres méthodes de construction plus modernes.

3. Briques de terre cuite

3.1. Définition de brique en terre cuite

La brique de terre cuite est produite en utilisant de l'argile riche en silice, qui est moulée puis cuite à des températures élevées dans des fours. La cuisson à haute température permet de rendre les briques dures, résistantes et durables.

Les matériaux en terre cuite sont utilisés depuis des millénaires dans la construction, à travers le monde entier. Ils ont su évoluer en harmonie avec les besoins du secteur. Les propriétés de ces produits en terre cuite les rendent adaptés à une utilisation efficace dans toutes les phases de la construction. On retrouve principalement des briques, des tuiles, des composants pour les planchers, des conduits de cheminée, des revêtements extérieurs, des carreaux rustiques, et bien d'autres encore.

Ces composants sont élaborés à partir d'argiles ordinaires. Après une préparation minutieuse du mélange, la terre glaise est façonnée, séchée puis finalement soumise à la cuisson. Il est fréquent que les produits prennent une teinte rougeâtre lors de ce processus (à l'exception des argiles calcaires qui peuvent varier du rose au jaune et au blanc après cuisson) [23],[24] .

Ensuite, les diverses phases de la production sont expliquées, depuis l'extraction dans la carrière jusqu'au dépôt des produits finis dans l'aire de stockage. Cela englobe la préparation de la terre, le façonnage, le processus de séchage et de cuisson. Puis, des détails sont fournis concernant les caractéristiques de la terre cuite, ainsi que sur la variété des produits en terre cuite disponibles sur le marché [25].

3.2. Étapes du procédé de fabrication

La fabrication comprend plusieurs stades (figure I.13) dont les principaux sont :

- Extraction des matières premières .
- Préparation .
- Façonnage .
- Séchage .
- Caisson.

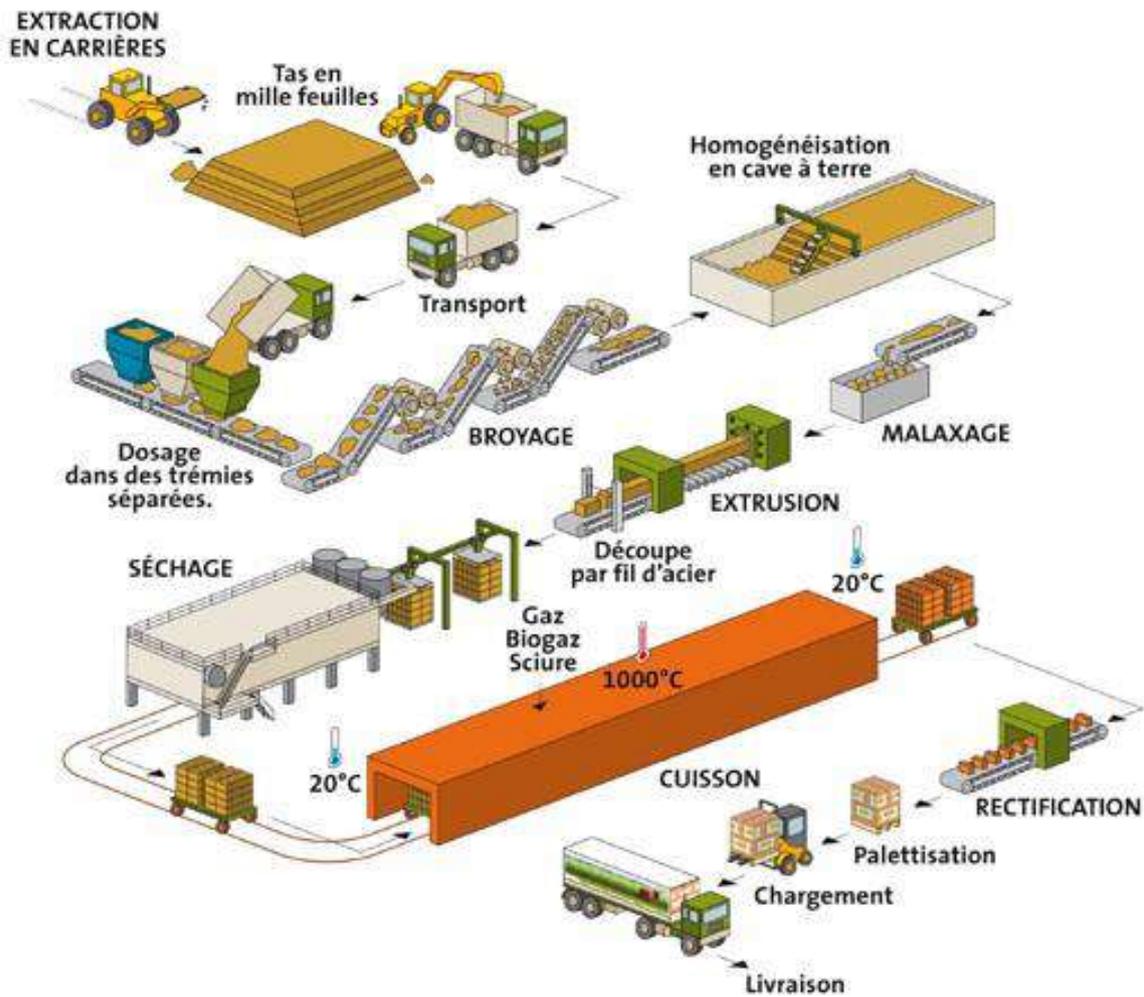


Figure I.13. Étapes du procédé de fabrication de brique de terre cuite [25]

3.2.1. Extraction des matières premières

Les composants les plus fréquemment employés dans la production d'articles en terre cuite sont principalement les argiles, ainsi que les éléments dégraissants.

- **Gisements**

Les argiles employées dans la production de produits en terre cuite se trouvent presque partout dans les différentes strates géologiques, à l'exception des terrains primaires. Au sommet du quaternaire, on rencontre la formation significative de loëss, qui est une argile à la fois siliceuse et calcaire, présentant une faible plasticité. La couche supérieure du loëss a subi une décalcification, donnant naissance à une argile très siliceuse, peu plastique, pratiquement dépourvue de calcaire, appelée lehm [25].

- **Extraction**

Une fois que la couche de matériau inutilisable, également connue sous le nom de stérile, est retirée à l'aide de buteurs, de pelles mécaniques ou de décapeuses, l'extraction se déroule en plein air, avec des hauteurs de front de taille variant de 1 mètre à environ une vingtaine de mètres. L'extraction peut être réalisée à l'aide de divers équipements tels que

des pelles mécaniques, des excavateurs, des défonceuses, des décapeuses, des boteurs, des pelles, des chargeuses, etc.

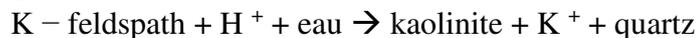
La matière première extraite est transportée vers l'usine, que ce soit par camions, par voie ferrée, ou plus rarement, par le biais de transporteurs à câbles ou à bandes.



Figure I.14. Gisement d'argile aux alentours du village de Gouge, wilaya de Touggourt

- **Argile et plasticité**

Les compositions utilisées pour fabriquer les produits en terre cuite sont élaborées à partir d'argiles, qui sont principalement des minéraux d'aluminium hydratés appelés phyllosilicates. Le terme "phyllo" indique que ces silicates ont une structure en feuillets. Ils proviennent de la décomposition chimique des composants des roches d'origine magmatiques, notamment les feldspaths et les micas présents dans les granites, par le biais d'une réaction du type :



En fonction de la nature initiale de la roche, des paramètres de réaction telles que les conditions et la durée, on produit divers types d'argiles qui subissent une décomposition progressive jusqu'à atteindre le stade du quartz final. En se basant sur la structure des feuillets et les remplacements ioniques, on peut obtenir une variété d'argiles parmi lesquelles les principales sont les suivantes :Kaolinite, Smectite, Illite, Chlorite [23].

- **Éléments dégraissants**

Fréquemment, les argiles naturelles sont trop plastiques, ce qui pose des problèmes lors de la fabrication. Il devient donc essentiel d'incorporer des substances inertes, appelées dégraissants. Ces derniers confèrent aux produits une texture moins dense, facilitant ainsi

le drainage de l'eau pendant le séchage et la libération des gaz lors de la cuisson. Les dégraissants les plus souvent employés sont :

- Le sable, avec des grains de 0,2 à 1 mm, ne contenant pas de calcaire, pouvant être ajouté jusqu'à concurrence de 30 % maximum.
- La chamotte, qui désigne de l'argile déjà cuite, généralement issue du broyage de résidus de cuisson. Son incorporation est fréquemment pratiquée pour la fabrication de boisseaux en terre cuite. En effet, une texture plus grossière contribue à renforcer la résistance aux chocs thermiques de ces produits.
- Les cendres volantes provenant de centrales thermiques alimentées en charbon pulvérisé.
- Les laitiers granulés issus des hauts fourneaux.
- Les matières combustibles tels que le mâchefer, le fraisil, les schlamms (résidus de lavage du charbon), ou divers déchets végétaux (sciure de bois, etc.) [25].

• **Ajouts spéciaux**

En plus des argiles et des dégraissants, il est souvent nécessaire d'incorporer à la préparation d'autres composants spéciaux. Cela peut servir à corriger des défauts liés à la nature de certaines matières premières ou à conférer des caractéristiques particulières aux produits. Voici les principaux ajouts utilisés :

- Le bioxyde de manganèse, employé pour créer des produits au look vieilli. Des quantités de 2 à 3 % par rapport au poids sec, ajoutées à des argiles ferrugineuses, permettent d'obtenir des produits affichant une belle teinte brune.
- L'oxyde de titane, qui, avec certaines argiles, à des dosages de 1,5 à 2 %, donne des produits de couleur orangée.
- Le carbonate de baryum, le carbonate de calcium finement broyé, le carbonate de sodium, la chaux vive ou éteinte, le chlorure de sodium, le spath fluor (ou fluorine), le lignosulfonate de sodium, qui, ajoutés en faibles quantités (quelques pour-mille), permettent de résoudre certains problèmes de fabrication [25].

3.2.2. Préparation de la pâte

La préparation joue un rôle multiple, visant à :

- Éliminer les impuretés.
- Émietter les argiles.
- Former les mélanges.
- Homogénéiser et humidifier ces mélanges.

Au cours de cette étape, de l'eau est ajoutée pour conférer à la pâte une consistance plastique. La plasticité se réfère à la capacité de certains matériaux à se déformer sans se rompre sous l'effet d'une force donnée, et à conserver la forme acquise une fois que la force cesse d'agir. La plasticité d'une argile dépend de sa composition minéralogique, du pourcentage de matériaux inertes qu'elle renferme (tel que le sable, etc.) et de sa finesse (plus elle est fine, plus elle est plastique).

En règle générale, les argiles nécessitent plus d'eau pour être façonnées lorsqu'elles sont plus plastiques. Ainsi, à l'état de pâte dite "normale" - c'est-à-dire légèrement collante au toucher - les argiles peu plastiques contiennent environ 15 à 20 % d'eau (par rapport à la

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

masse sèche), tandis que les argiles très plastiques en contiennent entre 20 et 30 %. Il est important de noter l'amélioration significative de la plasticité qui peut résulter de l'enfossage, également connu sous le nom de pourrissage. Cette technique consiste à entreposer de l'argile qui a déjà subi un début de préparation, contenant une partie de l'eau nécessaire au façonnage, pendant plusieurs semaines (généralement de 2 à 4) dans des fosses.

Le rôle de la préparation est crucial. Bien que l'on ait souvent tendance à attribuer les produits cassés ou fêlés au séchage ou à la cuisson, c'est en réalité la préparation qui peut en être la cause. Des variations dans le dosage du mélange peuvent conduire à des produits aux caractéristiques variables. Une homogénéisation insuffisante de la pâte peut entraîner l'apparition de fissures pendant le séchage. De plus, une élimination incomplète de certaines impuretés peut favoriser la formation de fissures ou de dégâts sur les produits cuits, comme des éclats de grains de chaux.



Figure I.15. Broyage de l'argile et mélange des composants

3.2.3. Façonnage

En terre cuite, les deux méthodes principales sont l'étirage et le pressage. Nous allons étudier en détail le processus de fabrication des produits pleins et perforés, des produits creux tels que les briques, les boisseaux et les hourdis, ainsi que des tuiles et des carreaux.



Figure I.16. Façonnage de brique

3.2.4. Séchage

Les produits sont formés avec une teneur en eau allant de 15 à 30 % (exprimée en pourcentage du poids sec). Avant la cuisson, il est impératif d'éliminer la majeure partie de cette humidité, ce qui constitue l'étape du séchage. C'est une phase délicate et cruciale du processus de fabrication qui doit être menée avec soin pour garantir des produits de haute qualité. Une fois passés dans le séchoir, ces produits ne contiennent plus que 1 à 2 % d'eau résiduelle (parfois moins).



Figure I.17. Sechage de brique

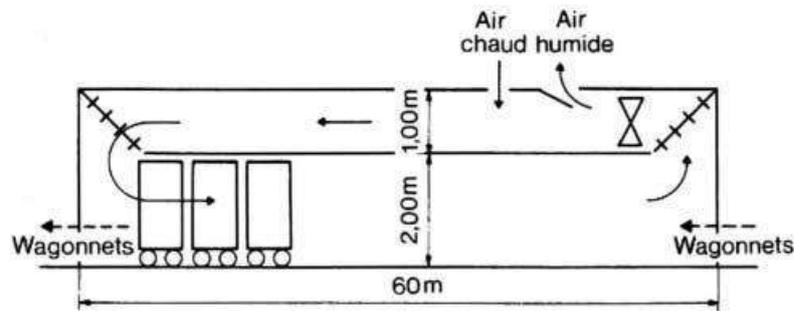


Figure I.18. Séchoir-tunnel [25]

3.2.5. Cuisson

À la sortie du séchoir, les produits n'ont pas encore atteint leurs propriétés finales. Pour qu'ils acquièrent leur résistance mécanique, leur stabilité, leur capacité à résister aux intempéries, etc., il est essentiel de les soumettre à une cuisson à des températures élevées, généralement entre 850 et 1050°C. Étant donné que les produits en terre cuite sont fabriqués en très grande quantité, l'aspect de régularité revêt une importance capitale. La cuisson doit être réalisée de manière à produire des produits possédant des caractéristiques fonctionnelles satisfaisantes et aussi uniformes que possible.

Cela implique un mélange minutieux des combustibles et de l'air de combustion à la sortie des brûleurs, ainsi qu'une dilution de ce mélange dans une quantité d'air importante pour ramener la température des flammes à celle requise pour la cuisson de l'argile. Enfin, tous les produits dans le four doivent être soumis aux mêmes effets thermiques.



Figure I.19. Cuisson de brique

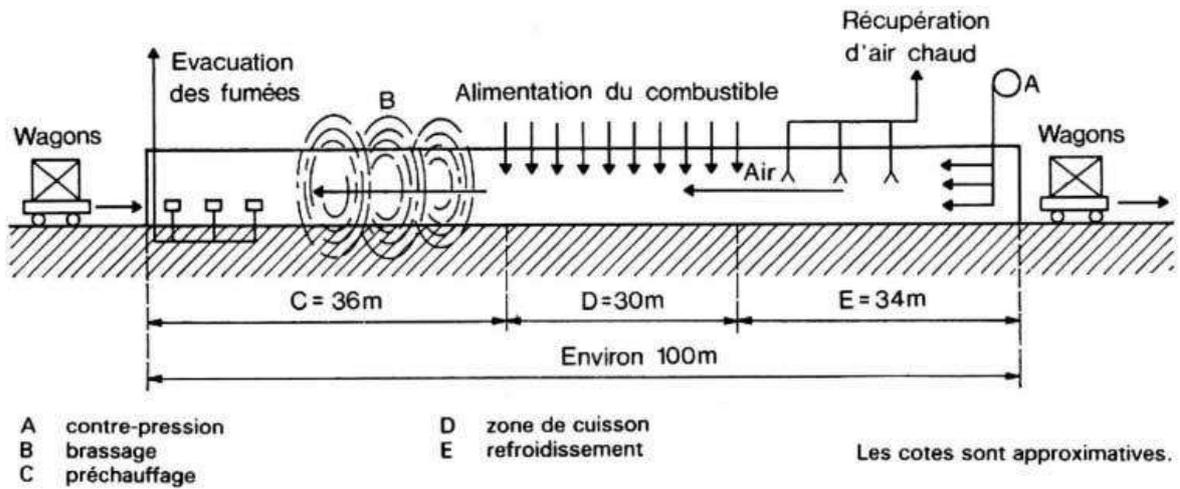


Figure I.20. Principe de fonctionnement d'un four-tunnel [25]

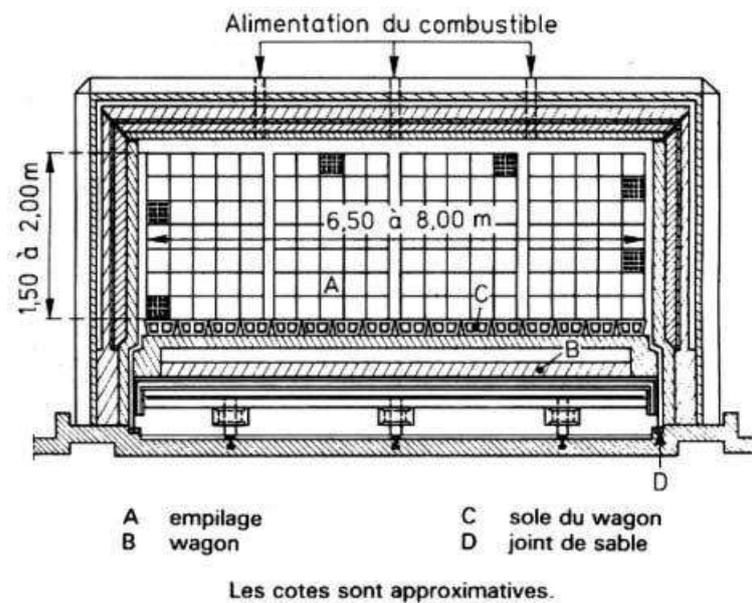


Figure I.21. Coupe schématique d'un four-tunnel [25]

• **Action de la chaleur** [25]

Lors de la cuisson des matières premières, la chaleur engendre des changements dans la masse volumique, la porosité, la dureté et les dimensions. Elle provoque également des processus de déshydratation, de décomposition et de combinaison qui altèrent les propriétés comme suit :

- Jusqu'à environ 200°C, évaporation de l'eau résiduelle du séchage.
- Entre 200 et 450°C, décomposition des matières organiques.
- Entre 450 et 650°C, destruction des minéraux argileux accompagnée de la libération de l'eau de constitution.
- Entre 650 et 750°C, décomposition du carbonate de calcium (dans le cas des argiles calcaires).

- Au-delà de cette température et jusqu'à la température de cuisson, les agents fondants présents dans l'argile entrent en réaction et confèrent aux produits leurs caractéristiques mécaniques finales. Ce processus, appelé grésage, s'accompagne d'une diminution de la porosité du matériau et, le plus souvent, d'un retrait (généralement de 0,5 à 3 % par rapport à la longueur sèche).

3.3. Produits de brique en terre cuite

3.3.1. Briques et blocs en terre cuite[26]

Obtenues par façonnage, filage et/ou pressage, séchage et/ou cuisson d'une pâte argileuse, les briques traitées ici sont employées dans les ouvrages de maçonnerie courante : murs, cloisons, doublage...

Selon le type de produit, sa destination, son rôle et les règles de l'art (AFNOR DTU P10-202 ; DTU 20-1), la géométrie d'un élément et ses dimensions varient.

On trouve notamment des formes particulières adaptées aux points singuliers et donnant les mêmes caractéristiques qu'en partie courante : brique d'angle, bloc à feuillure, planelle, brique linteau, plaquettes destinées à revêtir certains éléments d'ouvrage (chaînage, poteau...).

3.3.2. Briques creuses [26]

Les caractéristiques des briques (C) à faces de pose continues, montées à joints de mortier horizontaux continus et des briques (RJ) à rupture de joint, montées à joints de mortier horizontaux discontinus pour améliorer le comportement thermique du mur sont données (figure I.22).

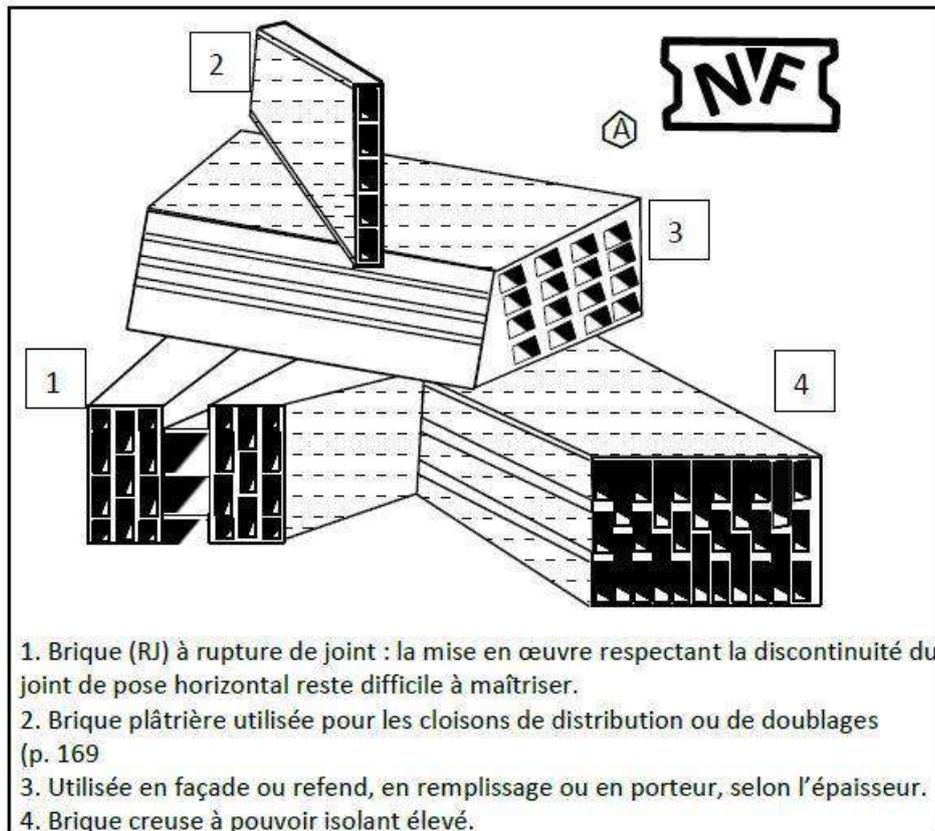


Figure I.22. Exemples de briques creuses en terre cuite [26, 27]

- **Exemples de briques creuses en terre cuite**

Ces produits, ouverts aux deux extrémités, comportent des cloisonnements intérieurs longitudinaux continus sur toute leur longueur. Un marquage garantit la fourniture de matériaux de qualité, de caractéristiques bien définies et identiques : il est présent sur 25 % au moins des briques creuses ainsi que le nom de l'usine productrice, l'année et le mois de fabrication. 10 % au moins portent la catégorie de résistance.

On distingue les briques à résistance garantie (caractérisées d'après leur résistance R moyenne et minimale à l'écrasement, rapportée à la surface brute de la brique, et exprimée en MPa dans l'une des classes de résistance), des briques ordinaires (tableau I.6)

Tableau I.6. Exemples de briques creuses en terre cuite [26],[27]

Briques à résistances garanties			
Résistance à l'écrasement R (MPa)	Désignation		
	C ou RJ40	C ou RJ60	C ou RJ80
Moyenne	4	6	6
Minimale	3.2	4.8	6.4
Briques ordinaires ⁽¹⁾			
Moyenne	R ≥ 2 MPa		
Minimale	R ≥ 1.6 MPa		
Nota (1) : la catégorie de résistance n'est pas garantie.			

3.3.3. Briques pleines ou perforées et blocs perforés en terre cuite à enduire [26],[27]

Les briques pleines ou perforées verticalement sont montées à joints de mortier épais : figure I.23 et figure I.24 ci-après.

Employées pour l'habitation, elles sont généralement enduites ou protégées extérieurement, afin d'améliorer des caractéristiques physiques du mur ou pour rattraper des irrégularités de surface afin d'obtenir une surface plane destinée à recevoir ultérieurement un parement décoratif.

On distingue plusieurs modèles :

- La brique pleine : format le plus courant 6 x 11 x 22 cm.
- La brique perforée : largeur inférieure à 14 cm, somme des perforations inférieures à 50 % de la section perpendiculaire à la face de pose.
- Le bloc perforé, permettant de réaliser toute l'épaisseur brute du mur avec un seul élément (de grand format)

Des exemples de désignation sont donnés ci-après :

- Brique pleine pressée BP 200, 5,5 x 10,5 x 22 (NF P 13-305).
- Bloc perforé BP 150, 22,5 x 8,5 x 25 (NF P 13-305).



Figure I.23. Produits de brique en terre cuite

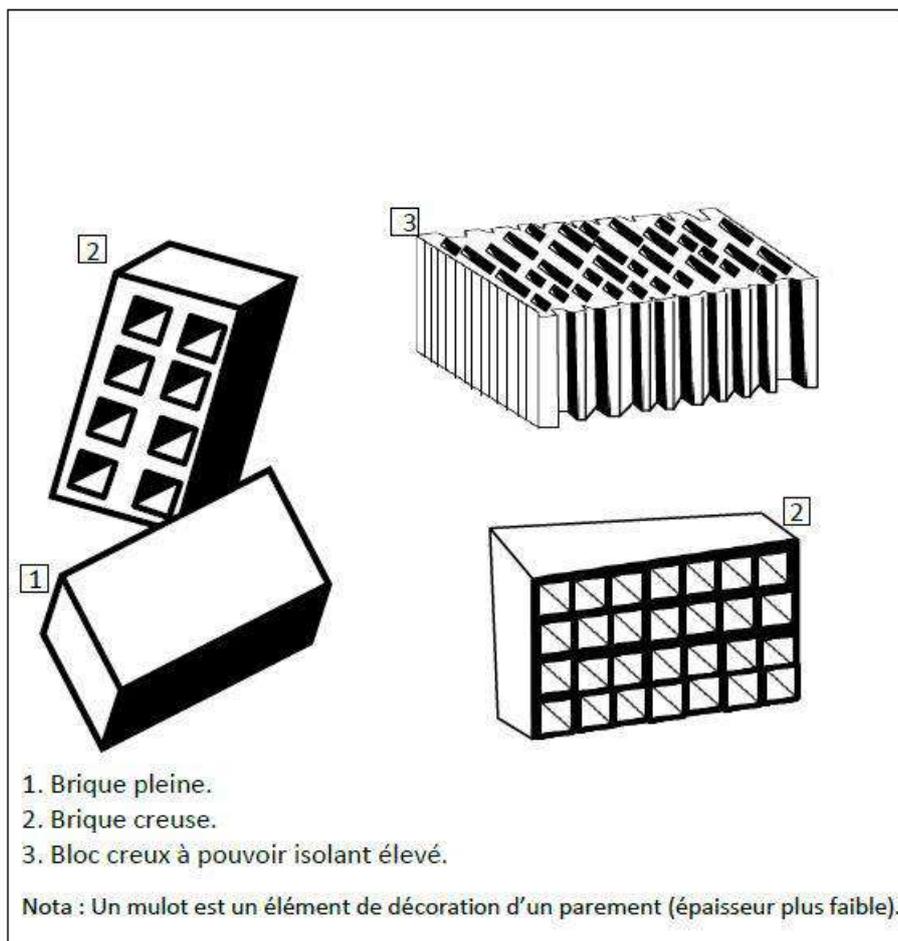


Figure I.24. Exemples de briques pleines ou perforées [27]

- **Exemples de briques pleines ou perforées.**

La classification mécanique de ces produits est indiquée dans le tableau I.7

Tableau I.7. Exemples de briques pleines ou perforées [26],[27]

Résistance à l'écrasement R rapportée à la surface brute (MPa)				
Catégorie	Brique (largeur ≤ 14 cm)		Bloc (largeur ≥ 14 cm)	
	Moyenne	Minimale	Moyenne	Minimale
Ordinaire	12.5	10	10	8
BP 150	-	-	15	12
BP 200	20	16	20	16
BP 300	30	24	30	24
BP 400	40	32	40	32

3.4. Propriétés et caractéristiques de brique en terre cuite

Les propriétés et les caractéristiques des briques de terre cuite sont indiquées dans les tableaux suivants :

Tableau I.8. Propriétés de la brique pleines et perforés [24]

Poids spécifique (kg/m ³)		Environ 1800
Résistance Mécanique	Compression (MPa)	De 5 à 80
	Traction (MPa)	De 0 à 2
Dilatation thermique (mm/m. k)		0.005
Gonflement à l'humidité (mm/m)		0.1
Retrait au durcissement (mm/m)		0.2 à 1.1
Porosité (%)		5 à 18
Réaction au feu		Très élevé
La conductivité W/m.°C		1.15

Tableau I.9. Résistance thermique des briques pleines et perforés [28]

Briques pleines		Briques perforés	
Epaisseur (cm)	R(m ² .°C/W)	Epaisseur (cm)	R(m ² .°C/W)
5.5	0.05	10.5	0.13
10.5	0.09	12	0.15
22	0.20	22	0.28
34	0.30	25	0.32
45	0.40	33.5	0.42
Format courant: 5.5x10.5x22(cm)		Vides :25 à 40%	
$\rho=1700$ à 2000 kg/m ³		$\rho=1650$ à 1950 kg/m ³	

Tableau I.10. Propriétés de brique creuse[24]

Masse volumique (kg/m ³)	1750-2050
Résistance à la compression MPa	4-8
Dilatation conventionnelle à l'humidité mm/m	0.60 -1.6
L'absorption d'eau %	≤15
Résistance au gel %	1
Isolation acoustique Db	41-58

Tableau I.11. Résistance thermique de brique creuse [28]

E : épaisseur en cm	5	10	15	20	25	30
R (m ² .°C/W)	0.10	0.20	0.3	0.39	0.49	0.59
nombre de rangée d'alvéoles	4	8	12	16	20	24

Ses propriétés changent par rapport au type d'argile utilisé.

3.5. Avantages et inconvénients de brique en terre cuite

❖ Avantages [23], [24],[25]

- Haute performance mécanique : La brique de terre cuite se distingue par une résistance élevée aux forces de compression par rapport aux produits de brique de terre crue, et dans une moindre mesure à la résistance à la flexion et traction.
- Durabilité : La brique en terre cuite est un matériau durable, résistant aux intempéries, aux UV et à l'usure du temps. Elle peut durer des décennies voire des siècles si correctement entretenue.
- Résistance au feu : Les briques en terre cuite sont incombustibles, ce qui en fait un matériau sûr en cas d'incendie. Elles ne dégagent pas de fumée toxique et ne contribuent pas à la propagation du feu.

- Isolation thermique : Les briques en terre cuite ont une bonne capacité d'isolation thermique, ce qui signifie qu'elles peuvent aider à garder les intérieurs frais en été et chauds en hiver. Cela peut entraîner une réduction de la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation.
- Régulation de l'humidité : La brique en terre cuite a une propriété de régulation de l'humidité, ce qui signifie qu'elle peut absorber l'excès d'humidité dans l'air et la libérer lentement lorsque l'air devient sec. Cela contribue à maintenir un niveau d'humidité plus stable à l'intérieur des bâtiments.
- Résistance aux insectes et aux moisissures : Contrairement au bois, la brique en terre cuite n'est pas sujette aux infestations d'insectes ou à la pourriture causée par les moisissures.

❖ **Inconvénients [23], [24], [25]**

- Coût initial : La brique en terre cuite peut être plus coûteuse à l'achat et à l'installation par rapport à certains autres matériaux de construction tels que le béton ou les blocs de béton.
- Poids : Les briques en terre cuite sont relativement lourdes, ce qui peut nécessiter des fondations et une structure de support plus solides. Cela peut augmenter les coûts de construction.
- Temps de construction : La construction avec des briques peut prendre plus de temps car chaque brique doit être posée individuellement et soigneusement alignée.
- Sensibilité aux tremblements de terre : Dans les zones sismiques, la brique en terre cuite peut être plus sujette aux dommages causés par les tremblements de terre par rapport à certains autres matériaux plus flexibles.
- Impact environnemental : La production de briques en terre cuite nécessite des ressources naturelles comme l'argile et l'énergie pour la cuisson. L'extraction de l'argile peut avoir un impact sur l'environnement local et les émissions de CO₂ dues à la cuisson peuvent contribuer au changement climatique.

4. Briques silico-calcaires

4.1. Définition

Les produits silico-calcaires sont principalement composés d'un mélange de matériaux siliceux finement broyés et de chaux hydratée, également appelée chaux grasse (ou parfois de ciment portland), qui subissent généralement un traitement à l'autoclave. Deux catégories de produits sont fabriquées et utilisées comme matériaux de construction :

- Les silico-calcaires denses.
- Les silico-calcaires légers.

On peut également ajouter une troisième catégorie constituée par les fibres-ciment-silice [29],[30].

La brique silico-calcaire est fabriquée à partir de matières premières naturelles comme le sable, la chaux et l'eau. Comparée à d'autres matériaux de construction similaires, sa production industrielle requiert peu d'énergie et est respectueuse de l'environnement. De

plus, la brique silico-calcaire offre une isolation phonique efficace et ne présente aucun danger pour la santé.

4.1.1. Silico-calcaires denses

Le mélange de silice et de chaux ne forme généralement pas un liant hydraulique à température ambiante (sauf si la silice est vitreuse et pouzzolanique). Cependant, en présence de vapeur d'eau sous pression, la réaction se produit.

Dans les pays producteurs, particulièrement en Russie et en Allemagne, on tend à développer des matériaux de plus grandes dimensions que la brique standard. Ces matériaux peuvent être renforcés et sont similaires aux éléments préfabriqués en béton ou aux briques et blocs en terre cuite.

L'Allemagne compte environ 130 usines de production, principalement situées dans l'ouest du pays [29] .

4.1.2. Silico-calcaires légers

Les silico-calcaires légers sont élaborés à partir des mêmes composants que les silico-calcaires denses, mais en y ajoutant un élément qui génère des espaces vides artificiels clos, sous forme de bulles gazeuses créées par réaction chimique. Ils font partie de la catégorie des matériaux connus sous le nom de béton cellulaire ou béton gaz.

Les principaux producteurs de ces matériaux sont la Russie, le Japon, l'Allemagne et la Grande-Bretagne [29] .

4.1.3. Fibres-ciment-silice

Le fibres-ciment-silice est un matériau composite constitué d'un mélange de pâte de ciment pure, parfois mélangée à de la silice, broyée et renforcée par des fibres minérales. Après durcissement, le fibres-ciment-silice subit un traitement en autoclave à la vapeur d'eau sous pression.

Le procédé de fabrication, actuellement le plus répandu, ressemble de loin à celui du carton. Il a été breveté par l'Autrichien Hatschek vers 1900. En l'espace de dix ans, différentes variantes de produits ont vu le jour, allant des ardoises aux plaques planes, puis aux plaques ondulées, aux moulages, et enfin aux tuyaux.

Le fibres-ciment est inclus dans la catégorie des produits silico-calcaires, car il est parfois soumis à l'autoclavage lorsque la matrice contient de la silice, comme c'est le cas pour les tuyaux (aux États-Unis et au Mexique) ou pour certains produits spéciaux, telles que les plaques planes légères, isolantes ou à haute résistance mécanique. Dans certains pays, on fabrique des produits légers en fibres-ciment-silice en incorporant des charges minérales légères et réfractaires dans le mélange de ciment, de silice broyée et d'amiante [29].

4.2. Mode de fabrication de brique silico-calcaire [29]

4.2.1. Silico-calcaires denses

Les matériaux utilisés sont les suivants :

- Sable propre de 0/5 mm, dont une partie (5 à 10 %) peut être broyée à une finesse de l'ordre de 1 000 à 2 000 cm^2/g (finesse Blaine).
- Chaux vive CaO. Les proportions sont les suivantes (en masse) :

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

- Sables fins : 12
- Chaux vive CaO : 1
- Eau : environ 4 à 8 % de la masse des matières sèches.
- Colorants (le cas échéant) : pigments composés d'oxydes métalliques.

Le mélange de chaux vive, de sable et d'eau est homogénéisé, puis il passe dans des réacteurs. Il est impératif d'obtenir une homogénéisation parfaite de ces matériaux pour garantir des produits de résistance similaire.

Généralement, des mélangeurs continus alimentent régulièrement les presses. Ces presses sont souvent composées de tables tournantes munies d'alvéoles prismatiques. La matière est comprimée, parfois avec vibration, selon les modèles de presse, sous des pressions variant de 15 à 45 MPa, exceptionnellement 60 MPa. La résistance mécanique et la masse volumique dépendent de la pression de moulage.

Après le démoulage, les produits sont traités dans des autoclaves de diamètres variant de 2,5 à 4 m et de longueurs de 25 à 40 m. Ce traitement dure de 6 à 14 heures et la pression varie de 0,8 à 1,2 MPa (à une température d'environ 170 à 190°C).

On fabrique le plus souvent des briques pleines ou perforées (les presses les plus modernes ont une capacité de production de près de 10 000 briques par heure), mais on peut également fabriquer des éléments de plus grandes dimensions.

Par exemple, en Allemagne, aux côtés des briques de format standard de 7×11×24 cm (largeur × longueur × épaisseur), on fabrique :

- Des blocs pleins ou creux (avec 1 ou 2 trous verticaux) de 11 à 30 cm d'épaisseur, souvent de 25×50 cm.
- Des panneaux (avec 2 trous verticaux), également de 11 à 30 cm d'épaisseur et de 50 × 100 cm.

Ces éléments servent à la construction de cloisons et de murs de différentes épaisseurs. Il existe des éléments spéciaux telles que les briques d'angle et de couronnement. Ils sont souvent de teinte claire (blanc), et l'aspect extérieur peut varier (plan, à relief, ou aspect pierre cassée). Ces blocs et panneaux sont assemblés avec des mortiers spéciaux ou des mortiers-colles. En France, on importe des produits allemands qui sont conformes à la norme allemande DIN 106. La désignation comprend les éléments suivants :

- Référence à la norme.
- Désignation du produit.
- Classe de résistance en N/mm² (de 6 à 28 et exceptionnellement 36, 40 et 60).
- Densité.
- Format.
- Épaisseur du mur à réaliser.

4.2.2. Silico-calcaire léger [31]

Ces matériaux sont produits en soumettant un mélange de sable siliceux (composant à hauteur de 60 à 65%), de chaux et de ciment (représentant 35 à 40% de l'ensemble) à un traitement en autoclave. De nombreuses petites cellules sont créées dans ce mélange grâce à la libération de gaz résultant de l'ajout, au moment du mélange, de poudre d'aluminium.

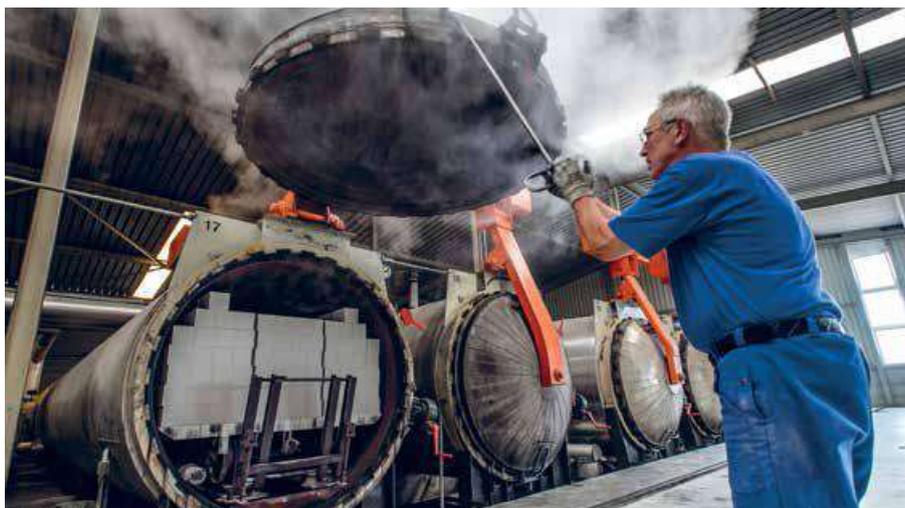


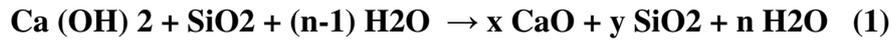
Figure I.25. L'autoclaves [30]



Figure I.26. Produits des briques silico-calcaires [30]

- **Phénomènes physiques de processus d'autoclave[31]**

En conditions normales, le mélange de chaux avec le sable durcit très lentement. Les éléments obtenus après ce durcissement ont une résistance mécanique de l'ordre de 1 à 2 MPa et sont facilement altérables en présence d'eau. Cependant, en présence d'une vapeur saturée (à 100% d'humidité) et à une température de 170°C ou plus, la silice du sable devient chimiquement active et commence à réagir rapidement avec la chaux selon la réaction (1), formant un hydrosilicate de calcium. Il s'agit d'un produit solide et résistant à l'eau.



À mesure que la température augmente, la vitesse de la réaction (1) s'accélère. Ce processus se déroule dans des autoclaves sous pression de vapeur saturée (entre 0,8 et 1,2 MPa).

L'élévation de la température et de la pression de vapeur est suivie de la dissolution des composants initiaux. La solubilité des constituants varie en fonction de la température, c'est-à-dire que la solubilité du Ca(OH)₂ diminue avec l'augmentation de la température, tandis que celle du SiO₂ et de H₂O (formant H₄SiO₄) augmente [31], [32].

4.3. Propriétés de brique silico-calcaire

Les propriétés de brique silico-calcaire sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.12. Propriétés de brique silico-calcaire [31]

Type de brique SC	Brique silico-calcaire dense	Brique silico-calcaire léger
Masse volumique (kg/m ³)	600 – 2200	300 - 800
Résistance à la compression (MPa)	6 – 60	1.5 – 7
Conductibilité thermique λ (w/m.°C)	1.16 -1.63 pour un masse volumique enter1700-2100 (Kg /m ³)	0.08 pour un masse volumique enter 300 (Kg /m ³)
Absorption d'eau	4 à 8 %	-
Isolation acoustique	48 dB	-

4.4. Avantages et inconvénient des briques silico-calcaires [31]

❖ Avantages [32]

La brique silico-calcaire offre de nombreux avantages :

- Résistance à la compression : Comparable à celle du béton armé, atteignant 240 kg/cm².
- Résistance technique : Deux fois supérieure à celle de la brique pleine.
- Capacité d'isolation : Excellente tant sur le plan thermique qu'acoustique.
- Écologie : Complètement naturelle, respectueuse de l'environnement.
- Sécurité : Haute résistance au feu, assurant une protection supplémentaire.
- Climat : Grande capacité d'accumulation d'énergie, contribuant à la régulation thermique.
- Longévité : Les façades extérieures en brique silico-calcaire sont robustes face aux conditions atmosphériques, nécessitant peu d'entretien à faible coût.
- Esthétique : Les deux formats disponibles offrent une grande flexibilité pour répondre aux préférences des concepteurs et des utilisateurs.
- Économie d'acier : La certification des qualités porteuses permet de réduire significativement l'utilisation d'acier dans la construction.
- Économie d'enduit et de peinture : Le plissage et la grande résistance aux intempéries permettent des constructions sans nécessité de crépissage ni de peinture des parois extérieures.
- Facilité de mise en œuvre : Les qualités et les formes géométriques de la brique silico-calcaire facilitent la pose.
- Transport et manutention : La brique silico-calcaire peut être manipulée et transportée sans risque de casse, simplifiant ainsi la logistique.

❖ Inconvénients [32]

- Absorption d'eau : Les briques silico-calcaires ont une certaine porosité qui les rend sensibles à l'absorption d'eau. Lorsqu'elles sont exposées à des conditions humides, elles peuvent subir des dégâts dus au gel et au dégel répétés, ce qui entraîne une détérioration progressive.
- Moindre résistance à l'acide : Comparées aux briques en céramique, les briques silico-calcaires ont une résistance inférieure aux attaques chimiques, en particulier aux acides forts. Dans certains environnements industriels ou chimiques, cela peut poser des problèmes de durabilité et de maintien de l'intégrité structurelle.
- Coût : Bien que les briques silico-calcaires ne soient pas très coûteuses, leur prix peut être légèrement supérieur à celui des briques en terre cuite plus traditionnelles. Leur utilisation peut donc entraîner des coûts de construction plus élevés, surtout si elles sont utilisées en grande quantité.
- Impact environnemental : Comme pour la production de tout matériau de construction, la fabrication des briques silico-calcaires peut avoir un impact environnemental négatif en raison des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation de ressources naturelles. Cependant, certaines briques silico-

calcaires modernes peuvent être fabriquées avec des processus de production plus respectueux de l'environnement.

4.5. Briques silico calcaires en Algérie

L'expérience de l'utilisation de la brique silico-calcaire en Algérie, notamment dans la ville de Msila, a connu un échec. Les chercheurs Allaoua AMMICHE, Hynda BOUTABBA, Mohamed MILI, Djamel DAHDOUH ont étudié les raisons de ce déclin. Deux projets achevés dans la région de Msila, comprenant 56 logements sociaux financés entièrement par l'état à travers la caisse nationale du logement (CNL) et gérés par l'office de promotion et de gestion immobilière (OPGI) de la Wilaya de Msila, ont été examinés pour évaluer la durabilité de ces matériaux.

Les conclusions de l'étude ont identifié plusieurs raisons pour lesquelles l'utilisation de ces matériaux a échoué :

- **Raisons d'ordre politique :** Ces opérations pilotes ont été approuvées rapidement sans laisser le temps à une tradition technique et constructive de ce matériau de se développer. De plus, il était perçu comme le matériau des moins fortunés, ce qui lui a donné une connotation négative ancrée dans l'esprit des utilisateurs.
- **Raisons techniques :** Les entreprises de construction ne maîtrisaient pas la technicité ni les normes d'exécution (la main-d'œuvre n'était pas qualifiée), et il y avait un manque de diversité de formats de briques sur le marché (DF et 2DF).
- **Raisons sociales :** Les utilisateurs rejetaient complètement la brique, préoccupés par le coût final de leur construction. Ils n'étaient pas habitués à voir des murs sans crépissage et ne toléraient pas une installation électrique apparente.

Ce rejet de ce matériau et de cette technique par les utilisateurs, ainsi que par l'État (qui a abandonné cette technique prématurément), a conduit à la fermeture de la seule usine située à Boussaâda, à 60 km de Msila, qui a fini par faire faillite. Les espoirs de développer une industrie basée sur ce matériau ont été anéantis [32] .

5. Conclusion

Les technologies de fabrication de briques se sont améliorées au fil des âges, les technologies modernes ont été utilisées pour améliorer la qualité, l'efficacité et la durabilité. Ces dernières contribuent à économiser les ressources et à une production plus respectueuse de l'environnement, ce qui contribue au développement de l'industrie de la construction en général.

En conclusion, nous soulignons la brique de terre crue est privilégiée dans des contextes plus spécifiques de construction écologique ou traditionnelle, tandis que la brique de terre cuite est largement utilisée dans la construction moderne en raison de sa résistance mécanique et de ses propriétés durables.

La construction en argile est largement appliquée et répandue dans la plupart des régions du monde et avec de multiples technologies, de sorte que chacune d'elles présente de grands avantages et présente également un certain nombre d'inconvénients, car des études et des recherches s'efforcent constamment de minimiser et de surmonter ces inconvénients autant que possible, car le monde de la construction en argile a connu un développement

Chapitre I :Présentation des techniques de production des briques en terre et leurs propriétés physiques et thermomécaniques

remarquable à la mesure des exigences de l'époque, en s'inspirant des racines historiques de la construction en argile comme base pour cela.

Il est difficile de comparer les techniques de construction en argile pour déterminer laquelle est la meilleure, mais on peut dire que les meilleures techniques sont celles qui sont adaptées au chantier et au climat ambiant et utilisent des matériaux de construction disponibles localement afin qu'ils aient les caractéristiques de durabilité, un faible coût et être amis de l'environnement.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

B) Synthèse des études antérieures pour amélioration de l'isolation thermique des briques de terre

1. Introduction

La brique en terre est un matériau doté d'une efficacité thermique notable en raison de l'inertie thermique du sol brut, résultant du réseau de nanopores et de la grande surface spécifique de l'argile. Cette caractéristique favorise l'adsorption et la libération de vapeur dans des environnements humides et secs, respectivement, lors du stockage de la chaleur latente[7]. En outre, la brique de terre est considérée comme un produit respectueux de l'environnement, composée principalement d'argile et de sable, des matériaux facilement décomposables et recyclables. Cependant, malgré son efficacité thermique par rapport au ciment, son isolation reste insuffisante pour répondre aux normes d'isolation thermique des bâtiments. Des études visent à améliorer la performance thermique en modifiant la structure poreuse, notamment en intégrant des éléments légers pour augmenter la porosité. Dans le cas de la brique en terre cuite, l'ajout de déchets peut également avoir des avantages tels que l'économie d'énergie de combustion et l'amélioration de la plasticité du mélange de fabrication, réduisant ainsi la consommation d'eau[8].

Dans le rapport suivant, nous discutons de plusieurs études de recherche qui ont tenté d'améliorer les performances thermiques des briques en terre, ainsi que d'énumérer les différents types d'additifs et de déchets qui ont été utilisés.

Chercheur **Velasco.P. M. et al.** [8] ont classé ces ajouts en quatre éléments principaux : cendres, boues d'épuration, déchets organiques et déchets inorganiques.

2. Études antérieures sur le développement de l'isolation thermique des briques en terre et des certains autres matériaux de construction.

2.1. P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot et R. Duval 2003 [33]

Le chercheur Pierre Meukam et ses collaborateurs ont analysé les caractéristiques physiques, thermiques et mécaniques d'échantillons de briques en terre fabriquées à partir de latérite (un sol riche en fer et en aluminium, typique des régions chaudes et humides des tropiques), ainsi que de mélanges de latérite avec de la pouzzolane naturelle et de la latérite avec de la sciure de bois. Ils ont également introduit un pourcentage de ciment, variant de 8 à 10 %, pour stabiliser tous les échantillons.

Les échantillons, de dimensions 27 cm × 27 cm × e, avec e compris entre 3,75 et 5,5 cm pour les essais thermiques, étaient composés comme suit :

Éprouvette 1 : 92 % latérite + 8 % ciment

Éprouvette 2 : 45 % latérite + 45 % pouzzolane + 10 % ciment

Éprouvette 3 : 81 % latérite + 9 % sciure de bois + 10 % ciment

Les résultats des expériences thermiques sont les suivants :

Éprouvette 1 : $\lambda = 0,95 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $C_p = 1 \text{ kJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Éprouvette 2 : $\lambda = 0,68 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $C_p = 0,94 \text{ kJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Éprouvette 3 : $\lambda = 0,55 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $C_p = 0,88 \text{ kJ/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Les résultats obtenus indiquent que la pouzzolane naturelle peut contribuer à l'isolation thermique des matériaux de construction ; 45 % de pouzzolane ont permis de réduire la conductivité thermique jusqu'à 28 %, tandis que l'échantillon contenant seulement 9 % de sciure de bois présente la meilleure valeur de conductivité thermique, à 0,55 W/m.°C, soit

une réduction de 42 % par rapport au premier échantillon. La valeur de chaleur spécifique du troisième échantillon a également diminué de 12 %.

Pour les essais mécaniques, des échantillons de taille $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, contenant les mêmes matériaux, ont été produits. Les résultats montrent :

Éprouvette 1 : $R_c = 2,34 \text{ MPa}$, $R_t = 0,52 \text{ MPa}$

Éprouvette 2 : $R_c = 1,01 \text{ MPa}$, $R_t = 0,56 \text{ MPa}$

Éprouvette 3 : $R_c = 2,59 \text{ MPa}$, $R_t = 0,47 \text{ MPa}$

Les expériences mécaniques ont montré que l'ajout de sciure de bois à la latérite augmenterait la résistance mécanique à la compression d'environ 10 % par rapport à l'utilisation de la latérite seule, avec le ciment jouant un rôle dans cette amélioration. En revanche, la pouzzolane naturelle a réduit la résistance à la compression des échantillons. La résistance des trois échantillons aux forces de traction a convergé et s'est stabilisée à des valeurs proches de 0,5 MPa.

2.2. Faycal El Fgaier 2013 [34] a étudié l'effet de l'ajout de déchets d'anas de lin, d'amidon de maïs et de granulés de polystyrène sur les propriétés thermiques et mécaniques des briques de terre cuite, où il a ajouté ces déchets en quantités de 2,5%, 5% et 7 % en poids aux anas de lin et les proportions de 5%, 7,5% et 10 % à l'amidon de maïs et 1,25% au polystyrène, où le chercheur a prouvé que l'ajout d'anas de lin entre de 2,5 % et 7 % contribuait à réduire la conductivité thermique entre de 25% et 34% avec des valeurs de 0,49 W/m.K et 0,43 W/m.K respectivement , Il a également prouvé que l'ajout d'amidon de maïs de 7,5% entraînait une réduction de la conductivité thermique de brique de 10% de la conductivité thermique de l'échantillon témoin (0,65 W/m.K) avec une valeur de conductivité de 0,53 W/m.K et a conclu que cette dernière avait un faible effet sur les propriétés thermiques , et a également prouvé que l'ajout de polystyrène contribuait à réduire la conductivité thermique de 18% avec une valeur atteinte 0,53 W/m.K.

Le chercheur a conclu que la volume et la forme des pores laissés par les déchets affectent directement l'isolation thermique des briques cuites produites.

Le chercheur a également conclu que tous ces additifs contribuent à la diminution de la résistance mécanique, car le pourcentage d'anas de lin a contribué à la diminution de la résistance à la compression de 74%, le pourcentage d'amidon de maïs dans la perte de 44,31% des performances mécaniques et les granulés de polystyrène dans la diminution de la résistance à la compression de 58%.

2.3. Nadia Benmansour, Boudjemaa Agoudjil, , Abdelkader Gherabli, Abdelhak Kareche, Aberrahim Boudenne 2014 [35]

La chercheuse Nadia Benmansour et ses collègues ont étudié l'effet de l'utilisation de fibres de bois de palmier dattier sur les propriétés physiques, thermiques et mécaniques des échantillons de mortier de ciment destinés à être utilisés comme matériau de construction isolant .

Les échantillons comprenaient du ciment, du sable et des fibres, qui ont été ajoutés dans des proportions allant de 0% à 30% du poids total de l'échantillon avec un gradient de 5%. ensuite, le comportement thermique et mécanique des échantillons a été étudié.

Les résultats ont démontré que l'incorporation de fibres a un effet positif sur l'isolation thermique, car la conductivité thermique a diminué de pourcentages allant de 87% à 92,5% lors de l'ajout de 30% des fibres à l'échantillon.

Les résultats ont également montré que l'effet de l'ajout de fibres est négatif pour les propriétés mécaniques, car l'ajout de seulement 5% des fibres réduit la résistance de l'échantillon à la compression jusqu'à 85% à 92%.

La conductivité thermique obtenue en ajoutant 5 à 15 % des fibres variait de 0,39 à 0,14 W/m.K.

La résistance des mêmes échantillons aux forces de compression variait de 5.36 à 2.75 MPa.

Ce sont toutes des valeurs qui répondent aux exigences mécaniques recommandées pour la construction de structures murales (leurs caractéristiques ont été comparées aux caractéristiques du béton léger et du béton autoclave cellulaire).

Les échantillons contenant plus de 15% de fibres ne répondaient pas à ces conditions et recommandations.

Les chercheurs ont également prouvé la possibilité d'utiliser la fibre de bois de palmier dattier seule comme matériau isolant avec une conductivité thermique allant jusqu'à 0,038 W/m.K.

2.4. Emmanuel Ouedraogo, Ousmane Coulibaly, Abdoulaye Ouedraogo, Adamah Messan 2015 [36]

Ces chercheurs ont mené une étude expérimentale sur l'effet de l'ajout de déchet de papiers et de ciment sur les propriétés mécaniques et thermiques des blocs de terre comprimée (brique de terre crue).

Les chercheurs ont préparé quatre échantillons de BTC, le premier est composé uniquement d'argile, le deuxième d'argile et de déchets de papier, le troisième d'argile et de ciment, et le quatrième d'argile, de déchets de papier et de ciment. Les travaux des chercheurs se sont concentrés sur la tentative d'améliorer les propriétés du BTC par un traitement mécanique, chimique et physique de l'échantillon en augmentant le processus de compactage (traitement mécanique) et en ajoutant une liaison hydraulique représentée dans le ciment (traitement chimique) et en utilisant les déchets de papiers comme une sorte de traitement physique de la composition de la brique.

L'augmentation du compactage améliore les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion). L'ajout de ciment améliore les propriétés mécaniques et augmente également la résistance à l'eau de l'échantillon (stabilité à l'eau).

L'ajout des déchets des papiers améliore la structure sous vide de l'échantillon et améliore ainsi les propriétés physiques et thermiques de l'échantillon.

Les expériences menées par les chercheurs ont montré que l'échantillon (argile + ciment) offre la meilleure résistance à la compression ont atteint $R_c \in [7; 8]$ MPa, tandis que l'échantillon (argile + ciment + déchets de papiers) offre la meilleure résistance à la flexion ont atteint $R_f = 1.132$ MPa avec un pourcentage d'augmentation de 500% ,et l'échantillon (argile + déchets de papiers) donne également les meilleures performances thermiques avec des valeurs de conductivité thermique ont atteint $\lambda = 0.49$ W/m.K et une valeur chaleur spécifique $C_p = 1.592$ KJ/kg.K.

Les travaux expérimentaux réalisés par ces chercheurs ont démontré qu'en ajoutant seulement 4 % (en poids d'argile) de ciment, la résistance à la compression augmentait, les valeurs de résistance à la compression variant de 2,399 à 7,765 MPa. Lorsqu'on incorpore à la terre du papier (cellulose), du ciment et du mélange ciment-papier, les valeurs des résistances de compression sont améliorées respectivement de 38,75%, 223,54% et 215,5% et l'ajout de seulement 0.78% (en poids d'argile) de déchet de papiers a amélioré la propriétés thermique par réduit en moyenne la conductivité thermique de 11%, les essais de compression ont été réalisés 30 jours après la confection des blocs.

2.5. Hachem Chaib 2017; Mekhermeche abd essalam 2017; Hakkoum Soumia 2015, [37],[38],[39].

Les chercheurs ont étudié l'effet de l'ajout de fibre de palmier (Dhokkar) sur les propriétés thermiques et mécaniques des briques de terre crue et cuit, ainsi que l'effet de la proportion de sable de dune ajoutée sur ces propriétés.

- **Hachem Chaib [37]**

Le chercheur Hachem Chaib a examiné l'impact de l'ajout de fibres de palmier (Dhokkar) et de stabilisant (gomme arabique) sur les caractéristiques mécaniques et thermiques des briques en terre cuite. Il a observé que l'ajout de fibres était directement lié à l'amélioration des propriétés thermiques, tandis que l'effet sur les propriétés mécaniques diminuait avec l'augmentation du pourcentage de fibres ajoutées. Pour un échantillon composé de 67 % d'argile, 30 % de sable de dune et 3 % de fibres de palmier (avec une variation du rapport pondéral des fibres de 0 % à 3 %), il a observé les meilleures propriétés thermiques, avec une valeur de conductivité thermique (λ) de 0,46 W/m.K, soit une réduction de 28 % par rapport à une valeur initiale de $\lambda = 0,64$ W/m.K, ainsi qu'une valeur de chaleur spécifique (C_p) de 6400,4 J/kg.K, réduite de 16 % par rapport à une valeur initiale de $C_p = 7620,8$ J/kg.K ,et présente des propriétés mécaniques acceptables, mais avec un déclin significatif. La résistance à la compression (R_c) est de 0,97 MPa, ce qui représente une réduction de 79 % par rapport à une valeur initiale de $R_c = 4,81$ MPa, tandis que la résistance à la flexion (R_f) est de 0,82 MPa, une réduction de 38 % par rapport à une valeur initiale de $R_f = 1,34$ MPa.

Il a également observé que l'ajout du stabilisant, représenté par la gomme arabique, a un impact positif sur les propriétés mécaniques. L'incorporation de 5 % de ce stabilisant améliore la résistance à la compression de 47 %, passant de $R_c=0,97$ MPa à $R_c=1,43$ MPa, et la résistance à la flexion de 19 %, de $R_f=0,82$ MPa à $R_f=0,98$ MPa. Cependant, l'effet de ce dernier sur les propriétés thermiques est presque négligeable.

Par ailleurs, l'augmentation du pourcentage de sable de dune a un effet bénéfique sur les propriétés thermiques et mécaniques. L'ajout de 10 % (passant de 20 % à 30 % du total) a été compensé par une réduction de la conductivité thermique de 4 % et de la chaleur spécifique de 9 %, ainsi qu'une augmentation de 18 % de la résistance à la compression et de 6 % de la résistance à la flexion.

- **Mekhermeche abd essalam [38]**

Le chercheur Mekhermeche abd essalam a étudié l'effet de l'ajout de fibre de palme (Dhokkar) aux briques en terre cuites et aux briques en terre crues sur les propriétés thermiques et mécaniques des briques et a étudié l'effet du changement du pourcentage de sable de dune sur ces propriétés.

Où la fonction de modification des propriétés thermiques était directement proportionnelle au pourcentage de fibres ajoutées, il a également montré que la fonction de modification des propriétés mécaniques est inversement proportionnelle à la proportion de fibres ajoutées en cas de brique en terre cuite.

Où la fonction de modification des propriétés thermiques et mécaniques était directement proportionnelle au pourcentage de fibres ajoutées en cas de brique de terre crue.

Le chercheur a prouvé que l'ajout de 3% de fibres de palme aux briques en terre crue a un effet positif sur les propriétés thermiques et mécaniques, où les résultats ont donné que l'ajout de ce pourcentage de fibres améliorerait les propriétés thermiques en fournissant les meilleures performances à 3% (dans le changement du rapport pondéral des fibres de 0% à 3%) de conductivité thermique $\lambda \in [0.4;0.5]$ W/m.K avec de la valeur du chaleur spécifique $C_p < 2000$ KJ/ m³.k ; $R_c \in [3.25;3.5]$ MPa et $R_f \in [1.1;1.2]$ MPa. Il est à noter que les briques commerciales (creuses et perforées) sont $\lambda \in [0.8;1]$ W/m.K, avec de la valeur du chaleur spécifique $C_p \in [8000;10000]$ KJ/ m³.k et; $R_c \in [3.25;3.5]$ MPa et $R_f \in [1.1;1.2]$ MPa.

Lorsque la même proportion de fibres est ajoutée aux briques cuites, la conductivité thermique est meilleure $\lambda \in [0.3;0.4]$ W/m.K, la chaleur spécifique est $C_p \in [5000;6000]$ KJ/ m³.k , mais les propriétés mécaniques sont réduites en fonction de l'effet des vides laissés par la combustion des fibres, $R_c \in [2.5 ; 3]$ MPa et $R_f \in [1.25 ; 1.5]$ MPa et

le chercheur a également prouvé que les propriétés thermiques sont affectées par l'augmentation de la proportion de sable (40% maximum), où l'augmentation de la proportion de sable améliore les propriétés thermiques $\lambda \in [0.8;0.82]$ W/m.K et la chaleur spécifique est $C_p \in [5000;6000]$ KJ/ m³.k Cependant, les propriétés mécaniques donnent les résultats les plus détaillés à raison de 20%, avec une valeur de ; $R_c \in [2.5;3]$ MPa et $R_f \in [0.8;1]$ MPa.

- **Hakkoum Soumia [39]**

La chercheuse Hakkoum Soumia a étudié l'effet de l'ajout de fibres de palme (Dhokkar) sur les propriétés thermiques et mécaniques des briques en terre cuite en ajoutant un pourcentage de fibres compris entre 0 et 3%, où la fonction de modification des propriétés thermiques était directement proportionnelle au pourcentage de fibres ajoutées, où elle a obtenu les meilleurs résultats thermiques à 3% des fibres avec la conductivité thermique est atteinte $\lambda = 0.487 \text{ W/m.K}$ et La chaleur spécifique atteinte $C_p = 6268.7.4 \text{ J/ kg.K}$.

Il a également montré que la fonction de modification des propriétés mécaniques est inversement proportionnelle à la proportion de fibres ajoutées, où le contrainte de résistance à la compression a atteint $R_c = 2.2 \text{ MPa}$ et le contrainte de résistance à la flexion $R_f = 1.44 \text{ MPa}$ lors de l'ajout de fibres il a atteint 3%.

2.6. Le chercheur Tatane Mohamed et al. [40] ont étudié l'effet du renforcement avec des fibres naturelles sur les propriétés thermiques, physiques et mécaniques de la brique de terre comprimée. Ils ont utilisé deux types de fibres représentées par de la sciure de bois et de la poudre d'écorce de noix, où ces fibres ont été ajoutées à raison de 2, 4 et 6% du poids de la matrice du sol avec un ciment stabilisé à 5 %. Leurs résultats ont montré que l'ajout de 2% de fibres améliore les propriétés thermiques de la brique de terre comprimée. Cet ajout a un effet négatif sur les propriétés mécaniques, mais il est toujours acceptable et il est considéré comme le pourcentage optimal d'ajout. De plus, cet ajout a un effet négatif sur l'absorption d'eau capillaire. Les chercheurs ont également noté que le rôle positif du ciment améliore les performances mécaniques.

2.7. Hamza Laoubi, Madani Bederina, , Amina Djoudi, Adeline Goullieux, Rose Marie Dheilily et Michele Queneudec 2018 [41]

Ces chercheurs ont mené une étude expérimentale afin de déterminer les propriétés physiques, thermiques et mécaniques d'un matériau composite utilisé comme matériau de construction léger pouvant être utilisé comme isolant thermique dans la construction .

Ce matériau se compose de plâtre comme liant, de sable de dune, de billes de polystyrène expansé, ainsi que de chaux, qui agit comme retardateur de prise du plâtre. La chaux est susceptible de réduire la solubilité du plâtre et d'augmenter son temps d'utilisation, sans altérer ses propriétés mécaniques. Le plâtre utilisé dans cette étude est un produit de gypse disponible dans le commerce, dont le principal composant est le sulfate de calcium. Le sable de dune a une granulométrie de 0 à 0,63 mm.

Le polystyrène expansé (PSE) est constitué de billes fabriquées par une entreprise algérienne, située dans la ville d'Ain Oussera (Algérie), et se présente sous la forme de billes parfaitement sphériques. Trois diamètres de PSE sont utilisés : 3,15 mm, 4 mm et 5 à 7 mm.

Les chercheurs ont produit des échantillons de taille $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. Ils ont fixé le rapport entre le plâtre et le sable à $P/S = 0,50$ en poids, conformément aux recommandations du CNERIB.

Les billes de polystyrène expansé ont été incorporées dans une matrice constituée de "plâtre + sable", les pourcentages, en volume, des polystyrènes expansés (par rapport au volume de matrice) variait de 20 à 50% avec un gradient de 10%.

A une composition sans EPS (échantillon de référence) a également été élaborée afin de comparer les résultats obtenus.

Tout les éprouvettes ont été durcies à une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ et à une humidité relative de $45 \pm 1\%$ pendant 28 jours.

Avec cette restriction, plusieurs séries d'échantillons, composées avec différents pourcentages de PSE (0%, 20%, 30%, 40% et 50%) et trois tailles de particules (3,15 mm; 4 mm; 5 à 7 mm), ont été définies et analysées.

Les chercheurs ont étudié les propriétés : densité, conductivité thermique, résistance à la compression et résistance à la flexion du produit final.

Les chercheurs sont parvenus à des résultats qui peuvent être résumés comme suit :

La densité des échantillons complétés se change inversement en fonction du pourcentage de billes de polystyrène expansé ajoutées pour atteindre sa valeur la plus basse lors de l'augmentation de 50%.

La densité des échantillons effectués se change également inversement en fonction de la taille des billes de polystyrène expansé, où les échantillons d'une taille de 5 à 7 mm ont enregistré une densité inférieure de 613 kg/m^3 en augmentant de 50%.

L'ajout de 50% de billes de polystyrène expansé réduit la densité de l'échantillon complété de 52 à 56%.

Les chercheurs ont prouvé par leurs travaux expérimentaux que l'augmentation de la proportion de billes de polystyrène expansé réduit la conductivité thermique, et plus la taille de ces billes est grande, plus la conductivité thermique est faible, atteignant la valeur la plus basse du conductivité thermique $\lambda=0.198 \text{ W/m.K}$. C'est à ce moment-là que 50% des billes de polystyrène expansé d'une taille de 5 à 7 mm sont augmentées.

L'ajout de polystyrène de 50% réduirait la conductivité thermique du produit final de 66 à 73%.

L'augmentation des billes de polystyrène expansé affecte négativement la résistance à la compression des échantillons finis, car leur ajout a contribué de 50% à réduire la résistance à la compression de 53 à 80%.

Les chercheurs ont constaté que l'échantillon avec 50% de billes de polystyrène expansé ajoutées dans les tailles 5 à 7 ne répond pas aux exigences de la norme européenne EN13279-1 qui détermine la valeur de résistance à la compression d'un minimum de 2 MPa.

Avec une augmentation de 50 % des billes de polystyrène expansé, la résistance à la flexion diminue jusqu'à 62 %. La valeur la plus basse, atteignant 1,43 MPa, est observée lorsque 50 % de billes de polystyrène expansé de taille 5 à 7 mm sont ajoutées.

La diminution du produit final dans sa résistance à la compression est due à la faiblesse des billes de polystyrène expansé en compression et à leur grande élasticité.

Et d'autre part au fait que le polystyrène ne réagit pas chimiquement avec le mélange.

En cas de flexion, la diminution peut être due à une adhérence altérée entre la pâte de plâtre et les billes de polystyrène par rapport à celles entre la pâte de plâtre et le sable de dune.

2.8. Daifallah Khoudja, Bachir Taallah, Ouarda Izemmouren, Salima Aggoun, Ouided Herihiri, Abdelhamid Guettala 2021 [42]

Ces chercheurs ont mené une étude expérimentale sur l'effet de l'ajout de déchets de troncs de palmiers sur les propriétés physiques, thermiques et mécaniques des briques de terre crue (L'adobe).

les chercheurs ont réalisé des échantillons contenant 70% d'argile et 30% de sable pour la correction granulaire et 11% (en poids d'argile et de sable) de chaux pour la stabilisation et avec une teneur en eau de 32% de la masse totale des éléments ci-dessus.

Les échantillons ont été renforcés avec des proportions variables de déchets de palmiers de 0% à 10% ensuite, des essais expérimentaux ont été effectués où les résultats thermiques, physiques et mécaniques sont les suivants :

La valeur de conductivité thermique des échantillons renforcés avec 10% de déchets de fibres de palme a diminué de près de 49%, là où elle a été signalée $\lambda = 0.342$ W/m.K pendant qu'elle l'était $\lambda = 0.677$ W/m.K avant l'ajout de fibres (Changement selon la fonction inverse en termes de rapport de fibres), ce qui signifie que le produit est devenu très approprié pour une utilisation comme isolant thermique.

La valeur de chaleur spécifique a été réduite en ajoutant 10% des fibres, là où elle atteignait $C_p = 1010.45$ J/Kg.K, ce que ça valait $C_p = 1168.83$ J/Kg.K avant d'ajouter des fibres.

La résistance à la compression s'est diminuée de 80% de sa valeur initiale, là où elle a atteint $R_c = 1$ MPa quelle était sa valeur $R_c = 5.16$ MPa avant d'ajouter des fibres. (Changement selon de la fonction inverse en termes de rapport de fibres).

La valeur de la résistance à la flexion s'est diminuée de 87%, là où elle a atteint $R_f = 0.29$ MPa quelle était sa valeur $R_f = 2.26$ MPa avant d'ajouter des fibres.

Le coefficient d'absorption total de l'échantillon renforcé s'est augmenté de 10% des fibres, atteignant 32,29% du poids sec de l'échantillon. (Changement selon d'une fonction directe en termes de rapport de fibres)

La densité apparente a été réduite de 25% lorsque 10% des fibres de déchets des troncs de palmiers ont été ajoutées.

2.9. Yuecheng Xin, Halenur Kurmus, Abbas Mohajerani, Yasmin Dallol, Yunsha Lao, Dilan Robert, Biplob Pramanik et Phuong Tran 2021 [43]

Les chercheurs ont étudié l'effet de l'ajout de déchets de poudre de verre et de la température de cuisson sur les briques de terre cuite.

Les chercheurs ont produit cinq échantillons de briques de terre cuite, dont quatre contiennent 10% des déchets de poudre de verre récupérés dans les bouteilles de bière, puis ont cuit les échantillons à des températures de 900°C; 950°C; 1000°C et 1050°C, et le cinquième échantillon ne contient pas de poudre de verre et a été cuit à 1050 °C .

Les échantillons ont été soumis à des tests et expériences d'absorption d'eau, de retrait, de conductivité thermique et de résistance à la compression.

Les résultats obtenus par les chercheurs ont montré que la résistance à la compression des échantillons de briques se change directement en fonction de l'évolution de la température de cuisson des briques de terre où elle a été atteinte $R_c \in [20;30]$ MPa à une température de cuisson de 900°C et $R_c=113.93$ MPa à une température de cuisson de 1050 °C, C'est-à-dire une augmentation de 279%.

Les chercheurs ont également remarqué que l'ajout de déchets augmentait la résistance à la compression de 153% où la valeur de résistance est sans déchets $R_c \in [40;45]$ MPa et $R_c=113.93$ MPa après l'ajout de déchets dans les mêmes conditions.

Ils se situent tous dans les valeurs recommandées de la norme australienne, qui recommande que la résistance à la compression des briques de terre ne soit pas inférieure à la valeur de $R_c=5$ MPa.

Les chercheurs ont également expliqué que l'ajout de verre aux échantillons de briques augmenterait sa conductivité thermique, comme en témoigne la comparaison de la conductivité thermique de l'échantillon témoin, qui s'élevait à $\lambda=0.49$ W/m.K et le support d'échantillon a ajouté de la poudre de verre dans les mêmes conditions qui équivalaient à $\lambda=0.84$ W/m.K.

Les chercheurs ont également constaté que la température de cuisson des briques affecte son conductivité thermique et que la conductivité thermique directement par rapport à la température de cuisson où il a été atteint $\lambda=0.62$ W/m.K à une température de cuisson de 900°C et $\lambda=0.84$ W/m.K à une température de cuisson de 1050 °C.

Les chercheurs ont également prouvé que l'ajout de 10% de poudre de verre réduit l'absorption totale d'eau des échantillons de briques de terre cuite jusqu'à 15%, où le taux d'absorption de l'échantillon témoin était de 7,1% et l'échantillon de briques de verre avec une température de cuisson de 1050°C atteignait 0,43% .

Il a également constaté que plus la température de cuisson était élevée, plus le taux d'absorption était faible en raison de la décomposition du verre et de son travail de fermeture des pores, où le taux d'absorption à une température de cuisson de 900°C atteignait la 12.02%.

Le taux d'absorption recommandé dans les normes australienne est de 17%.

Le taux de retrait se change directement avec la température de cuisson des échantillons de briques, car le taux de retrait atteint 2,19% en diagonale (1,71% longitudinalement) lorsque les échantillons contenant de la poudre de verre sont cuits à 900 °C.

Il a atteint 7,24% en diagonale (4.06% longitudinalement) lorsque la température de cuisson a atteint 1050°C.

Notez que le retrait de l'échantillon qui ne contenait pas de poudre de verre a atteint 6,04% en diagonale (3.37% longitudinalement) à une température de 1050°C.

Veillez noter que le taux de retrait recommandé dans les normes australiennes ne doit pas dépasser 8%, ce qui est vérifié avec tous les échantillons.

2.10. Aboubakr El Hammouti, Mouatassim Charai, Othmane Horma, Ahmed Mezrhab, et Mustapha Karkri 2022 [44]

Les chercheurs ont mené une étude expérimentale du comportement thermique d'un nouveau matériau bio composite composé d'argile et de coquilles de noix.

Des échantillons de briques contenant de l'argile et des coquilles de noix dans les proportions de 0%, 10% et 20% de poids ont été complétés, puis les propriétés physiques et thermiques des composés bio composites ont été étudiées.

Les chercheurs ont utilisé la méthode du disque chaud pour déterminer les propriétés thermiques, l'analyse a montré que l'ajout de coquilles de noix de 20% réduirait la densité de 20% et la conductivité thermique de 45,22%.

Les chercheurs ont mené une étude de comparaison thermique de deux modèles de murs en béton et d'un produit bio composite, où ce produit a prouvé qu'il pouvait améliorer la performance énergétique des bâtiments résidentiels, économisant de 10,8% à 7,94% des besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement.

2.11. Imane Bouchefra et al. 2022 [45] ont étudié le comportement thermique, physique et mécanique du BTC renforcé de fibres de palmier Dom (brutes et transformées). Ils ont également étudié l'effet de la stabilisation avec du ciment et de la chaux sur ces blocs de construction qui sont renforcés par des fibres avec un rapport de 0 et 2 %. Les 2% ont prouvé l'amélioration effective des performances thermiques du BTC. L'ajout de ciment, de chaux et de traitement chimique (en nettoyant les fibres) affecte également positivement les performances mécaniques, mais le traitement des fibres affecte négativement l'absorption capillaire de l'eau et le pourcentage de son addition également.

2.12. Debnath, NK et al. 2022 [46] ont étudié l'utilisation de cendres de lignite volatiles et de sciure de bois avec de l'argile pour produire des briques de terre cuite avec de bonnes propriétés thermiques, ils ont conclu à travers son étude que la combinaison de 60% de cendres de lignite volatiles et de 10% de sciure de bois avec 30% d'argile donne des briques de terre cuite avec de bonnes propriétés thermiques représentées en conductivité thermique jusqu'à 0,38 W/m.K et la porosité jusqu'à 44,69% si l'échantillon est brûlé à 1100 °C.

Dans le tableau suivant nous résumons les résultats les plus importants obtenus par les chercheurs susmentionnés.

Tableau I.13. Études antérieures pour améliorer les propriétés thermiques des briques de terre et autres matériaux de construction

Type de produit	Type de déchet	Composants de la matrice du sol	Taux de remplacement (%)	Conditions expérimentales	Propriétés physiques, mécaniques et thermiques du produit fini	Auteurs et références
Brique de terre comprimée	sciure de bois et pouzzolane naturelle	argile de latérite	45% latérite + 45% pouzzolane + 10% ciment	compactage variant entre 7 et 20 bars	CT= 0,68 W/m.K Cp=0.94 kJ/kg.°C Rc=1.01 MPa Rt=0.56 MPa	P. Meukam et al (2003) [33]
			81% latérite + 9% sciure de bois + 10% ciment		CT=0,55 W/m.K Cp=0.88 kJ/kg.°C Rc=2.59 MPa Rt=0.47 MPa	
Brique de terre cuite	Déchets de fibres de lin	70% Argile et 30% Sable	2.5%; 5% and 7%.	Teneur en eau =22% T=1000 °C	Porosité : 18 ; 21 and 24% CT:0.49; 0.48 and 0.43W/m.K Cp: 0.55; 0.6 and 0.61 kJ/kg.	Faycal El Fgaier (2013)[34]

					K	
	Amidon de maïs		5%; 7.5% and 10%.		Rc: 18.65; 14.06 and 6.21MPa Porosité : 20; 22 and 24% CT: 0.58; 0.53 and 0.55 W/m.K Cp : 0.72 ;0.61 and 0.73 kJ/kg.K Rc: 16.39 ;15.02 and 13.29 MPa	
	Granulés de polystyrène		1.25%		Porosité :14% CT =0.53 W/m.K Cp =0.62 kJ/kg.K Rc =10.06 MPa	
Matrice de sable et de ciment (mortier)	Poudre de bois de palmier	85% de Sable et 15% de ciment	5 to 15% avec un gradient de 5%	Les dimensions des déchets avec un diamètre de 3 mm	CT : 0.39 ; 0.24 and 0.14 W/m.K Rc : 2.75 ;1.83 and 1.44 MPa	Nadia Benmansour et al.(2014) [35]
				avec un diamètre de	CT : 0.63 ; 0.43 and	

				6 mm	0.22 W/m.K Rc : 2.82 ; 2.56 and 2.67 MPa	
				Combinaison mélangeant les deux dimensions dans une proportion égale	CT : 0.39 ; 0.24 and 0.14 W/m.K Rc : 5.36 ;1.52 and 2.64 MPa	
Brique de terre comprimée	Déchets de papier (cellulose)	100% Argile	0,78% de gaspillage de papier		CT= 0.49W/m.K Cp=1592 kJ/kg .K Rc=3.3 MPa Rf=0.248 MPa	Emmanuel Ouedraogo et al.(2015)[36]
Brique de terre cuite	Fibre de bois de palmier	67% Argile + 30% Sable des Dunes	3% de fibres	T=700 °C	CT =0.46 W/m.°C Cp=6400.4 kJ/m ³ .°C	Chaib et al.(2015)[47]
		97% Argile	3% de fibres	T=700°C	CT =0.408W/ m.K Cp=2035.0 66 kJ/m ³ .K	Mekhamech et al.(2016)[48]
		67% Argile + 30% Sable	3% de fibres	T=700°C	CT =0.487W/ m.K	Hakkoum et al.(2017)[

		des Dunes			Rc=2.2 MPa	49]
Brique de terre comprimée	Sciure de bois et poudre de zeste de noix	100% Argile	6% en poids de la matrice du sol	Stabilisé avec du ciment de 5 %	CT =0.455 W/m.K 1.5 MPa ≤ Rc ≤ 2 MPa 10.1% ≤ Ac ≤ 13%	Tatane Mohamed et al.(2018)[40]
Matrice de sable et de plâtre	Granulés de polystyrène	plâtre / sable = 0,5	50% de granulés de polystyrène extrudé (le rapport a été mesuré au volume de la matrice)	Dimensions des granulés de polystyrène entre 5 et 7 mm	CT =0.198 W/m.K Rc=2 MPa Rf=1.43M Pa	Hamza Laoubi et al. (2018)[41]
Briques d'Adobe	Poudre de bois de palmier	70% Argile + 30% Sable	10% en poids de matrice de sol	Stabilisé par 11% de chaux	CT =0.342 W/m.K Cp=1010.45 J/kg.K Rc=0.55 MPa Rf=0.29M Pa At=31.29% Ac=25.14 g/cm ² .min ^{0.5}	Daifallah Khoudja et al.(2021)[42]
Briques non cuites (crues)	Poudre de pelures de noix de grenoble	100% Argile	20% en poids de matrice de sol		CT =0.63 W/m.K	Aboubakr El Hammouti et al.(2022)[44]

Brique de terre comprimée	Fibres de palmier Dom	100 Argile	2%	Stabilisation à 9% de chaux	CT =0.57 W/m.K Ac=11.6 g/cm ² .min ^{0.5}	Imane Bouchefra et al.(2022)[45]
Brique de terre cuite	Cendres volatiles de lignite et sciure de bois	30% Argile	60% Cendres volatiles de lignite et 10% sciure de bois	brûlé à 1100 °C	CT=0.38 W/m.K Porosité = 44.69 %	Debnath, NK et al.(2022) [46]
Brique de terre cuite	Poudre de verre	85 % Argile	15% par poids total	La température de combustion est 900 °C	CT =0.252 W/m.K Rc=22.2 MPa Porosité =28.4%	Yuecheng Xin et al. (2023)[50]
CT: Conductivité thermique; Cp: Chaleur spécifique; Rc: Résistance à la compression; Rf: Résistance à la flexion; Rt: Résistance à la traction; At: Absorption totale d'eau ; Ac: Absorption capillaire d'eau.						

La liste est longue pour les chercheurs qui ont adopté cette approche et les ajouts et déchets qu'ils ont ajoutés à la matrice du sol, nous énumérons brièvement le reste d'entre eux, comme représenté dans: cendres de balle de riz [51], boues de traitement des eaux usées [52], déchets de traitement du thé [53], poudre de déchets de marbre [54], grignons d'olive [55], déchets huileux [56], déchets de briques de terre [57].

3. Conclusion

Dans des diverses études et recherches, une variété de matériaux et de déchets ont été ajoutés à la structure de la brique en terre afin d'améliorer ses performances thermiques. L'impact de ces ajouts sur les propriétés de la brique en terre varie de la brique cuite à la brique non cuite, ayant un effet significatif sur les autres propriétés mécaniques et physiques de la brique. Il était donc impératif pour les chercheurs de vérifier dans quelle mesure la brique correspond aux spécifications et aux normes physiques et mécaniques, tout en améliorant ses performances thermiques.

Chapitre II

A) Introduction au transfert de chaleur et aux propriétés thermiques

1. Introduction

La thermodynamique concerne le flux d'énergie thermique d'un état d'équilibre spécifique à un autre. Sur la base des analyses de cette science, il est possible de calculer la quantité de chaleur transférée d'un corps chaud à un autre corps froid, mais sans spécifier le temps requis pour le processus d'échange de chaleur. En revanche, la science du transfert de chaleur dépend de l'échange de chaleur entre deux points en raison de la différence de température entre eux, de sorte que le temps est un facteur important pour cela. De plus, l'évaluation du taux de transfert de chaleur, c'est-à-dire de la quantité de chaleur transférée pendant une unité de temps, est un élément essentiel dans la conception d'équipements thermiques industriels tels que des échangeurs de chaleur, des condenseurs, des unités de climatisation (réfrigération) [58].

Dans ce chapitre, nous étudions le concept d'énergie thermique et sa relation avec le phénomène de transfert de chaleur, ainsi que les méthodes de transfert de chaleur et ses lois, et nous familiarisons avec certains termes thermiques.

2. Chaleur et modes de transfert de chaleur

Le mot "chaleur" désigne le transfert d'énergie thermique d'un objet chaud vers un objet froid en raison de leur différence de température. Une des formulations de cette définition, énoncée par le scientifique James Clerk Maxwell en 1871, stipule que "la chaleur représente une forme d'énergie". En réalité, la chaleur est intimement liée à l'énergie interne et est influencée par le mouvement aléatoire des particules constitutives de la matière [58].

Le transfert de chaleur est défini comme le déplacement d'énergie thermique d'un endroit à un autre en raison d'une différence de température. On peut observer ces phénomènes de transfert de chaleur dans divers contextes, que ce soit dans des situations industrielles telles que les fours, les réacteurs, les échangeurs de chaleur, les colonnes à distiller, les chambres froides, les presses à injection, ou encore dans notre vie quotidienne, comme le chauffage et l'isolation de nos maisons, la cuisson des aliments, le port de vêtements d'hiver et l'effet du vent sur la sensation de froid, ou même les coups de soleil à la plage [59].

Lorsque deux éléments sont à des températures différentes, un transfert de chaleur se produit jusqu'à ce que leurs températures se stabilisent. La chaleur se déplace toujours du corps chaud vers le corps froid, et il est impossible d'empêcher totalement ce processus d'échange. Ainsi, l'objectif de l'isolation thermique est de le ralentir autant que possible. Dans le domaine de la construction, les échanges de chaleur se manifestent principalement à travers trois modes de transmission : la conduction, qui est prédominante, la convection, et le rayonnement [60].

2.1. Conduction

Il s'agit du transfert d'énergie à travers les parties solides d'un matériau, se propageant progressivement d'une région à une autre. La facilité avec laquelle la chaleur se propage dépend de la nature, des caractéristiques (comme les résistances thermiques) et de la configuration géométrique du matériau.

Ce transfert d'énergie thermique, qui ne dépend pas d'un déplacement macroscopique de la matière, est engendré par différents mécanismes :

- L'agitation moléculaire (dans les gaz et les liquides)
- Les vibrations des réseaux cristallins (dans les solides non-conducteurs)
- Le déplacement d'électrons libres (dans les métaux conducteurs) [59].

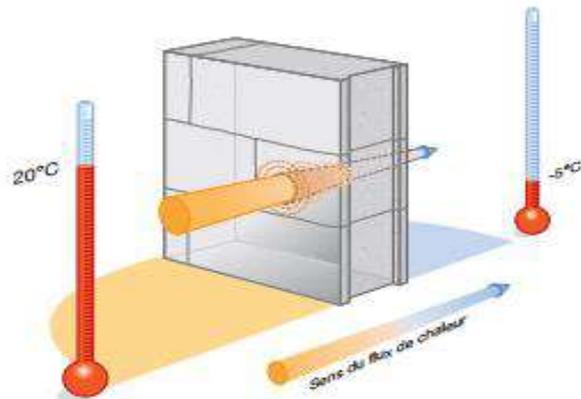


Figure II.1. Transfert de chaleur par conduction [59]

Plus le matériau est isolant moins il y a de conduction.

2.2. Convection

Ce processus de transfert de chaleur est spécifique aux fluides, qu'ils soient sous forme de gaz ou de liquide. Lorsqu'un fluide, comme de l'air par exemple, entre en contact avec un élément chaud, il se met en mouvement et se déplace vers l'élément plus froid. En perdant de la chaleur, le fluide engendre ainsi un mouvement vertical qui intensifie les échanges thermiques entre les deux éléments[60].

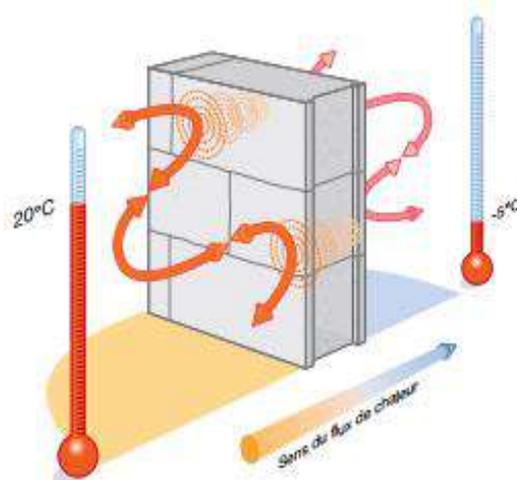


Figure II.2. Transfert de chaleur par convection [60]

Plus l'air est immobile moins il y a de convection.

2.3. Rayonnement

Il s'agit du transfert de chaleur d'un élément à un autre par le biais d'ondes électromagnétiques, sans qu'il y ait de contact direct entre les deux. Ce mode de transfert n'exige pas de support matériel et peut même se produire dans le vide[60].

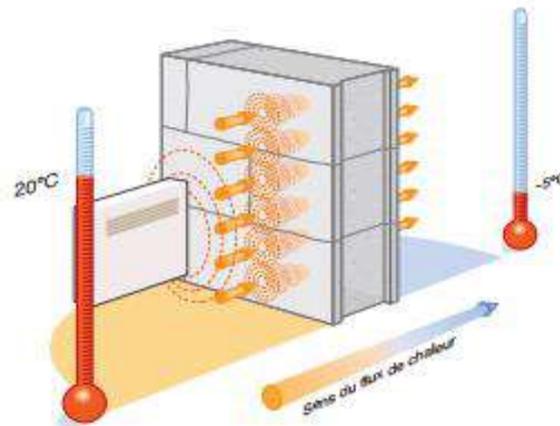


Figure II.3. Transfert de chaleur par rayonnement [60]

Plus l'émissivité du matériau est faible moins il y aura de transfert par rayonnement.

3. Transfert de chaleur stationnaire et transfert de chaleur transitoire

Par transfert de chaleur stable, nous entendons que les propriétés du matériau ne changent avec le temps en aucun point du milieu, mais un transfert instable signifie qu'il y a un changement continu avec le temps des propriétés du matériau, donc nous constatons que dans un transfert de chaleur stable, la température et le taux de transfert de chaleur sont constants, ce qui ne change pas avec le temps en tout point du milieu dans lequel la chaleur est transférée, mais les deux quantités peuvent changer d'une région à l'autre, par exemple, le taux de transfert de chaleur à travers les murs d'une certaine maison reste stable si les conditions internes et externes de la maison sont restées constantes pendant une longue période [61].

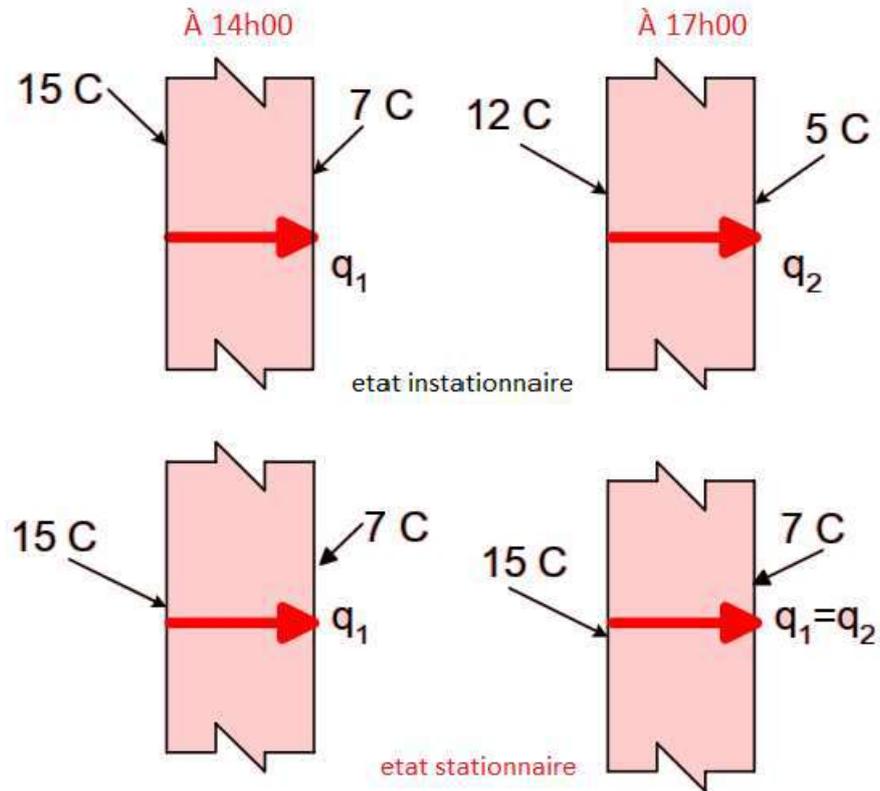


Figure II.4. Transfert de chaleur stationnaire et transitoire[61].

Mais en revanche, le refroidissement d'un fruit, par exemple, à l'intérieur d'un réfrigérateur, est un processus de transition instable puisque la température à un certain point est à l'intérieur de celle-ci le fruit changera au fil du temps pendant le processus de refroidissement.

4. Transfert de chaleur stationnaire unidimensionnel

Si l'on prend en compte le transfert de chaleur à travers le mur d'une maison comme le montre la figure II.5

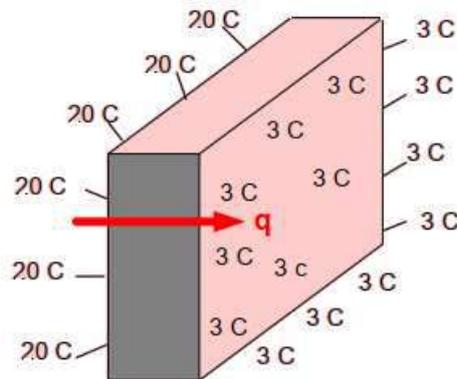


Figure II.5. Transfert de chaleur à travers le mur unidirectionnel [61]

en hiver, la chaleur est constamment transmise à l'extérieur du bâtiment à travers les murs dans une direction perpendiculaire à la surface du mur, la chaleur se déplace toujours dans

une certaine direction lorsqu'il y a une différence de température dans cette direction et ne se déplace pas dans une certaine direction [61] .

Par conséquent, le transfert de chaleur dans ce cas est appelé transfert de chaleur stationnaire et unidirectionnel, sur lequel nous nous concentrerons dans notre étude.

5. Quelques définitions thermiques

5.1. Flux thermique (φ) et la fuite de la chaleur

Le flux de chaleur, représenté par le symbole φ (phi), désigne la quantité d'énergie ou de chaleur qui traverse 1 mètre carré de surface pendant une seconde, en présence d'une différence de température entre les deux côtés. Son unité de mesure est le watt par mètre carré (W/m^2).

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e}$$

Avec λ la conductivité thermique ; ΔT l'écart de température et e l'épaisseur de la paroi.

La quantité de chaleur s'échappant d'une paroi simple diminue lorsque la conductivité thermique décroît, lorsque l'écart de température entre les deux faces de la paroi diminue et lorsque l'épaisseur de la paroi augmente.

Tout à fait, dans le domaine de la construction, les moyens d'atténuer la perte de chaleur sont principalement la réduction de la valeur de la conductivité thermique et l'optimisation de l'épaisseur des parois. Cela permet de rendre les bâtiments plus économes en énergie et de favoriser une meilleure isolation thermique [60] .

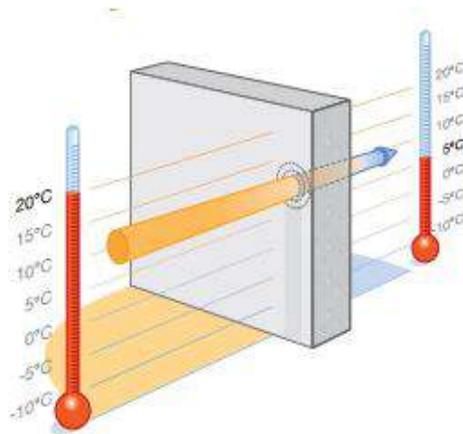


Figure II.6. Flux de chaleur [60]

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\Phi = \frac{1}{S} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (W/m^2)$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\Phi = \frac{\varphi}{S}$$

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{W}) \text{ ou } (\text{J/s})$$

Le flux de chaleur est une valeur algébrique tandis que la densité du flux de chaleur est une valeur vectoriel [62] .

$$\varphi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e}$$

5.2. Conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique mesure la quantité d'énergie traversant un mètre carré de matériau d'un mètre d'épaisseur, pour une différence de température d'un degré. Elle s'exprime en watt par mètre-kelvin (W/m.K) et reflète la capacité d'un matériau à laisser passer la chaleur. C'est une propriété constante des matériaux homogènes. Il est important de souligner que même au sein d'une même catégorie d'isolants, les produits peuvent présenter des performances variables. Par exemple, dans le cas des laines minérales ou du polystyrène expansé, la conductivité thermique (λ) peut varier de 0,04 à 0,03 W/m.K [60].

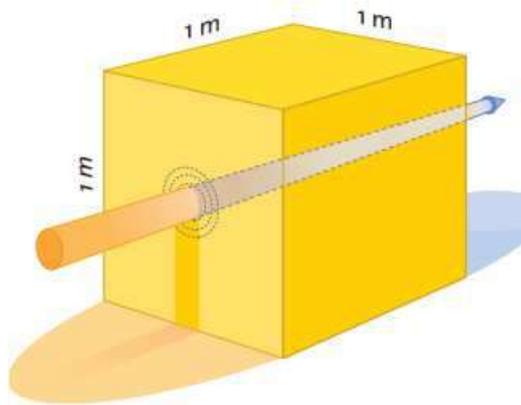


Figure II.7. Conductivité thermique λ [60]

Plus la conductivité est faible plus un matériau est isolant.

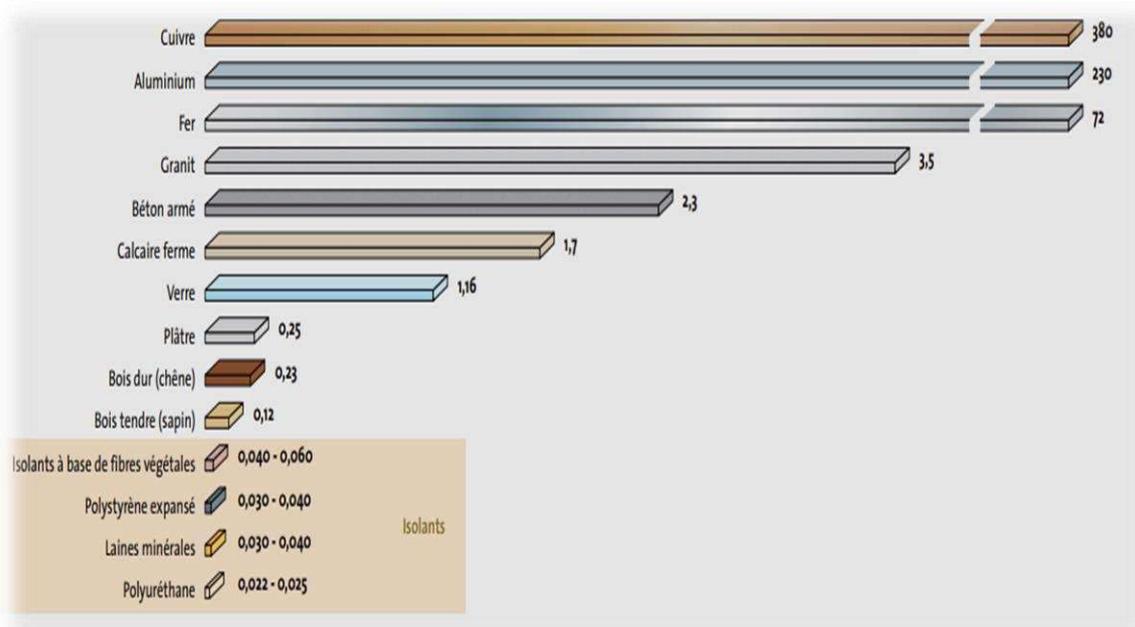


Figure II.8. Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels [60]

5.3. Résistance thermique (R)

La résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en : $m^2.K/W$

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{\Delta T \cdot S}{\phi}$$

e : l'épaisseur du matériau (en mètre)

λ : conductivité thermique (en W/m.K)

Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique [63].

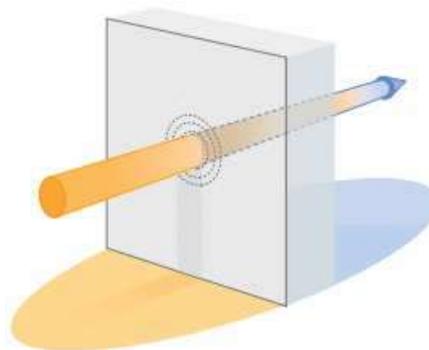


Figure II.9. Résistance thermique [63]

Plus la résistance thermique est élevée plus le matériau est isolant

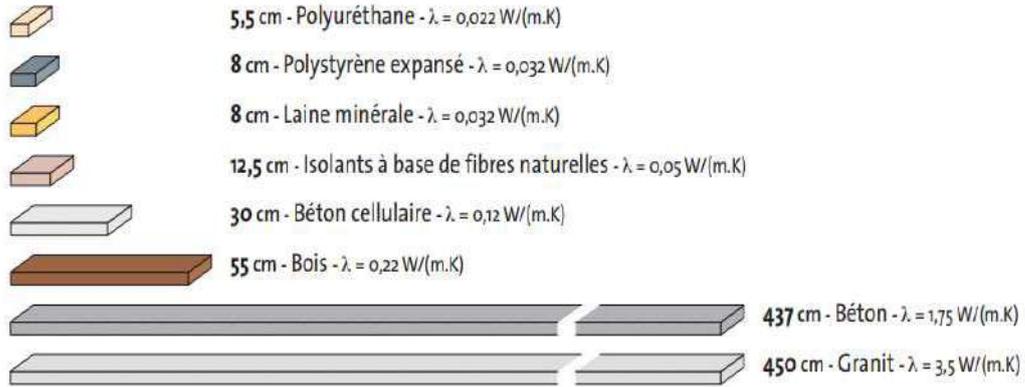


Figure .II.10. Épaisseur équivalente pour obtenir avec différent matériaux une résistance thermique de $R= 2,5 \text{ m}^2.\text{K/W}$ [60]

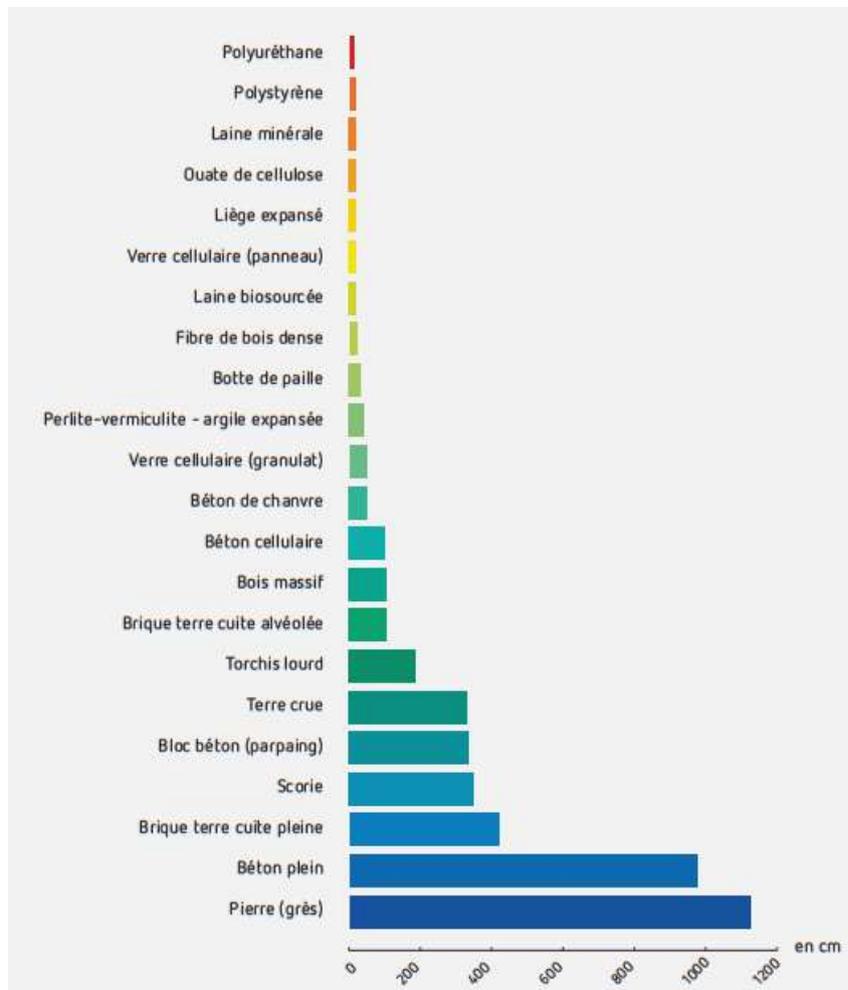


Figure II.11. Épaisseur équivalente moyenne pour une résistance thermique $R=5 \text{ m}^2.\text{K/W}$ [64]

La résistance thermique d'un matériau traduit sa capacité à résister à la transmission de chaleur.

La résistance thermique totale d'une paroi est égale à la somme des résistances thermiques de chacune des couches de matériau qui la constitue :

$$\mathbf{R_{paroi} = R_{matériau1} + R_{matériau2} + \dots}$$

Plus la résistance thermique est élevée, plus la paroi considérée est isolante [64] .

5.4. Capacité thermique (C)

La capacité thermique traduit l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer (élévation de sa température) de ΔT :

$$\mathbf{C = \frac{Q}{\Delta T}}$$

Dans la pratique, et pour définir une propriété du matériau indépendante de sa masse (m), on utilise la capacité thermique massique c ou Cp qui s'exprime en J/K.kg :

$$\mathbf{c \text{ ou } C_p = \frac{C}{m}}$$

Cette grandeur était anciennement désignée sous le nom de chaleur spécifique ou capacité calorifique. Pour la mesurer, divers processus thermodynamiques peuvent être employés, les plus courants étant l'échauffement du matériau à pression constante, ce qui permet de mesurer Cp (capacité thermique à pression constante), et l'échauffement à volume constant, permettant la mesure de Cv (capacité thermique à volume constant). Ces deux grandeurs, obtenues de manière différente, sont liées entre elles par le volume molaire V, le coefficient d'expansion volumique α , et le coefficient de compressibilité isotherme β , pour le matériau considéré à la température T:

$$\mathbf{C_p - C_v = \frac{\alpha^2 \cdot V \cdot T}{\beta}} \quad [63]$$

5.5. Diffusivité thermique (a) ou (D)

Il représente la vitesse de pénétration et d'atténuation d'une onde de chaleur dans le milieu environnant ou la vitesse d'alignement du matériau à sa température avec le milieu environnant et est le rapport entre la chaleur transmise et la chaleur stockée qui ne doit pas être exprimé par le coefficient ρ . Cp c'est-à-dire que:

$$\mathbf{a \text{ ou } D = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}} \quad \text{en (m}^2/\text{s)}$$

La diffusion thermique représente la valeur qui caractérise la capacité d'un matériau à disperser sa chaleur.

Les matériaux avec des valeurs de diffusion élevées ajustent rapidement leur température pour correspondre à la température du milieu environnant car leur conductivité est bonne par rapport à la capacité thermique volumétrique standard ou types.

ρ . Cp: la chaleur stockée [63].

5.6. Effusivité thermique (E)

C'est la valeur qui caractérise la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement, fait référence à la capacité des matériaux à absorber la chaleur rapidement ou lentement, et sa valeur est donnée par l'expression:

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp} \quad \text{en (J/K.m}^2\text{.s}^{1/2}\text{)}$$

La sensation de chaud ou de froid au toucher d'un matériau est directement liée à l'effusivité thermique de ce matériau[63] .

5.7. Inertie thermique

L'inertie thermique se réfère à la capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur ou du froid. Cette caractéristique est principalement influencée par la densité et la capacité thermique spécifique du matériau. Si ces propriétés sont plus élevées, le matériau aura une inertie thermique plus importante. Ainsi, ce sont habituellement les surfaces massives telles que les murs en maçonnerie, les dalles, les chapes ou les cloisons robustes qui contribuent à l'inertie thermique d'un édifice, ce qui aide à atténuer les fluctuations de sa température intérieure [64] .

5.8. Coefficient de transmission calorifique (U)

Il caractérise la perte thermique d'un matériau ou d'une paroi et est le contraire de la résistance thermique, car ils ont la relation opposée

$$U = \frac{1}{R} \quad (\text{W/m}^2\text{.K) ou (W/m}^2\text{.}^\circ\text{C)}$$

Plus U il est petit, plus la capacité d'isolation du matériau ou du mur est grande.

5.9. Chaleur latente

La chaleur latente de l'état instationnaire est la chaleur absorbée par le corps (matière) sans le changement de température qui doit être fourni à l'unité de masse.

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour convertir une substance d'un état à un autre (du solide au liquide en passant par le gazeux) par kilogramme de matière à température constante.

$$L = \frac{\Delta Q}{m} \quad (\text{J/kg}) \quad [58]$$

5.10. Déphasage thermique

Le déphasage thermique représente la durée nécessaire pour qu'une vague de chaleur traverse une épaisseur spécifique de matériau. Cette caractéristique dynamique est principalement influencée par la densité et la capacité thermique spécifique du matériau. Considérer le déphasage thermique est particulièrement utile en été pour retarder l'absorption de la chaleur absorbée par les parois extérieures pendant la journée, afin de la transférer au cœur de la nuit, lorsque l'air est plus frais [65] .

5.11. Capacité hygrothermique

En plus de l'inertie thermique, certains matériaux peuvent procurer un avantage additionnel dans la régulation de la température et de l'humidité des environnements, grâce à leur capacité hygrothermique. Bien que cette notion soit encore peu définie, elle revêt une importance particulière dans le domaine des matériaux biosourcés, qui agissent comme de véritables matériaux à changement de phase [65].

5.12. Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ)

Ce coefficient caractérise la capacité d'un matériau à bloquer le passage de la vapeur d'eau. Il s'exprime en unités sans dimension. Un μ plus élevé indique une plus grande étanchéité du matériau à la vapeur d'eau. Selon la convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 1$. Un matériau ayant une faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau est également qualifié de « perspirant » [65].

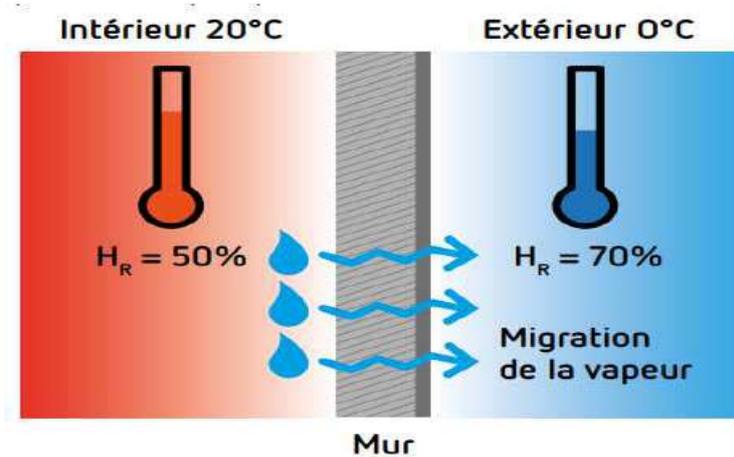


Figure II.12. Perspirant[65]

6. Conclusion

Ce chapitre a offert une analyse approfondie du transfert de chaleur dans les matériaux, ainsi que des méthodes de transfert de chaleur, mettant en lumière l'importance cruciale de comprendre les propriétés thermiques pour garantir des performances optimales dans la conception structurale. Nous avons exploré divers matériaux de construction et examiné comment leurs propriétés thermiques influent sur le transfert de chaleur à travers eux.

Chapitre II

B) Analyse climatologique et déterminants du confort thermique

1. Introduction

Dans notre quête constante de compréhension et de contrôle de notre environnement, l'impact du climat sur nos vies devient de plus en plus important. L'évolution des conditions climatiques, aggravée par des phénomènes tels que le changement climatique, soulève des questions fondamentales sur la manière dont nous interagissons avec notre environnement. Un aspect crucial de cette interaction est notre confort thermique, élément essentiel de notre bien-être dans des espaces aussi divers que nos maisons, nos lieux de travail et nos espaces publics.

Ce chapitre vise à plonger au cœur de l'analyse climatique, en explorant les éléments qui déterminent notre perception du confort thermique. Comprendre la dynamique du climat et les facteurs qui influencent la sensation de chaleur ou de froid est impératif pour concevoir des environnements habitables et durables. Les tenants et aboutissants de cette relation complexe entre l'homme et le climat méritent une exploration approfondie afin d'orienter des décisions cruciales en termes de conception architecturale, de gestion de l'espace et de politiques urbaines. Nous discuterons également dans ce chapitre du climat de la région d'étude et de son emplacement dans la plage de confort thermique.

2. Climat

2.1. Définition du climat

le climat est défini comme les conditions météorologiques qui prévalent dans une certaine zone sur une longue période de temps, il est déterminé par l'influence de la somme des éléments de l'atmosphère et des changements qui s'y produisent à long terme [66] .

2.2. Définition de la météo

la météo est formée par l'influence des éléments atmosphériques sur de courtes périodes de temps et ces éléments comprennent: le rayonnement solaire, la température, l'humidité ,les précipitations (type, fréquence et quantité), la pression atmosphérique et le vent(vitesse et direction) [66].

2.3. Éléments du climat

2.3.1. Rayonnement solaire

L'énergie du rayonnement solaire est la source d'énergie la plus importante sur Terre, de sorte que cette énergie arrive de sa source (le Soleil) sous forme d'ondes électromagnétiques, sachant que le rayonnement qui atteint la terre ne représente que 40% du rayonnement total émis par le soleil, tandis que les 60% restants sont réfléchis au niveau de l'atmosphère terrestre.

Le pourcentage de rayonnement solaire qui atteint la terre (40% du rayonnement solaire) est encore divisé de sorte qu'une partie est réfléchi dans l'atmosphère et l'autre partie est absorbée par la masse terrestre et est considérée comme un stockage thermique qui conduit à augmenter la température du sol et donc augmenter la température de l'air par l'effet de la convection et du rayonnement.

Le rayonnement solaire affecte directement les bâtiments en pénétrant dans les ouvertures et en augmentant la chaleur des espaces ou indirectement en absorbant les murs extérieurs des constructions, qui diffusent une partie de leur chaleur absorbée à l'intérieur du bâtiment, c'est l'aspect sur lequel se concentre notre thèse [67],[68].

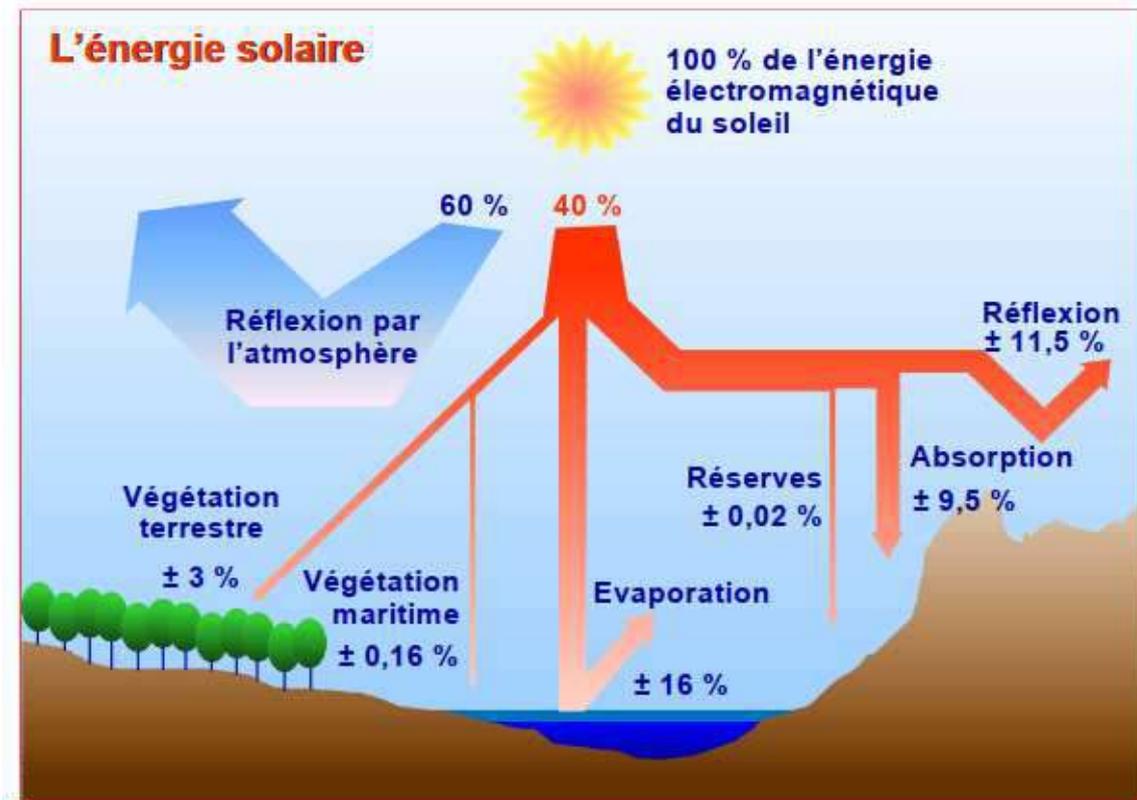


Figure II.13.Ce que reçoit la terre du soleil [67]

2.3.2. Température

la température de l'air est liée au rayonnement solaire, à sa hauteur et à son emplacement à partir de la latitude et de la longitude, et la température varie entre les zones exposées et ombragées, la nuit ou le jour, ainsi que le type de sol et de vent ...etc.

La température de l'air affecte l'évaporation, le rayonnement et le mouvement des masses d'air, et la capacité de stockage et de refroidissement de la surface de la terre est un facteur important pour déterminer la température de l'air[68].

2.3.3. Humidité

L'atmosphère contient une certaine quantité de vapeur d'eau qui provient de l'évaporation des surfaces d'eau et de la transpiration des plantes.

La quantité d'eau que l'air peut contenir est fonction de la température.

Le degré d'humidité a son influence dans le choix et la durée de vie des matériaux[68].

2.3.4. Précipitations

la vapeur d'eau causée par l'évaporation des masses d'eau et la transpiration des plantes monte dans la haute atmosphère et se condense autour de noyaux solides tels que des particules de poussière, des grains de pollen ou de petits cristaux de glace, et passe de son état gazeux à un état liquide ou solide, formant des nuages. les gouttelettes d'eau augmentent progressivement à mesure que le processus de condensation se poursuit et leur taille et leur poids augmentent jusqu'à ce que le nuage devienne complètement saturé et lourd, et la charge est éliminée sous forme de précipitations

La fréquence et la quantité de précipitations sont des facteurs importants pour les constructions et leurs matériaux de construction[68].

2.3.5. Vents

ce sont les courants résultant de la différence entre les zones de haute et basse pression, et est le mouvement de l'air principalement horizontalement des zones de haute pression (masses d'air froid) vers les zones de basse pression (masses d'air chaud),

car la rotation de la terre génère la direction du vent, et le vent peut résulter de la différence de température entre deux surfaces (sol-eau), la topographie contribue également à la formation de vents locaux[68] .

3. Confort thermique dans les bâtiments

Le confort thermique et la création d'une atmosphère saine et confortable sont l'un des objectifs les plus importants poursuivis par la conception thermique des bâtiments.

Le rôle du bâtiment est de réduire les échanges de chaleur entre le corps humain et l'environnement environnant, ce rôle est apprécié par le corps humain, car il dispose d'un système de réglage thermique qui lui permet de réguler les processus d'échange de chaleur avec son environnement.

L'idée de confort thermique dans les bâtiments est également liée à la quantité d'énergie à fournir pour atteindre le confort grâce à l'équipement[69] .

Le niveau de satisfaction thermique est déterminé par un ensemble de facteurs affectant l'état physiologique d'une personne dans l'océan dans lequel elle vit.

L'échange de chaleur entre l'homme et l'atmosphère environnante est effectué par plusieurs mécanismes différents, car :

Plus de 50% de la perte de chaleur est due à la convection entre le corps et l'air ambiant.

Environ 35% des échanges sont effectués par rayonnement thermique par contact avec la surface de la peau.

Alors que le pourcentage d'échanges par conductivité thermique ne dépasse pas 1%, le corps perd également environ 6% de la chaleur lors du processus de digestion pour chauffer les aliments consommés[67] .

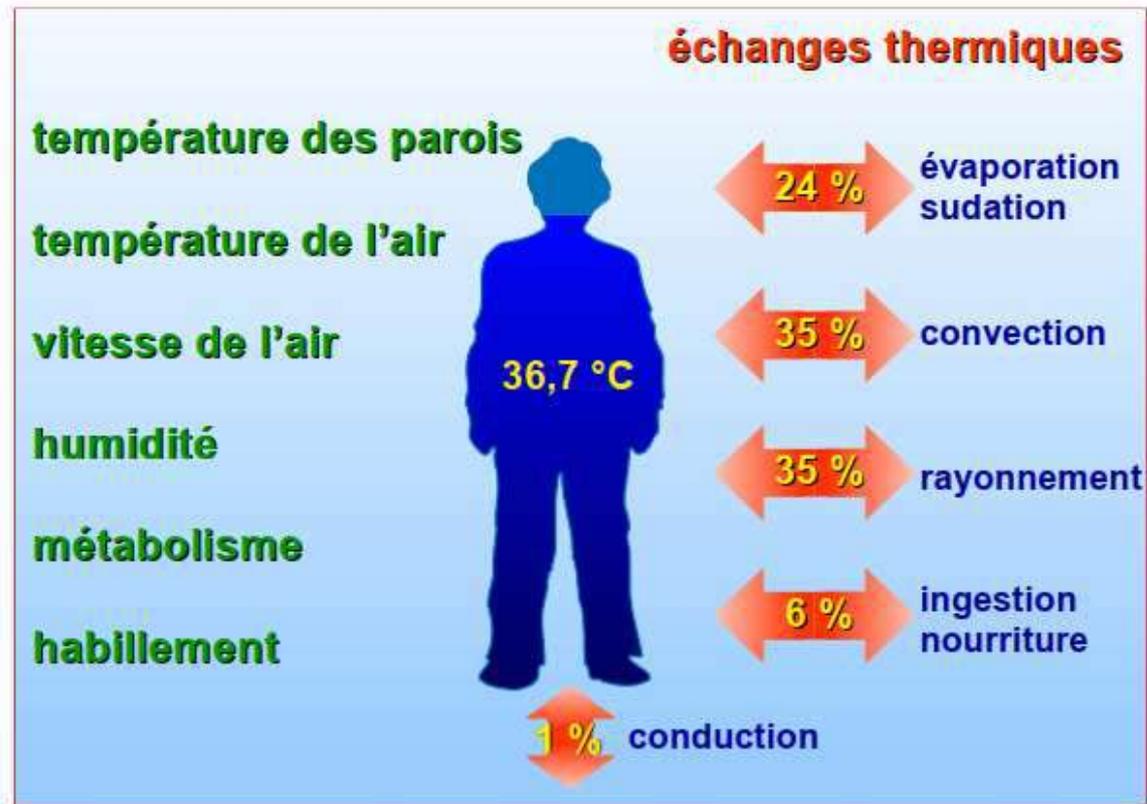


Figure II.14. Pertes thermiques du corps humain dépendent de 6 paramètres physiques [67]

3.1. Facteurs affectant le confort thermique

Le confort thermique dépend de six facteurs de base :

3.1.1. Métabolisme

C'est la production de chaleur interne du corps humain pour maintenir sa température à 36,7 degrés Celsius. Le métabolisme correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base de l'organisme au repos.

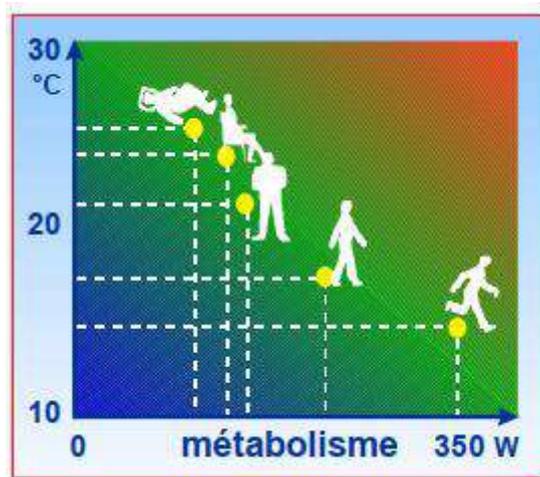


Figure II.15. Températures de confort pour différentes activités (d'après O. Fanger) [67]

3.1.2. Vêtements

Il joue le rôle de résistance thermique des échangeurs de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement environnant.

3.1.3. Température de l'air ambiant (T_{air}) et Température des murs (T_{paroi})

De manière simplifiée, la température de confort est définie :

$$T_{rs} = (T_{\text{air}} + T_{\text{paroi}}) / 2$$

T_{rs} : est appelée la température résultante sèche.

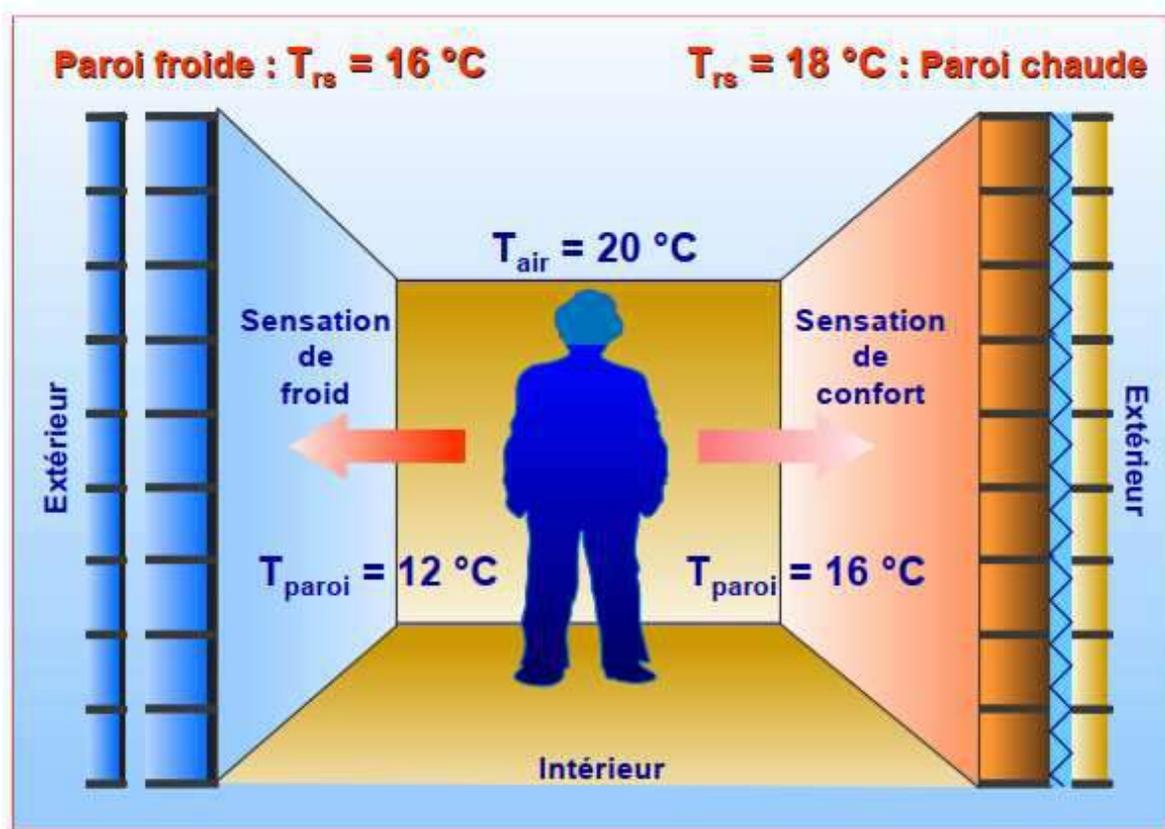


Figure II.16. Température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois [67]

3.1.4. Humidité relative de l'air (H_R)

C'est le pourcentage entre la quantité d'eau transportée dans l'air à la température T_{air} et la quantité maximale d'eau que l'air peut contenir à la même température.

On peut dire que l'humidité de l'air est la pression de la vapeur d'eau et qu'elle affecte directement et indirectement le corps humain.

Lorsque l'humidité relative est comprise entre 30% et 70%, elle a peu d'effet sur la sensation de confort thermique.

L'augmentation de l'humidité dans l'atmosphère environnante empêche l'évaporation de la sueur du corps et donc sa survie à la surface de la peau, ce qui provoque une élévation progressive de la température corporelle.

La faible humidité peut provoquer une sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

La figure suivante représente un schéma de confort thermique dans le cas d'une position assise en sous-vêtements d'hiver à une vitesse de l'air de 0,2 m / s et la différence entre la température de l'air et la température des murs ne dépasse pas 1 degré Celsius et l'humidité relative varie de 30% à 70%

L'échelle verticale de droite mesure l'humidité absolue de l'air exprimée en quantité d'eau en grammes par kilogramme d'air sec.

L'échelle horizontale indique la température.

Les lignes courbes indiquent la somme des points qui ont la même humidité relative.

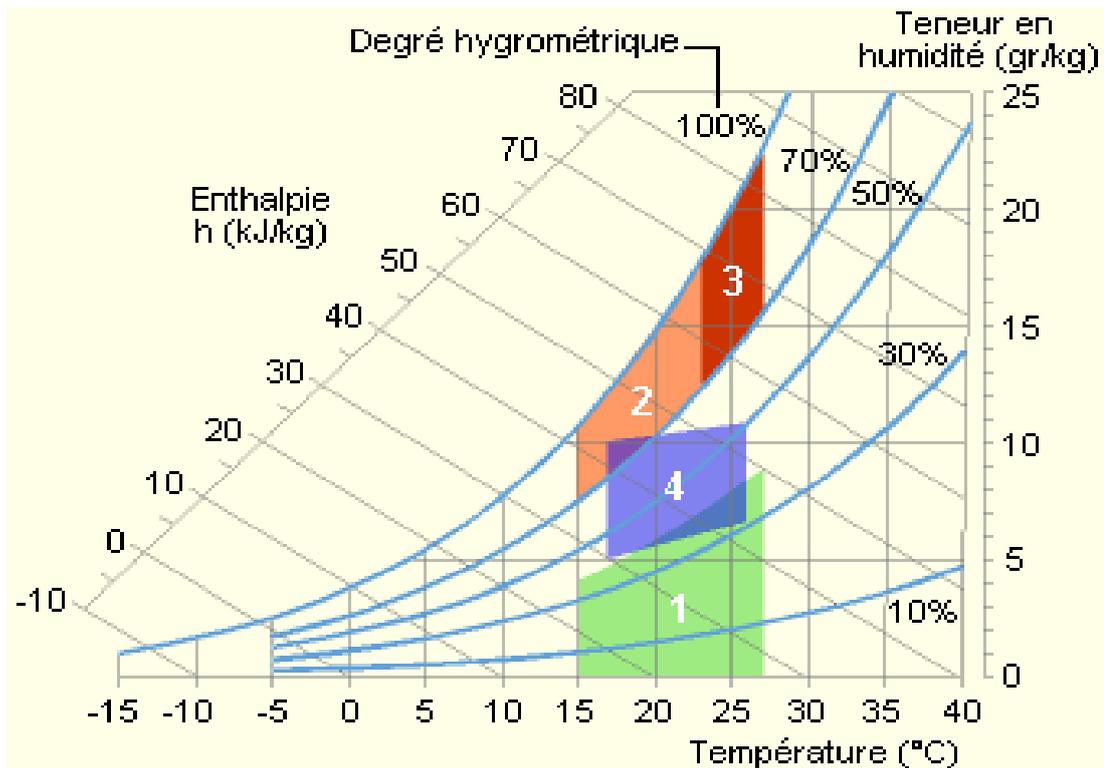


Figure II.17. Plage de confort pour une activité de bureau[67], [70]

Zone 1 : à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.

Zone 2 et 3 : à éviter vis-à-vis du développement des bactéries et microchampignons.

Zone 3 : à éviter vis-à-vis du développement des acariens.

Zone 4 : « polygone de confort hygrothermique » [70]

3.1.5. Vitesse de l'air

afin d'affecter l'échange de chaleur par convection dans les bâtiments, la vitesse maximale du vent requise pour le confort humain doit être inférieure à 2 m/s .

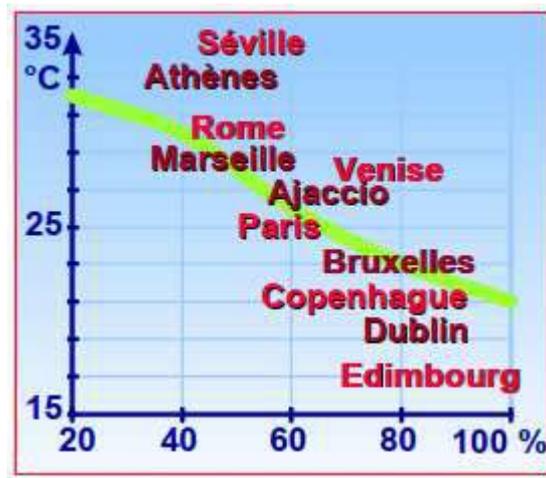


Figure II.18. Ligne des températures de confort pour un sujet nu, en fonction de l'humidité relative, (d'après O. Fanger) [67]

3.2. Stratégies de confort thermique

3.2.1. Confort hivernal

Le confort hivernal consiste dans la stratégie de chauffage en captant la chaleur par rayonnement solaire, en la stockant dans le bloc de construction, en la préservant par isolation et en la répartissant dans le bâtiment.

- **Capture**

La capture consiste à collecter l'énergie solaire et à la convertir en chaleur.

Le rayonnement solaire reçu par le bâtiment dépend du climat, de ses changements quotidiens et saisonniers, et dépend également de l'orientation du bâtiment (façade du bâtiment), de la nature de ses surfaces et de la nature des matériaux...etc.

Le rayonnement de l'énergie solaire n'est utilisable que dans le cas de surfaces vitrées, où il est partiellement transféré dans l'espace interne de sorte qu'il procure un gain de chaleur direct.

- **Stockage**

Les rayons solaires produisent souvent de la chaleur à un moment où il n'est pas nécessaire de l'utiliser, de sorte que la construction doit être en mesure de stocker cette énergie pendant le temps nécessaire (par exemple, la nuit). ce stockage varie en fonction de la capacité calorifique des matériaux et de leur capacité à absorber la chaleur et à réduire(atténuer) les fluctuations de température dans le bâtiment en profitant de l'inertie thermique du bâtiment [67] .

L'inertie thermique est la capacité d'une substance à stocker de l'énergie exprimée par sa capacité thermique

- Plus le matériau est lourd, plus son inertie thermique est grande.
- Plus l'inertie thermique est élevée, plus le matériau met de temps à refroidir et à chauffer[70] .

- **Rétention**

Dans les climats froids, nous travaillons à préserver la chaleur, qu'elle provienne de la lumière du soleil ou des apports internes du système de chauffage, et cela dépend principalement de la forme et de l'isolation des murs qui sont utilisés pour réduire la dissipation thermique.

- **Diffusion**

Elle consiste à répartir la chaleur dans tout le bâtiment et à la diriger vers les espaces souhaités. La distribution peut avoir lieu normalement lorsque la chaleur s'accumule dans le matériau pendant la période de rayonnement solaire et est transmise à l'air ambiant par rayonnement thermique et convection[67] .

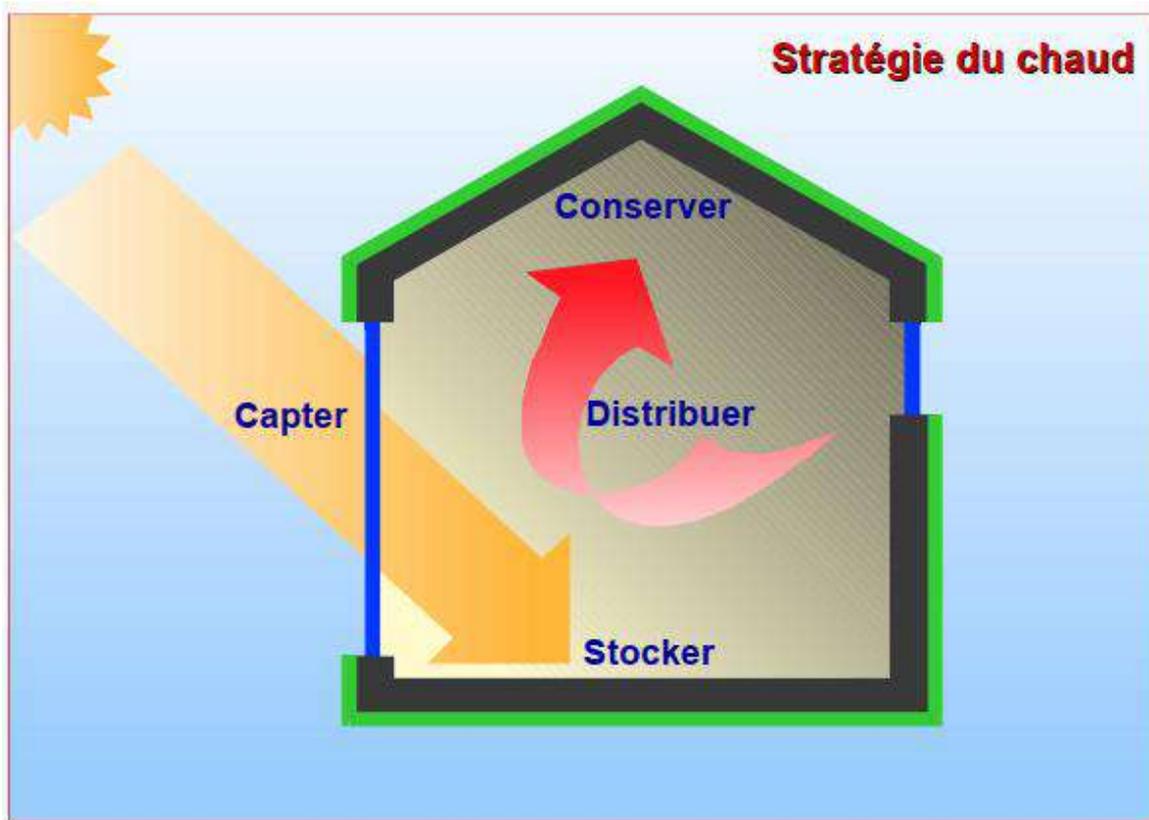


Figure II.19. Principes du confort d'hiver[67]

3.2.2. Confort d'été

Le repos estival doit répondre à la stratégie de refroidissement, qui consiste en la protection contre le rayonnement solaire, la dissipation de l'excès de chaleur, la réduction des contributions internes (par exemple, l'éclairage) et le refroidissement naturel [67] .

- **Protection**

On entend : protéger le bâtiment, en particulier les ouvertures de la lumière directe du soleil, pour réduire le gain de chaleur direct en érigeant des rideaux occultant, qu'ils soient fixes ou mobiles (fixes comme les plantes, par exemple), et il doit également y avoir un

niveau d'isolation suffisant pour empêcher l'accumulation de chaleur dans le bloc (murs et plafonds) et réduire l'infiltration d'air chaud dans le bâtiment.

- **Dissipation de chaleur**

Cela se fait par la ventilation naturelle du bâtiment, en exploitant la pression du vent et en dirigeant le flux d'air où nous pouvons nous débarrasser de l'air chaud.

- **Réduire les contributions internes**

Cela se fait en réduisant l'utilisation d'équipements émetteurs de chaleur tels que l'éclairage, par exemple, et la plupart des équipements électriques en général, et cela se fait en exploitant l'éclairage naturel, par exemple.

- **Refroidissement local**

Le refroidissement naturel de la construction peut facilement être assuré en améliorant la ventilation, en particulier la nuit pour éliminer la chaleur stockée ,ou augmenter la vitesse de l'air. Et aussi le refroidissement en exploitant l'eau, comme l'utilisation de fontaines, de plantes et de canaux muraux[67] .

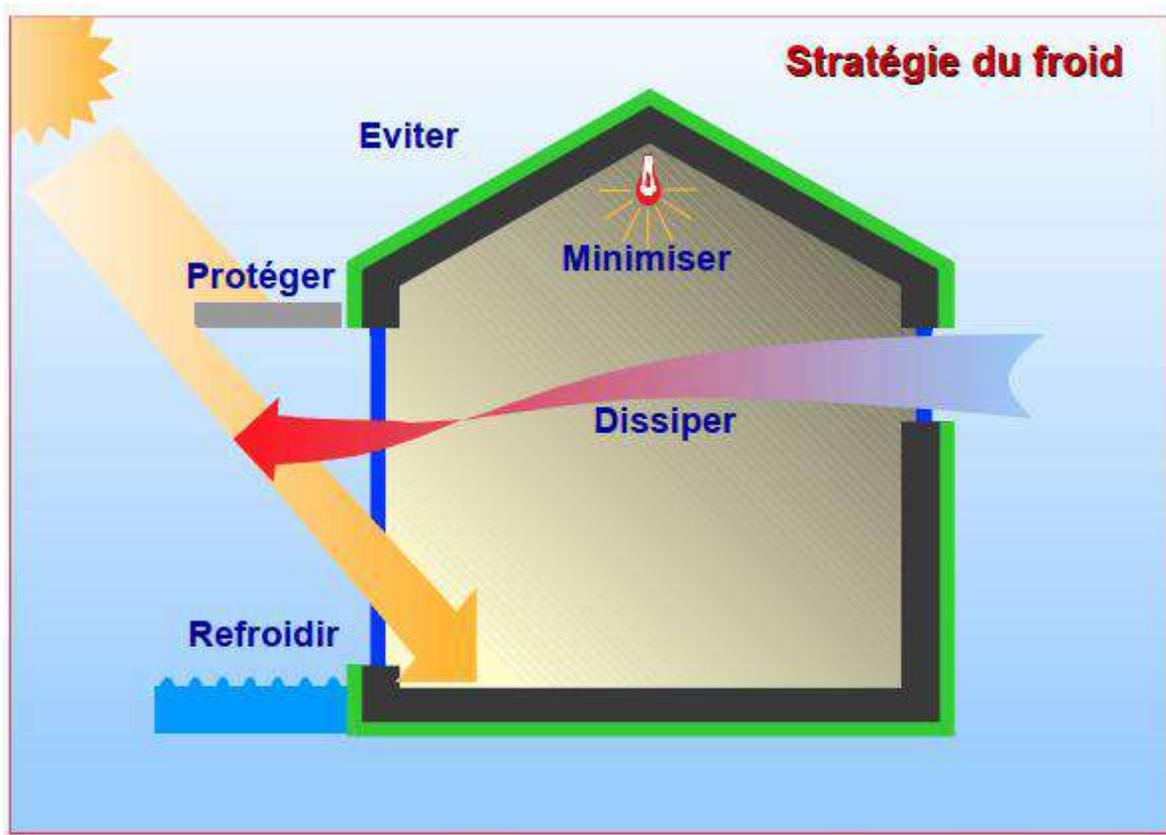


Figure II.20. Principes du confort d'été[67]

3.3. Exigences de confort hygrothermique

Pour des Individus «au repos», sont en situation courante caractérisées par les valeurs suivantes :

- En confort d'hiver: $T^{\circ}_{\text{air}} = 20^{\circ}\text{c}$ pour une humidité de 40% à 60% .
- En confort d'été: $T^{\circ}_{\text{air}} = 25^{\circ}\text{c}$ si $T_{\text{ext}} \leq 30^{\circ}\text{c}$
 $T^{\circ}_{\text{air}} = (T_{\text{ext}} - 5^{\circ}\text{c})$ si $T_{\text{ext}} \geq 30^{\circ}\text{c}$

(un système de rafraîchissement ou de climatisation sera nécessaire ou non suivant les régions, les activités et les apports internes) [70].

Remarques

En été, la T°_{air} «confortable» dépend de l'humidité (pour une vitesse d'air donnée) ; si l'humidité est de 50 %, $T^{\circ}_{\text{air}} < 28^{\circ}\text{c}$ convient, mais si l'humidité est de 70 %, il faut $T^{\circ}_{\text{air}} < 26^{\circ}\text{c}$.

la T°_{air} de confort peut varier de 17°c pour un gymnase à 22°c pour une infirmerie ou vestiaire [70].

- L'écart entre la température de surface des parois et la température ambiante ne doit pas excéder :
 8°c pour les parois vitrées.
 5°c pour les parois opaques (pour une base de $T^{\circ}_{\text{extérieure}}$ de 0°c).
- La température du sol doit pouvoir être maintenue supérieure à 17° (15° dans tous les cas)
- Dans le cas de parois chauffantes rayonnantes, leurs températures de surface ne doit pas excéder :
 27° pour les plafonds et les parois verticales.
 24° pour les planchers.
- La variation de température avec la hauteur ne devrait pas excéder :
 1° par mètre dans la zone d'occupation,
 3° dans tous les cas (sauf conditions particulières à justifier)
- La vitesse de l'air en tout point des zones d'occupation ne doit pas dépasser 0,3 à 0,5 m/ s (selon sensibilité des occupants) [70].
- Selon les recommandations du DTR algérien de thermorégulation, C3. 2/4 [71], la sensation de confort thermique pendant la saison estivale est représentée par une humidité relative variant entre 30 et 60 % et une température comprise entre 24 et 30 degrés Celsius. De même, la sensation de confort thermique pendant la saison hivernale est représentée par une humidité relative variant entre 40 et 60 % et une température entre 18 et 21 degrés Celsius. [70],[72].

4. Climat de la zone d'étude

4.1. Présentation de la zone étude

La ville d'El Oued est située dans le sud-est de l'Algérie à une distance de 630 km d'Alger, à la longitude 6.86 degrés et à la latitude 33.36 degrés, à une altitude de 80 mètres au-dessus du niveau de la mer. La wilaya d'El Oued s'étend sur une superficie de 44585 kilomètres carrés [73].

4.2. Classification climatique

Selon la classification des zones dans la figure II.21 et II.22, la zone d'étude se situe dans la région climatique hivernale H3b et la région climatique estivale E3. El Oued se trouve dans une zone limitrophe au nord du désert avec un climat sec, ce qui lui confère des caractéristiques spécifiques.

- Été plus chaud et plus sec, avec une grande différence de température.
- Hiver froid et sec, avec une variation importante de température [38].

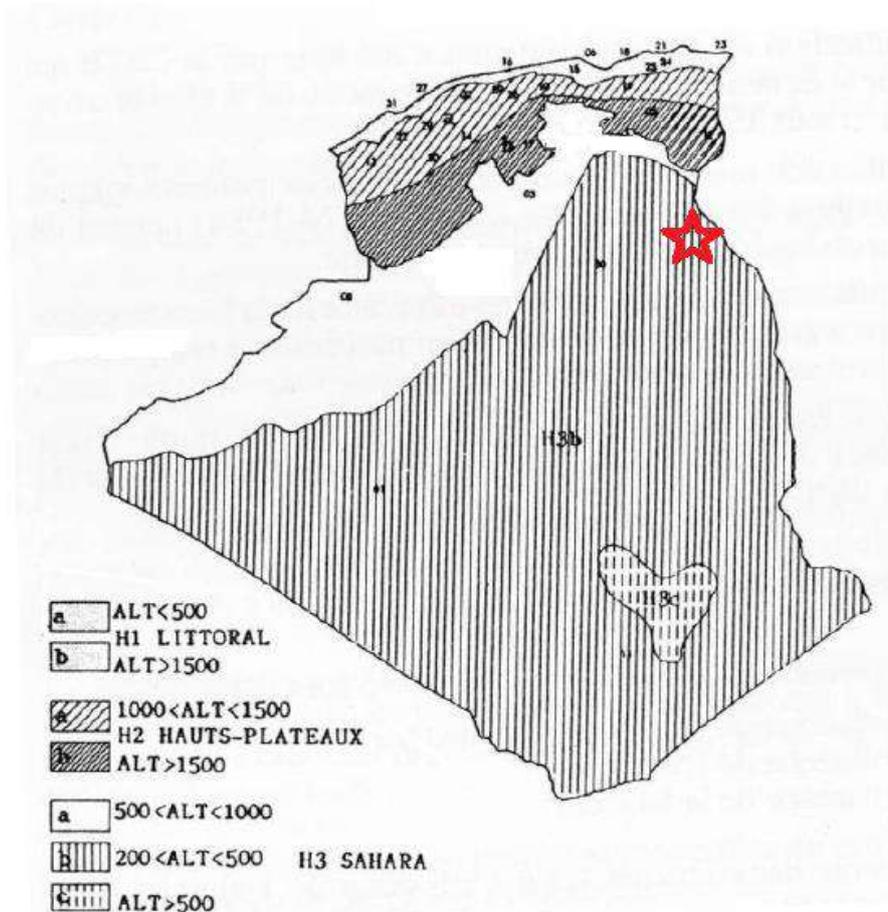


Figure II.21. Zones climatiques en Algérie (en hiver) [38]

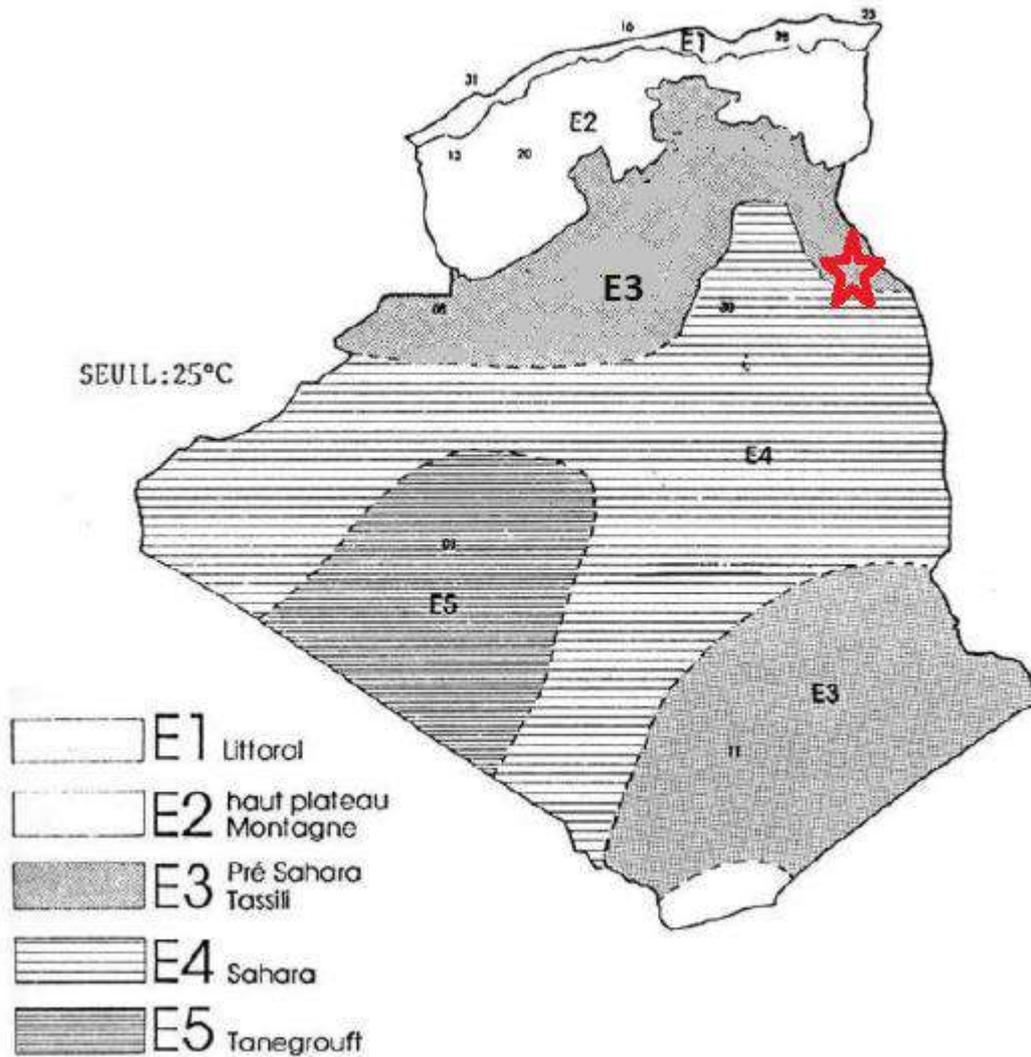


Figure II.22. Zones climatiques en Algérie (en été) [38]

4.3. Présentation climat et météo moyenne toute l'année à El Oued

4.3.1. Température

À El Oued, les étés sont torrides, arides et dégagés, et les hivers sont frais, secs et principalement dégagés. Au cours de l'année, la température varie généralement de 5 °C à 40 °C et est rarement en dessous de 2 °C ou au-dessus de 45 °C.

La saison chaude dure 3,2 mois, du 5 juin au 12 septembre, avec une température quotidienne maximale moyenne dépassant les 35 °C. Le mois le plus chaud de l'année à El Oued est juillet, avec une moyenne maximale de 40 °C et une minimale de 27 °C.

La saison fraîche dure 3,5 mois, du 19 novembre au 5 mars, avec une température quotidienne maximale moyenne inférieure à 21 °C. Le mois le plus froid de l'année à El

Oued est janvier, avec une moyenne minimale de 6 °C et une maximale de 17 °C [74].

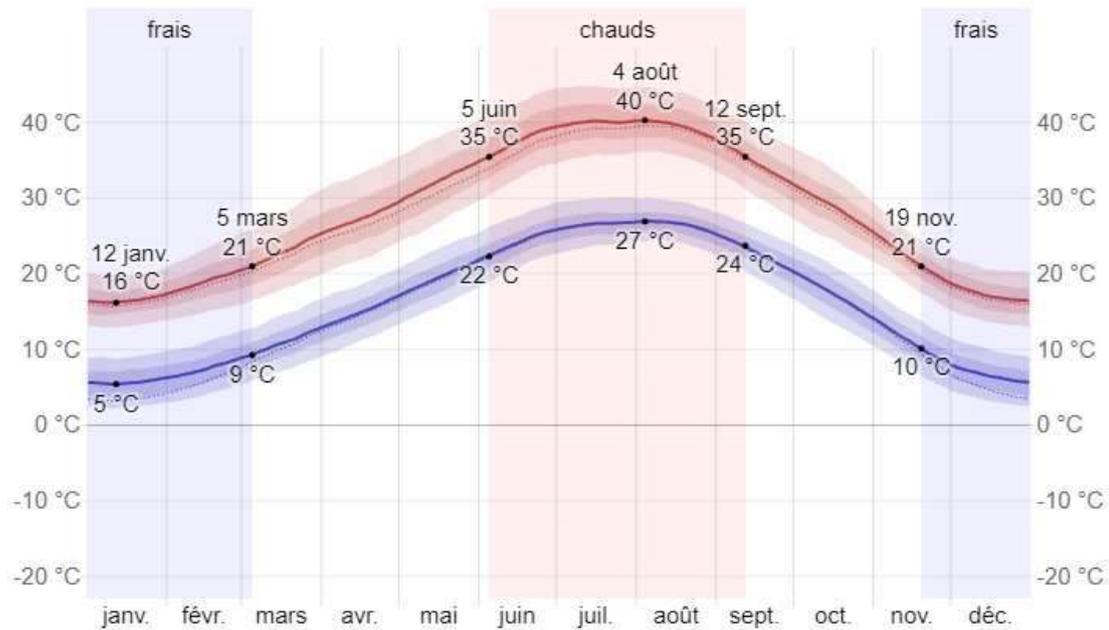


Figure II.23. Température moyenne maximale et minimale à El Oued [74]

La figure II.24 ci-dessous vous présente une caractérisation complète de l'année entière des températures moyennes horaires. L'axe horizontal représente le jour de l'année, l'axe vertical représente l'heure du jour, et la couleur indique la température moyenne pour cette heure et ce jour [74].

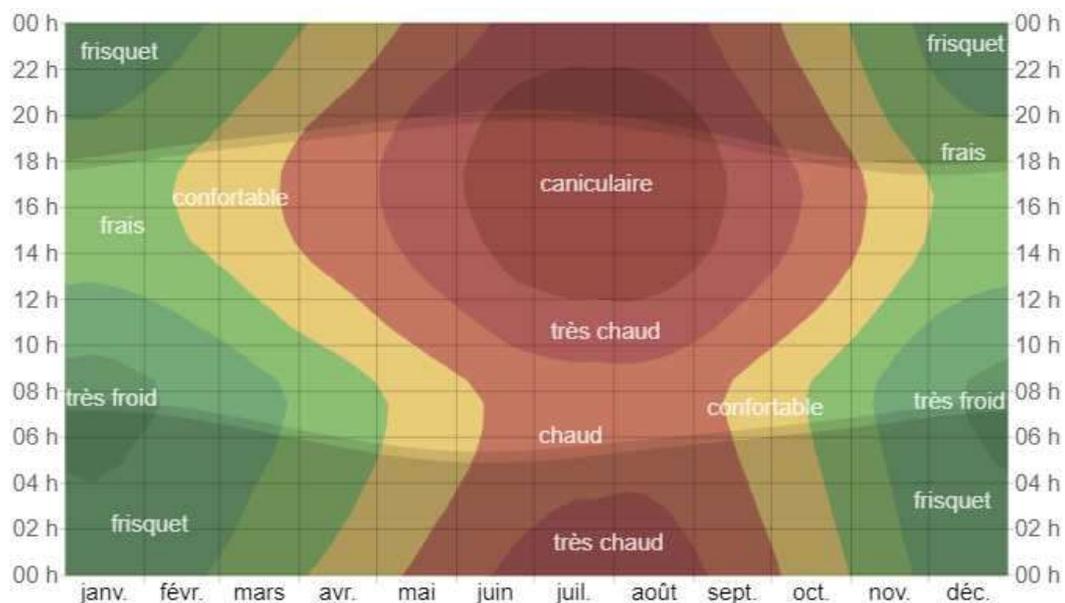


Figure II.24. Température horaire moyenne à El Oued [74]

La température horaire moyenne, codée par couleur en bandes. Les zones ombrées indiquent la nuit et le crépuscule civil.

4.3.2. Précipitations

El Oued connaît une certaine variation saisonnière des précipitations mensuelles. Il pleut tout au long de l'année à El Oued. Le mois avec le plus de pluie à El Oued est janvier, avec une pluviométrie moyenne de 9 millimètres. Le mois avec le moins de pluie à El Oued est juillet, avec une pluviométrie moyenne de 1 millimètre [74].

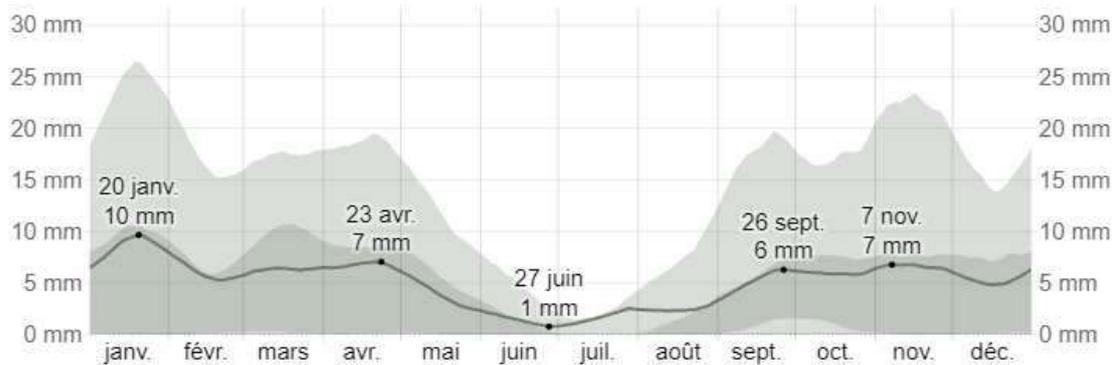


Figure II.25. Moyenne mensuelle des précipitations à El Oued [74]

4.3.3. Humidité

Nous estimons le niveau de confort selon l'humidité sur le point de rosée, car il détermine si la transpiration s'évaporera de la peau, causant ainsi un rafraîchissement de l'organisme. Les points de rosée plus bas sont ressentis comme un environnement plus sec et les points de rosée plus haut comme un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui varie généralement considérablement entre le jour et la nuit, les points de rosée varient plus lentement. Ainsi, bien que la température puisse chuter la nuit, une journée lourde est généralement suivie d'une nuit lourde.

Oued Souf connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne l'humidité perçue.

La période la plus lourde de l'année dure 3,0 mois, du 15 juillet au 16 octobre, avec une sensation de lourdeur, oppressante ou étouffante au moins 4 % du temps. Le mois ayant le plus grand nombre de jours lourds à Oued Souf est septembre, avec 3,9 jours lourds ou plus accablants.

Le jour le moins lourd de l'année est le 6 février, avec un climat lourd quasiment inexistant. [74].

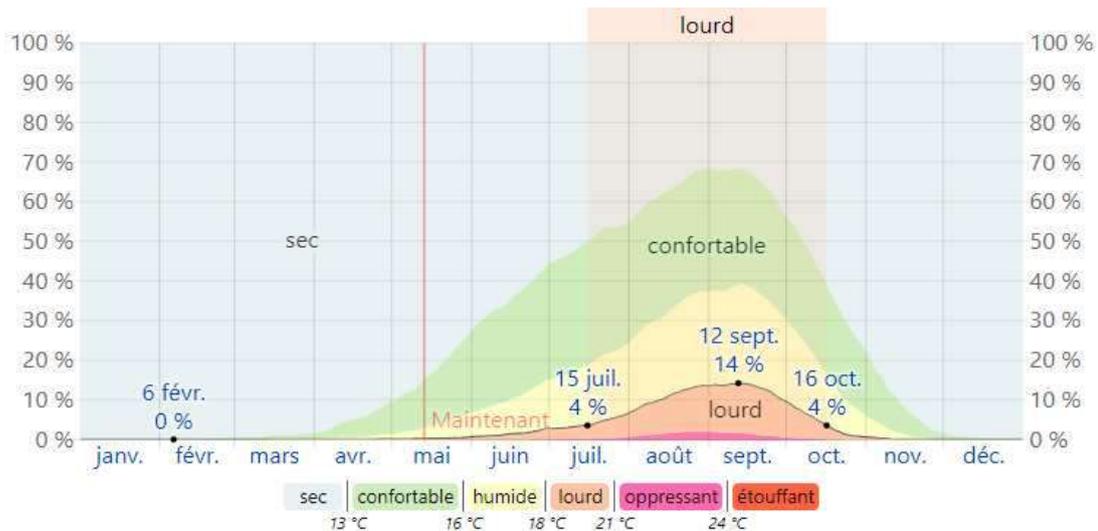


Figure II.26. Niveaux de confort d'humidité à El Oued [74]

Le pourcentage de temps passé à différents niveaux de confort d'humidité, catégorisé par le point de rosée.

Sources de données ce rapport illustre les conditions météorologiques typiques à El Oued, basées sur une analyse statistique des rapports météorologiques horaires historiques et des reconstructions de modèles du 1er janvier 1980 au 31 décembre 2016 [74].

5. conclusion

À la fin de ce chapitre, nous concluons que la région d'étude se situe en dehors de la plage de confort thermique, entraînant d'importantes répercussions économiques sur les individus et les pays. Ces conséquences sont liées aux importantes factures énergétiques gaspillées pour atteindre le confort thermique dans divers bâtiments. Cela contraint la communauté scientifique à approfondir les recherches et les études pour tenter d'isoler l'impact du climat sur les espaces intérieurs des installations, une orientation adoptée par la plupart des réglementations thermiques modernes.

Partie 2

Etude expérimentale

Chapitre III

Caractéristiques des matériaux utilisés et méthodes des essais thermiques, mécaniques et physiques de briques

1. Introduction

Ce chapitre vise à fournir une description détaillée des matières premières utilisées, comprenant l'argile, le sable des dunes, la chaux, ainsi que les matériaux et déchets additives. Ces matériaux ont été soigneusement sélectionnés pour la fabrication des échantillons de briques en terre cuite améliorée. La maîtrise des caractéristiques essentielles des matières premières, telles que la taille des particules, la composition chimique et minérale, est cruciale. En effet, la connaissance approfondie de ces propriétés est essentielle pour évaluer les performances potentielles lors de la fabrication de nouveaux produits ou l'amélioration des produits existants.

Des tests de caractérisation physiques, chimiques et géotechniques clés ont été réalisés sur les matières premières conformément aux recommandations et normes internationales. Ce chapitre présente également une caractérisation des expériences thermiques, mécaniques et physiques menées sur les produits finis, suivant les recommandations et normes internationales.

L'importance de cette étude réside dans sa contribution à la compréhension approfondie des propriétés intrinsèques des matériaux à toutes les étapes de la production. La sélection judicieuse des matières premières, basée sur une connaissance approfondie de leurs propriétés, sert de fondement à la création de produits finis de haute qualité. Ces résultats contribuent non seulement à l'avancement des connaissances dans le domaine, mais également à l'amélioration continue des processus de fabrication et à la conception de produits plus performants et durables.

2. Propriétés des matériaux

2.1. Argile



Figure III.1. Argile utilisée pour fabriquer les échantillons

L'argile utilisée est une argile extraite d'une des carrières des environs du village de Gog de la commune de Balidat Ameer, wilaya de Touggourt, Algérie (figure III.1).

Latitude 32,8729611°; longitude 5,9107017° et altitude 94,3165394 m

L'argile utilisée a été soumise aux expériences suivantes :

La densité apparente et la densité absolue.

L'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie.

Les limites d'Atterberg.

La composition chimique et l'analyse minérale.

2.1.1. Densité apparente et densité absolue

Cette expérience a été menée sur la base des normes NF P 94-053 et NF P 94-054 [75].

Les résultats de cette expérience sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Densité apparente et densité absolue

Densité apparent	Densité absolue
1258 kg/m ³	2828.57 kg/m ³

2.1.2. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie

La structure granulaire de ce sol a été évaluée à l'aide des expériences d'analyse granulaire par tamisage et sédimentométrie.

La première expérience concerne la partie grossière du sol avec un diamètre de grain supérieur à 0,08 mm et pour les sols fins avec un diamètre de grain inférieur à 0,08 mm nous avons appliqué la deuxième expérience.

Ces expériences basées sur les normes NF P94-056; NF P94-057 [75].

Les résultats de ces expériences sont représentés dans le tableau et la courbe suivante :

Tableau III.2. Analyse granulométrique et sédimentométrique de l'argile

Analyse par	diamètre de tamis (mm)	Tamisât %
Tamisage	5	100
	2	100
	1	100
	0.4	99
	0.2	98
	0.1	96
	0.08	95
Sédimentation	0.075	95
	0.055	82
	0.038	78
	0.025	78
	0.017	76
	0.012	73
	0.008	69
	0.006	65
	0.004	65
	0.003	58
	0.002	36
	0.001	9
	0.0005	4

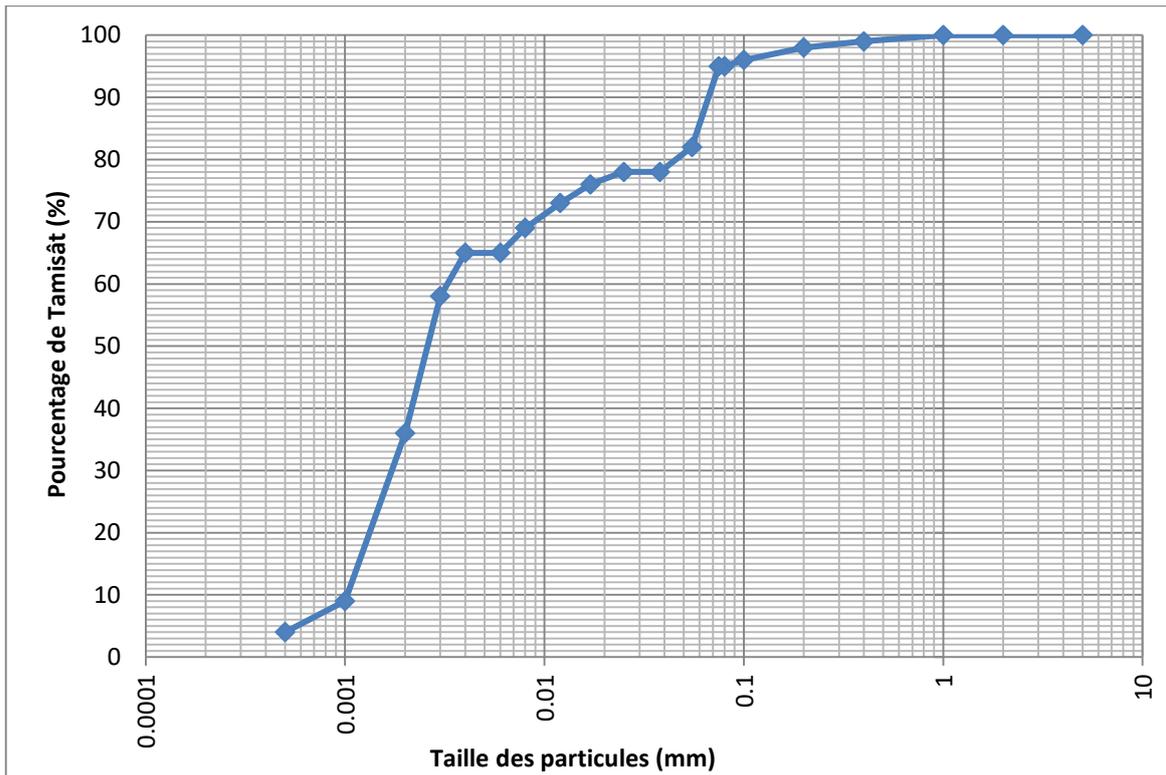


Figure III.2. Courbe d'analyse granulométrique de l'argile

Les résultats de l'expérience montrent que l'argile utilisée est constituée de 2% Sables Gros; 20% Sables Fines ;42% Silts et 36% Argiles.

2.1.3. Expériences des limites d'Atterberg

Ce sol a été soumis à des expériences de limites d'Atterberg afin de déterminer la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité afin de connaître le type de sol sur la base des normes NFP94-051; NFP94-052 [75].

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristique du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action de variation de la teneur en eau .ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 0.4 mm.

Les résultats de cette expérience sont représentés dans le tableau suivante :

Tableau III.3. Résultats des expériences sur les limites d'Atterberg

Limite de liquidité W_L	Limite de plasticité W_P	l'indice de plasticité $I_P=W_L-W_P$	type de sol
67.75%	23.98%	43.77%	Argiles très plastiques

Le type de sol est déterminé en fonction de l'abaque de Casagrande.



Figure III.3. Abaque de Casagrande

2.1.4. Analyse chimique et minéral de l'argile

La composition chimique de l'argile et l'analyse minérale à l'aide des techniques la Fluorescence des Rayons X (FRX) et la Diffraction des Rayons X (DRX) respectivement, ont été évaluées au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico Chimique (CRAPC) Laghouat, Algérie.

Tableau III.4. Composition chimique de l'argile

Élément	SiO ₂	CO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CL	SO ₃	MnO	SrO	ZrO ₂	P ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O
Pourcentage (%)	41.10	15.89	15.55	13.83	6.94	2.19	2.16	0.81	0.34	0.3	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02

Le tableau III.4 montre la composition chimique de l'argile que cette argile est constituée principalement de silice, d'aluminium, de carbonate de calcium, de fer et de faibles proportions de potassium, de magnésium et de titane.

Nous avons noté que le pourcentage de silice est dans le champ des recommandations, qui stipule que la silice dans l'argile devrait varier de 35 à 80% [25], car la silice augmente la porosité, nous avons également noté que le pourcentage de fer est inférieur à 10 %, ce qui rend la brique à l'abri du risque d'efflorescence, et il y a un pourcentage de chaux vive, ce qui augmente la dureté de la brique lorsqu'elle se lie et réagit avec la silice [8].

La courbe DRX (figure III.4) montre que l'argile utilisée est principalement constituée de Quartz, Calcite, Kaolinite, Palygorskite et Orthoclase.

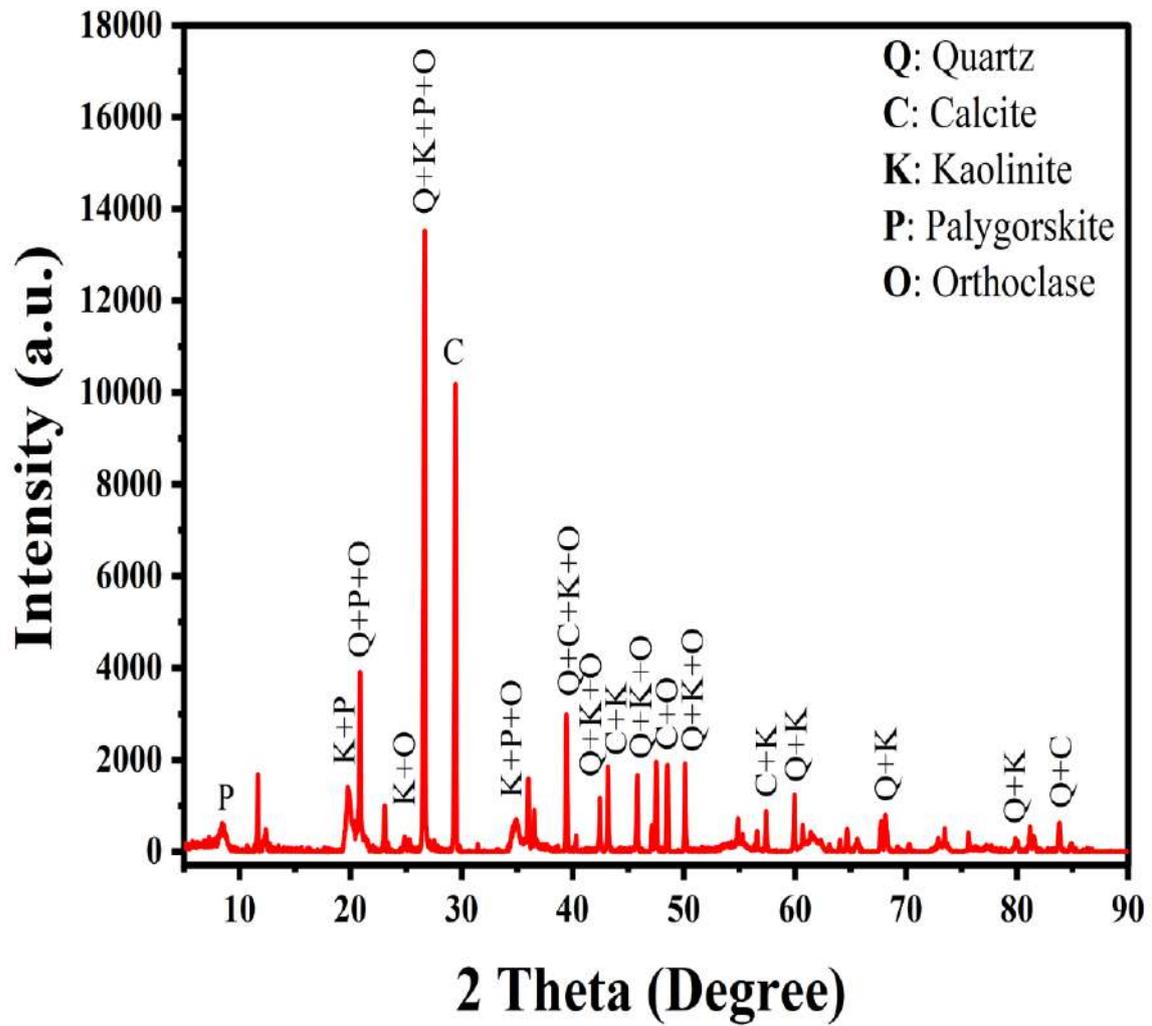


Figure III.4. Courbe DRX de l'argile

2.2. Sable de dune



Figure III.5. Sable de dune utilisé pour la fabrication des échantillons

Le sable utilisé est du sable de dunes extrait d'environs de la commune d'El Oued wilaya d'El Oued, Algérie (figure III.5).

Latitude 33,3656789°, longitude 6,8306318 ° et altitude 254,7922769 m

Le sable utilisée a été soumise aux expériences suivantes :

La densité apparente et la densité absolue.

L'analyse granulométrique par tamisage.

Le module de finesse.

L'équivalent de sable.

L'absorption totale d'eau.

La composition chimique et l'analyse minérale.

2.2.1. Densité apparent et densité absolue

Cette expérience a été menée sur la base les normes NF P 94-053 et NF P 94-054[75].

Les résultats de cette expérience sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.5. Densité apparent et densité absolue

Densité apparent	Densité absolu
1732 kg / m ³	2511.09 kg/m ³

2.2.2. Analyse granulométrique par tamisage

La structure granulaire de ce sol a été évaluée à l'aide des expériences d'analyse granulaire par tamisage.

Cette expérience concerne la partie grossière du sol avec un diamètre de grain supérieur à 0,08 mm. Cette expérience basée sur les normes NF P94-056[75].

Les résultats de cette expérience sont représentés dans le tableau et la courbe suivante :

Tableau III.6. Analyse granulométrique de sable de dune

diamètre de tamis (mm)	Tamisât %
0.8	100
0.4	91.94
0.2	12.44
0.1	0.51
0.08	00

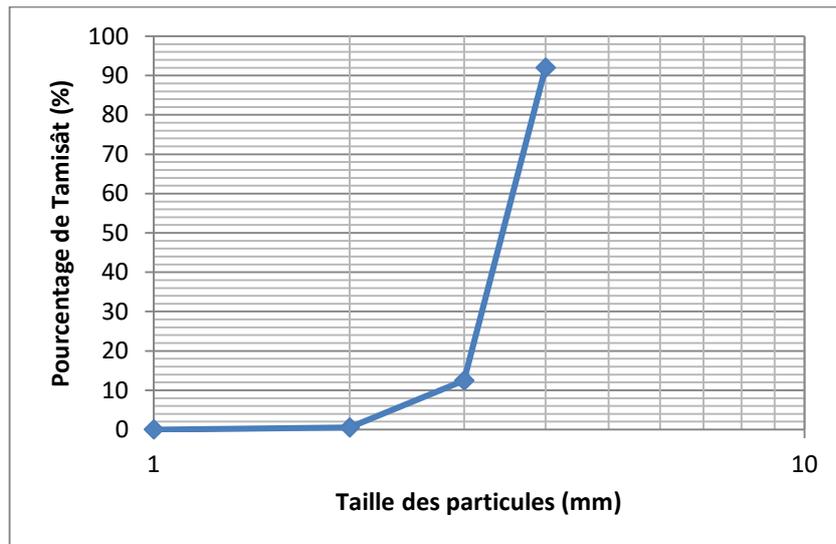


Figure III.6. Courbe d'analyse granulométrique du sable de dune

Les résultats de l'expérience montrent que le sable utilisé est constitué de 87.56% sable grossier et 12.44% sable fin.

2.2.3. Module de finesse

Cette expérience basée sur les normes NFP18-304[75].

Les résultats obtenus à partir de cette expérience indiquent un module de finesse MF de 0.95, ce qui signifie que ce sable est très fin et a un gradient de grain étroit.

2.2.4. Équivalent de sable

Cette expérience basée sur les normes NFP18-598[75].

Les résultats obtenus à partir de l'expérience d'équivalent de sable montrent que ce sable a un équivalent de $E_s=95,12\%$, ce qui signifie qu'il s'agit d'un sable très propre.

2.2.5. Absorption totale d'eau

Cette expérience est basée sur les normes NF P18-554 et ASTM D570 [75],[76].

Les résultats obtenus à partir de l'expérience de l'absorption totale d'eau montrent une absorption d'eau de 0.91%. Cela montre la faible absorption d'eau du sable de dunes.

Tableau III.7. Propriétés physiques du sable de dune

Propriété	Densité apparente	Densité absolue	Equivalente de sable	Module de finesse et Type de sable	Absorption d'eau
Valeur	1732 kg/m ³	2511.09 kg/m ³	95.12% sable très propre	0.95 Le sable est très fin et a un gradient de grain étroit	0.91%

2.2.6. Composition chimique et analyse minérale du sable de dune

La composition chimique de l'argile et l'analyse minérale à l'aide des techniques FRX et DRX respectivement, ont été évaluées au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico Chimique (CRAPC) Laghouat, Algérie.

Tableau III.8. Analyse chimique du sable de dune

Élément	SiO ₂	CaO	CO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	ZrO ₂	Sc ₂ O ₃	SrO	MnO
Pourcentage (%)	73.59	15.86	4.45	2.66	1.47	0.71	0.6	0.27	0.16	0.04	0.02	0.02	0.02

Le tableau III.8 montre la composition chimique du sable utilisé, montrant que ce sable contient principalement de la silice; du carbonate de calcium et de faibles proportions d'aluminium, de soufre et de fer.

Nous avons noté les fortes proportions de silice puis de carbonate de calcium dans une moindre mesure, ce qui va contribuer à une augmentation de la résistance mécanique du produit fini, ce qui est prouvé par le chercheur Mekhermeche et al. [48]. Ce sable contribue à une augmentation des propriétés mécaniques de la brique cuite, le pourcentage de silice contribue également à une augmentation de la porosité du produit fini, ce qui a un effet positif sur les propriétés thermiques de la brique [8].

La courbe DRX (figure III.7) montre que le sable utilisé est principalement constitué de Quartz, Calcite et Alumina.

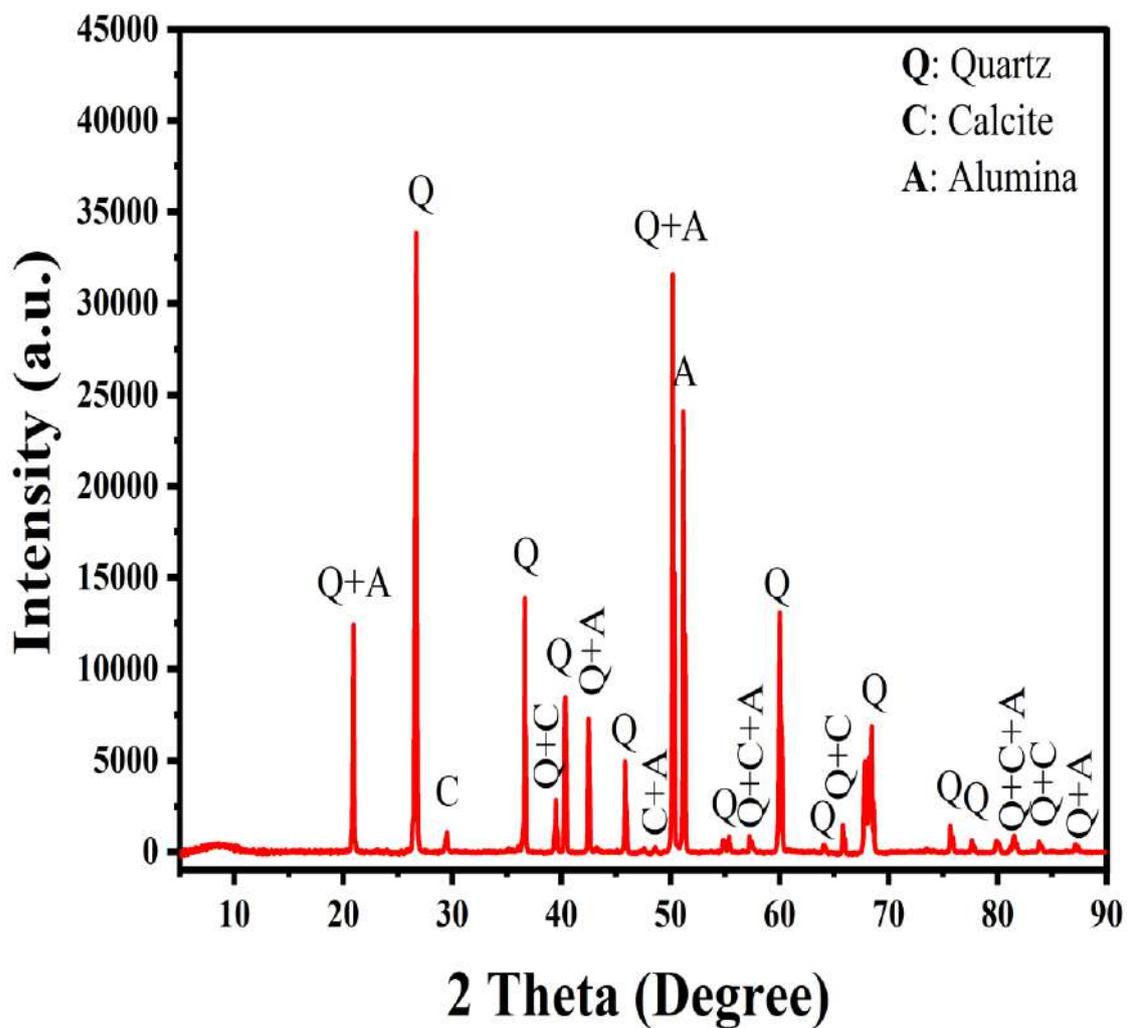


Figure III.7. Courbe DRX du sable de dune

2.3. La Chaux



Figure III.8. La chaux éteinte utilisée pour faire des échantillons

La chaux utilisée est de la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$, il est produite par la société Anatarcho, Tunisie. Il a été importé par la société de trefilage de wilaya de Tébessa, Algérie (figure III.8).

La fiche technique des propriétés chimiques et physiques de la chaux a été prise par la société importatrice.

2.3.1. Propriétés physiques et chimiques de la chaux

La fiche technique de la chaux utilisée est résumée dans le tableau III.9 et tableau III.10

Tableau III.9. Analyse physique [77]

Finesse (% en poids)	Densité Apparente
98% passing 0.2 mm	555 kg/m ³

Tableau III.10. Analyse chimique [77]

Élément	CaO	CO ₂ R	K ₂ O+NaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	H ₂ O R	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
Pourcentage (%)	73.12	15.23	0.05	0.32	0.05	0.06	0.02	0.3	64.84	34.61

Nous avons noté que la chaux utilisée contient un grand pourcentage de chaux vive, ce qui la rend de haute qualité, car cet élément est associé à la silice pour former une structure de dureté élevée et il agit également pour augmenter la vitesse de fusion des éléments minéraux pendant le processus de combustion et travaille également pour augmenter la porosité de la brique [8],[25], [78].

2.4. L'eau

L'eau utilisée est l'eau du robinet des maisons de wilaya d'El Oued, en Algérie.

L'analyse chimique de celui-ci a été évaluée dans un laboratoires de la compagnie algérienne des eaux dans wilaya d'El Oued [79].

2.4.1. Propriétés de l'eau

L'eau utilisée est exempt de substances nocives telles que les huiles, les graisses, les sels, les acides, les alcalis, les substances organiques, le liège et les matériaux mous, qu'ils soient dissous ou en suspension. Son analyse chimique et son pH sont indiqués dans le tableau III.11.

Tableau III.11. Concentrations des éléments minéraux dans l'eau [79].

Élément	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	PH
Concentration (mg / l)	120.24	72.915	4	92	276.533	12.98	328.632	85.4	7.29

2.5. Additifs et déchets

Nous avons utilisé six types de déchets sous deux formes, poudres et granulés, présentés comme suit :

2.5.1. Granulés et poudre de caoutchouc synthétique

obtenus par recyclage de pneus dans l'un des ateliers de recyclage de wilaya de Bejaïa ont été combinés sous deux formes, granulés et poudre (Figure III.9) .



Figure III.9. Déchets de pneus , granulés et poudre de caoutchouc synthétique

2.5.2. Poudre de verre

Obtenue à partir des déchets d'ustensiles ménagers en verre transparent après broyage. Les éléments en verre ont été écrasés après que de petits fragments aient été brisés par une meule électrique (Figure III.10).



Figure III.10. Déchets de verre et poudre de verre

2.5.3. Granulés de polystyrène

Obtenus à partir des plaques de protection fixées à de nombreux appareils électroménagers. Nous avons utilisé de la meule électrique qui préserve la forme sphérique des granulés. (figure III.11)



Figure III.11. Déchets de polystyrène et granulés de polystyrène

2.5.4. Poudre de bois de palmier dattier 1

Il a été obtenu en écrasant la tête sèche de l'arbre, qui est retirée du palmier dattier pendant le processus de nettoyage, qui est largement disponible dans la région.

Le bois de palmier était écrasé après avoir été coupé en petits morceaux par une meule électrique (figure III.12).



Figure III.12. Déchets de bois de palmier dattier 1 et poudre de bois de palmier dattier 1

2.5.5. Poudre de bois de palmier dattier 2

Il a été obtenu en broyant les résidus de grappes de dattes, qui sont retirés des palmiers après la récolte, et est largement disponible dans la région.

Le bois de palmier a été broyé directement par une meule électrique (figure III.13) .



Figure III.13. Déchets de bois de palmier dattier 2 et poudre de bois de palmier dattier 2

2.5.6. Poudre de plante Alfa

La plante Alfa [80] que l'on trouve en abondance dans le désert de la région, car elle est collectée en grande quantité pour être utilisée dans l'industrie papetière, comme c'est le cas dans l'Entreprise Nationale de Cellulose et de Papier Sparte à Kasserine, en Tunisie, voisine de la zone d'étude [28].

Chapitre III: Caractéristiques des matériaux utilisés et méthode des essais thermiques, mécaniques et physique de briques

Les fibres Alfa ont été broyées après avoir été coupées en petits morceaux par une meule électrique.(Figure III.14)



Figure III.14. Plante Alfa , Processus de broyage et poudre de plante Alfa

La masse volumique apparente et absolue de ces déchets a été évaluée par les normes NF P 94-054; NF P 94-053[75].

L'absorption totale d'eau a été déterminée sur la base des normes NF P18-554 et ASTM D570[75],[76].

La structure granulaire de ces déchets a été évaluée à l'aide d'une expérience d'analyse granulaire basée sur les normes NFP94-056[75].

2.5.7. Propriétés des additifs de déchets

Les caractéristiques physiques des déchets usagés sont indiquées dans le tableau III.12 et tableau III.13.

Tableau III.12. Propriétés physiques des additifs et déchets

Les Déchets Additifs	Densité apparente	Densité absolue	Taux d'absorption d'eau
Granulés de caoutchouc	480 kg/m ³	666.67 kg/m ³	négligeable
Poudre de caoutchouc	460 kg/m ³	500 kg/m ³	négligeable
Poudre de verre	1540 kg/m ³	1925 kg/m ³	négligeable
Granulés de polystyrène	14 kg/m ³	20.59 kg/m ³	négligeable
Poudre de bois de palmier dattier 1	155 kg/m ³	588.26 kg/m ³	243.13%
Poudre de bois de palmier dattier 2	400kg/m ³	520kg/m ³	210.24%
Poudre de plante Alfa	490 kg/m ³	594.59 kg/m ³	140%

Tableau.III.13. Analyse granulair des additifs et déchets

Taille des particules (mm)	Pourcentage de poids (%)						
	$5 \geq D \geq 2.5$	$2.5 \geq D \geq 0.8$	$0.8 \geq D \geq 0.4$	$0.4 \geq D \geq 0.2$	$0.2 \geq D \geq 0.1$	$0.1 \geq D \geq 0.08$	$0.08 \geq D$
Granulés de caoutchouc	1.2	83.33	15.47	00	00	00	00
Poudre de caoutchouc	00	1.5	73.2	18.1	5.2	1.6	0.4
Poudre de verre	00	11.16	40.42	38.32	8.84	00	1.26
Granulés de polystyrène	100 ($3.15 \geq D \geq 2.5$)	00	00	00	00	00	00
Poudre de bois de palmier dattier1	00	82.13	10.62	5.32	1.93	00	00
Poudre de bois de palmier dattier 2	00	44.13	23.61	19.06	5.72	1.46	6.02
Poudre de plante Alfa	00	00	67.66	16.32	6.24	5.42	4.36

3. Préparation des échantillons

3.1. Expérience préliminaire

Sur la base de l'examen de diverses études et publications antérieures, notre travail porte sur l'investissement dans l'efficacité thermique des sols bruts constitués principalement d'argile et de sable de dune, qui sont abondants dans la zone d'étude, et sur leur exploitation pour fabriquer des briques de terre calorifuges en développant sa structure poreuse en y incorporant divers déchets, et en essayant de préserver ses propriétés physiques et mécaniques dans le champ des recommandations.

La brique de terre cuite peut également être considérée comme respectueuse de l'environnement, bien que sa consommation d'énergie, en particulier les processus de séchage et de combustion, mais dans tous les cas, ils restent inférieurs à l'énergie consommée dans la production de ciment et de chaux par exemple. De plus, ils n'émettent pas d'émissions importantes lors des processus de combustion en raison de leur dépendance au gaz naturel, considéré comme l'une des énergies les plus propres exploitées[25].

À cette fin, nous avons combiné cinq types de déchets à l'intérieur de la matrice d'argile et de sable afin d'améliorer sa structure poreuse en augmentant l'air emprisonné à l'intérieur des blocs de briques cuites pour l'utiliser dans le processus d'isolation thermique. Nous avons également utilisé de la chaux comme stabilisant chimique dans son pourcentage minimum dans la plage recommandée de 6% pour aider à augmenter la cohésion entre les différents composants du mélange et réduire le risque de fissures pendant le processus de séchage. Il a également un rôle dans l'augmentation de la vitesse de fusion pendant le processus de combustion. Il agit également pour augmenter la porosité du produit final. La chaux est l'un des stabilisants les plus appropriés pour les sols cohésifs [9],[25],[42].

Nous avons utilisé des granulés et des poudres de caoutchouc synthétique, nous avons également utilisé de la poudre de bois de palmier dattier¹, de la poudre de plante alfa, de la poudre de verre et des granulés de polystyrène.

Les échantillons qui ont été complétés sont des échantillons de briques de terre solides comprimées par un compresseur manuel attaché à un compresseur hydraulique qui exerce des forces de pression allant jusqu'à 1,2 MPa. Les échantillons ont été séchés pendant 30 jours à l'air libre. Puis ils ont brûlé dans un four d'une des briqueteries (STB) de Touggourt jusqu'à 850 degrés Celsius.

Des déchets ont été ajoutés à raison de 10% des poids de la matrice du sol (argile + sable). Ce pourcentage a été adopté selon les études précédentes, où les chercheurs [35] et al., prouvent que lors de l'ajout de fibres de plus de 15 %, cela affecte de manière significative les performances mécaniques du produit final. Les chercheurs [42] et al., prouvent également que l'ajout de 10% de fibres végétales maintient le produit final dans la plage admissible de performances mécaniques. Le chercheur [81] a également prouvé qu'en ajoutant des fibres de 16 %, le produit final reste dans les zones recommandées dans les normes des matériaux de construction utilisés dans les travaux de construction non porteurs (ASTM C109 / C 109M-98) malgré ses propriétés mécaniques réduites.

Aussi, ce rapport permet de remarquer les différences de performances des produits finis, ce qui est difficile lors de l'ajout de faibles proportions de ces déchets.

Nous avons également établi le pourcentage de sable de dune ajouté à 25%. Ce pourcentage est typique des performances thermiques, mécaniques et physiques selon les chercheurs [47],[48],[49] comme le sable agit comme un élément inerte pour réduire la plasticité du mélange, ce qui facilite le processus de mélange et de moulage. Il fonctionne également comme élément dégraissant. Il aide à évacuer l'eau pendant le processus de séchage et réduit le taux de retrait pendant le processus de séchage et de combustion, les recommandations stipulent que le sable ne peut pas être ajouté plus de 30% à la brique cuite [25].

En ajoutant des déchets de polystyrène, nous nous sommes appuyés sur le volume moyen d'autres déchets ajoutés afin d'utiliser la comparaison appropriée en raison de sa très faible densité.

Ce travail vise à évaluer véritablement l'effet des additifs résiduels sur les propriétés thermiques, mécaniques et physiques des briques de terre cuite fabriquées. Le travail vise également à comparer le comportement de divers additifs de déchets.

3.1.1. Proportions des composants des mélanges

des échantillons de brique pleine en terre cuite ont été préparés pour être réalisés avec des échelles 22x10,5x6 cm³ qui étaient basées sur les normes EN 771-1 et NF P13-305[82], [26].

Un mélange a été préparé pour produire quatre modèles d'échantillons témoins et sept modèles d'échantillons contenant divers déchets.

Le premier échantillon témoin contenait 100% d'argile. Cet échantillon n'a pas été brûlé .

Le deuxième échantillon témoin contenait du sable et de l'argile. Cet échantillon n'a pas été brûlé. La proportion de sable représentait 25% du poids de la matrice (argile et sable) afin d'étudier l'effet du sable sur les propriétés de l'échantillon.

Le troisième échantillon témoin contenait de l'argile et du sable. Cet échantillon a été brûlé afin d'étudier l'effet de la combustion sur les propriétés de l'échantillon.

Le quatrième échantillon témoin contenait du sable, de l'argile et de la chaux. L'ajout de chaux au pourcentage minimum recommandé de 6% du poids de la matrice (sable + argile) [9]. Il a été brûlé afin d'évaluer l'effet de la chaux sur les propriétés de l'échantillon ainsi que l'effet de la combustion de la chaux sur ces propriétés.

Les sept échantillons restants contenaient 25% de sable de dune, 75% d'argile, 6% de chaux du poids de la matrice du sol (argile + sable) et 10% de déchets végétaux ou industriels du poids de la matrice du sol afin d'étudier l'effet de différents déchets sur les propriétés thermiques, mécaniques et physiques des échantillons, ainsi que de comparer les résultats de l'effet de différentes fibres.

À l'exception d'un seul échantillon, nous avons ajouté 3% de poudre de verre, en plus des 10% de poudre de bois de palmier, afin d'étudier dans quelle mesure les deux poudres se complètent pour obtenir de meilleurs résultats que si elles étaient seules. Ce formulaire a été ajouté après une lecture préliminaire des résultats des échantillons précédents.

Le tableau III.14 montre les composants et leurs rapports au poids total de l'échantillon, à l'exception du pourcentage de polystyrène qui a été ajouté en conséquence du rapport au volume total. Le pourcentage de polystyrène a été évalué par la taille correspondent au volume moyen des autres fibres ajoutées au volume total de l'échantillon, soit environ 30% du volume de la brique fabriquée.

Tableau III.14. Pourcentages des compositions des échantillons

L'échantillon	Matrice du sol	Chaux (%)	Déchets et additifs (%)
		Ajout Par rapport au poids du matrice sol	
Témoin 1 ,Non cuite	100% Argile	0	0
Témoin 2 ,Non cuite	75% Argile+25% sable de dune	0	0
Témoin 3		0	0
Témoin 4		6	0
Agrégat de caoutchouc		6	10
Poudre de caoutchouc		6	10
Poudre d'Alfa		6	10
Poudre de Bois de Palmier Dattier		6	10
Poudre de verre		6	10
Agrégat de polystyrène		6	(w=7grame 30% en volume total)
Poudre de verre + Poudre BPD		6	3% poudre de verre+10% PBPD

3.1.2. Préparation des échantillons

Lors de la première étape, l'argile a été broyée à la meule électrique pour former un mélange homogène avec le reste des ingrédients. Les fibres et les déchets supplémentaires ont été immergés dans l'eau pendant 24 heures jusqu'à ce qu'elle atteigne le degré de saturation. Un mélange initial d'argile broyée, de sable et de chaux s'est formé. Il a été mélangé à la main sur sa forme sèche jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Ensuite, de l'eau a été ajoutée. La teneur en eau (W) trouvée était proche de la valeur donnée par la formule suivante : $W=(LL+PL)/ 2$. Il s'agit de la valeur moyenne entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Cette formule a été utilisée dans divers travaux antérieurs [42],[83],[84]. Ensuite, les fibres saturées d'eau ont été ajoutées. Le mélange a été soigneusement mélangé jusqu'à ce qu'il atteigne sa forme homogène.

Le mélange a été placé dans le moule à piston à travers trois couches avec un processus de compactage manuel par une pièce en bois. Ensuite, l'échantillon a été pressé par un piston

manuel hydraulique, qui applique une force d'empilement allant jusqu'à un maximum de 1,2 MPa. (figure.III.15)



Figure III.15. Dispositif de pression utilisé pour effectuer les échantillons exerce une pression allant jusqu'à 1,2 MPa

Après avoir extrait l'échantillon, nous l'avons laissé sécher à l'air libre à l'abri du soleil pendant 30 jours afin de terminer le processus de réaction de la chaux [9]. Après cela, les échantillons ont été transportés à la usine de brique (STB) dans la province de Touggourt de procéder au processus de combustion des échantillons. Ces échantillons ont été brûlés dans un four tunnel à des températures allant jusqu'à 850 degrés Celsius. (figure III.16)



Figure III.16. Cuisson des échantillons dans un four Tunnel, à une température allant jusqu'à 850 degrés Celsius

Un mélange a été préparé pour compléter quarante-quatre (44) échantillons de briques de terre selon onze (11) modèles. Quatre échantillons ont été complétés pour chaque modèle

afin de donner plus de précision aux résultats des expériences, où la moyenne arithmétique des résultats de chaque modèle est prise. (Figure III.17)



Figure III.17. Échantillons complétés

Les échantillons ont été soumis à des expériences de densité apparente, de retrait longitudinal et diagonal ,de conductivité thermique ,de chaleur spécifique ,de diffusivité thermique ,de résistance thermique , de résistance à la compression ,de résistance à la flexion, d'absorption totale d'eau et d'absorption capillaire d'eau.

3.2. Expérience finale 1

Grâce aux résultats d'expériences préliminaires, l'efficacité de deux déchets a été démontrée dans l'amélioration des propriétés thermiques, physiques et mécaniques des échantillons de briques de terre cuite, où la poudre plante Alfa donnait les meilleures performances thermiques des échantillons et la poudre de verre les meilleures performances physiques et a également maintenu ses performances mécaniques bien.

Pour cette raison, nous avons mené d'autres expériences dans lesquelles nous nous concentrons sur ces éléments de déchets uniquement en étudiant l'efficacité de leur ajout et leur impact sur les propriétés thermiques, physiques et mécaniques des échantillons de briques de terre cuite, ainsi qu'en déterminant les proportions optimales d'additifs et en étudiant la faisabilité de collecter ces déchets dans un seul produit pour se compléter les uns les autres afin d'obtenir un produit optimal.

Nous avons gardé les mêmes proportions des composants de la matrice du sol, le mélange a été stabilisé avec un pourcentage de chaux pour l'exploiter pour améliorer la plasticité du mélange, il contribue également à accélérer la fusion du mélange lors de la combustion et augmente également la porosité du produit final[25].

Quant aux déchets et additifs, ils ont été ajoutés à raison de 0 à 15% du poids de la matrice du sol pour la poudre plante Alfa, de 0 à 10% pour la poudre de verre et de 0 à 10% pour la chaux.

À travers ce travail, nous cherchons à évaluer véritablement l'étendue et l'efficacité de l'impact des déchets et des additifs de la matrice du sol sur les propriétés thermiques, mécaniques et physiques de la brique de terre cuite fabriquée.

La méthode de plans des expériences par un logiciel statistique appelé "Statgraphics" (figure III.18) a été utilisée pour modéliser l'expérience et analyser ses résultats afin que le programme détermine le type et le pourcentage de déchets responsables des résultats et tente d'améliorer les résultats en suggérant les rapports de mélange typiques et les résultats attendus .

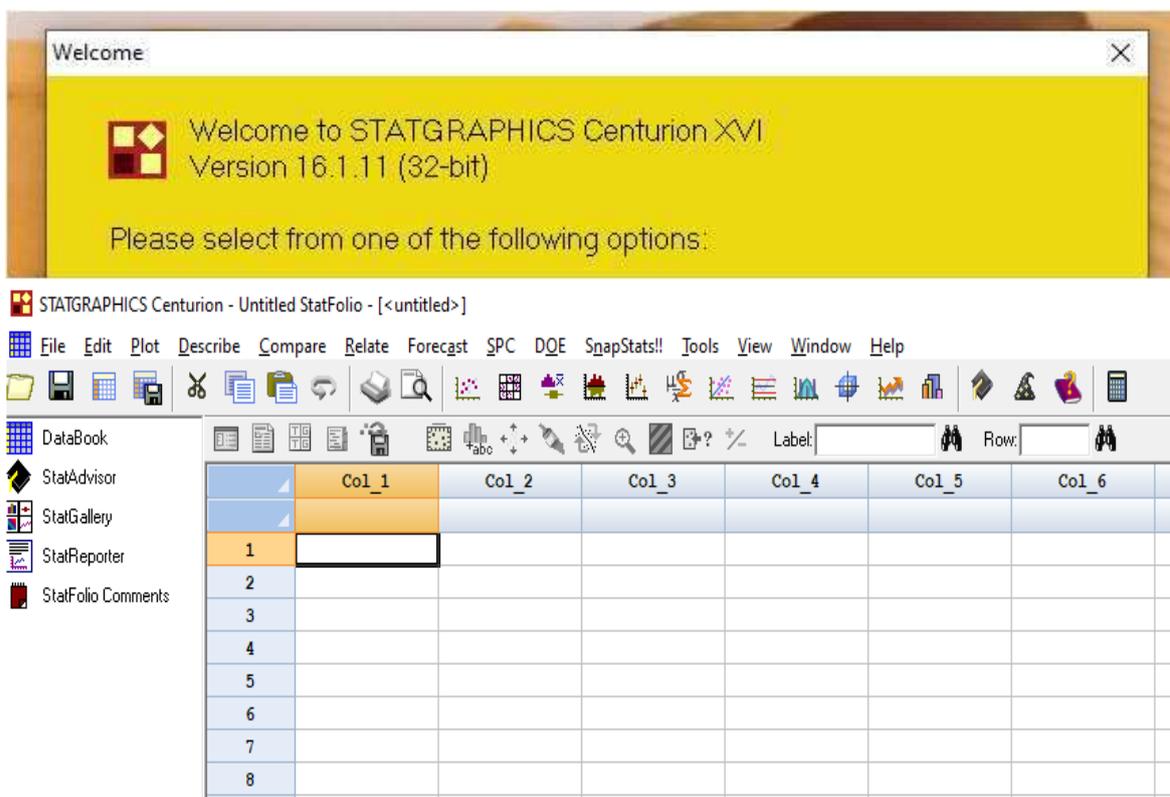


Figure III.18. Interface du logiciel statistique utilisé dans la modélisation expérimentale

3.2.1. Proportions des composants des mélanges

Des échantillons de briques pleines en terre cuite ont été préparés pour être fabriqués avec des échelles de 22x10, 5x6 cm³ qui étaient basées sur les normes EN 771-1 et NF P13-305[82].

Un mélange a été préparé pour produire neuf modèles d'échantillons contenant différents composants. Ces modèles et leurs composants sont proposés par le programme "Statgraphics".

Le tableau III.15 montre les composants et leurs rapports au poids total de la matrice du sol.

Tableau III.15. Pourcentages des compositions des échantillons

Echantillon	Matrice du sol	Poudre d'Alfa (%)	Poudre de verre (%)	Chaux (%)
		Ajout Par rapport au poids du matrice sol		
Témoin	75% Argile+25% sable de dune	0	0	0
Alfa		15	0	0
Verre		0	10	0
Chaux		0	0	10
Alfa + Chaux		15	0	10
Alfa + Verre		15	10	0
Verre + Chaux		0	10	10
Verre +Chaux +Alfa		15	10	10
1/2Verre+1/2Chaux+1/2Alfa		7.5	5	5

3.2.2. Préparation des échantillons

Dans la première étape, l'argile a été broyée par une meule électrique pour former un mélange homogène avec le reste des ingrédients. Les déchets supplémentaires ont été immergés dans l'eau pendant 24 heures jusqu'à saturation. Un mélange initial d'argile broyée, de sable (et de chaux) a été formé. Il a été mélangé à la main à l'état sec jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Ensuite, de l'eau a été ajoutée. Sa teneur en eau optimale (OMC) a été évaluée selon les résultats de l'expérience de Proctor Standard. Ensuite, les déchets saturés d'eau ont été ajoutés. Le mélange a été soigneusement mélangé jusqu'à atteindre sa forme homogène.

Le mélange a été placé dans le moule à piston, puis l'échantillon a été pressé par un piston manuel hydraulique, appliquant une force de compactage allant jusqu'à un maximum de 1,2 MPa (figure III.15).

Après l'extraction de l'échantillon, nous l'avons laissé sécher à l'air libre, à l'abri du soleil, pendant 30 jours afin de compléter le processus de réaction à la chaux [9]. Ensuite, les échantillons ont été transportés à l'usine de briques (STB) dans la province de Touggourt pour effectuer le processus de cuisson des échantillons. Ces échantillons ont été brûlés dans un four tunnel à des températures pouvant atteindre 850 °C (figure III.19).

Un mélange a été préparé pour réaliser trente-six (36) échantillons de briques en terre cuite selon neuf (9) modèles. Quatre échantillons ont été réalisés pour chaque modèle afin de donner plus de précision aux résultats des expériences, où la moyenne arithmétique des résultats de chaque modèle est prise (figure III.19).



Figure III.19. Échantillons complétés sous forme finie

Les échantillons ont été soumis à des expériences de densité apparente, de retrait longitudinal et diagonal, de conductivité thermique, de chaleur spécifique, de diffusivité thermique, de résistance à la compression, de résistance à la flexion, d'absorption totale d'eau et d'absorption capillaire d'eau.

3.3. Expérience finale 2

Après avoir étudié et analysé les résultats des échantillons lors d'expériences précédentes, il a été découvert l'impact négatif significatif que l'ajout de chaux jouait sur les propriétés mécaniques des échantillons (résistance à la compression et flexion) et dans une moindre mesure sur les propriétés physiques (absorption totale et capillaire d'eau), malgré son bon effet sur les propriétés thermiques, ainsi que l'amélioration de la plasticité du mélange utilisé dans la fabrication des échantillons.

Dans cette partie du travail expérimental nous avons décidé de ne pas ajouter de chaux pour essayer d'obtenir un produit de brique en terre cuite qui combine de bonnes propriétés thermiques, mécaniques et physiques à la fois.

Nous avons également décidé de produire des échantillons de briques de terre cuite en combinant un autre type de poudre de bois de palmier dattier (N°2), qui est représenté par les restes de palmiers dattiers obtenus après la récolte des dattes (figure III.20), et ce pour le bon impact environnemental du recyclage de ces déchets, qui sont abondants dans la zone d'étude. Ces déchets ont été broyés et transformés en poudre à l'aide de broyeurs électriques (figure III.20). Ces déchets ont été ajoutés dans des proportions confinées au champ de 0 à 15 pour cent du poids de la matrice du sol constitué principalement de 75 % d'argile et de 25 % de sable dune.

Chapitre III: Caractéristiques des matériaux utilisés et méthode des essais thermiques, mécaniques et physique de briques

Des échantillons de briques de terre cuite ont été produits en suivant les mêmes étapes de fabrication lors des expériences précédentes.



Figure III.20. Déchets et poudre de bois de palmier dattier 2

Dans le tableau suivant, nous montrons les composants du mélange avec lequel les échantillons ont été complétés.

Tableau III.16. Pourcentages des compositions des échantillons

Échantillons	Matrice du sol	Pourcentage d'ajout de bois de palmier dattier ² par rapport au poids de la matrice sol.
Argile + Sable	75% Argile+25% sable de dune	0
5% poudre de bois de palmier 2		5
8% poudre de bois de palmier 2		8
10% poudre de bois de palmier 2		10
12% poudre de bois de palmier 2		12
15% poudre de bois de palmier 2		15

Les échantillons ont été soumis à des expériences sur la densité apparente, le retrait longitudinal et diagonal, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, l'absorption totale d'eau et l'absorption capillaire d'eau.

3.4. Expérience finale 3

Après avoir atteint l'échantillon optimal dans l'expérience précédente, qui ne contenait qu'une proportion de 10 % de déchets (poudre de bois de palmier 2), nous avons décidé de réaliser une expérience supplémentaire. Celle-ci consistait à ajouter de la chaux à cet échantillon avec des proportions inférieures à la plage recommandée, dans le but d'obtenir des performances positives pour cet élément. Nous avons décidé de l'ajouter avec des proportions de 0, 2, 4 et 6 % du poids de la matrice du sol. Nous avons suivi les mêmes étapes de fabrication des échantillons, qui ont ensuite été soumis aux mêmes tests expérimentaux.

Tableau III.17. Pourcentages des compositions des échantillons

Échantillons	Matrice du sol	poudre de bois de palmier dattier 2 (%)	Chaux(%)
		Pourcentage d'ajout Par rapport au poids de la matrice du sol	
10% poudre de bois de palmier	75% Argile+25% sable de dune	10	00
10% poudre de bois de palmier+2% Chaux		10	02
10% poudre de bois de palmier+4% Chaux		10	04
10% poudre de bois de palmier+6% Chaux		10	06

4. Essais et procédures expérimentales

4.1. Teneur en eau optimale

Dans cette expérience, nous recherchons la plus faible teneur en eau nécessaire au mélange afin d'obtenir la plus grande densité sèche de l'échantillon, ce qui nous permettrait de mieux exploiter l'énergie de compactage et d'obtenir une structure typique en termes de faible pourcentage de vides, ce qui est très important pour les performances mécaniques des échantillons.

En fait, chacun des mélanges précédents des échantillons a sa propre teneur optimale en eau (OMC), mais dans cette étude, il nous a suffi d'évaluer l'OMC d'échantillon qui contient du sable, de l'argile et de la chaux uniquement en raison de la grande influence de ces éléments et de leurs proportions sur le pourcentage d'eau ajoutée.

Cette expérience, appelée expérience Proctor Normal, a été réalisée sur la base des normes NF P94-093 et NF EN 13286-2. (figure III.21)



Figure III.21. Moule d'expérimentation de Proctor Normal avec son marteau

4.2. Expérience de mesure du retrait

Les processus de séchage et de combustion contribuent de manière significative à la diminution des dimensions des échantillons en raison du retrait, ce qui est important dans les sols argileux mous. Le séchage provoque le plus grand retrait dû à la sortie d'eau libre et d'eau capillaire des échantillons, ce qui entraîne une convergence entre les grains du sol formant la brique pour combler le vide laissé par l'eau. Les taux de retrait linéaire des briques cuites varient de 5 à 8% (selon la nature minérale de l'argile, la teneur en éléments dégraissants, La teneur en eau formée et la pression que subit l'argile lors de son passage dans le moule) [25]. Le taux de retrait est significativement corrélé avec le rapport de l'absorption totale d'eau ainsi que la relation entre eux est directe [25].

Dans cette expérience, nous évaluons la déformation relative des dimensions des échantillons après séchage et combustion.

Dans cette expérience, nous avons calculé les pourcentages de retrait longitudinal et diagonal des échantillons de briques cuites après le processus de combustion, c'est-à-dire après avoir atteint sa forme et ses dimensions finales.

Ce procédé de mesure est réalisé selon les normes NF P15-433 (1994) et ASTM C326-09 (2014).

4.3. Expérience de détermination de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique

Le dispositif CT mètre a été utilisé pour déterminer la conductivité thermique et la chaleur spécifique des blocs de briques cuites fabriqués. Ce dispositif a été développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en Grenoble. Il est basé sur la méthode de l'état transitoire via la technologie du fil chaud. (figure III.22)



Figure III.22. CT mètre et sa Sonde

Les normes adoptées dans cette expérimentation sont NF EN 993-15 et ISO 8894-1

Le principe de fonctionnement du dispositif est basé sur le placement d'une sonde à l'intérieur de deux échantillons identiques du matériau dont la conductivité thermique doit être mesurée. Cette sonde contient un fil à résistance thermique qui libère une quantité spécifique de chaleur Q dans les échantillons. Il contient également un collecteur de chaleur qui mesure les changements de température pendant un certain temps. Grâce aux informations obtenues, l'appareil calcule la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau [85].

- **Diffusivité thermique** (D) des échantillons a ensuite été déduite par la relation $D = \lambda / (C_p * \rho)$

C_p est la chaleur spécifique de l'échantillon et ρ la densité apparente de l'échantillon et λ est la conductivité thermique, l'unité de diffusivité est (m^2/s) [86].

- **Résistance thermique** (R_t) d'un mur hypothétique constitué d'échantillons entrelacés longitudinalement et transversalement (le système le plus courant pour

les blocs de briques solides) a également été déduite l'épaisseur de ce mur est de $e = 22$ cm. la résistance thermique est donnée par la relation $R = e / \lambda$
 λ est la conductivité thermique du matériau formant la paroi[86].

4.4. Expérience de résistance à la compression

Cette expérience recherche la contrainte de pression maximale que les échantillons de briques peuvent supporter. Cela se fait en plaçant l'échantillon entre les mâchoires de la presse et une charge est placée dessus qui augmente progressivement jusqu'à ce que l'échantillon s'effondre. À la fin, grâce au dispositif d'expérimentation, nous pourrions obtenir une courbe de changement de contrainte et de contrainte d'effondrement (réfraction), où $\sigma_c = F / S$.

Cette expérimentation a été réalisée sur la base des normes ASTM C67-03 (2003), NF P18-406 et XP 13-305 (figure III.23).

4.5. Expérience de résistance à la flexion

A travers cette expérience, nous cherchons à déterminer la contrainte de flexion maximale que l'échantillon peut supporter avant son effondrement σ_f adm. Nous nous sommes appuyés sur une expérience de flexion en trois points où l'échantillon est placé sur deux supports et une force concentrée est exercée sur lui au milieu de la dimension entre les deux supports augmentant progressivement jusqu'à l'effondrement. Nous avons utilisé pour cette expérience la machine de flexion. Elle est donnée par : $\sigma_f = 3FL / (2ba^2)$

Où; F est la force exercée lorsque l'échantillon s'effondre;

L est la distance entre les deux accoudoirs et nous l'avons fixée à 10 cm ;

a et b est une dimensions de section d'échantillon ;

Les normes adoptées dans cette expérimentation sont NF P15-471, NF EN 196-1, NF P18-407 (figure III.23).



Figure III.23. Essai de résistance à la compression et à la flexion

4.6. Expérience d'absorption totale d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau est un élément important pour les blocs de briques réfractaires. Il a un impact significatif sur la durabilité des blocs à travers les cycles de gel dégel de l'eau absorbée. Il affecte également les propriétés thermiques, car il élimine la propriété du matériau d'isolation thermique si son coefficient d'absorption est important lorsqu'il est exposé à l'eau.

L'expérience d'absorption totale a été adoptée sur la base des normes NF P 18-555 et BS3921 (figure III.24).

Cette expérience consiste à déterminer la teneur en eau d'un échantillon de briques après immersion dans l'eau pendant 24 heures à température modérée, où :

$$A_T (\%) = ((P_h - P_s) * 100) / P_s$$

Ph: le poids de la brique est humide après immersion

Ps: le poids de la brique est sec avant immersion

4.7. Expérience d'absorption capillaire d'eau

Cette expérimentation a été réalisée sur la base des normes NF XP P 13-305 (figure III.24).

Le but de cette expérience est de déterminer la capacité des blocs de briques cuites à absorber l'eau à travers la propriété capillaire en aspirant de l'eau dans l'échantillon, où les échantillons sont séchés jusqu'à 65 °C. Ensuite, nous l'avons pesé. Ensuite, il est immergé dans l'eau à travers une couche très mince d'une épaisseur de 5 mm pendant dix minutes. Ensuite, l'échantillon humide est pesé.

Le coefficient d'absorption d'eau par la propriété capillaire est donné par la relation :

$$A_c = ((P_1 - P_0) * 100) / (S * \sqrt{t})$$

Ac: coefficient d'absorption capillaire de l'eau (g / cm².min^{1/2})

P1, P0: la masse d'eau avant et après immersion (gramme)

S: surface immergée dans l'eau (cm²)

t: temps d'immersion par minute (dix minutes)



Figure III.24. Test d'absorption totale et capillaire d'eau

4.8. Analyse d'incertitude (ξ)

L'incertitude pour la valeur moyenne de la mesure est définie comme la somme de l'incertitude de l'appareil et de l'incertitude provenant de trois mesures répétées (ξ). Cette dernière est calculée selon la formule suivante :

$$\xi = \text{Max}(|\text{Val 1} - \text{Val m}|; |\text{Val 2} - \text{Val m}|; |\text{Val 3} - \text{Val m}|)$$

où ξ représente l'erreur de mesure ; Val1, Val2, Val3 sont les trois valeurs mesurées pour les différents tests et Val m est la valeur moyenne.

$$\text{Val m} = (\text{Val1} + \text{Val2} + \text{Val3}) / 3$$

Des expériences destructives n'ont été réalisées que deux fois.

Ci-dessous, nous expliquons l'incertitude associée à chaque appareil utilisé.

Équipement	Incertainitude
Presse hydraulique	$\pm 1 \%$
Dispositif CT mètre	$\pm 5\%$ [85] .
Balance	$\pm 1 \text{ g}$

4.9. Analyse microstructurale

Pour étudier la distribution, la forme et la taille des pores ainsi que la texture des échantillons de briques, une microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée.

L'analyse par dispersion d'énergie des rayons X (EDX ou EDAX) a également été effectuée pour déterminer la composition chimique des échantillons du produit final.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de comprendre les propriétés des matières premières utilisées, conformément aux normes internationales. Ces matières se composent d'argile, de sable de dune, de chaux, d'eau, ainsi que d'un ensemble d'additifs et de déchets.

Les conclusions pouvant être tirées de la caractérisation de ces matières sont les suivantes :

-L'argile utilisée est principalement constituée des minéraux kaolinite, quartz, calcite. C'est une argile très plastique avec une densité apparente de 1258 kg/m³. Sa composition chimique est essentiellement constituée de silice, d'alumine, de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone, et de trioxyde de fer, qui est considéré comme présent dans les limites autorisées, assurant ainsi la sécurité du produit final contre les risques de floraison .

-Le sable utilisé est un sable très fin avec une module de finesse de 0.95. Il est considéré comme très propre, avec une équivalent de sable de 95%. Principalement composé de minéraux de quartz, calcite, et alumine, sa densité apparente est de 1732 kg/m³, et son absorption d'eau est très faible. Sa composition chimique est principalement constituée de silice, alumine, dioxyde de carbone, et monoxyde de carbone.

-La chaux utilisée est de la chaux éteinte, dont les données chimiques ont été obtenues auprès de la société importatrice.

-L'eau utilisée peut être considérée comme de l'eau propre, exempte d'impuretés.

-Les autres additifs et déchets ont été caractérisés en termes de densité apparente, densité absolue, absorption d'eau, et granulométrie.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons discuté des proportions de divers mélanges de matériaux préparés pour la réalisation des échantillons, nous avons également discuté des principaux tests auxquels les produits finis ont été soumis, en utilisant l'essai du CT mètre pour caractériser les propriétés thermiques, et les essais de compression simple et de flexion à trois points pour caractériser les propriétés mécaniques. Certaines propriétés physiques des échantillons ont également été déterminées à travers les essais d'absorption capillaire et totale d'eau.

Ce chapitre, avec les résultats obtenus, a permis la préparation de la synthèse et de la documentation technique pour les différents échantillons.

Chapitre IV

Résultats et interprétations

1. Introduction

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment constitue une problématique cruciale pour répondre aux nouvelles exigences réglementaires. Ainsi, une recherche et un développement ambitieux ont été lancés au cours de la dernière décennie pour améliorer les performances des matériaux de construction.

Ce chapitre se consacre à l'étude des différentes méthodes possibles pour améliorer la résistance thermique des briques en terre cuite, tout en tenant compte des contraintes économiques et environnementales. En effet, l'amélioration de la résistance thermique des briques implique la réduction de la transmission de chaleur, soit par conduction dans le matériau, soit par convection et rayonnement dans l'air.

Parmi les approches utilisées pour atteindre ces objectifs, il a été possible d'obtenir une diminution de la conductivité thermique de la couche en introduisant des formulations dans le mélange de base, créant ainsi des pores dans le matériau. Le développement du concept morphologique de la brique, en réduisant les ponts thermiques et en limitant le transfert par convection thermique dans les cellules, constitue également une autre méthode pour accroître la résistance thermique.

Ce chapitre présente les différentes approches que nous avons adoptées pour améliorer les performances thermiques des briques en terre cuite. Nous exposons les résultats des diverses expériences thermiques, mécaniques et physiques réalisées sur les nouveaux produits. Différents tests de caractérisation ont été effectués d'obtenir un compromis optimal entre les propriétés thermiques, mécaniques et physiques.

En somme, cette recherche vise à élargir notre compréhension des mécanismes qui influent sur les performances thermiques des briques en terre cuite, ouvrant la voie à des avancées significatives dans la conception de matériaux de construction plus efficaces sur le plan énergétique.

2. Résultats des tests de l'expérience préliminaire

Nous listons les résultats obtenus à partir de divers tests dans le tableau VI.1

Tableau IV.1. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience préliminaire

Chapitre IV: Résultats et interprétation

Échantillon	Retrait longitudinal(%)	Retrait diagonal(%)	Absorption capillaire d'eau (g/cm ² .min ^{0.5})	Absorption totale d'eau (%)	Densité apparente (kg / m ³)	Incertitude	Conductivité thermique (W/m.K)	Incertitude	Chaleur spécifique (kj/m ³ k)	Incertitude	Diffusivité thermique (x10 ⁻⁷ m ² /s)	Résistance thermique (m ² .k/w)	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la flexion (Mpa)
Témoin non cuit 1	7.272	7.247	Grande sensibilité à l'eau	Grande sensibilité à l'eau	2129.14	2.62	0.82733	0.02167	1854.1	68.8	4.46	0.26602	6.925	1.323
Témoin non cuit 2	6.136	6.056	Grande sensibilité à l'eau	Grande sensibilité à l'eau	2024.79	4.48	0.764	0.037	1822.65	28.55	4.19	0.28796	7.877	1.494
Témoin 3	7.727	7.617	25.627	12.321	1836.67	12.10	0.48833	0.01167	1322.67	46.1667	3.68	0.45082	33.2065	3.724
Témoin 4	7.272	7.511	56.744	23.0094	1547.81	20.505	0.386	0.02	1188.87	49.7333	3.25	0.56995	4.438	1.712
Poudre de verre	7.272	7.511	61.244	20.886	1567.12	15.34	0.42067	0.01133	1151.83	33.2333	3.65	0.52381	5.703	2.445
Poudre d'Alfa	6.818	7.31	160.561	39.885	1243.31	37.81	0.277	0.012	970.267	16.6667	2.85	0.79422	1.658	0.885
Poudre de bois de palmier dattier 1	8.409	8.612	102.581	40.524	1211.16	13.70	0.31067	0.02133	942.067	40.3333	3.29	0.70968	1.616	0.839
Poudre de verre + poudre BPD1	6.136	6.408	114.396	34.241	1338.09	2.71	0.317	0.02233	1071.17	12.0333	2.96	0.69401	1.752	1.109
Agrégat de caoutchouc	6.59	6.953	89.949	29.356	1376.8	1.93	0.324	0.015	1064.97	25.8667	3.04	0.67901	2.941	1.117
Poudre de caoutchouc	7.727	8.4	72.658	29.879	1378.6	19.80	0.33867	0.03033	1125.4	33.7	3	0.65089	3.887	1.053
Agrégat de polystyrène	7.5	8.043	77.084	24.712	1352.8	26.38	0.33033	0.00933	1074.63	55.9333	3.07	0.66667	1.831	1.214

2.1. Densité apparente (ρ)

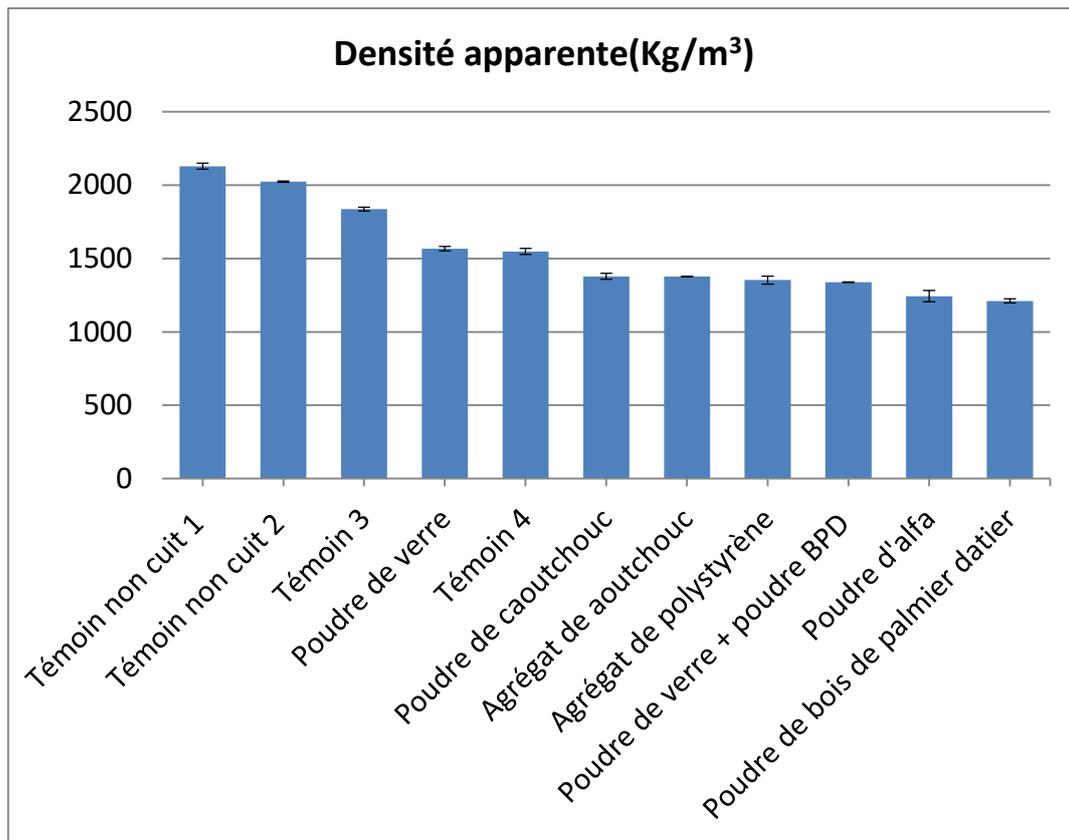


Figure IV.1. Densité apparente

Il est clairement montré à travers le diagramme (figure IV.1) que l'ajout de sable à l'argile a entraîné une diminution de la densité de l'échantillon d'environ 5%, ce qui rend les blocs de construction moins lourds car le sable a une densité absolue inférieure à celle de l'argile, et le processus d'ajout de chaux et de combustion de l'échantillon a entraîné une diminution de la densité de plus de 23% du poids du deuxième échantillon témoin. Cela s'explique par la fonction de combustion de la fusion du mélange, la décomposition de la matière organique, la destruction des minéraux argileux, la sortie de l'eau résiduelle et de l'eau de formation et la décomposition du carbonate de calcium, et c'est ce que le chercheur [25] a prouvé.

L'ajout de chaux contribue également à augmenter la vitesse de fusion lors de la combustion et augmente également la porosité du produit final, ce qui est prouvé par les chercheurs [25] [42].

On remarque que tous les granulés et poudres pour déchets ajoutés ont contribué à réduire la densité du produit final dans des proportions variables. Cette diminution atteint une valeur allant jusqu'à 1243,31 kg/m³ et 1211,55 kg/m³ de plus de 19,67% et 21,75% du poids du quatrième échantillon témoin lors de l'augmentation de la poudre de plante d'Alfa et de la poudre de bois de palmier dattier¹, respectivement, en raison de la facilité de combustion et de décomposition de ces deux éléments pendant le processus de combustion. Contrairement aux granulés de caoutchouc ajoutés, bien que sa densité soit presque égale à

celle de l'Alfa, la densité du produit final était plus grande en raison de l'absence de décomposition complète de ces déchets. On sait que les fibres végétales ont généralement une température de combustion plus basse et des cendres plus faibles.

Presque tous les échantillons contenant des additifs étaient moins denses que la gamme de briques solides cuites commerciales qui indique que $\rho \in [1600; 2000] \text{ kg/m}^3$ [82] ,[28],[87].

2.2. Retrait

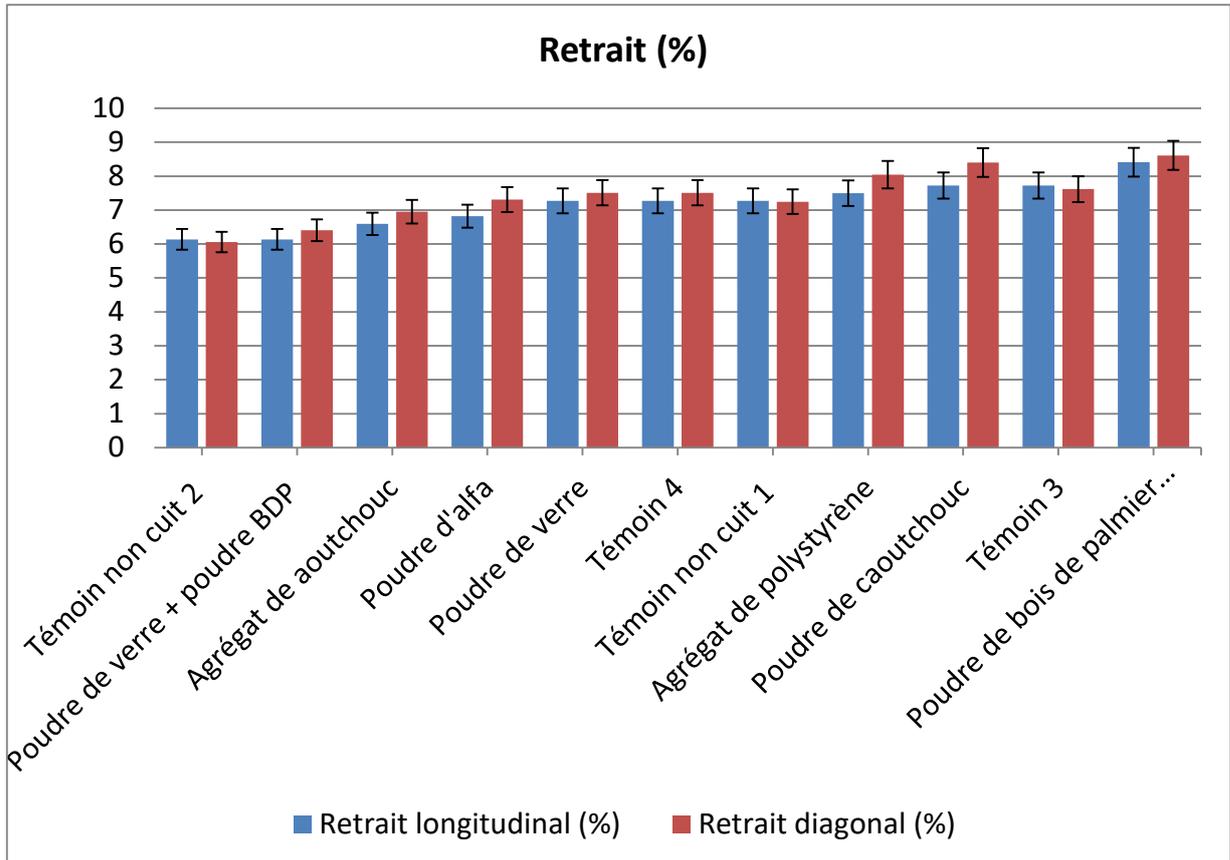


Figure IV.2. Retrait

Sur le diagramme (figure IV.2), il est remarquable que l'ajout de sable à l'échantillon diminue la valeur de retrait. Cela est clairement illustré par le taux de retrait du deuxième échantillon témoin.

D'autre part, nous constatons que l'incorporation de chaux ainsi que de la plupart des déchets et différents additifs aux échantillons a contribué à réduire le taux de retrait longitudinal et diagonal. Cette observation s'explique par le fait que ces additifs améliorent la plasticité de la pâte de fabrication, réduisant ainsi la quantité d'eau nécessaire pour le mélange. De plus, ils absorbent une partie des contraintes et des fissures qui pourraient se former en raison du retrait, réduisant ainsi les risques de formation de fissures. Nous avons également remarqué grâce à cette mesure que le processus de combustion n'augmente pas le taux de retrait de manière significative, car un grand pourcentage d'eau quitte l'échantillon pendant le processus de séchage.

Nous avons noté que les taux de retrait de tous les échantillons variaient de 6,065% à 8,612%, ce qui se situe approximativement dans la plage admissible que nous avons indiquée précédemment 5 à 8% [25].

2.3. Conductivité thermique (λ) et chaleur spécifique (C_p)

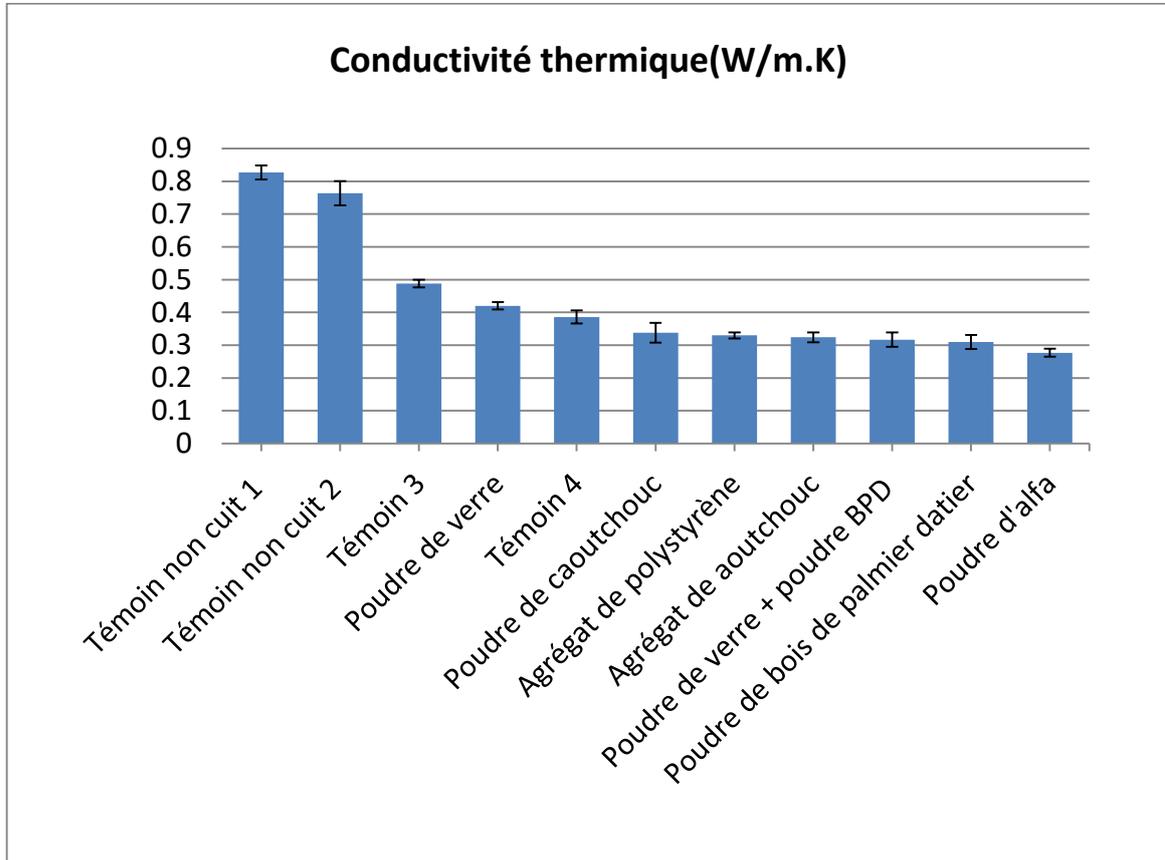


Figure IV.3. Conductivité thermique

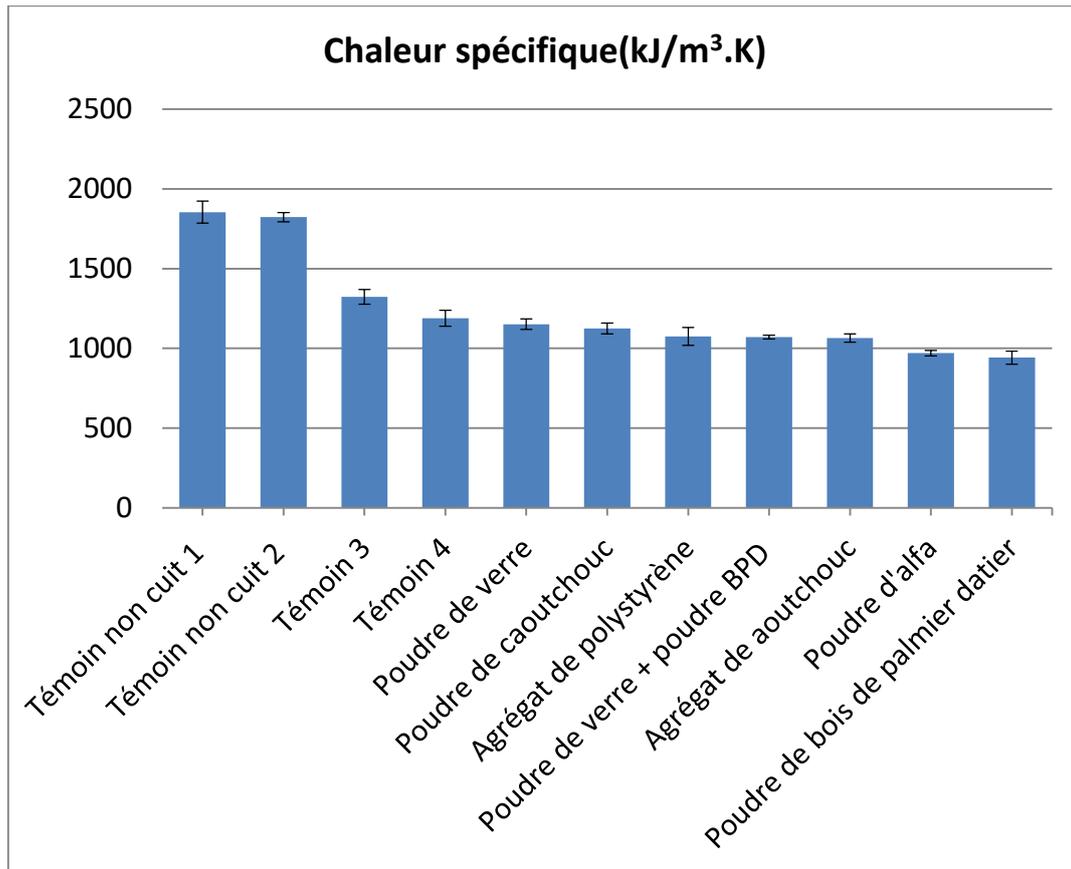


Figure IV.4. Chaleur spécifique

On remarque sur le diagramme (figure IV.3) une diminution de la conductivité thermique du deuxième échantillon témoin, qui contenait du sable, d'environ 7,61% de la conductivité du premier échantillon témoin en raison du fait que la conductivité du sable est inférieure à celle de l'argile.

Nous notons également que le processus de combustion des échantillons a contribué de manière significative à réduire la conductivité jusqu'à 36,12% en raison de la transformation structurelle de la structure de l'échantillon résultant de la fusion des minéraux, la rupture des liaisons et la sortie de toute l'eau des échantillons.

Nous avons noté que l'ajout de chaux contribuait également à réduire la conductivité thermique jusqu'à 20,9% en raison de son rôle dans l'augmentation de la vitesse de fusion et l'augmentation de la porosité du produit final, comme mentionné précédemment.

Les résultats obtenus sont différents de ceux du chercheur [45] et al., le chercheur [88] et al. Cette différence peut être due à la combustion des échantillons, car l'effet de la chaux sur la conductivité thermique augmente pendant la combustion.

Nous avons noté que l'ajout de poudre de verre augmente la conductivité du produit final en raison de sa conductivité plutôt élevée (par rapport au reste des composants du mélange). La conductivité d'une matière première de verre atteint 1,05 W / m.K[86]. De plus, le verre fondu remplit les vides, ce qui réduit la porosité des échantillons, ce qui augmente la conductivité thermique de l'échantillon. Cependant, nous avons obtenu une

conductivité thermique de l'échantillon auquel 10% de la poudre de verre a été ajoutée, à 0,420 W/m.K, ce qui est meilleur que les résultats obtenus par le chercheur [43] et al.

Nous avons noté que les échantillons restants contenant divers déchets diminuaient leur conductivité thermique dans des proportions variables, la conductivité thermique de ces échantillons variait de 0,277 à 0,488 W/m.K si l'on exclut les échantillons imbrûlés, il s'agit de valeurs record inférieures aux valeurs du champ de conductivité thermique des briques pleines cuites commerciales, qui indique que $\lambda \in [0,7 ; 0,73]$ W/m.K [87] et il peut même atteindre une valeur de 0,573 W/m.K, selon le chercheur [89]. Où le pourcentage de diminution a atteint son maximum pour les deux échantillons de poudre de bois de palme1 et de poudre de plante d'Alfa, où le pourcentage de diminution pour chacun d'eux, respectivement, a atteint 19,68% et 28,24% par rapport au quatrième échantillon témoin avec des valeurs de conductivité de 0,31 W/m.K pour l'échantillon de poudre de bois de palme1 et 0,277 W/m.K pour l'échantillon de poudre de plante d'Alfa. Ceci s'explique par les vides laissés par ces déchets lors du processus de combustion des échantillons, ce qui a abouti à une bonne structure poreuse en termes de performances thermiques.

Quant à la chaleur spécifique (figure IV.4), nous avons noté que les résultats obtenus étaient proches des résultats de la conductivité thermique, car cette propriété a connu une diminution due à l'ajout de granules et de poudres aux échantillons, ce qui a entraîné une augmentation de l'air emprisonné à l'intérieur des échantillons, qui a été laissé par le processus de combustion. Cela affecte de manière significative la matrice du sol constituée principalement de sable et d'argile grâce à sa faible chaleur spécifique par rapport à eux. La chaleur spécifique de l'air est de 1006 J/kg .C [86].

2.4. Diffusivité thermique (D ou α)

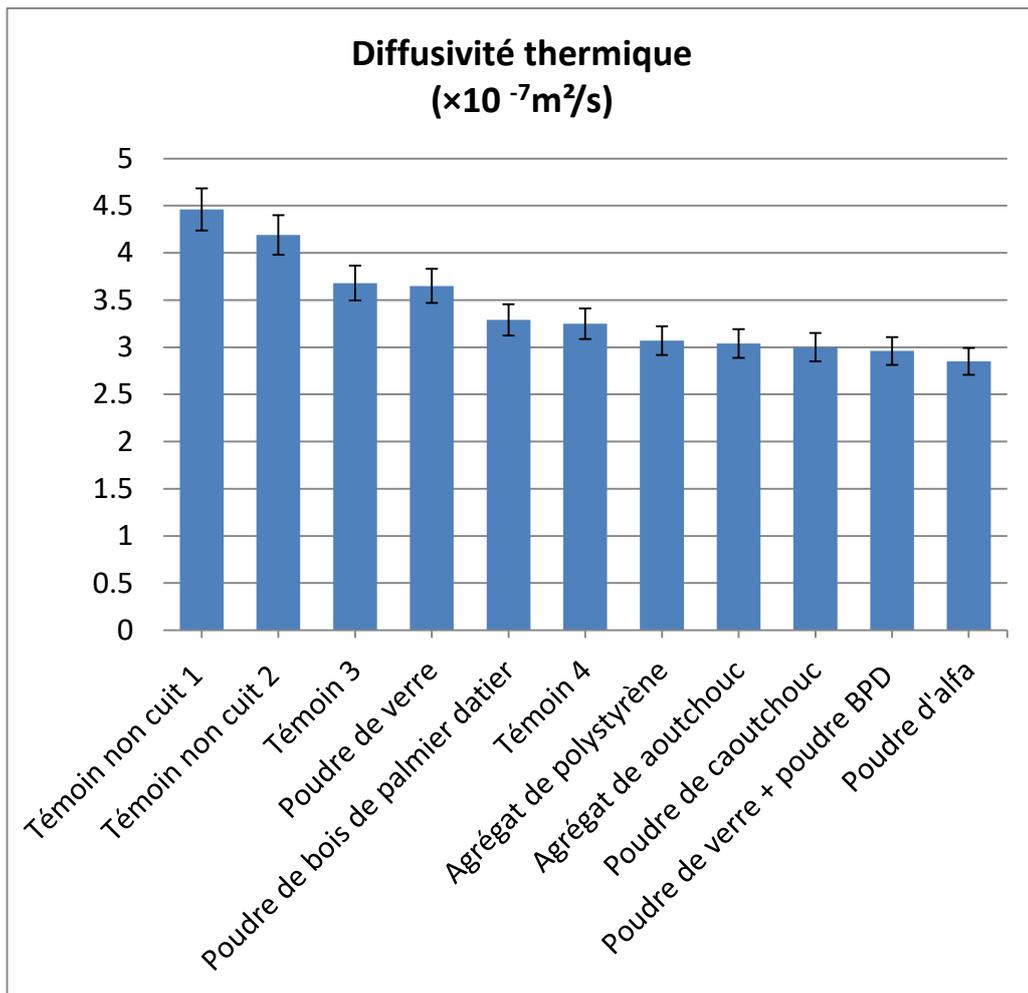


Figure IV.5. Diffusivité Thermique

Nous avons observé que différents déchets ont joué un rôle important dans la réduction de la diffusivité thermique (voir Figure IV.5). Cette diminution a atteint son niveau le plus bas dans l'échantillon de poudre d'Alfa, avec une réduction d'environ 12,3%, ce qui a conduit à une valeur de diffusivité de $2,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$. L'ajout de chaux aux échantillons a contribué à réduire la diffusivité de 11,6%. La combustion des échantillons a également contribué à une réduction de la diffusivité thermique d'environ 12.17%. Le troisième échantillon témoin a enregistré une diffusivité thermique de $3,68 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$.

De plus, l'ajout de sable a réduit la diffusivité de 6%. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus lors des expériences de conductivité thermique, ce qui renforce l'efficacité de ces échantillons dans leur capacité d'isolation thermique.

2.5. Résistance thermique (Rt)

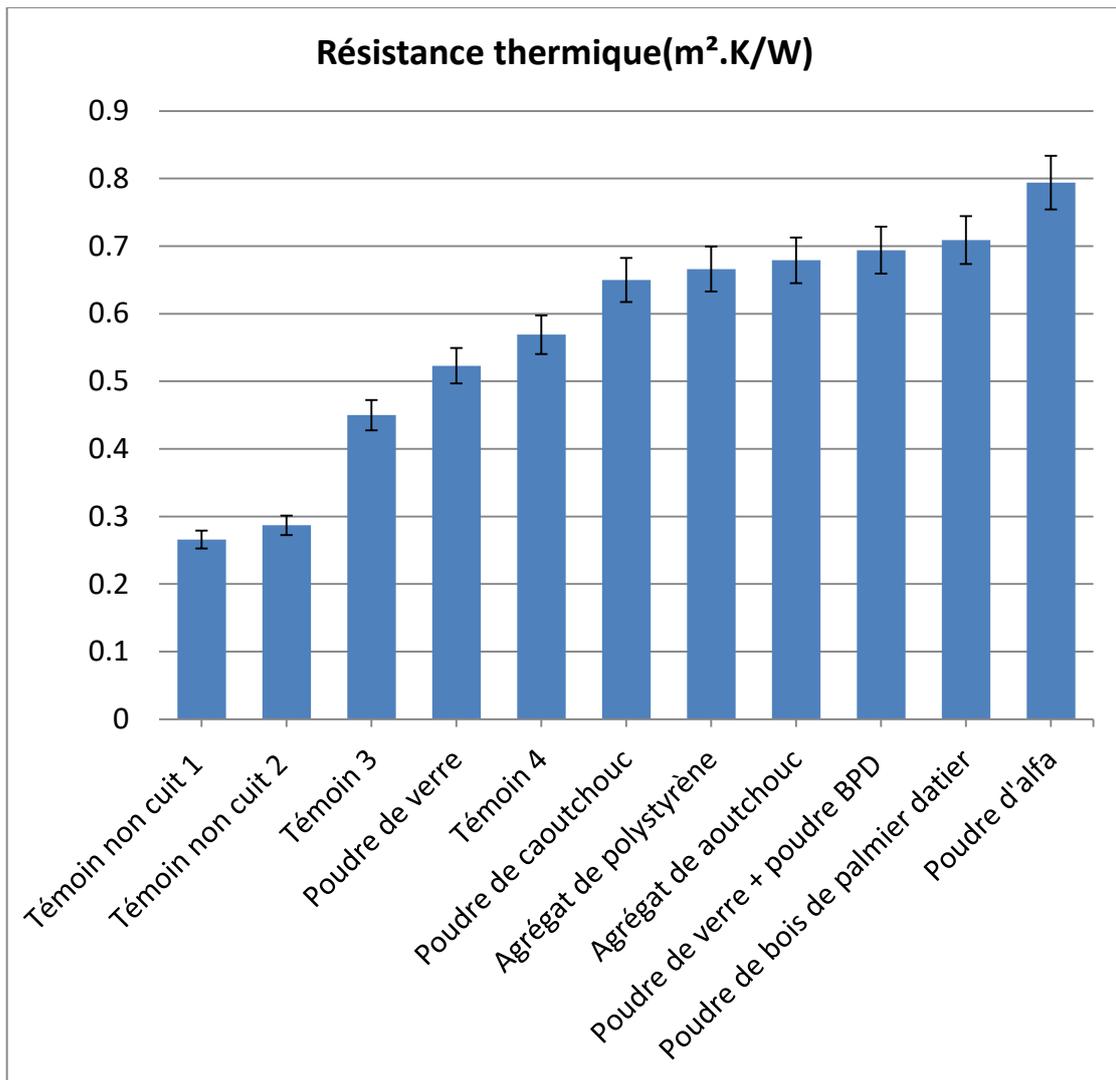


Figure IV.6. Résistance thermique

Les valeurs de la résistance thermique d'un mur hypothétique à double bloc d'une épaisseur de 0,22 mètre variaient de 0,523 m².K/W à 0,794 m².K/W pour les blocs contenant divers déchets, tandis que la résistance des échantillons témoins variait de 0,265 m².K/W à 0,596 m².K/W, ce qui montre le rôle des déchets ajoutés dans l'amélioration de l'isolation thermique de ce mur (Figure IV.6).

2.6. Résistance à la compression (Rc)

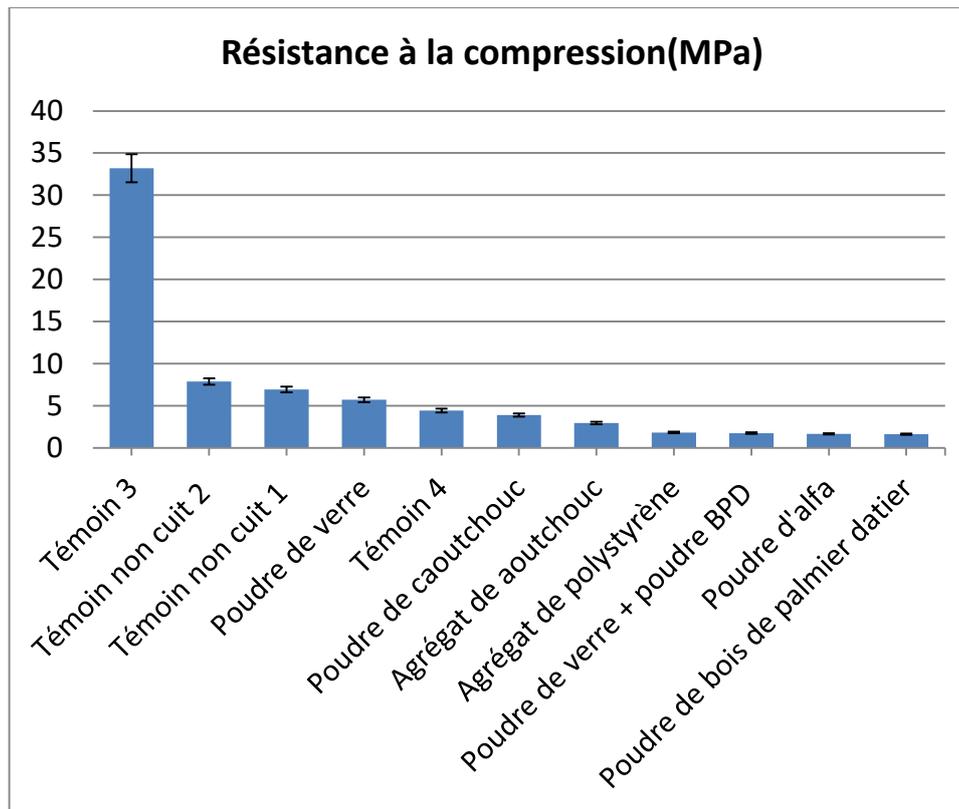


Figure IV.7. Résistance à la compression

Nous avons noté que le processus de combustion des échantillons augmente la résistance des échantillons à la compression jusqu'à 321%. De plus, l'ajout de seulement 25% de sable aux échantillons a amélioré la résistance aux forces de compression de plus de 13%.

De manière inhabituelle, l'échantillon brûlé avec de la chaux ajoutée a diminué ses performances de résistance aux forces de compression de plus de 86%, car cet échantillon a enregistré une résistance à la compression de 4,438 MPa, contre 33.206MPa avant l'ajout de chaux en raison de la structure poreuse laissée par la chaux brûlée.

Le reste des échantillons qui leur ont ajouté les déchets a enregistré une baisse des performances mécaniques, en particulier de la résistance à la compression. Les deux échantillons contenant des poudre de bois palme1 et poudre d'Alfa ont enregistré le plus faible pourcentage de résistance à la compression, respectivement 1,616 MPa et 1,658 MPa. Ceci s'explique par le vide et la structure poreuse laissés par ces déchets après combustion et décomposition.

Nous avons également noté que la poudre de verre améliore la résistance aux forces de compression, ce qui est évident dans l'échantillon qui contenait de la poudre de verre. Sa résistance aux forces de compression a augmenté de 28,5% par rapport au quatrième échantillon témoin.

De plus, l'échantillon contenant de la poudre de bois de palme1 ajoutée à seulement 3% de poudre de verre a augmenté ses performances mécaniques de 8,41 % (Figure IV.7).

Nous avons observé que la résistance à la compression de ces échantillons est inférieure aux recommandations établies par la plupart des normes. Les normes australiennes préconisent une valeur de 3 MPa, tandis que les normes indiennes pour les briques de terre cuite communes recommandent une plage comprise entre 3,5 et 35 MPa, et la norme nationale chinoise spécifie une plage entre 7,35 et 14,71 MPa. En Turquie, les normes recommandent une valeur minimale de 5 MPa pour les murs non porteurs dans les zones non exposées au risque sismique, conformément à la norme TS 705:1985[90],[91]. En revanche, les normes brésiliennes stipulent une résistance minimale à la compression de 1,5 MPa pour les briques en terre cuite, une exigence que les échantillons satisfont [92],[93].

2.7. Résistance à la flexion (Rf)

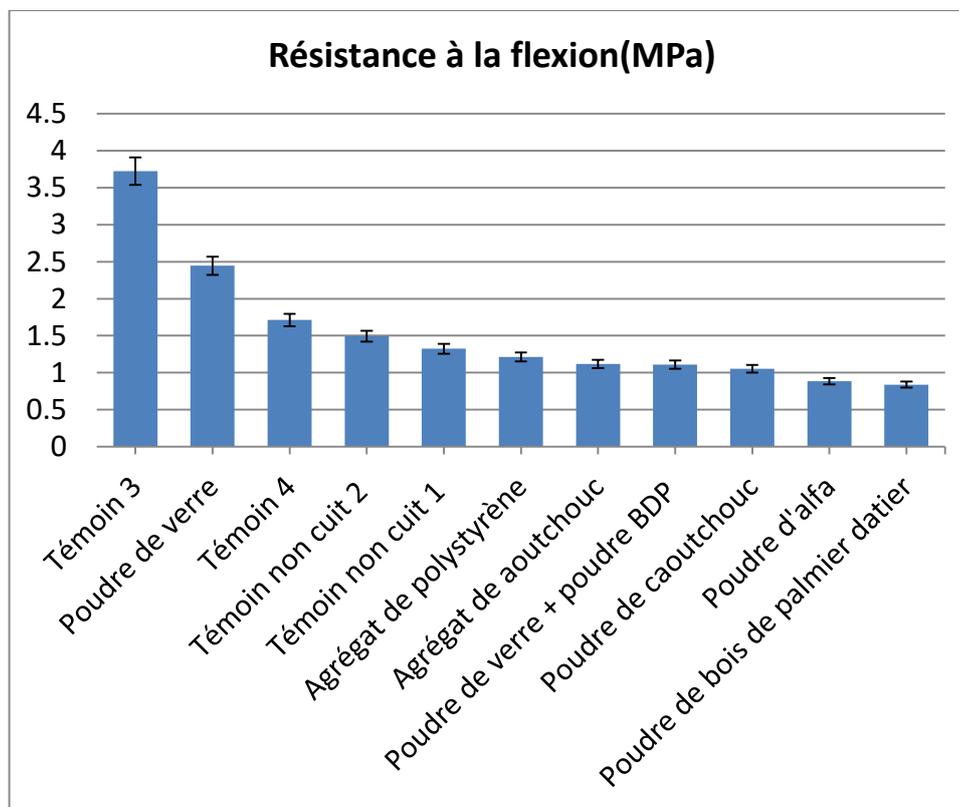


Figure IV.8. Résistance à la flexion

En ce qui concerne la résistance à la flexion, les échantillons ont enregistré presque le même comportement mécanique de la résistance des échantillons à la compression, où la combustion a augmenté la résistance à la flexion de plus de 149%. Le troisième échantillon témoin a représenté cette performance avec une résistance à la flexion de 3,724 MPa. L'ajout de sable a également affecté les performances mécaniques en augmentant la résistance à la flexion de près de 13%.

L'échantillon brûlé avec de la chaux ajoutée a diminué ses performances de résistance à la flexion de plus de 54%, car cet échantillon a enregistré une résistance à la flexion de 1,712 MPa.

La résistance des échantillons à la flexion a diminué après l'ajout de divers déchets pour enregistrer son niveau le plus bas dans les échantillons contenant de poudre de bois palmier¹ à et de la poudre d'Alfa, où ils ont enregistré respectivement 0,839 et 0,885 MPa, cela est dû au vide et à la structure poreuse laissés par la combustion de ces déchets (Figure IV.8) .

2.8. Absorption totale d'eau (A_T)

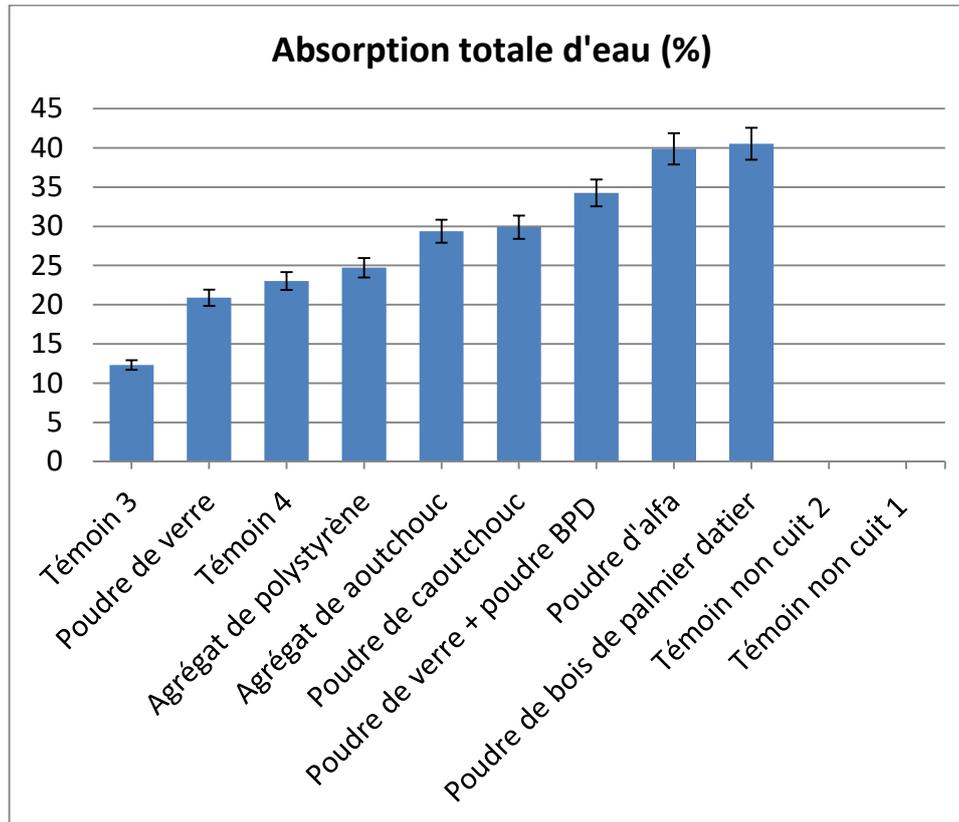


Figure IV.9. Absorption totale d'eau

Nous avons noté sur le diagramme (Figure IV.9) que le pourcentage de chaux ajouté aux échantillons a contribué à l'augmentation du pourcentage d'absorption totale d'eau d'une augmentation de 86,74%. Ceci s'explique par ce que nous avons dit précédemment que la chaux après combustion augmente la porosité des échantillons.

Nous avons noté que l'échantillon auquel la poudre de verre a été ajoutée a diminué le pourcentage d'absorption totale d'eau, malgré la présence de chaux, de 9,22%, ceci est dû au rôle du verre dans la contribution à la fermeture des pores après fusion. Le taux d'absorption de ces déchets est très faible, ce qui est prouvé par le chercheur [50] et al.

Nous avons noté que le reste des échantillons contenant divers déchets augmentait le pourcentage d'absorption totale d'eau, atteignant son maximum pour les échantillons de poudre d'Alfa et de poudre de bois de palmier¹ avec des valeurs d'absorption atteignant respectivement 39,885% et 40,524%. Ce rapport d'absorption totale d'eau est supérieur aux valeurs recommandées, car les recommandations stipulent que l'absorption totale d'eau de brique de terre cuite doit se situer dans le champ $A_T \in [15;25\%]$ [8].

Il est également considéré comme ayant une absorption d'eau presque cinq fois supérieure à celle des briques commerciales, où nous avons expérimenté avec un échantillon de brique de terre cuite perforées et constaté qu'il absorbe l'eau de 8,935% en 24 heures, cela est dû à la structure poreuse de l'échantillon laissée par les déchets incinérés, ainsi qu'à la différence de pression perdue lors de la fabrication des échantillons, ce qui affecte négativement leurs propriétés mécaniques et thermiques [92];[94].

Ceci s'explique par l'augmentation significative du rapport entre l'absorption totale d'eau et la structure sous vide laissée par la combustion des fibres à l'intérieur des échantillons.

Nous avons également noté que l'échantillon auquel 3% de la poudre de verre a été ajouté, bien qu'il contienne le même pourcentage de poudre de bois de palmier, mais il a enregistré un taux d'absorption total d'eau inférieur avec une diminution de 15,5%, ce qui prouve ce que nous voulions en ajoutant de la poudre de verre à cet échantillon, car le rôle du verre apparaît clairement dans la réduction de l'absorption.

Les premier et deuxième échantillons témoins n'ont pas été soumis à l'expérience en raison de leur grande sensibilité à l'eau.

2.9. Absorption capillaire d'eau (Ac)

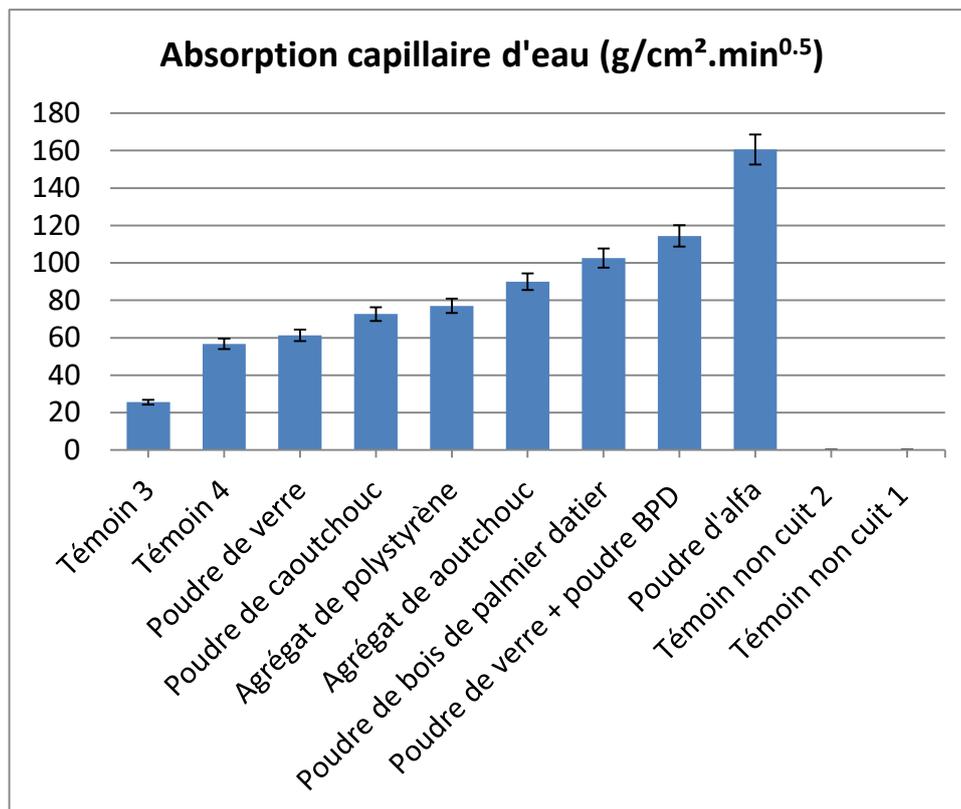


Figure IV.10. Absorption capillaire d'eau

Nous avons noté que l'absorption capillaire d'eau pour les échantillons auxquels des déchets et des poudres ont été ajoutés atteignait des valeurs significatives qui dépassaient le champ des recommandations qui déterminent le champ d'absorption capillaire d'eau pour les briques cuites solides entre 30 g/cm².min^{1/2} à 80 g/cm².min^{1/2} [25].

Chapitre IV: Résultats et interprétation

La quantité d'eau absorbée par l'échantillon auquel la poudre de plante d'Alfa a été ajoutée était de $160,561 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ainsi que les échantillons de poudre de bois de palmier 1 ont atteint $102,581 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

Nous avons également remarqué que la chaux ajoutée contribuait également à une augmentation de la quantité d'eau absorbée.

Nous avons également noté qu'il n'y avait aucun effet positif d'augmenter la poudre de verre de l'échantillon de poudre de bois de palmier en ce qui concerne l'absorption capillaire d'eau (Figure IV.10).

Les premier et deuxième échantillons témoins n'ont pas été soumis à l'expérience en raison de leur grande sensibilité à l'eau.

3. Résultats des tests de l'expérience finale 1

3.1. Expérience de Proctor

La Figure IV.11 montre l'évolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau du sol constitué de la brique fabriquée, principalement 75% d'argile, 25% de sable de dune et 10% de chaux du poids de la matrice (argile + sable) de sorte qu'OMC correspond à la densité sèche maximale obtenue.

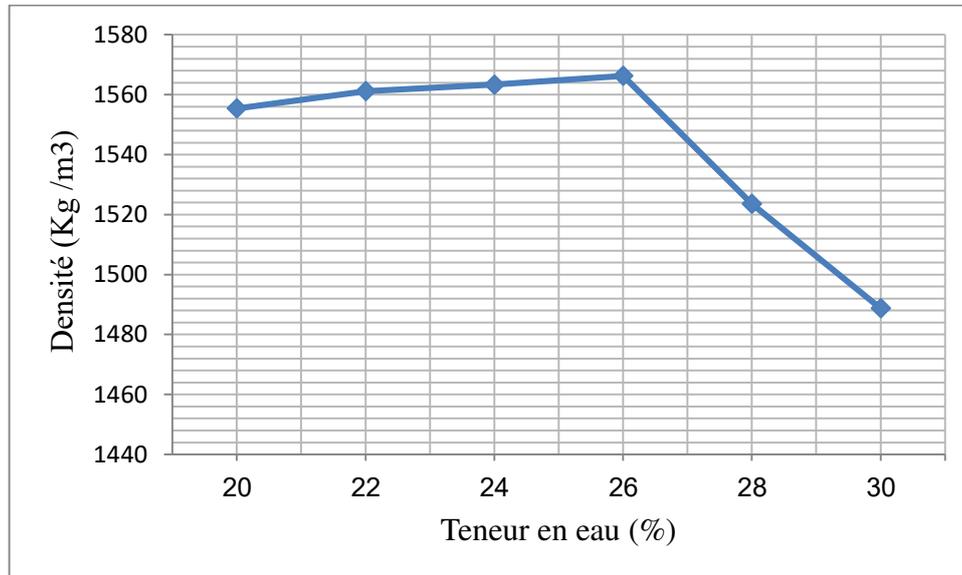


Figure IV.11. Courbe d'essai de Proctor Normal

D'après la courbe de la figure IV.11, on peut conclure que la OMC est de 26% du poids sec du mélange, ce qui est cohérent avec la fourchette recommandée, qui stipule que l'eau nécessaire pour former des briques varie de 15 à 30% du poids du mélange de fabrication des échantillons [25].

Nous avons résumé les résultats expérimentaux de diverses expériences menées sur divers échantillons dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 1

Chapitre IV: Résultats et interprétation

Les Échantillons	Densité	Incertitude	Absorption d'eau totale	Incertitude	Absorption d'eau capillaire	Incertitude	Conductivité thermique	Incertitude	Chaleur spécifique	Incertitude	Diffusivité thermique	Résistance à la compression	Incertitude	Résistance à la flexion	Incertitude
	kg/m ³	kg/m ³	%	%	g/cm ² .m in ^{1/2}	g/cm ² .m in ^{1/2}	W/m.K	W/m.K	kJ/m ³ . K	kJ/m ³ .K	x10 ⁻⁷ m ² /s	MPa	MPa	MPa	MPa
Échantillon témoin	1776.19	35.5	10.451	0.16	20.804	1.13	0.531	0.064	1363.95	52.05	3.89	33.206	4.68	3.724	0.52
Échantillon Alfa	1292.507	11.37	28.893	0.32	105.745	5.82	0.3606	0.0133	1143.6	85.9	3.15	4.027	0.10	1.245	0.033
Échantillon de verre	1896.897	82.08	9.978	0.15	32.381	0.905	0.516	0.027	1304.433	42.266	3.96	22.971	2.91	1.546	0.19
Alfa + Verre	1327.96	22.89	26.794	0.013	95.485	3.87	0.354	0.0186	1098.5	73.5	3.23	3.342	0.41	1.247	0.15
Échantillon de chaux	1510.191	42.85	23.449	0.16	52.996	4.95	0.404	0.042	1270.125	70.075	3.18	5.407	0.24	1.56	0.070
Alfa + Chaux	1143.359	19.66	44.175	0.13	169.363	1.02	0.291	0.0196	946.6	67.9	3.08	1.0383	0.019	0.529	0.009
Verre + Chaux	1510.733	24.62	24.456	0.25	63.315	1.22	0.381	0.012	1312	59.9	2.9	4.612	0.61	1.583	0.21
Verre + Chaux + Alfa	1173.368	16.35	39.892	0.094	173.0631	0.62	0.279	0.018	976.533	17.533	2.86	1.291	0.025	0.784	0.015
1/2 Verre+1/2 CHaux+1/2 Alfa	1211.88	28.11	33.715	0.34	130.382	2.43	0.288	0.01	1073.4	43.3	2.68	1.295	0.054	0.772	0.032

3.2. Retrait

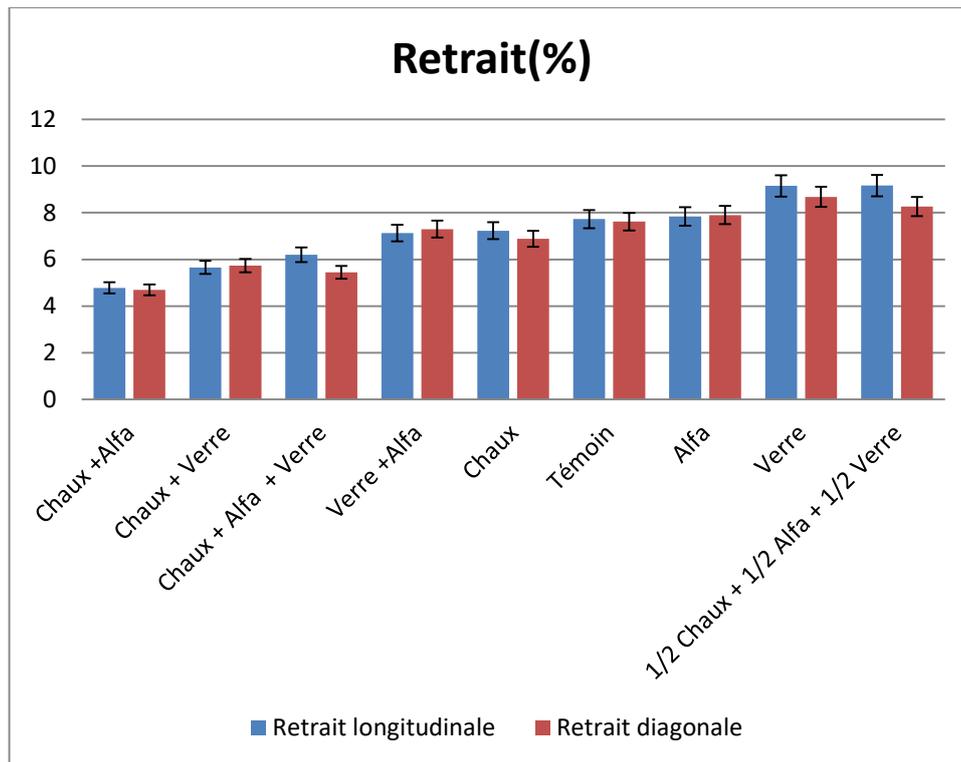


Figure IV.12. Diagramme à barres du retrait longitudinal et diagonal

Nous observons à travers le graphique (figure IV.12) que l'ajout de la chaux ainsi que de la plupart des additifs et des déchets aux échantillons a contribué à réduire le taux de retrait longitudinal et diagonal. Cette observation s'explique par le fait que ces additifs améliorent la plasticité de la pâte utilisée dans la fabrication, réduisant ainsi la quantité d'eau nécessaire pour le mélange. De plus, ils absorbent une partie des contraintes et des fissures qui pourraient se former en raison du retrait, diminuant ainsi les risques de formation de fissures.

Nous avons remarqué que les taux de retrait de la plupart des échantillons variaient de 4,696% à 9,162%, ce qui se situe approximativement dans la plage admissible que nous avons précédemment indiquée, soit de 5 à 8% [25].

3.3. Densité apparente (ρ)

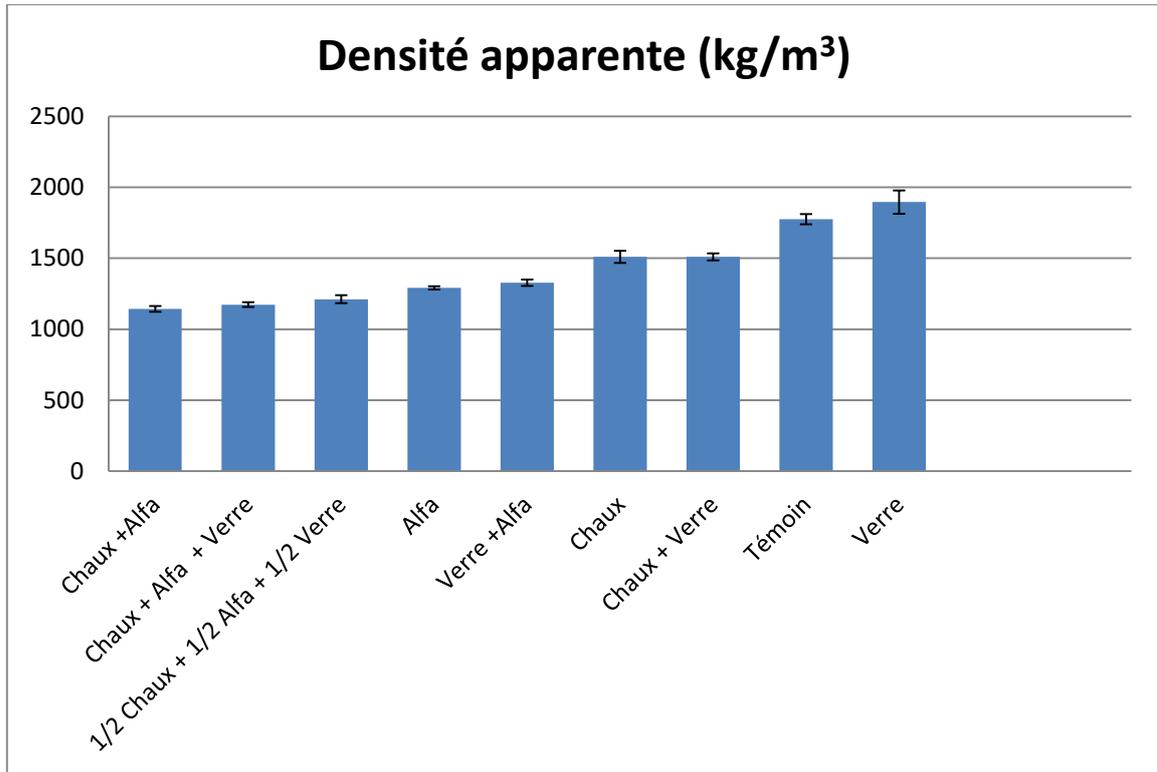


Figure IV.13. Diagramme à barres de la densité apparente

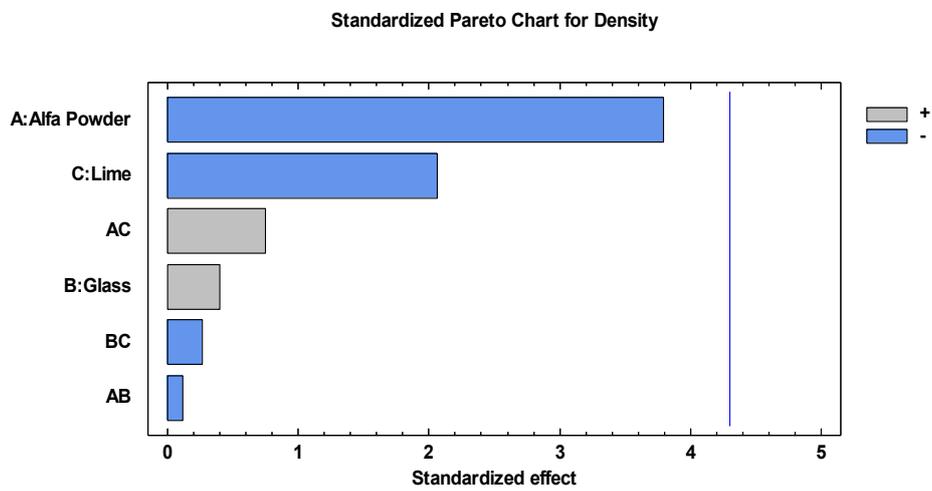


Figure IV.14. Diagramme de Pareto Normalisé pour la densité apparente

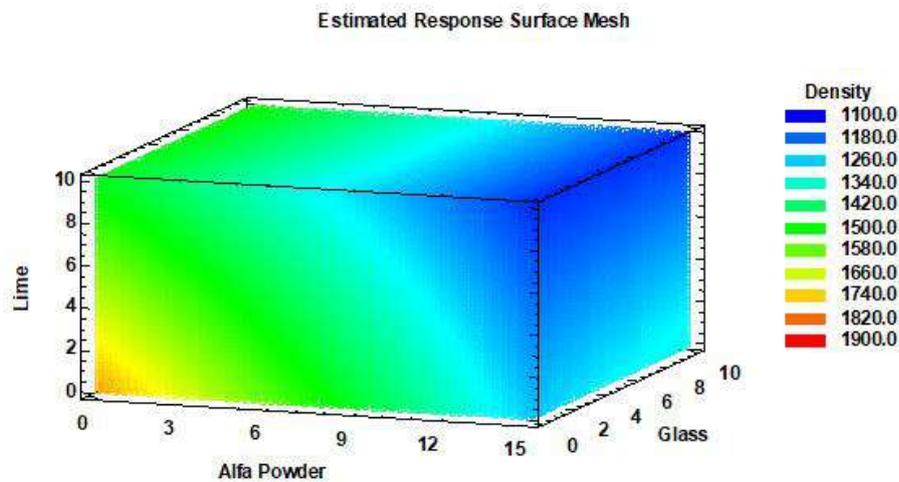


Figure IV.15. Maillage de surface de réponse estimé pour la densité apparente

Lime=La Chaux; Glass =Le Verre; Alfa Powder= Le poudre d'Alfa

Ce volet affiche l'équation de régression qui a été ajustée aux données.

L'équation du modèle ajusté est :

$$\text{Densité} = 1763,64 - 34,1576 \times \text{Poudre Alfa} + 9,20268 \times \text{Verre} - 29,4679 \times \text{Chaux} - 0,185957 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 1,16141 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} - 0,628045 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

Nous avons remarqué à travers le graphique à barres (Figure IV.13) l'effet de la poudre de plante d'Alfa et de la chaux sur la réduction de la densité du produit final, où l'ajout de 15% d'Alfa a réduit la densité de 27,23 %, l'ajout de 10% de chaux a contribué à réduire la densité de 14,98 %, et l'ajout de 10% de verre a augmenté la densité de 6,8 %. La densité apparente des échantillons variait de 1143,359 à 1896,897 kg / m³, elle se situe dans la plage des briques solides cuites commerciales qui indique que ρ [1600; 2000] kg / m³ [28];[87]. Presque tous les échantillons ont enregistré des valeurs inférieures à celle-ci.

D'après le diagramme de Pareto (Figure IV.14) il est clair que le plus grand effet sur la réduction de la densité de l'échantillon a été joué par l'ajout de poudre de plante d'Alfa et de chaux dans une moindre mesure, et l'interférence entre la chaux et l'Alfa a contribué à une augmentation de la densité d'un pourcentage insignifiant, ainsi que du verre dans une moindre mesure, ce qui est également prouvé par les coefficients de l'équation de régression.

Nous avons noté à travers le maillage de surface de réponse estimé (Figure IV.15) le rôle évident de l'augmentation de la proportion de poudre de plante d'Alfa et de l'augmentation de la proportion de chaux dans la réduction de la densité de l'échantillon montre également le faible effet de la modification de la proportion de poudre de verre sur la densité.

L'effet de l'Alfa sur la réduction de la densité de l'échantillon est dû à sa faible densité, ce qui lui fait occuper un plus grand volume dans l'échantillon, ce qui signifie une structure de

vide plus grande après la combustion, et l'effet de la chaux est dû au fait qu'il contribue à augmenter la vitesse de fusion du mélange pendant la combustion, ainsi qu'à augmenter la porosité de l'échantillon, ce qui est prouvé par les chercheurs [25].

3.4. Conductivité thermique (λ)

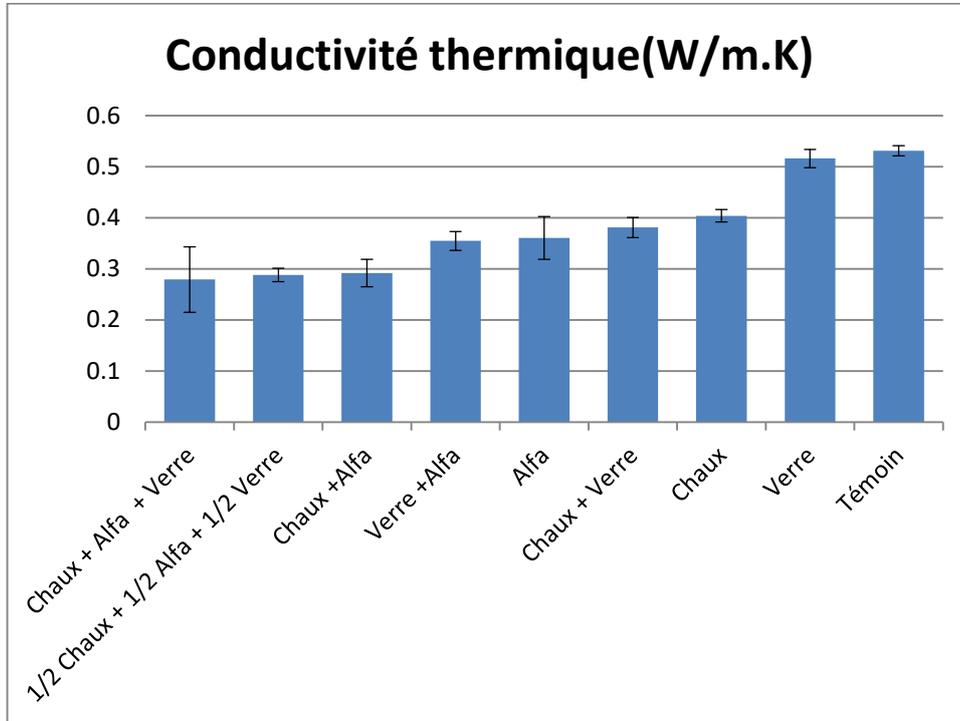


Figure IV.16. Diagramme à barres de la conductivité thermique

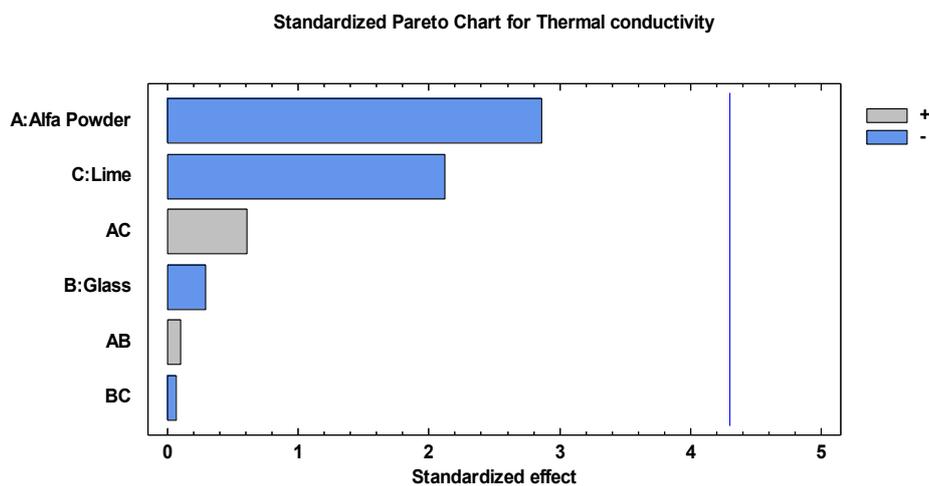


Figure IV.17. Diagramme de Pareto Normalisé pour la conductivité thermique

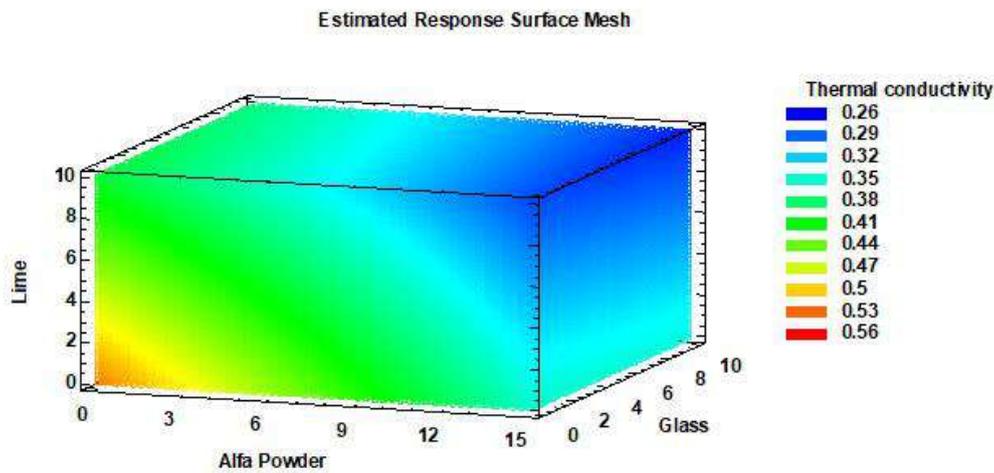


Figure IV.18. Maille de surface de réponse estimée de la conductivité thermique

L'équation du modèle ajusté est :

$$\text{Conductivité thermique} = 0,520039 - 0,0114033 \times \text{Poudre Alfa} - 0,001565 \times \text{Verre} - 0,012765 \times \text{Chaux} + 0,0000646667 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,000391333 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} - 0,000067 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

Nous avons noté à travers le graphique à barres (Figure IV.16) l'effet de la poudre de plante d'Alfa et de la chaux sur la réduction de la conductivité thermique du produit final, où l'ajout de 15% d'Alfa a réduit la conductivité de 32,09 %, l'ajout de 10% de chaux a contribué à réduire la conductivité de 23,91 %, et l'ajout de 10% de verre a imperceptiblement réduit la conductivité thermique ne dépassait pas 3 %.

D'après le diagramme de Pareto (Figure IV.17), il est clair que le plus grand effet de réduction de la conductivité thermique de l'échantillon a été joué par l'ajout d'Alfa et de chaux dans une moindre mesure. le diagramme montre également que l'ajout de verre a également contribué à réduire légèrement la conductivité, mais l'interférence entre la chaux et l'Alfa augmente la conductivité d'un pourcentage imperceptible par rapport au comportement de ces deux éléments s'ils étaient séparés, ce qui est également prouvé par les coefficients de l'équation de régression. La conductivité thermique des échantillons variait de 0,279 à 0,531 W / m.K, c'est des valeurs record inférieures aux valeurs du champ de conductivité thermique des briques pleines cuites commerciales, qui indique que $\lambda \in [0,7-0,73]$ W / m.K [87] et il peut même atteindre une valeur de 0,573 W/m.K, selon le chercheur[89]. De plus, l'échantillon contenant tous les additifs a enregistré une conductivité thermique typique de 0,279 W/m.K, ce qui est meilleur que la plupart des études précédentes que nous avons discutées. Dont les résultats variaient dans le domaine $\lambda \in [0,14 ; 0,68]$ W/m.K.

Nous avons noté à travers le maillage de surface de réponse estimé (Figure IV.18) le rôle évident de l'augmentation du rapport de poudre de plante d'Alfa et de l'augmentation du rapport de chaux dans l'abaissement de la conductivité thermique de l'échantillon montre également le faible effet de la modification du rapport de poudre de verre sur la conductivité thermique.

La raison de ce comportement est l'augmentation de la porosité du produit fini après la combustion, qui est principalement causée par la combustion de la poudre de plante d'Alfa et de la chaux.

3.5. Chaleur spécifique (Cp)

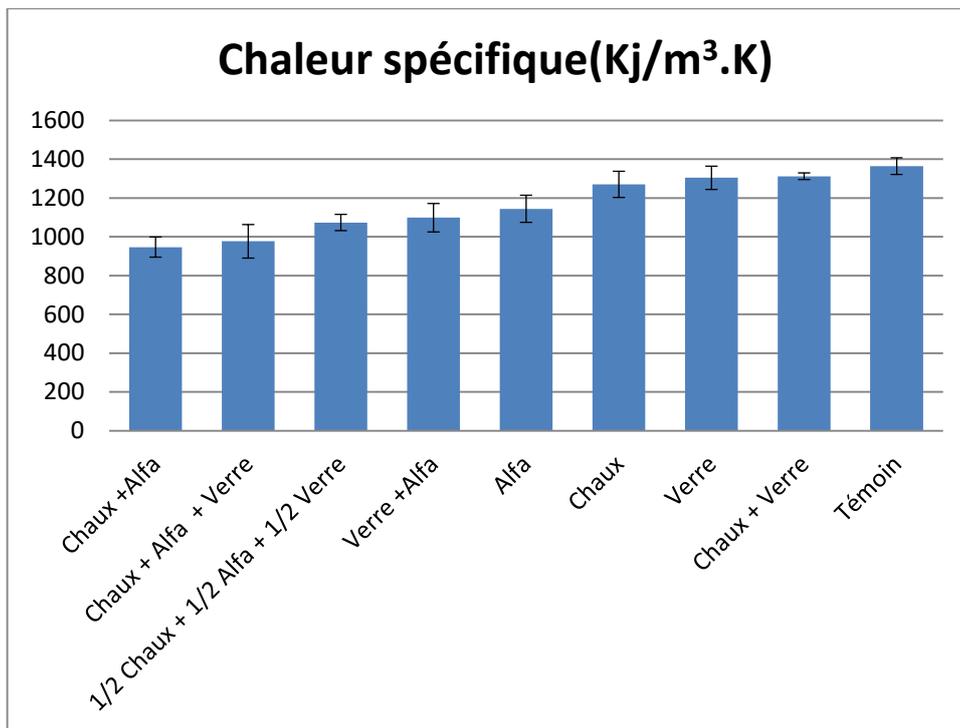


Figure IV.19. Diagramme à barres de la chaleur spécifique

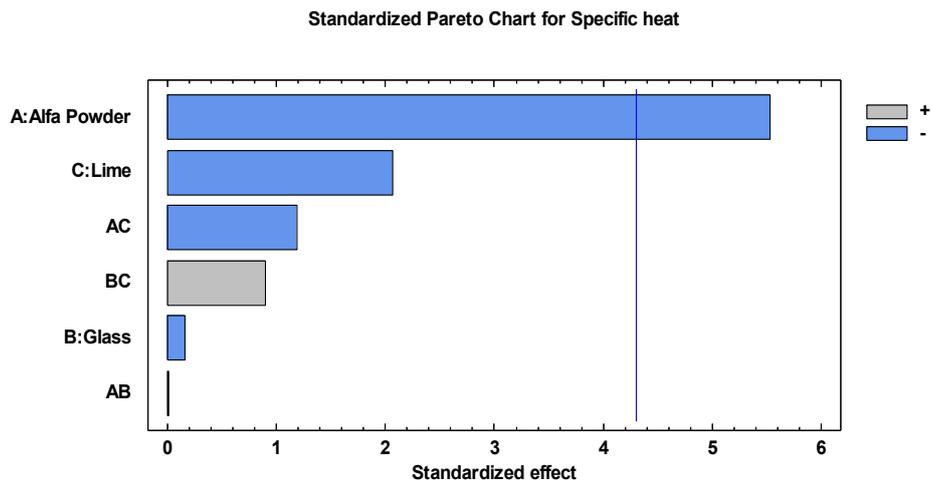


Figure IV.20. Diagramme de Pareto Normalisé pour la chaleur spécifique

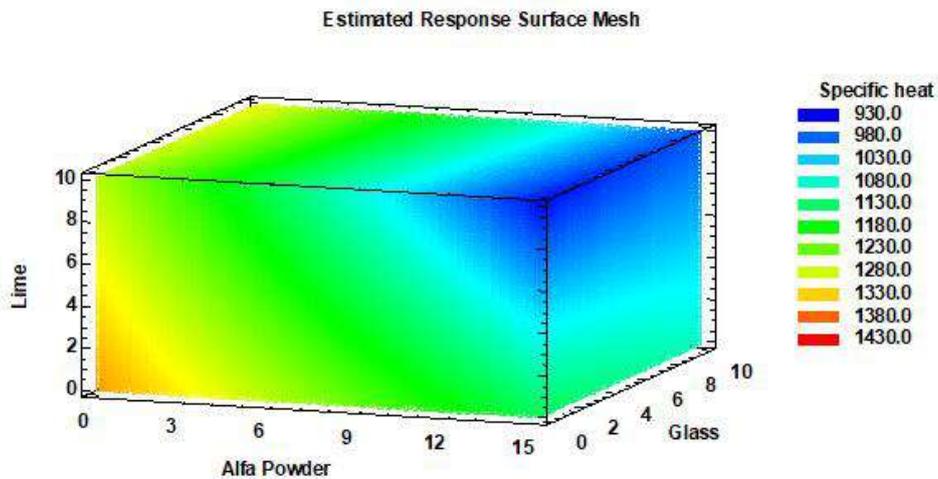


Figure IV.21. Maille de surface de réponse estimée pour la chaleur spécifique

L'équation du modèle ajusté est:

$$\text{Chaleur spécifique} = 1349,15 - 14,2507 \times \text{Poudre Alfa} - 5,29273 \times \text{Verre} - 8,72353 \times \text{Chaux} + 0,00825 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} - 0,775697 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} + 0,882125 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

Nous avons noté sur les diagrammes (Figure IV.19), (Figure IV.20), (Figure IV.21) que l'effet de divers additifs sur la conductivité thermique du produit final est presque le même que sur la chaleur spécifique, car cette propriété a connu une diminution significative due à l'augmentation de la poudre de plante d'Alfa et l'augmentation de la chaux, ce qui a entraîné une augmentation de la porosité du produit, c'est-à-dire une augmentation de l'air

emprisonné à l'intérieur de l'échantillon, cet air a un effet direct sur la chaleur spécifique du produit final en raison de sa faible chaleur spécifique, qui est d'environ 1006 J/kg.K [86].

3.6. Diffusivité thermique (D ou α)

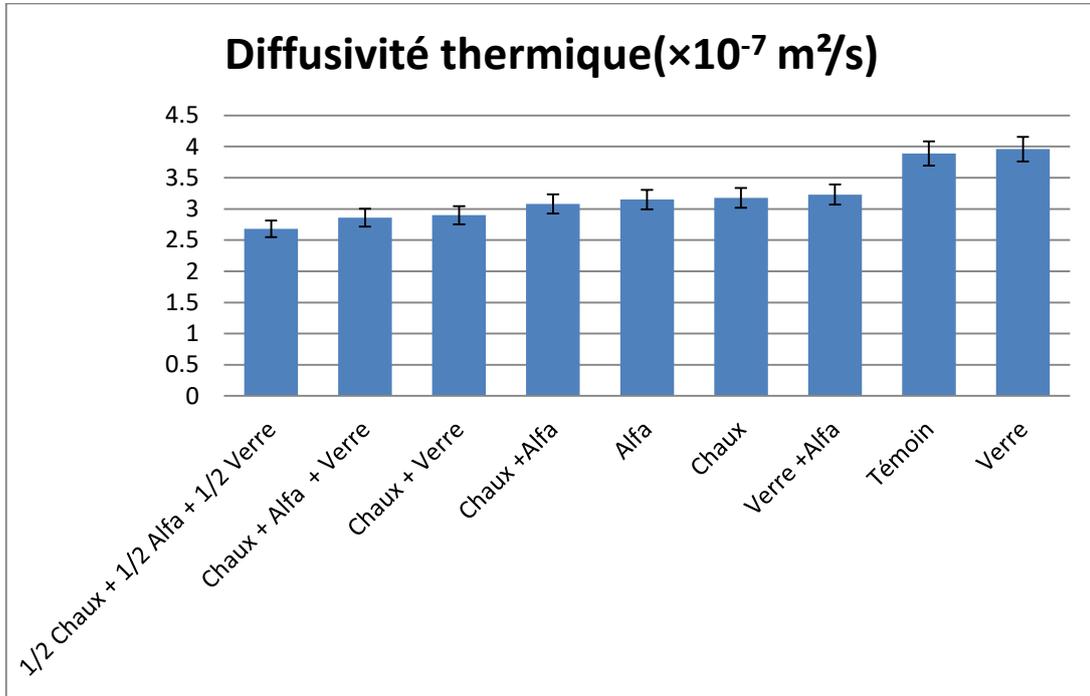


Figure IV.22. Diagramme à barres de la diffusivité thermique

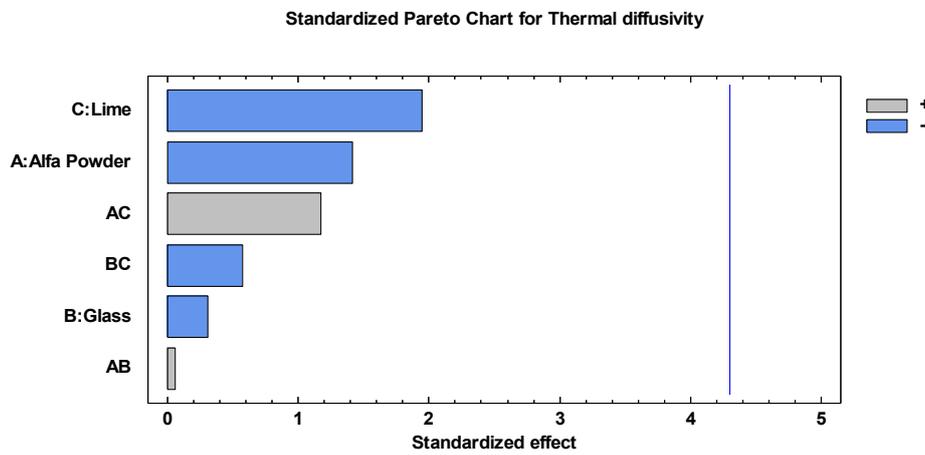


Figure IV.23. Diagramme de Pareto Normalisé pour la diffusivité thermique

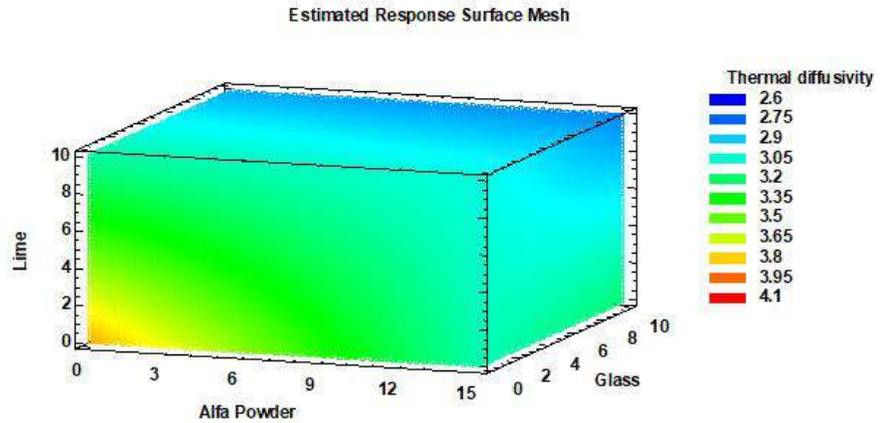


Figure IV.24. Maille de surface de réponse estimée pour la diffusivité thermique

L'équation du modèle ajusté est:

$$\text{Diffusivité thermique} = 3,82944 - 0,0501667 \times \text{Poudre Alfa} + 0,00575 \times \text{Verre} - 0,07225 \times \text{Chaux} + 0,000233333 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,00443333 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} - 0,00325 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

Nous avons noté sur les diagrammes (Figure IV.22), (Figure IV.23), (Figure IV.24) que les additifs contribuaient à réduire la diffusivité thermique, ce qui caractérise le concept d'inertie thermique, à l'exception de la poudre de verre, elle contribuait à augmenter la valeur de la diffusivité thermique d'un taux imperceptible ne dépassant pas 2 %, tandis que l'ajout d'Alfa et de chaux réduisait la diffusivité thermique d'environ 19% et 18 %, respectivement.

L'échantillon auquel tous les additifs ont été ajoutés a enregistré une diffusivité thermique de $2,86 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$.

3.7. Résistance à la compression (Rc)

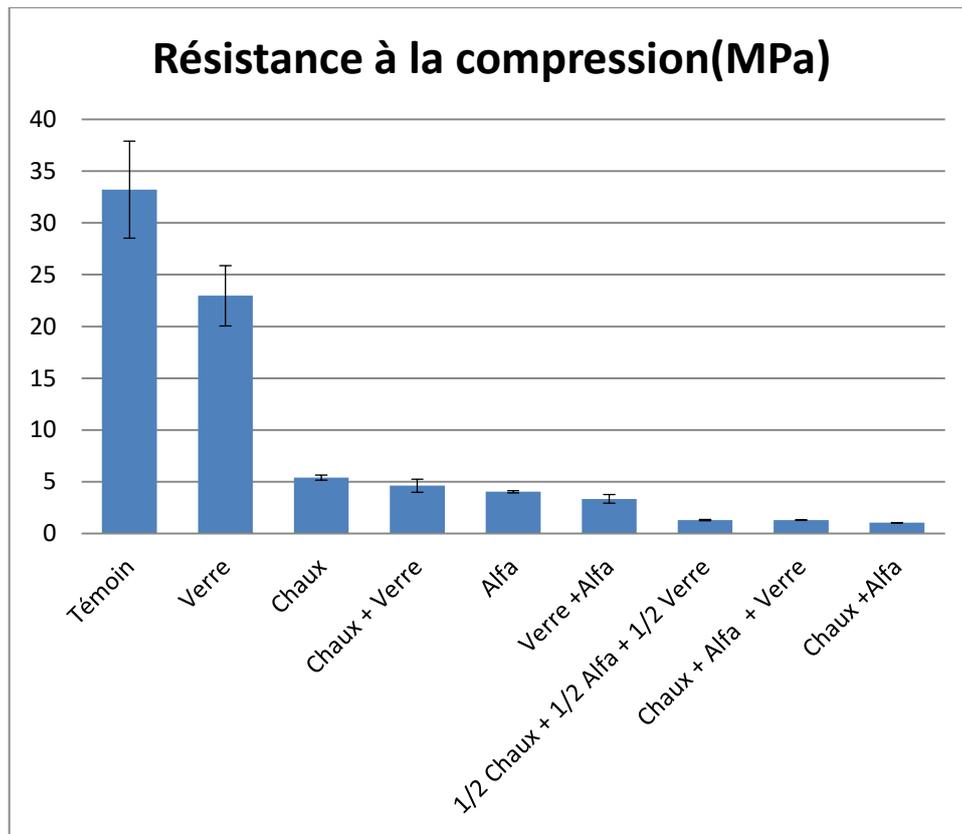


Figure IV.25. Diagramme à barres de la résistance à la compression

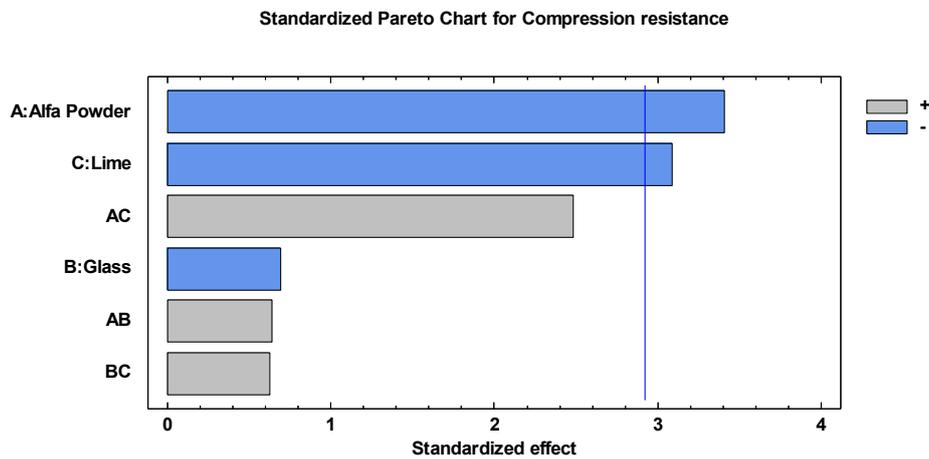


Figure IV.26. Diagramme de Pareto Normalisé pour la résistance à la compression

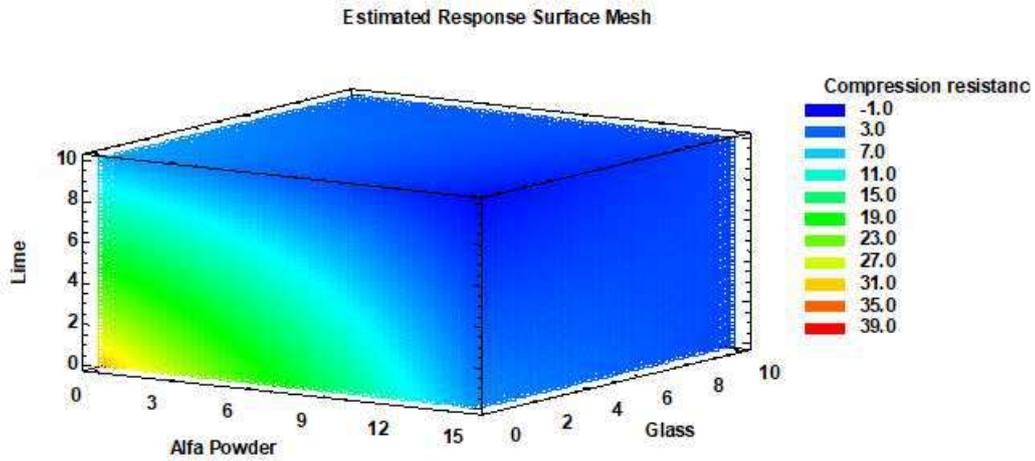


Figure IV.27. Maille de surface de réponse estimée pour la résistance à la compression

3.8. Résistance à la flexion (Rf)

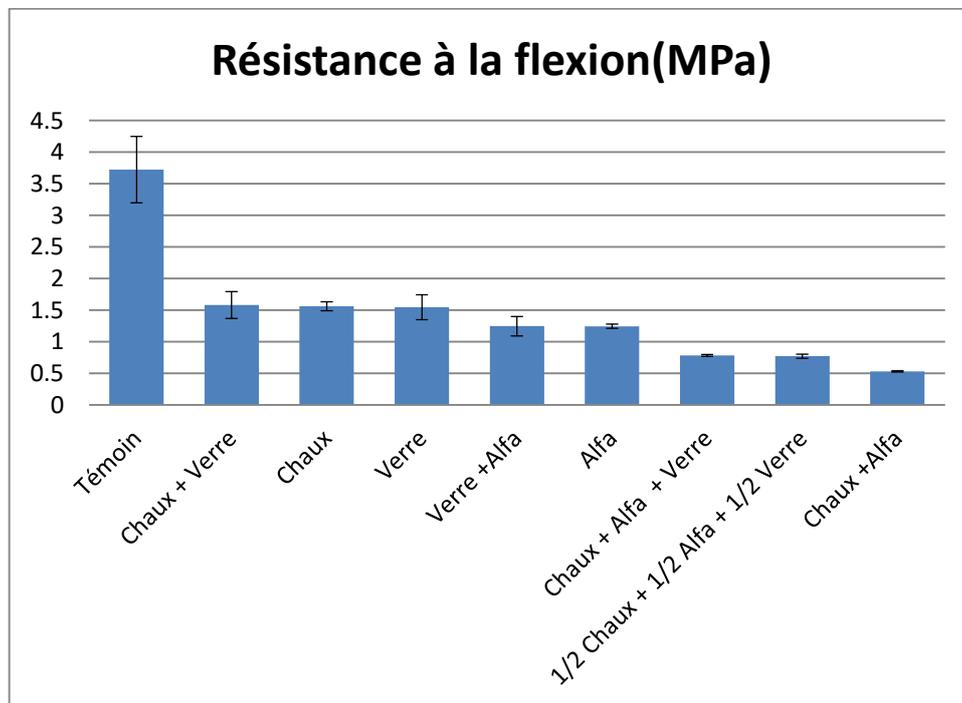


Figure IV.28. Diagramme à barres de la résistance à la flexion

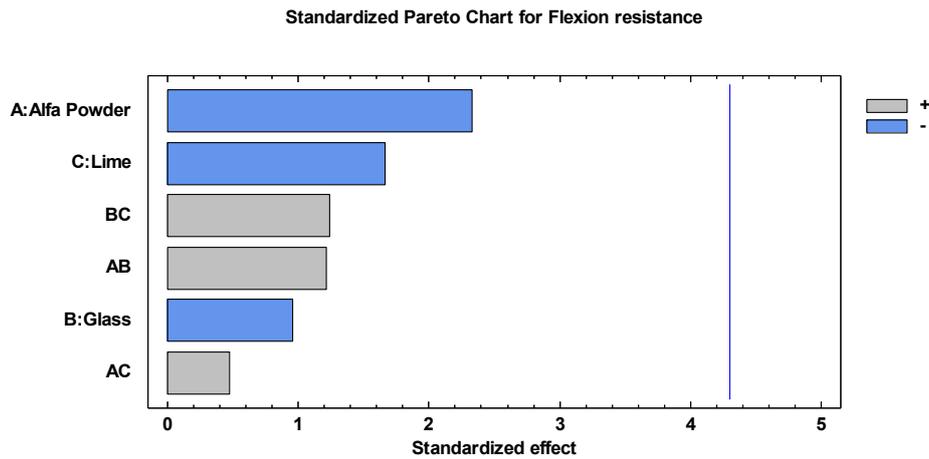


Figure IV.29. Diagramme de Pareto Normalisé pour la résistance à la flexion

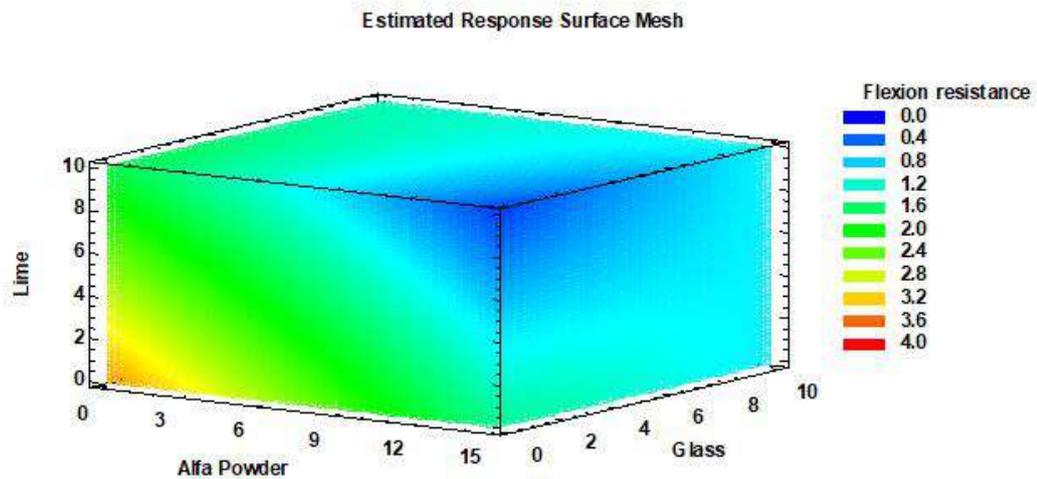


Figure IV.30. Maille de surface de réponse estimée pour la résistance à la flexion

L'équation du modèle ajusté est :

Résistance à la compression = $31,233 - 1,80356 \times \text{Poudre Alfa} - 0,810942 \times \text{Verre} - 2,56734 \times \text{Chaux} + 0,0353257 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,137061 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} + 0,0518885 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$

Résistance à la flexion = $3,39658 - 0,1328 \times \text{Poudre Alfa} - 0,1691 \times \text{Verre} - 0,1677 \times \text{Chaux} + 0,00804 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,00316 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} + 0,01227 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$

Nous avons noté à travers les diagrammes (Figure IV.25) (Figure IV.26) (Figure IV.27) (Figure IV.28) (Figure IV.29) (Figure IV.30) l'impact négatif que l'ajout d'Alfa et de chaux

a eu sur les propriétés mécaniques du produit final, représentées par la résistance à la compression et la résistance à la flexion. En effet, l'ajout d'Alfa a contribué à réduire la résistance aux forces de compression de plus de 87,87 % et la résistance à la flexion de plus de 66,56 %. De même, l'ajout de chaux a entraîné une réduction de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion de 83,71 % et 58,1 % respectivement. Enfin, l'ajout de poudre de verre a diminué la résistance à la compression et à la flexion de 30,82 % et 58,48 % respectivement.

L'échantillon qui contenait tous les additifs a enregistré une résistance à la compression de 1,291 MPa et une résistance à la flexion de 0,784 MPa.

Nous avons noté que cet échantillon a enregistré une résistance à la compression inférieure à ce qui est recommandé dans la plupart des normes. Les normes brésiliennes recommandent une valeur minimale de 1,5 MPa pour la résistance à la compression des briques en terre cuite, tandis que les normes australiennes recommandent une valeur de 3 MPa. Les normes indiennes (briques en terre cuite) prévoient une valeur comprise entre 3,5 et 35 MPa, et la norme nationale chinoise prévoit une valeur comprise entre 7,35 et 14,71 MPa. [92],[93].

Les normes turques recommandent une valeur minimale de 5 MPa pour les murs non porteurs dans les zones non exposées au risque sismique, selon la norme TS 705:1985[90],[91].

3.9. Absorption totale d'eau (A_T)

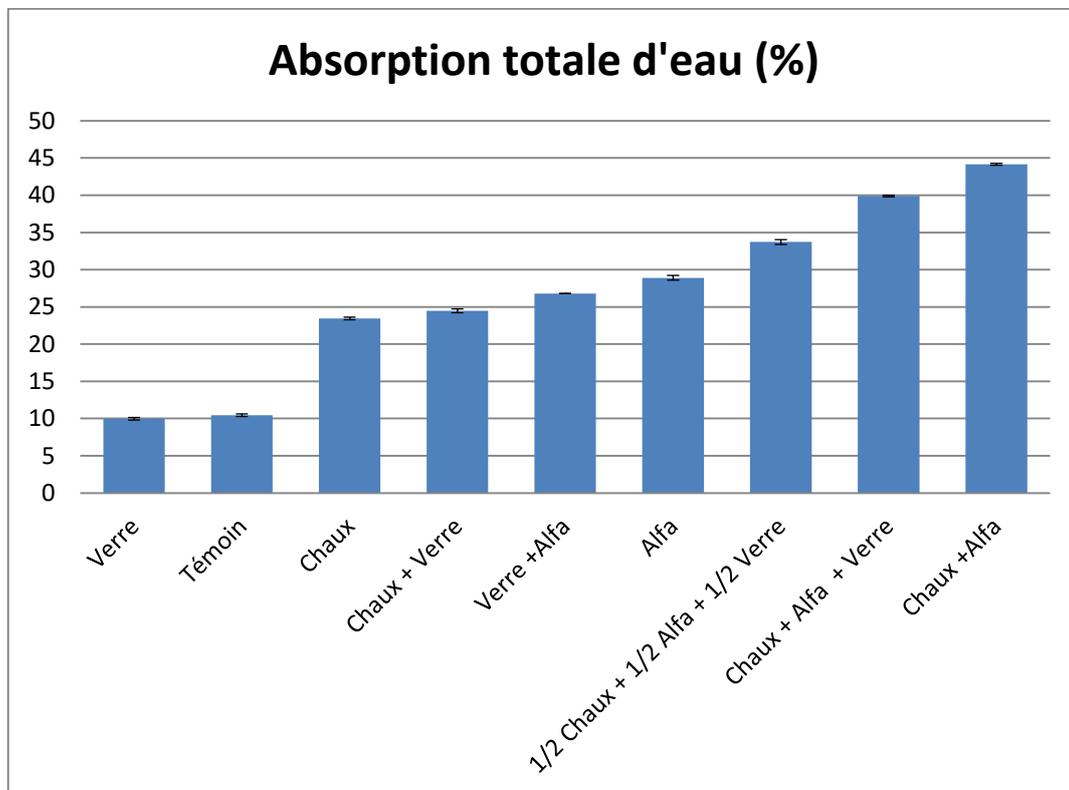


Figure IV.31. Diagramme à barres de l'absorption totale d'eau

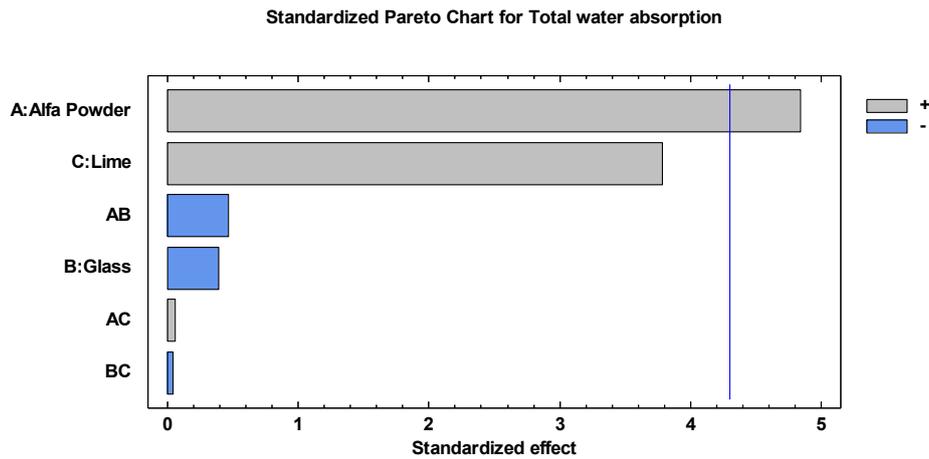


Figure IV.32. Diagramme de Pareto Normalisé pour l'absorption totale d'eau

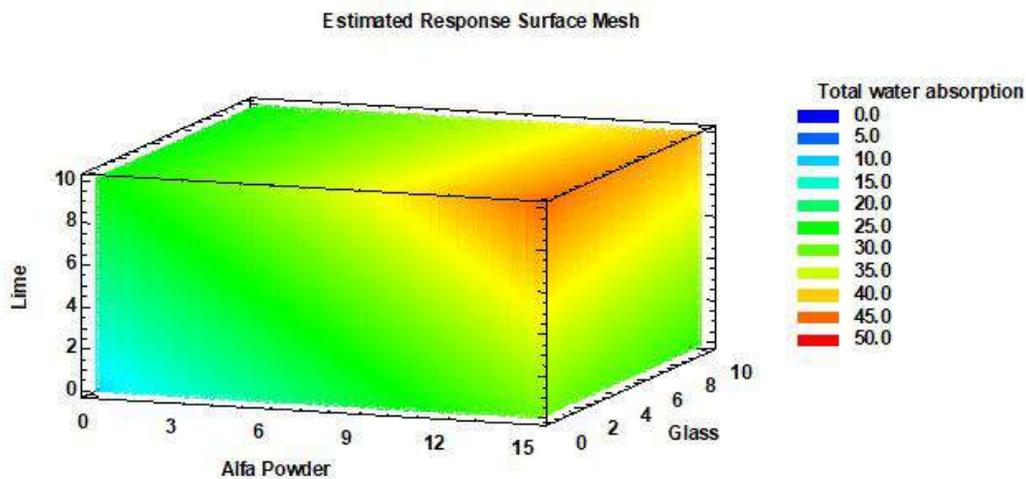


Figure IV.33. Maille de surface de réponse estimée de l'absorption totale d'eau

L'équation du modèle ajusté est :

$$\text{Absorption totale d'eau} = 10,849 + 1,29053 \times \text{Poudre Alfa} + 0,0443 \times \text{Verre} + 1,3914 \times \text{Chaux} - 0,0230533 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,00301333 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} - 0,00352 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

Nous avons noté sur les diagrammes (Figure IV.31) que la poudre d'Alfa et la chaux ajoutées à l'échantillon contribuent à augmenter l'absorption totale d'eau, car elles ont un effet important sur cela, où l'ajout de 15% de poudre de plante d'Alfa augmente l'absorption totale de l'échantillon de plus de 176,46 %, et l'ajout de 10% de chaux augmente l'absorption des échantillons d'environ 124,37%. Ceci est dû à l'influence de ces deux éléments sur la porosité des échantillons comme nous l'avons déjà indiqué.

D'autre part, l'ajout de poudre de verre contribue légèrement à réduire l'absorption totale d'eau des échantillons. Ceci est évident à partir du diagramme de Pareto (Figure IV.32) et du diagramme de surface de réponse estimée (Figure IV.33), où l'ajout de 10% de poudre de verre à l'échantillon a contribué à réduire l'absorption totale d'eau de celui-ci de plus de 4,52 %. Cela est dû à la contribution de la poudre de verre lorsqu'elle est fondue pendant le processus de combustion en fermant les pores, ce qui réduit le processus d'absorption, ce que les chercheurs[50]et al. ont proposé, ce qui est l'objectif souhaité d'ajouter de la poudre de verre, bien que non atteint dans la mesure où nous l'imaginions.

L'échantillon contenant tous les additifs a enregistré une absorption totale d'eau de 39,892%.

Le rapport d'absorption totale d'eau est supérieur aux valeurs recommandées, car les recommandations stipulent que l'absorption totale d'eau des briques de terre cuite doit se situer dans les limites du champ A_T [15;25%] [8].

Il est également considéré comme ayant une absorption d'eau presque cinq fois supérieure à celle des briques commerciales, où nous avons expérimenté avec un échantillon de briques de terre cuite perforées et constaté qu'il absorbe l'eau de 8,935% en 24 heures; cela est dû à la structure poreuse de l'échantillon laissée par les déchets incinérés, ainsi qu'à la différence de pression perdue lors de la fabrication des échantillons.

3.10. Absorption capillaire d'eau (A_c)

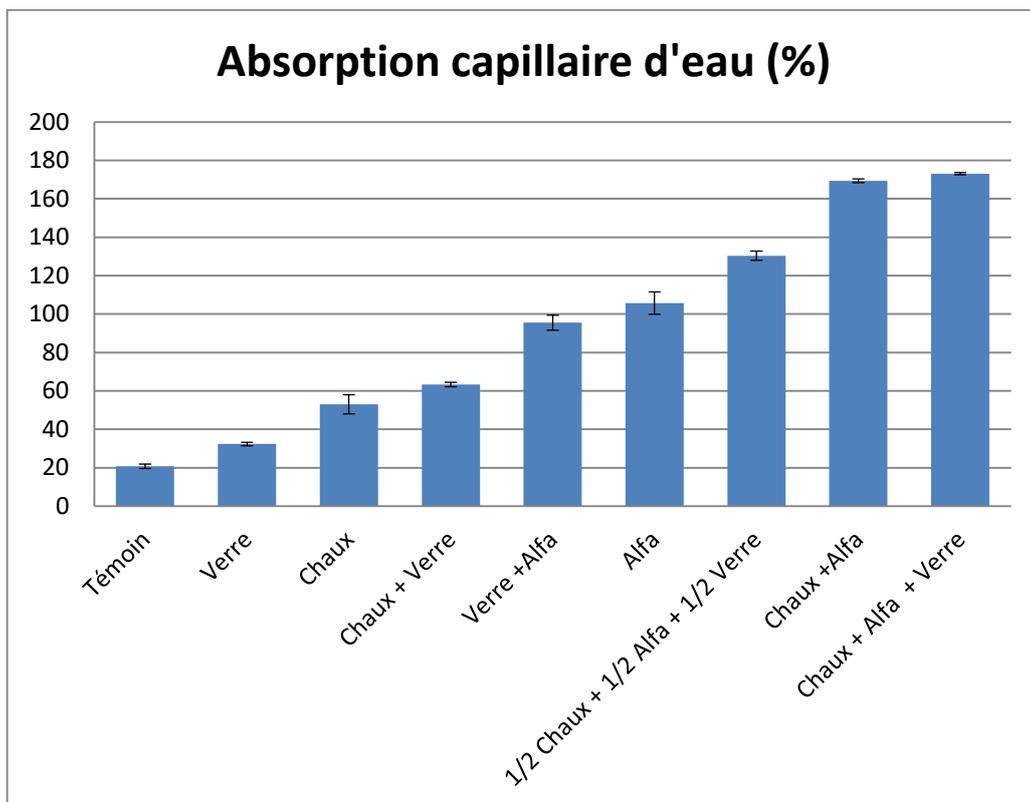


Figure IV.34. Diagramme à barres de l'absorption capillaire d'eau

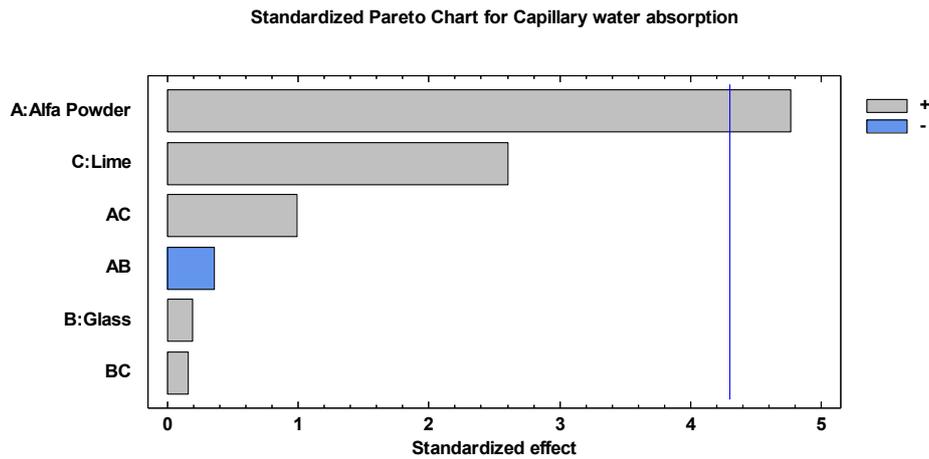


Figure IV.35. Diagramme de Pareto Normalisé pour l'absorption capillaire d'eau

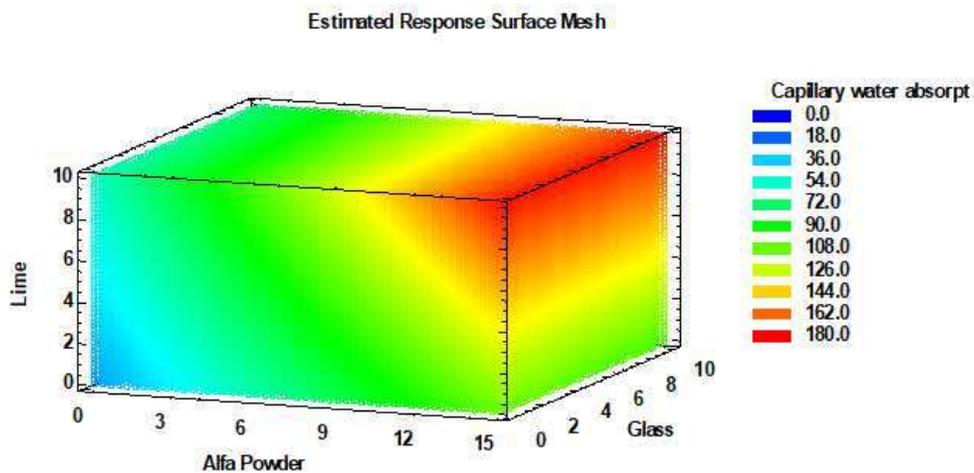


Figure IV.36. Maille de surface de réponse estimée pour l'absorption capillaire d'eau

L'équation du modèle ajusté est :

$$\text{Absorption capillaire d'eau} = 27,2883 + 5,4091 \times \text{Poudre Alfa} + 0,777248 \times \text{Verre} + 2,83875 \times \text{Chaux} - 0,094853 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Verre} + 0,260234 \times \text{Poudre Alfa} \times \text{Chaux} + 0,0635105 \times \text{Verre} \times \text{Chaux}$$

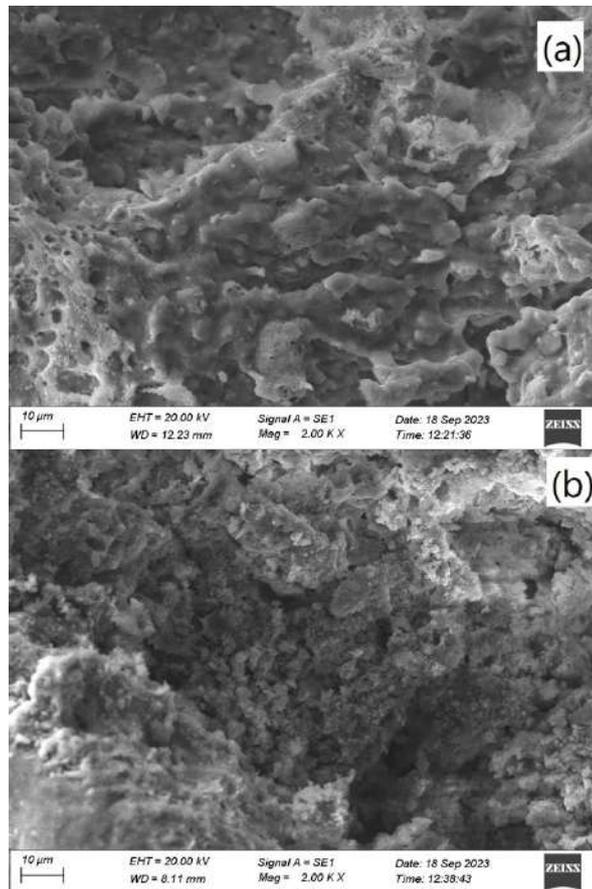
Nous avons noté sur les diagrammes (Figure IV.34), (Figure IV.35), (Figure IV.36) que l'ajout de poudre de plante d'Alfa, de chaux et de poudre de verre contribuait à augmenter l'absorption capillaire d'eau pour les échantillons dans des proportions variables, car l'ajout de 15% de poudre de plante d'Alfa augmentait l'absorption capillaire de l'échantillon de plus de 408% en raison de la structure capillaire des pores laissés par la combustion de ces déchets, tandis que l'absorption capillaire des échantillons auxquels 10% de chaux ont été

ajoutés augmentait de plus de 154 %, alors que l'ajout de 10% de poudre de verre augmentait de manière inattendue l'absorption capillaire des échantillons de plus de 55 %. L'échantillon contenant tous les additifs a enregistré une absorption capillaire de $173,063 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

La valeur de l'absorption capillaire de l'eau pour l'échantillon contenant tous les additifs est supérieure aux valeurs recommandées, ce qui indique que l'absorption capillaire des briques de terre cuite doit être limitée dans le champ $\text{Ac} \in [30;80] \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ [25].

3.11. Analyse microstructurale

La morphologie de surface des différents échantillons est présentée dans la figure IV.37. À travers les images au microscope électronique à balayage (figure IV.37), nous observons la structure poreuse distincte des échantillons contenant de la poudre de plante d'Alfa (figure IV.37, d et e), résultant de sa combustion pendant l'étape de cuisson, créant un cadre poreux qui améliore les performances thermiques des échantillons. En revanche, la poudre de verre, lorsqu'elle est fondue, joue un rôle crucial dans la réduction de la porosité du produit final (voir figure IV.37, c).



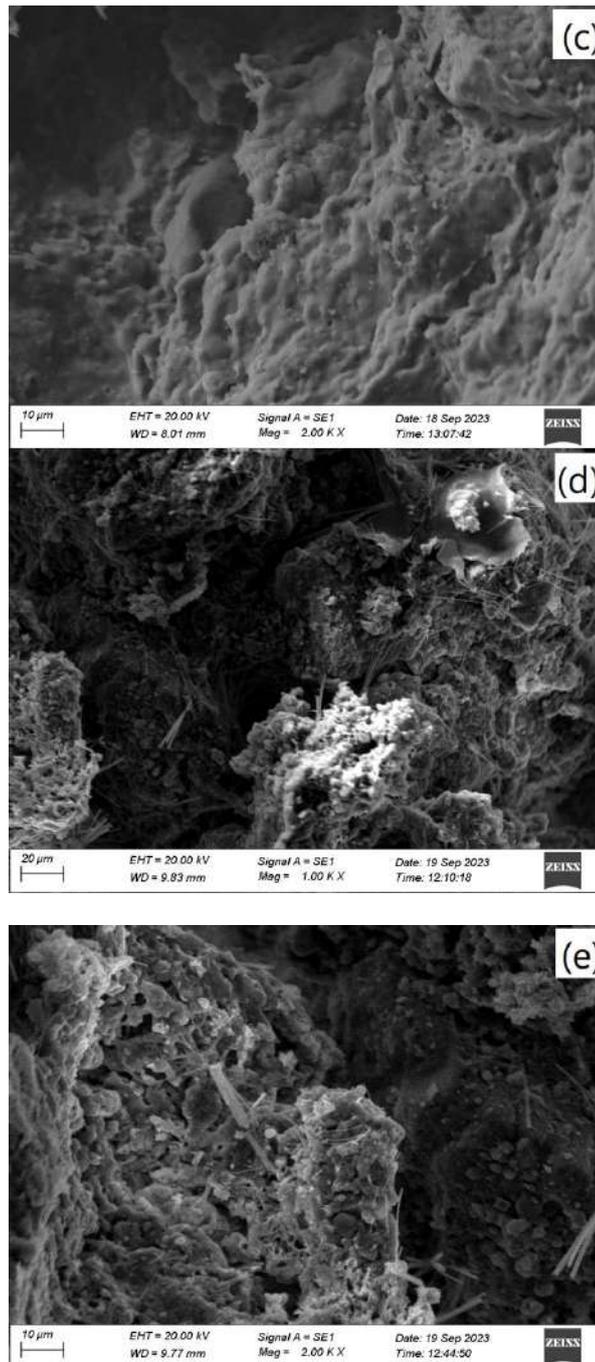


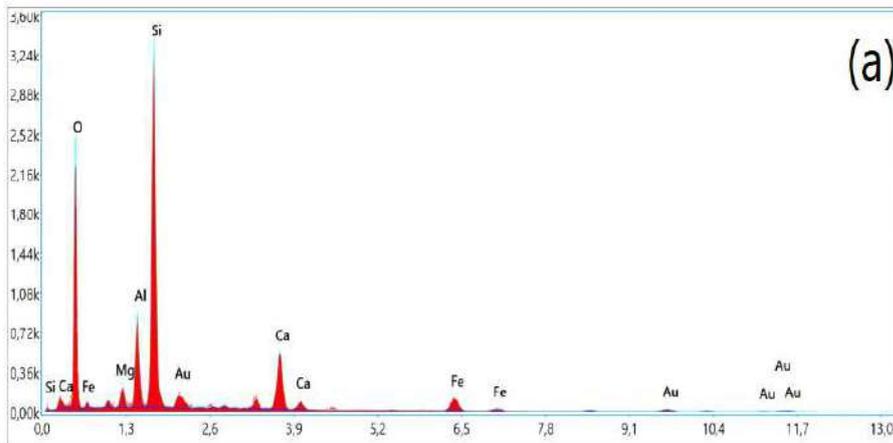
Figure IV.37. Images au microscope électronique à balayage (MEB) des briques fabriquées

(a) Échantillon témoin, (b) Échantillon à la chaux, (c) Échantillon de verre, (d) Échantillon de poudre d'alfa, (e) Échantillon d'Alfa+Chaux+Verre.

La Figure IV.38 illustre la composition chimique des produits finaux, révélant leur absence de substances nocives ou de métaux lourds susceptibles d'impact sur la santé humaine [95]. De plus, dans la Figure IV.38.b, nous observons une diminution de la teneur en silice et en alumine dans l'échantillon, indiquant leur interaction avec le calcium présent dans la chaux,

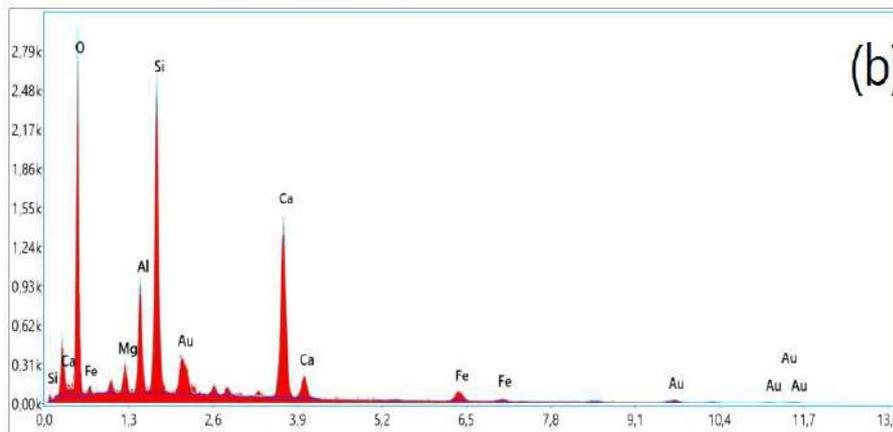
Chapitre IV: Résultats et interprétation

un phénomène connu sous le nom de réaction pouzzolanique, comme nous l'avons précédemment souligné.



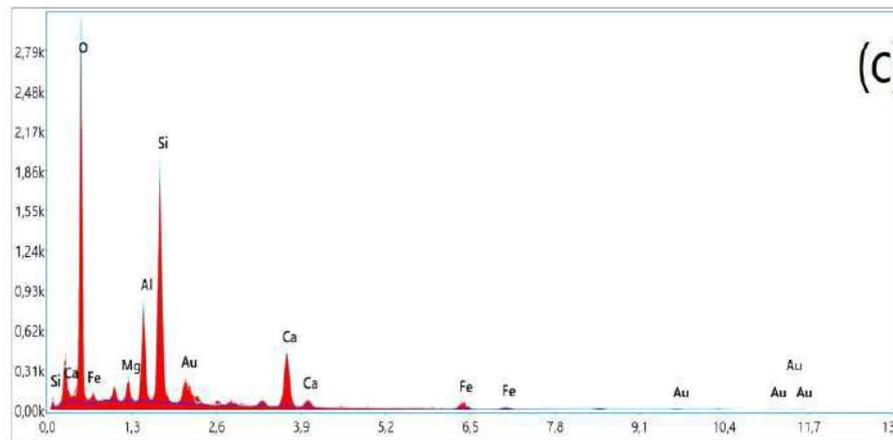
(a)

Elément	% de masse	% atomique
C K	5.06	8.34
O K	52.64	65.21
NaK	1.25	1.07
MgK	1.85	1.51
AlK	6.01	4.41
SiK	21.20	14.95
AuM	2.01	0.20
PdL	0.53	0.10
CaK	6.06	3.00
FeK	3.40	1.21



(b)

Elément	% de masse	% atomique
C K	12.63	19.49
O K	53.82	62.32
NaK	1.18	0.95
MgK	1.55	1.18
AlK	4.35	2.98
SiK	10.73	7.08
AuM	2.98	0.28
ClK	0.42	0.22
CaK	10.74	4.96
FeK	1.61	0.53



(c)

Elément	% de masse	% atomique
C K	12.23	18.17
O K	59.06	65.88
NaK	1.74	1.35
MgK	1.55	1.14
AlK	5.26	3.48
SiK	11.14	7.08
AuM	2.66	0.24
K K	0.44	0.20
CaK	4.59	2.04
FeK	1.35	0.43

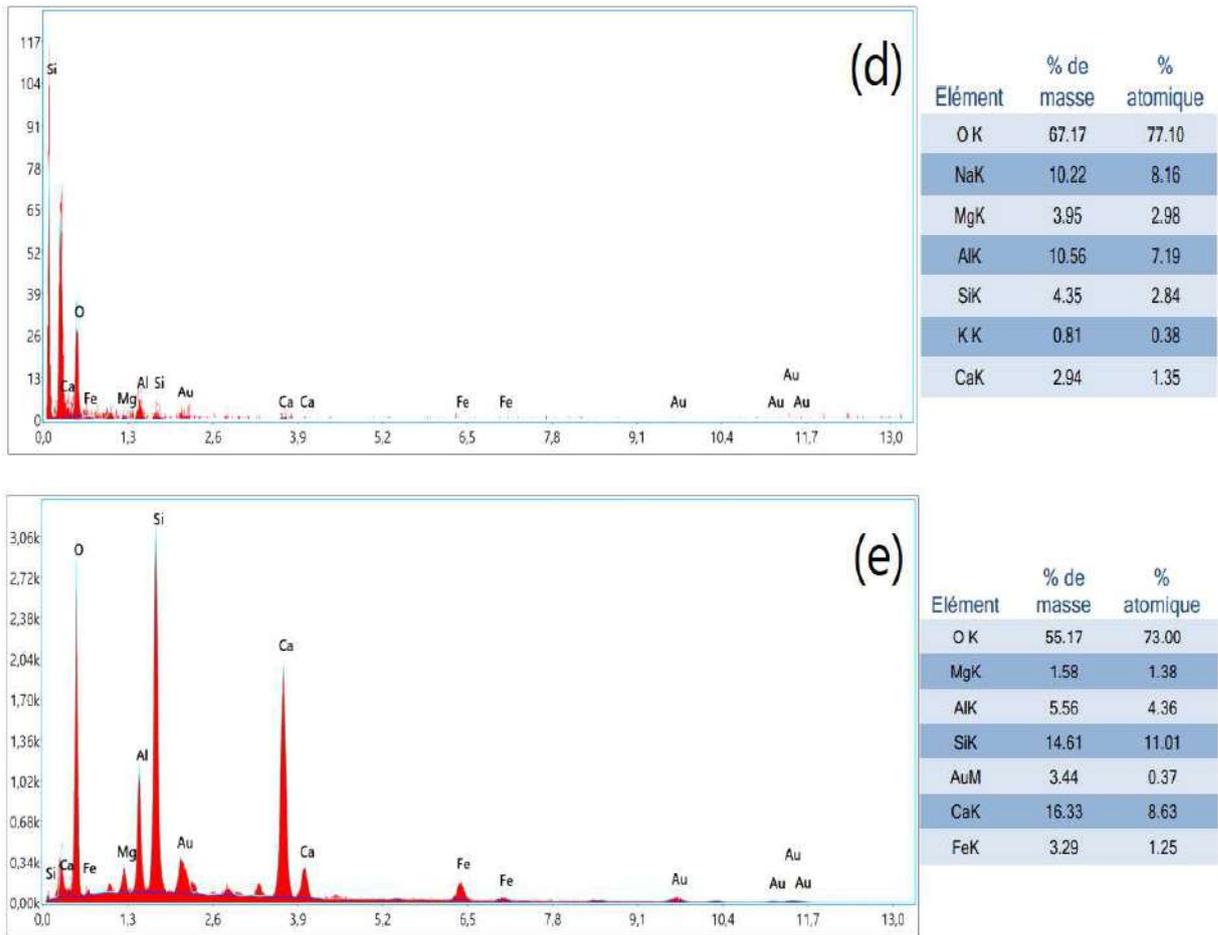


Figure IV.38. Image EDS et composition chimique des briques fabriquées (a) Échantillon témoin, (b) Échantillon à la chaux, (c) Échantillon de verre, (d) Échantillon de poudre d'alfa, (e) Échantillon d'Alfa+Chaux+Verre.

3.12. Optimisation avec le programme "Statgraphics"

Étant donné que les échantillons fabriqués ont obtenu de bons résultats dans certaines caractéristiques mais pas dans d'autres, nous essaierons dans ce paragraphe d'apporter quelques optimisations aux échantillons en utilisant la méthode plans d'expériences par programme statistique "Statgraphics".

Le programme fournit des modèles améliorés d'échantillons dans certaines caractéristiques que nous proposons d'améliorer, et nous donne également le pourcentage d'obtention de ces optimisations (désirabilité optimisée), ainsi que les ratios typiques de facteurs (additions) pour obtenir ce désir, puis les résultats des tests correspondant à ces additions et le pourcentage d'optimisations pour chaque résultat.

Le tableau paramètres des facteurs à optimum montre les proportions d'additifs que les échantillons doivent contenir pour obtenir ce pourcentage de désir.

Le diagramme de désirabilité du schéma tridimensionnel donne une modélisation de la façon dont le changement d'additifs affecte le pourcentage de désir d'optimisation que nous voulons atteindre.

Le tableau des valeurs de réponse à optimum montre le pourcentage d'optimisation pour chaque caractéristique de la meilleure valeur d'optimisation obtenue dans le travail expérimental que nous avons effectué en laboratoire.

3.12.1. Optimisation de l'absorption totale d'eau et de la conductivité thermique

Nous avons initialement proposé un modèle pour lequel nous cherchons à améliorer sa conductivité thermique et son absorption totale d'eau uniquement car le programme travaille à la formation d'un modèle dans lequel l'amélioration de ces deux propriétés est obtenue simultanément, ce modèle correspond aux blocs de construction qui sont utilisés dans les éléments non porteurs.

Le programme nous indique que le pourcentage maximum d'obtention du désir est de 59,88 %. (Désirabilité optimisée = 0,598828). (Figure IV.39).

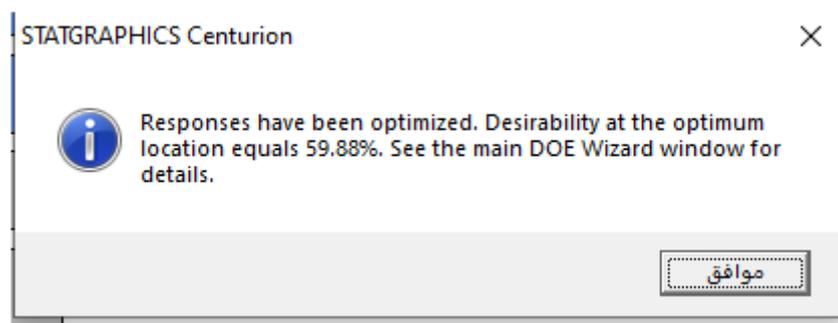


Figure IV.39. Désirabilité optimisée pour la première optimisation

Le diagramme de désirabilité (Figure IV.40) montre l'effet de la modification du rapport entre la poudre de plante d'Alfa et la poudre de verre sur le pourcentage de ce désir d'optimisation, le programme montre à travers le tableau des valeurs de réponse les valeurs de réponse optimales (Tableau IV.4), qui sont les résultats d'expériences thermiques, physiques et mécaniques, en tenant compte des ratios typiques approuvés par lui dans cette amélioration, et donne également le pourcentage de désir d'amélioration pour chaque propriété séparément. Les réglages des facteurs du tableau à optimum (Tableau IV.3) montrent qu'il est nécessaire d'ajouter un pourcentage de poudre d'Alfa de 14,4646%, une poudre de verre de 9,99% et un taux de chaux de 2,10861 E-7% pour obtenir les résultats enregistrés dans les valeurs de réponse du tableau à optimum (Tableau IV.4).

Nous notons dans ce tableau que les valeurs optimales obtenues de conductivité thermique et d'absorption totale d'eau ont atteint respectivement 0,348 W/m. K et 26,62%, qui sont considérées comme des valeurs acceptables par rapport aux domaines de recommandations dont nous avons discuté précédemment, et les autres caractéristiques ont également obtenu une certaine amélioration.

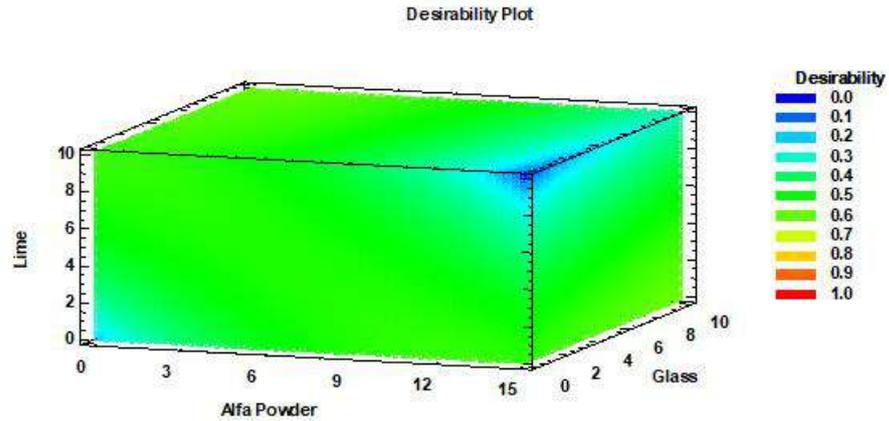


Figure IV.40. Tracé de désirabilité pour la Première Optimisation

Tableau IV.3. Paramètres des facteurs optimaux pour la première optimisation

Facteur	Paramètre
Alfa	14.4646
Verre	9.99993
Chaux	2.10861E-7

Tableau IV.4. Valeurs de réponse à l'optimum pour la première optimisation

Réponse	Optimisé	Prédiction	Limite inférieure à 95,0 %	Limite supérieure à 95,0 %	Désirabilité
Densité	Non	1334.69	700.307	1969.08	0.733863
Absorption d'eau totale	Oui	26.6245	6.42866	46.8203	0.518818
Absorption d'eau capillaire	Non	99.5811	-7.85807	207.02	0.491903
Conductivité thermique	Oui	0.348798	0.0866465	0.61095	0.691177
Chaleur spécifique	Non	1091.28	822.787	1359.78	0.630949
Diffusivité thermique	Non	3.19505	1.64262	4.74748	0.597614
Résistance à la compression	Non	2.14554	-20.5403	24.8313	0.0902216
Résistance à la flexion	Non	0.947642	-1.76403	3.65931	0.211803

3.12.2. Optimisation de la conductivité thermique et de la résistance à la compression

Dans le deuxième processus d'optimisation, nous avons proposé un modèle dont nous cherchons à améliorer la conductivité thermique et la résistance à la compression uniquement car le programme travaille à la formation d'un modèle dans lequel l'optimisation de ces deux propriétés est réalisée simultanément, ce modèle correspond à la brique de construction qui sont utilisés dans les éléments porteurs.

Le programme nous indique que le pourcentage maximum d'obtention du désir est de 44,97 %. (Désirabilité optimisée = 0,449723).

Le diagramme tridimensionnel du diagramme de désirabilité (Figure IV.41) montre clairement l'impact significatif de la variation du pourcentage de poudre de plant d'Alfa sur le pourcentage de ce désir d'amélioration.

À travers les paramètres de facteur de tableau à optimum (Tableau IV.5) le programme montre que pour atteindre ce pourcentage d'amélioration, des déchets doivent être ajoutés en quantités de 7,96% de poudre d'Alfa, 00% de poudre de verre et 0,76% de chaux pour obtenir les résultats enregistrés dans les valeurs de réponse du tableau à l'optimum (tableau IV.6).

Nous avons noté dans ce tableau que les valeurs de réponse optimales pour la conductivité thermique et la résistance à la compression de $\lambda=0,421$ W / m. K et $R_c=15,744$ MPa étant donné que ces valeurs sont considérées comme bonnes pour la résistance des échantillons aux forces de compression et acceptables pour les performances thermiques, le reste des caractéristiques sont également considérées comme acceptables.

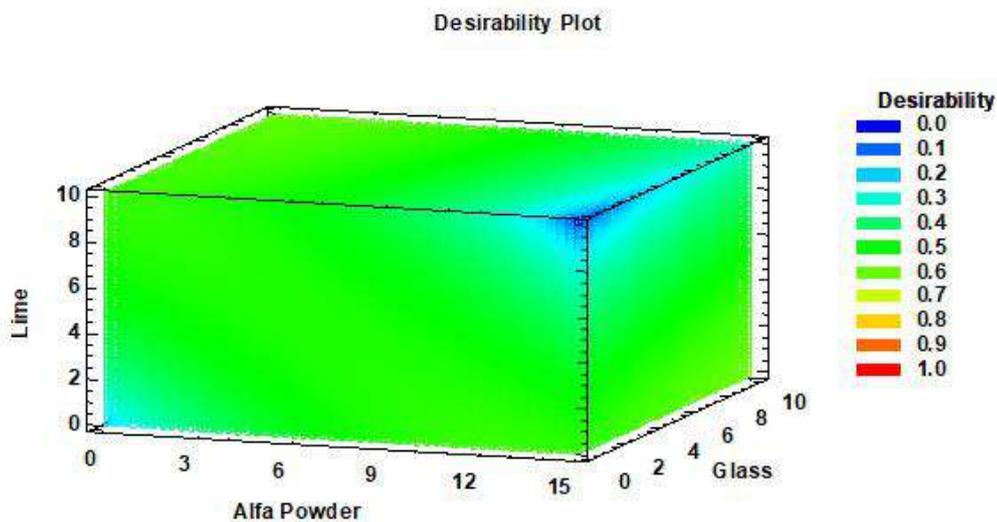


Figure IV.41. Tracé de désirabilité pour la deuxième optimisation

Tableau IV.5. Paramètres des facteurs optimaux pour la deuxième optimisation

Facteur	Paramètre
Alfa	7.96268
Verre	0.0000130565
Chaux	0.763957

Tableau IV.6. Valeurs de réponse à l'optimum pour la deuxième optimisation

Réponse	Optimisé	Prédiction	Limite inférieure à 95,0 %	Limite supérieure à 95,0 %	Désirabilité
Densité	Non	1476.21	1020.97	1931.44	0.549141
Absorption d'eau totale	Non	22.2064	7.71376	36.699	0.646527
Absorption d'eau capillaire	Non	74.1109	-2.98803	151.21	0.656181
Conductivité thermique	Oui	0.421866	0.233745	0.609988	0.413995
Chaleur spécifique	Non	1224.29	1031.62	1416.97	0.323171
Diffusivité thermique	Non	3.40176	2.28772	4.51579	0.436128
Résistance à la compression	Oui	15.7443	-0.535207	32.0237	0.488535
Résistance à la flexion	Non	2.23025	0.284337	4.17615	0.575929

3.12.3. Optimisation de la conductivité thermique, de l'absorption totale d'eau et de la résistance à la compression

Dans le troisième processus d'optimisation, nous avons proposé un modèle dont nous cherchons à améliorer ensemble la conductivité thermique, la résistance à la compression et l'absorption totale d'eau, car le programme travaille à la formation d'un modèle dans lequel l'optimisation de ces trois propriétés est obtenue simultanément.

Le programme nous indique que le pourcentage maximum d'obtention du désir est de 52,12 % (Désirabilité optimisée = 0,521235).

La grande influence de la variation du pourcentage de poudre de plante d'Alfa sur le pourcentage de ce désir d'amélioration est illustrée par le diagramme de désirabilité (Figure IV.42).

À travers les paramètres de facteur de tableau à optimum (Tableau IV.7). le programme montre que pour atteindre ce pourcentage d'optimisation, il est nécessaire d'ajouter des déchets en quantités de 6,323% de poudre Alfa, 00% de poudre de verre et 00% de chaux pour obtenir les résultats enregistrés dans les valeurs de réponse du tableau à optimum (Tableau IV.8).

Nous avons noté dans ce tableau que les valeurs de réponse optimales pour la conductivité thermique, la résistance à la compression et l'absorption totale d'eau sont obtenues à raison de $\lambda=0,447$ W/m. K , $R_c =19,82$ MPa et $A_T=19\%$.

Ces valeurs sont considérées comme bonnes pour la résistance des échantillons aux forces de compression et acceptables pour l'absorption totale d'eau, mais ses performances thermiques sont considérées comme médiocres, car la conductivité thermique n'a permis d'optimiser que 31,51 % de l'optimisation totale trouvée dans l'expérience.

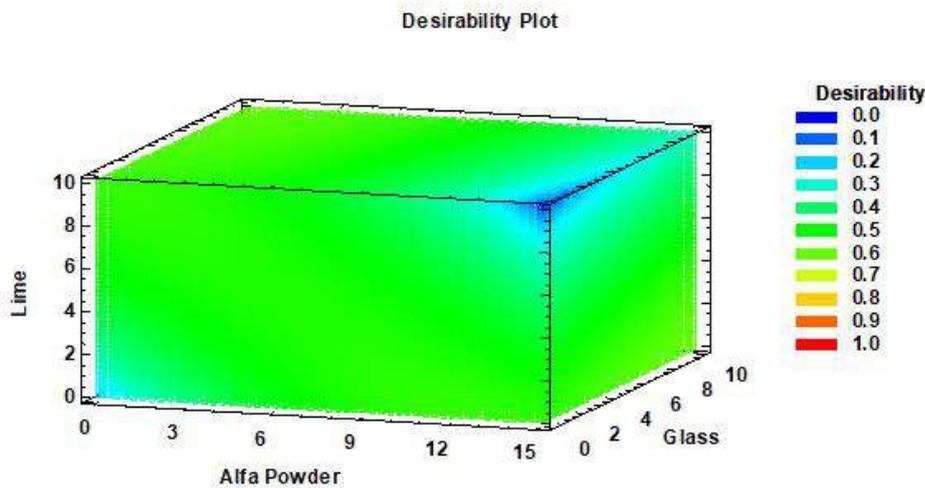


Figure IV.42. Tracé de désirabilité pour la Troisième optimisation

Tableau IV.7.Paramètres des facteurs optimaux pour la Troisième optimisation

Facteur	Paramètre
Alfa	6.32329
Verre	0.00000465253
Chaux	0.00001389

Tableau IV.8. Valeurs de réponse optimales pour la Troisième optimisation

Réponse	Optimisé	Prédiction	Limite inférieure à 95,0 %	Limite supérieure à 95,0 %	Désirabilité
Densité	Non	1547.65	1051.4	2043.9	0.455882
Absorption d'eau totale	Oui	19.0094	3.21106	34.8078	0.738938
Absorption d'eau capillaire	Non	61.4916	-22.5537	145.537	0.737572
Conductivité thermique	Oui	0.447932	0.242861	0.653003	0.315115
Chaleur spécifique	Non	1259.04	1049.0	1469.07	0.24277
Diffusivité thermique	Non	3.51223	2.29782	4.72663	0.349824
Résistance à la compression	Oui	19.8285	2.08235	37.5747	0.608167
Résistance à la flexion	Non	2.55685	0.435617	4.67808	0.66865

3.12.4. Optimisation de toutes les propriétés

Dans le quatrième processus d'optimisation, nous avons proposé un modèle dans lequel nous cherchons à améliorer toutes les propriétés thermiques, physiques et mécaniques, car le programme travaille à la formation d'un modèle dans lequel toutes ces propriétés sont améliorées simultanément.

Le programme nous indique que ces caractéristiques peuvent être améliorées ensemble de 50,54 % (Désirabilité optimisée = 0,505439).

La grande influence du changement du pourcentage de poudre de plant d'Alfa sur le pourcentage de ce désir d'amélioration est clairement illustrée par le diagramme de désirabilité (Figure IV.43).

À travers les paramètres de facteur de tableau à optimum (Tableau IV.9), le programme montre que pour atteindre ce pourcentage d'amélioration, il est nécessaire d'ajouter des déchets à raison de 10,26% de poudre Alfa, un pourcentage de poudre de verre de 00% et un pourcentage de chaux de 00% et d'obtenir les résultats enregistrés dans le tableau valeurs de réponse à l'optimum (Tableau IV.10).

Ceci permet d'obtenir des valeurs de réponse optimales de :

$\rho=1412,99 \text{ Kg} / \text{m}^3$; $\lambda = 0,402 \text{ W/m. K}$; $C_p=1202,86 \text{ Kj} / \text{m}^3.\text{K}$; $D = 3,342 \text{ m}^2 / \text{s}$;
 $R_c = 12,71 \text{ MPa}$; $R_f = 2,033 \text{ MPa}$; $A_T=24,097\%$; $A_c=82,816 \text{ g} / \text{cm}^2.\text{min}^{1/2}$.

Ces valeurs sont considérées comme bonnes pour la résistance des échantillons aux forces de compression et de flexion, acceptables pour l'absorption totale et capillaire de l'eau, et également acceptables pour leurs performances thermiques.

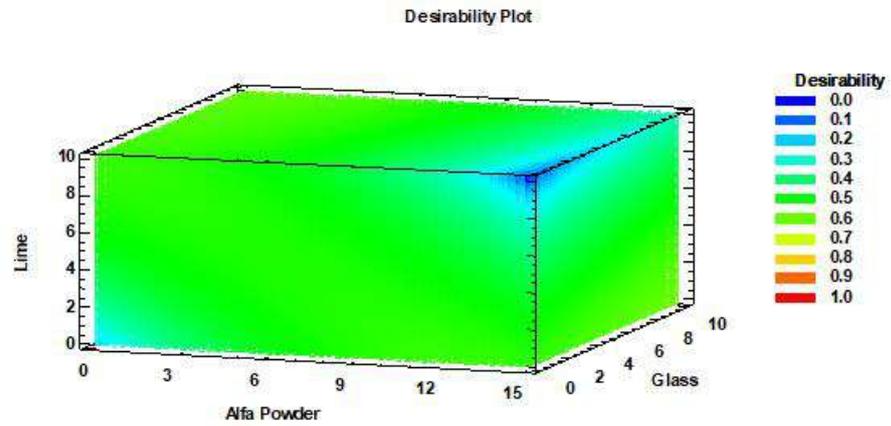


Figure IV.43. Tracé de désirabilité pour la quatrième optimisation

Tableau IV.9. Paramètres des facteurs optimaux pour la quatrième optimisation

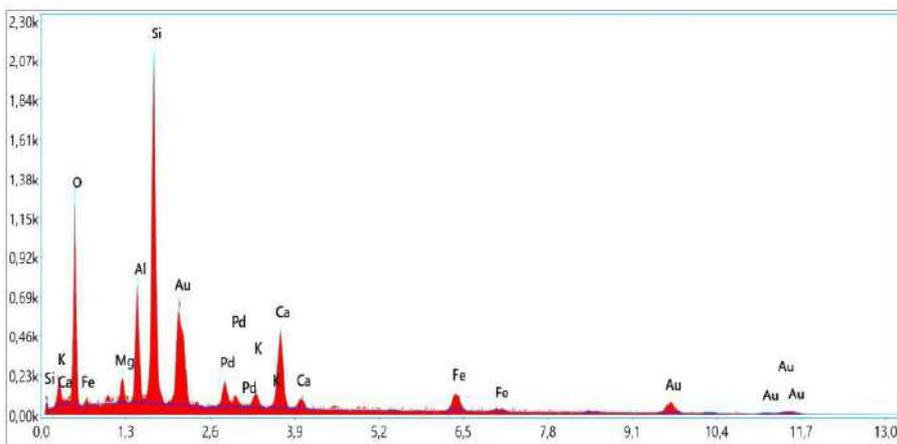
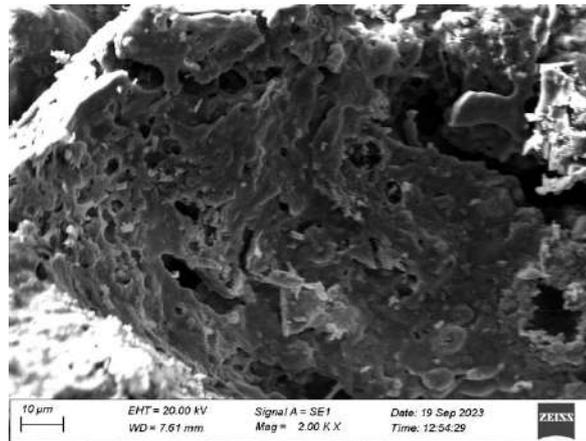
Facteur	Paramètre
Alfa	10.2656
Verre	0.00000196371
Chaux	0.00000340418

Tableau IV.10. Valeurs de réponse à l'optimum pour la quatrième optimisation

Réponse	Optimisé	Prédiction	Limite inférieure à 95,0 %	Limite supérieure à 95,0 %	Désirabilité
Densité	Oui	1412.99	896.24	1929.74	0.631658
Absorption d'eau totale	Oui	24.0971	7.64625	40.548	0.591874
Absorption d'eau capillaire	Oui	82.816	-4.70047	170.333	0.600034
Conductivité thermique	Oui	0.402977	0.189436	0.616517	0.485653
Chaleur spécifique	Oui	1202.86	984.147	1421.56	0.372773
Diffusivité thermique	Oui	3.31445	2.04989	4.57901	0.504334
Résistance à la compression	Oui	12.7183	-5.7608	31.1975	0.399905
Résistance à la flexion	Oui	2.03331	-0.175531	4.24215	0.520019

Après avoir modélisé l'amélioration à l'aide du programme mentionné, nous avons terminé le dernier modèle dans lequel nous avons proposé au programme d'améliorer toutes les propriétés et les proportions du mélange proposé par le programme, tout échantillon contenant de l'argile et du sable dans des proportions fixes et ajoutant 10,26% au poids de la poudre de plante d'Alfa uniquement afin d'évaluer la validité des résultats fournis par le programme ainsi que : Densité apparente de 1371,0335 kg/m³ avec une erreur de programme de 3,06%, Conductivité thermique de 0,384 W/m. K avec une erreur de 4,68%, Chaleur spécifique de 1154,21 KJ/m³.K avec une erreur de 4,21%, Diffusivité thermique de 3. 326x10⁻⁷ m² / s avec une erreur de 0,48%, Résistance à la compression de 8,561 MPa avec une erreur de 48,55%, Résistance à la flexion de 1,610 MPa avec une erreur de 26,27%, Absorption d'eau totale estimée à 26,922% avec une erreur de 10,49% et un taux d'Absorption d'eau capillaire de 95,953 g / cm².min^{1/2} avec une erreur de 13,69%.

La Figure IV.44 illustre la structure morphologique de surface et la composition chimique de l'échantillon idéal. Elle montre une augmentation de la porosité de la brique, ainsi que l'absence d'éléments nocifs pour la santé humaine dans le produit [95].



Elément	% de masse	% atomique
O K	42.64	66.06
MgK	2.05	2.09
AlK	6.82	6.27
SiK	17.92	15.81
AuM	14.29	1.80
PdL	3.09	0.86
KK	1.11	0.71
CaK	7.52	4.65
FeK	3.96	1.76

Figure IV.44. Images au microscope électronique à balayage (MEB) et spectrométrie de dispersion d'énergie (EDX) des briques fabriquées optimisées.

Enfin, on peut dire que ces indicateurs nous amènent à la conclusion que l'ajout de chaux aux composants des briques de terre cuite est considéré comme négatif pour la plupart des propriétés, il peut donc être supprimé.

On peut également dire que la poudre de verre n'a pas obtenu les résultats souhaités en comblant certaines des lacunes laissées par l'ajout de poudre de plante d'Alfa sur certaines propriétés, il a donc également fallu s'en passer.

L'échantillon finalement complété a des résultats qui répondent à la plupart des recommandations.

4. Résultats des tests de l'expérience finale 2

Nous avons résumé les résultats expérimentaux de diverses expériences menées sur divers échantillons dans le tableau IV.11.

Tableau IV.11. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 2

Chapitre IV: Résultats et interprétation

Les Échantillons	Retrait longitudinal	Retrait diagonal	Densité	Incertitude	Absorption d'eau totale	Incertitude	Absorption d'eau capillaire	Incertitude	Conductivité thermique	Incertitude	Chaleur spécifique	Incertitude	Diffusivité thermique	Résistance à la compression	Incertitude	Résistance à la flexion	Incertitude
	%	%	kg/m ³	kg/m ³	%	%	g/cm ² .m in ^{1/2}	g/cm ² .m in ^{1/2}	W/m.K	W/m.K	kJ/m ³ . K	kJ/m ³ . K	x10 ⁻⁷ m ² /s	MPa	MPa	MPa	MPa
Échantillon témoin	7.7272	7.617	1776.19	35.5	10.451	0.16	20.804	1.13	0.531	0.064	1363.95	52.05	3.89	33.206	4.68	3.724	0.52
5% Poudre de bois palmier 2	6.3636	6.419	1594.323	35.042	21.53622	1.722897	99.08713	4.954357	0.358	0.009	1184.125	33.975	3.02	7.072788	0.495	1.531	0.0918
8% Poudre de bois palmier 2	6.5909	6.604	1436.492	44.18595	25.76155	0.404409	139.5734	13.27946	0.333	0.02765	1112.275	78.43875	2.99	5.476	0.547	1.325	0.119
10% Poudre de bois palmier 2	5.3636	5.533	1332.86	51.01972	28.26298	0.501614	181.9769	5.758143	0.27975	0.028238	988.325	75.29125	2.83	3.730214	0.09	1.296	0.15
12% Poudre de bois palmier 2	5.4545	5.643	1307.867	9.802496	32.00614	0.160902	215.7238	18.52476	0.2525	0.038125	918.6833	122.0509	2.75	1.546	0.092	0.951	0.038
15% Poudre de bois palmier 2	4.7727	4.814	1194.463	26.6	37.40602	2.992481	242.3882	12.11941	0.2315	0.0165	853.75	35.55	2.71	0.929557	0.0836	0.489	0.0244

4.1. Retrait

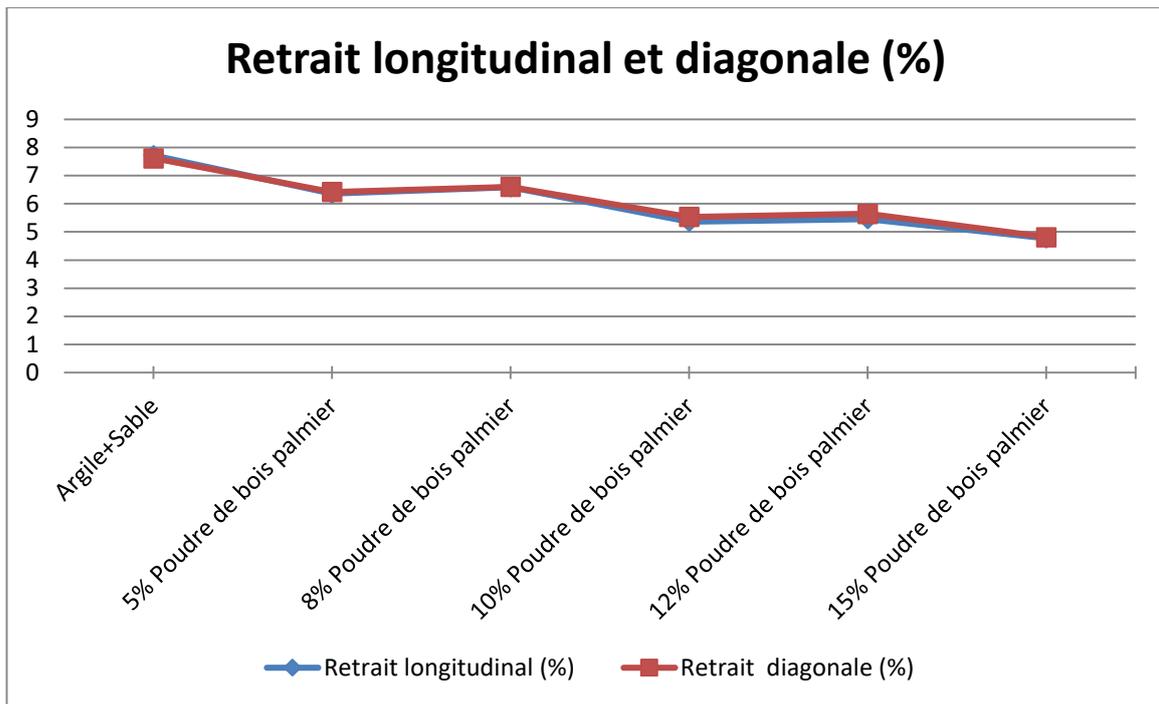


Figure IV.45. Retrait longitudinal et diagonale

Dans le graphique de variation du retrait longitudinal et diagonale des briques en terre cuite (Figure IV.45), on observe une diminution du retrait en fonction de l'augmentation du pourcentage de poudre de bois de palmier dattier². Le retrait longitudinal et diagonal des échantillons modifiés varie entre 4,77% et 6,6%, des valeurs de contraction proches de la plage recommandée pour la contraction des briques en terre cuite, où il varie de 5 et 8% [25]. Il convient de noter que le pourcentage de réduction du retrait des briques modifiées a atteint jusqu'à 38,21% lors de l'ajout de poudre de bois de palmier², à raison de 15% du poids de l'échantillon.

La raison de la diminution du retrait lors de l'augmentation de la poudre de bois de palmier réside dans l'amélioration de la plasticité du mélange. En effet, ces ajouts absorbent une partie des contraintes et des fissures qui pourraient se produire en raison du retrait, réduisant ainsi les chances de formation de fissures.

4.2. Densité apparente (ρ)

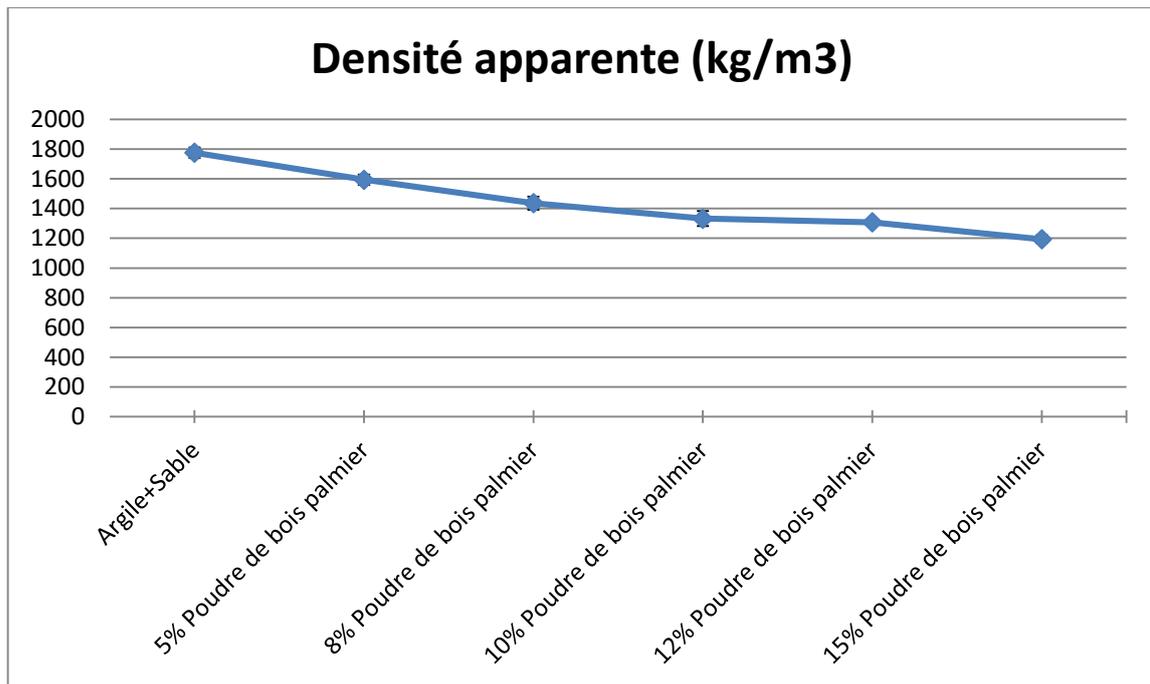


Figure IV.46. Densité apparente

À partir du graphique (Figure IV.46), on remarque que la densité apparente des échantillons de briques en terre cuite diminue avec l'augmentation de la poudre de palmier dattier. Cette diminution atteint plus de 32 % lors de l'ajout de la poudre à hauteur de 15 % du poids de l'échantillon, en enregistrant une densité apparente atteignant 1194,463 kg/m³. Cela est dû à la nouvelle structure poreuse de l'échantillon créée par le processus de cuisson. En plus de la sortie de la plupart de l'eau des échantillons, la cuisson de l'échantillon conduit à la combustion de la poudre de bois d'origine végétale, laissant des bulles d'air à sa place qui réduisent la densité apparente des échantillons, ce qui rend la brique en terre cuite plus légère. Il convient de noter que la densité apparente de la brique en terre cuite ordinaire varie entre 1600 et 2000 kg/m³ [28],[87]. Il est également important de noter que la densité de tous les échantillons modifiés est inférieure aux valeurs de cette plage, ce qui est un indicateur positif de l'effet de ces ajouts sur cette propriété de la brique.

4.3. Absorption totale d'eau

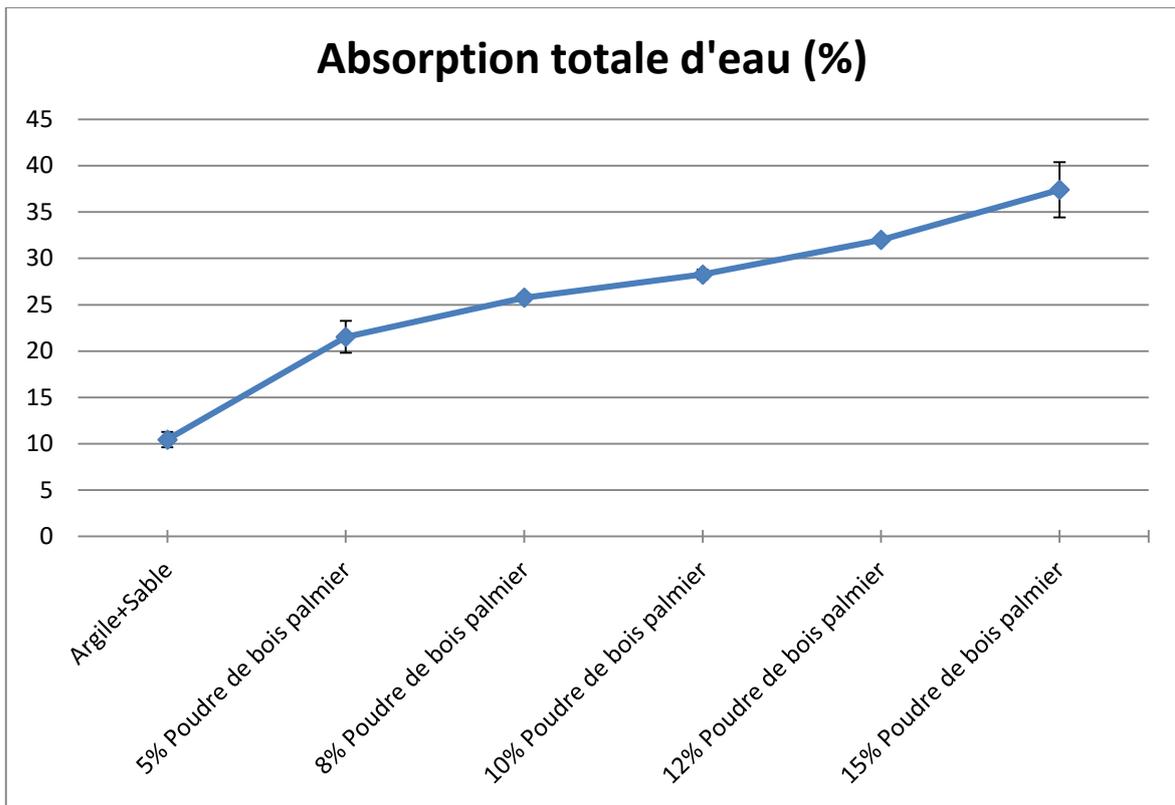


Figure IV.47. Absorption totale d'eau

Nous observons à travers le tableau IV.11 et la courbe dans la figure IV.47 que le taux d'absorption d'eau pour les échantillons de briques augmente avec l'augmentation du pourcentage de poudre de palmier ajoutée. Le taux d'absorption d'eau pour les échantillons modifiés varie entre 21,53% et 37,4%. Cependant, les échantillons qui ne dépassent pas la limite recommandée dans les recommandations, compris entre 15% et 25% [8], sont ceux auxquels on a ajouté de la poudre de palmier à hauteur de 5% et 8% seulement. L'augmentation du taux d'absorption pour les échantillons de briques modifiées est due à la nouvelle structure poreuse créée par la combustion des déchets à l'intérieur des échantillons.

4.4. Absorption capillaire d'eau

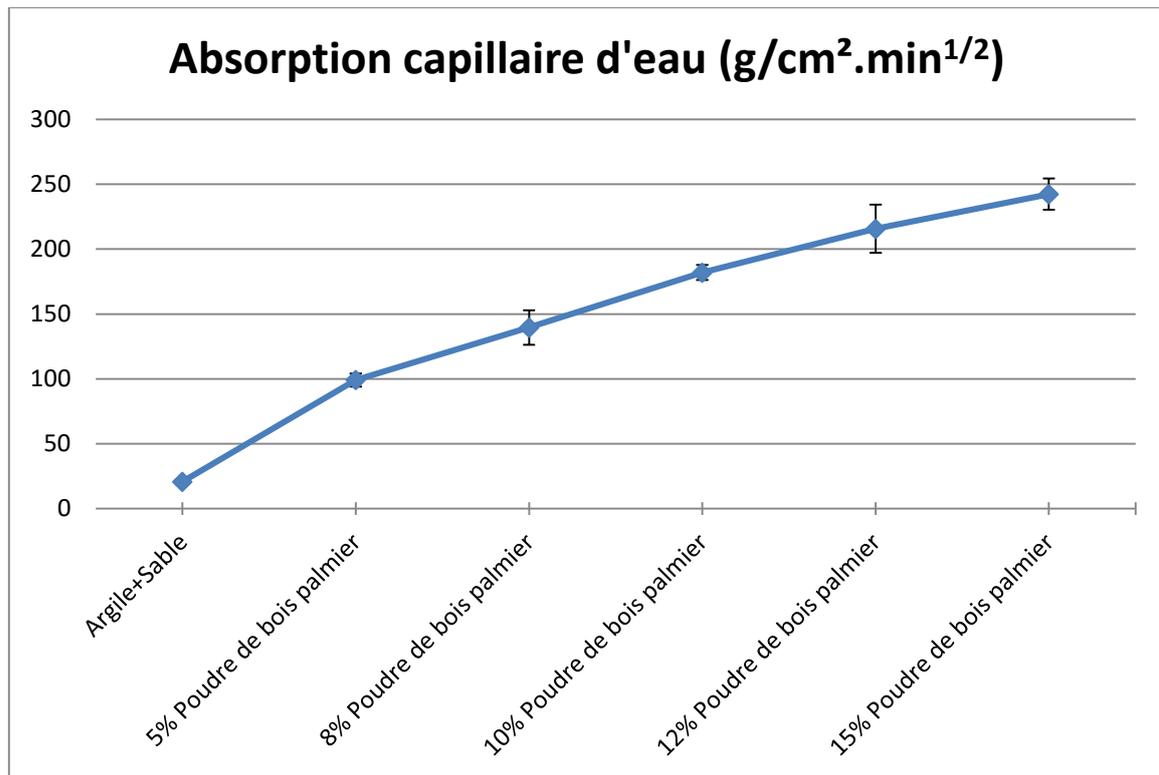


Figure IV.48. Absorption capillaire d'eau

Nous constatons à travers la courbe (Figure IV.48) une forte augmentation du coefficient de capillarité pour les échantillons de briques modifiés, où le coefficient de capillarité pour les échantillons de briques modifiés varie entre 99.08 et 242,38 g/cm².min^{0.5}. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs recommandées qui stipulent que le coefficient de capillarité pour les briques en terre cuite est limité entre 30 et 80 g/cm².min^{0.5} [25].

4.5. Conductivité thermique (λ)

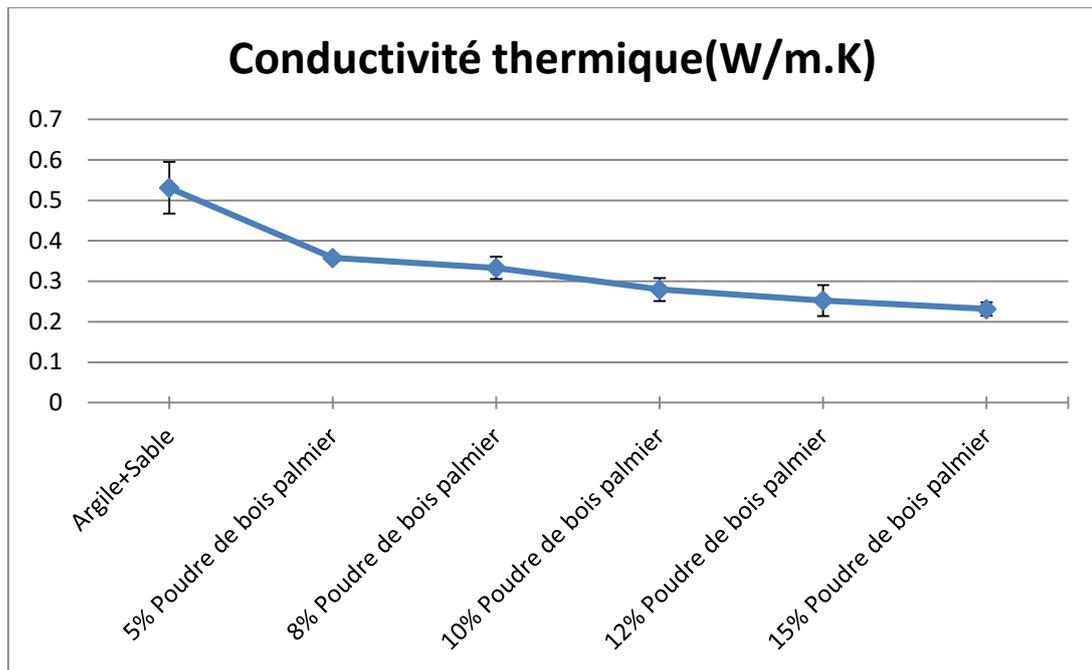


Figure IV.49. Conductivité thermique

Nous observons à travers le graphique (Figure IV.49) que la conductivité thermique des échantillons de briques en terre cuite diminue à mesure que la proportion de poudre de palmier ajoutée augmente. La baisse atteint 56,4% avec une augmentation de 15% de cette poudre. Les valeurs de conductivité thermique des échantillons de briques modifiées varient de 0,231 à 0,358, ce qui est considéré comme très important pour l'efficacité de la brique à des fins d'isolation thermique. Cela est dû à la nouvelle structure poreuse des échantillons de briques modifiées résultant de la combustion de la poudre de bois à l'intérieur. Il est à noter que la conductivité thermique des briques pleines en terre cuite commerciale est comprise dans la plage de $\lambda \in [0,7; 0,73]$ W/m.K selon le chercheur [87], et elle peut même atteindre une valeur de 0,573 W/m.K, selon le chercheur [89].

4.6. Chaleur spécifique

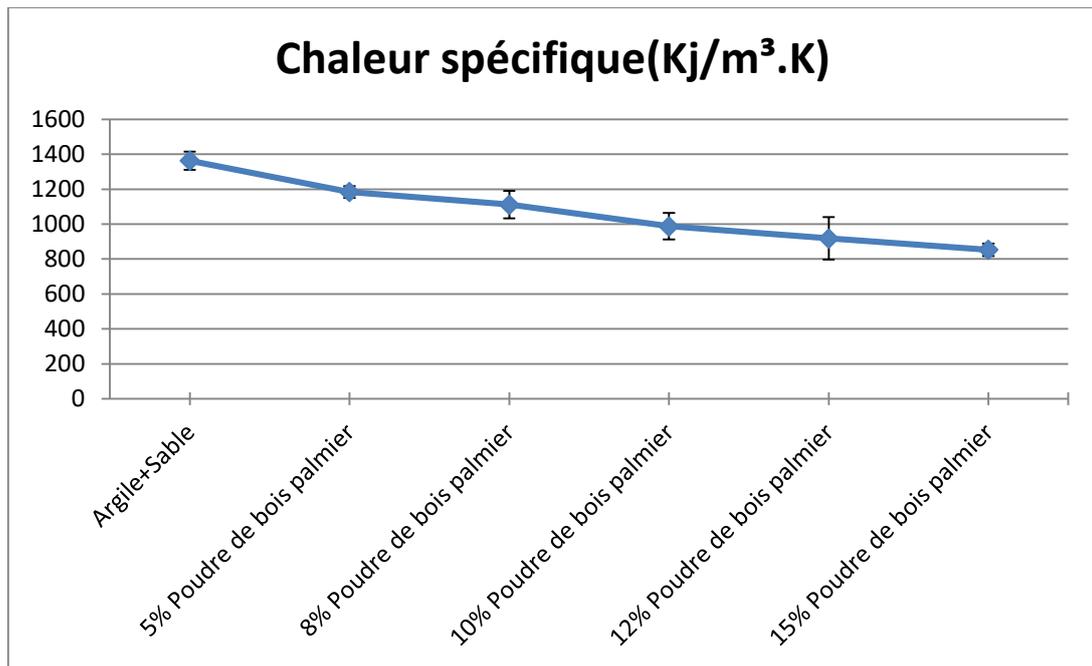


Figure IV.50. Chaleur spécifique

L'augmentation de la proportion de poudre ajoutée a contribué à la diminution de la chaleur spécifique des échantillons. Cela est dû au rôle joué par les bulles d'air dans la modification du comportement du matériau, car il est connu que l'air a une chaleur spécifique relativement basse, atteignant 1006 J / kg.C [86].

4.7. Diffusivité thermique (D ou α)

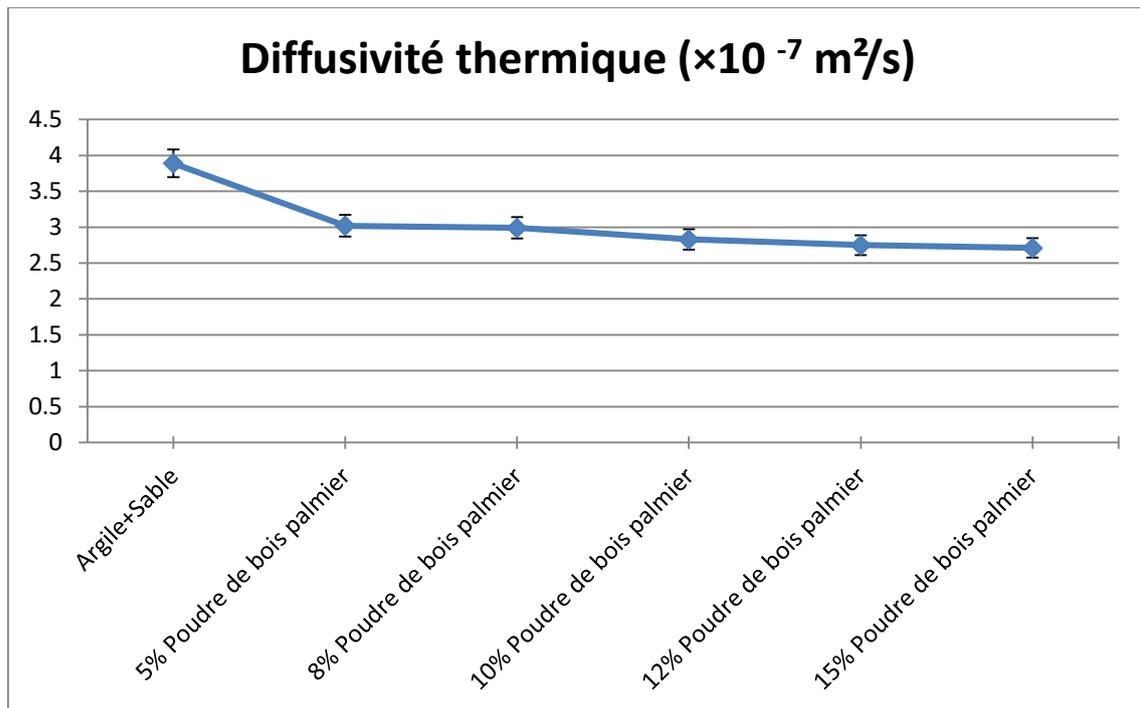


Figure IV.51. Diffusivité thermique

Nous avons remarqué à partir de la courbe graphique (Figure IV.51) que les additifs contribuaient à réduire la diffusion thermique, ce qui caractérise le concept d'inertie thermique, car l'ajout de poudre de bois réduisait la diffusion thermique d'environ 30.33 % lors de l'ajout de cette poudre de 15% enregistré une diffusivité thermique de $2.71 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.8. Résistance à la compression

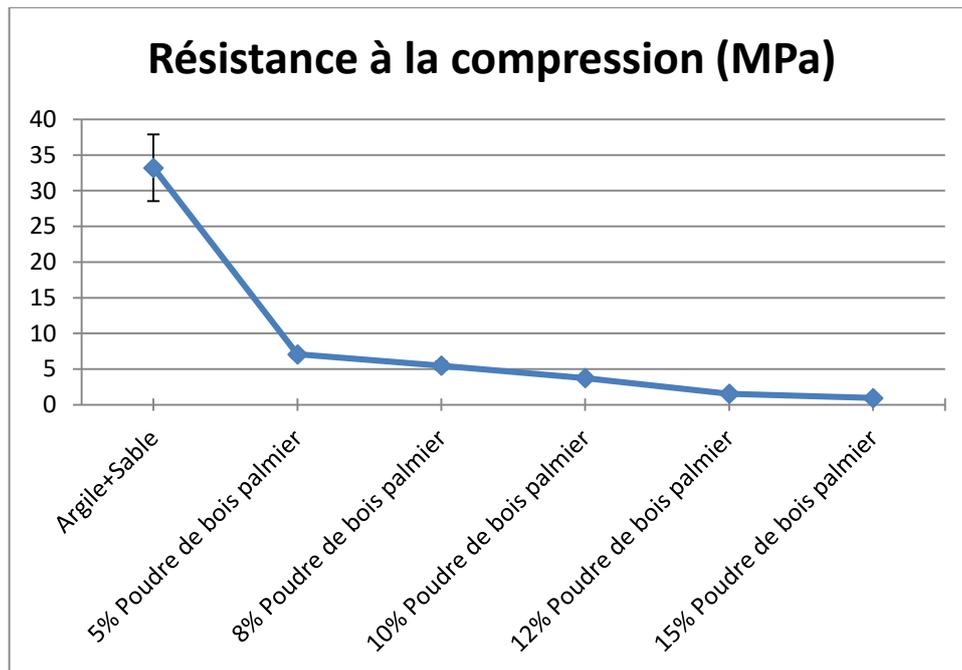


Figure IV.52. Résistance à la compression

Nous observons à travers la courbe (Figure IV.52) que la résistance à la compression des échantillons de briques en terre cuite diminue avec l'augmentation de la poudre de palmier dattier², en raison de la nouvelle structure poreuse des échantillons. La diminution de la résistance pour l'échantillon auquel 15 % de poudre a été ajoutée dépasse 97 %, ce qui est une perte très significative en termes de résistance à la compression des échantillons. Cela nous pousse à suivre l'évolution de cette caractéristique des échantillons afin de trouver la meilleure proportion d'ajout de poudre de bois. Nous notons à travers le tableau IV.11 et la courbe IV.52 correspondante que l'échantillon modifié auquel 10 % de poudre a été ajoutée a donné une performance mécanique acceptable qui se situe dans la plage des recommandations dans la plupart des normes internationales, car la résistance à la compression de cet échantillon a atteint 3.73 MPa, où les normes brésiliennes recommandent que la valeur minimale de la résistance des briques de terre à la compression soit de 1,5 MPa, tandis que les normes australiennes recommandent une valeur de 3 MPa, les normes indiennes (briques de terre cuite communes) une valeur comprise entre 3,5 et 35 MPa et la valeur standard nationale chinoise entre 7,35 et 14,71 MPa [92],[93]. Les normes turques recommandent une valeur minimale de 5 MPa pour les murs non porteurs dans les zones non exposées au risque sismique, selon la norme TS 705:1985 [90],[91].

4.9. Résistance à la flexion

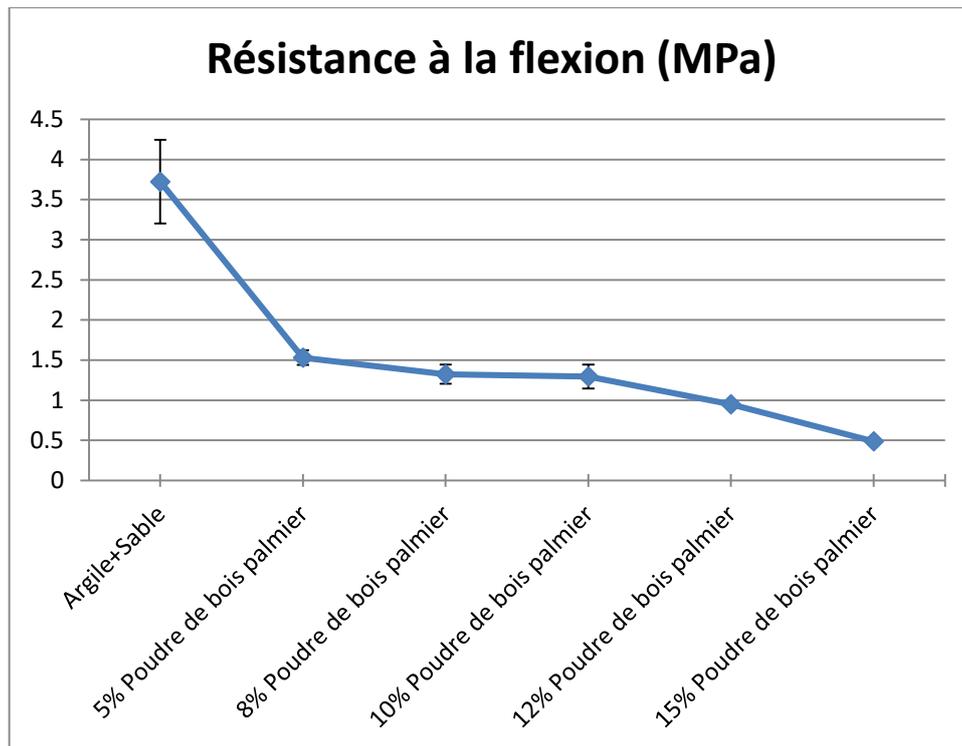


Figure IV.53. Résistance à la flexion

Nous constatons à travers la courbe de variation de la résistance des échantillons de briques à la flexion (Figure IV.53) que cette dernière diminue avec l'augmentation de la poudre ajoutée. La diminution atteint plus de 65.19 % pour les échantillons auxquels 10 % de poudre ont été ajoutés, enregistrant une résistance de 1.296 MPa.

5. Résultats des tests de l'expérience finale 3

Nous avons résumé les résultats expérimentaux de diverses expériences menées sur divers échantillons dans le tableau IV.12.

Tableau IV.12. Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience finale 3

Chapitre IV: Résultats et interprétation

Les Échantillons	Retrait longitudinal	Retrait diagonal	Densité	Incertitude	Absorption d'eau totale	Incertitude	Absorption d'eau capillaire	Incertitude	Conductivité thermique	Incertitude	Chaleur spécifique	Incertitude	Diffusivité thermique	Résistance à la compression	Incertitude	Résistance à la flexion	Incertitude
	%	%	kg/m ³	kg/m ³	%	%	g/cm ² .min ^{1/2}	g/cm ² .min ^{1/2}	W/m.K	W/m.K	kJ/m ³ .K	kJ/m ³ .K	x10 ⁻⁷ m ² /s	MPa	MPa	MPa	MPa
Échantillon témoin	7.7272	7.617	1776.19	35.5	10.451	0.16	20.804	1.13	0.531	0.064	1363.95	52.05	3.89	33.206	4.68	3.724	0.52
10% Poudre de bois palmier	5.3636	5.533	1332.86	51.01972	28.26298	0.501614	181.9769	5.758143	0.27975	0.028238	988.325	75.29125	2.83	3.730214	0.09	1.296	0.15
10% PBP+2 %Chaux	5.3333	5.5044	1320.191	18.87905	33.24823	0.85981	239.1663	0.406055	0.2765	0.021325	938.4	150.32	2.95	2.413	0.107	0.974	0.068
10% PBP+4 %Chaux	5.340909	5.4543	1276.939	19.07309	35.06511	0.302126	244.5658	12.41658517	0.247	0.01635	891.725	93.46125	2.77	1.835	0.128	0.814	0.059
10% PBP+6 %Chaux	5	5.175734	1257.92	23.9729	38.27123	0.602316	255.2383	5.154066	0.24325	0.021413	931.625	115.9563	2.61	1.563	0.067	0.626	0.043

5.1. Retrait

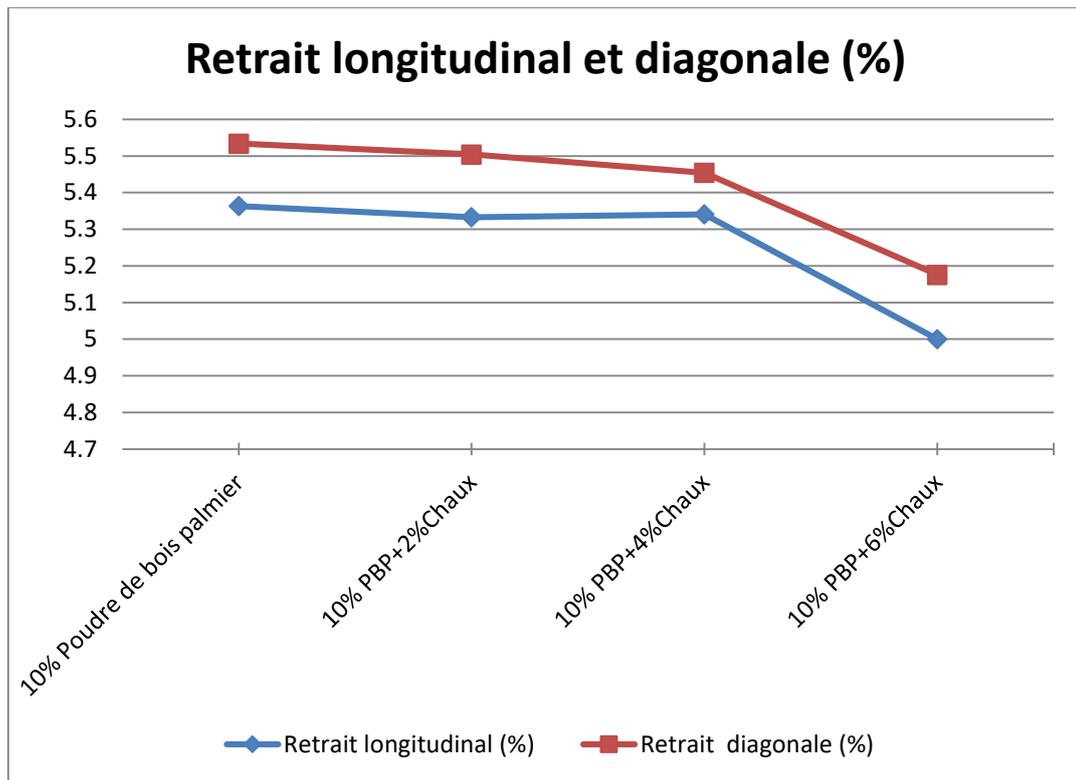


Figure IV.54. Retrait

En utilisant le tableau IV.12 et la courbe IV54, on observe que l'ajout de chaux aux échantillons modifiés avec de la poudre de bois de palmier dattier 2 a contribué à réduire les valeurs de retrait longitudinal et diagonal de pourcentages compris entre 0,52 et 6,76 % lorsqu'il est ajouté à des taux de 2 à 6 %. Cela est dû au fait que la chaux améliore la plasticité du mélange et consomme une partie de l'eau pour ses réactions, ce qui réduit la quantité d'eau qui quitte l'échantillon lors des opérations de séchage et de cuisson, et par conséquent, réduit le retrait des échantillons.

5.2. Densité apparente (ρ)

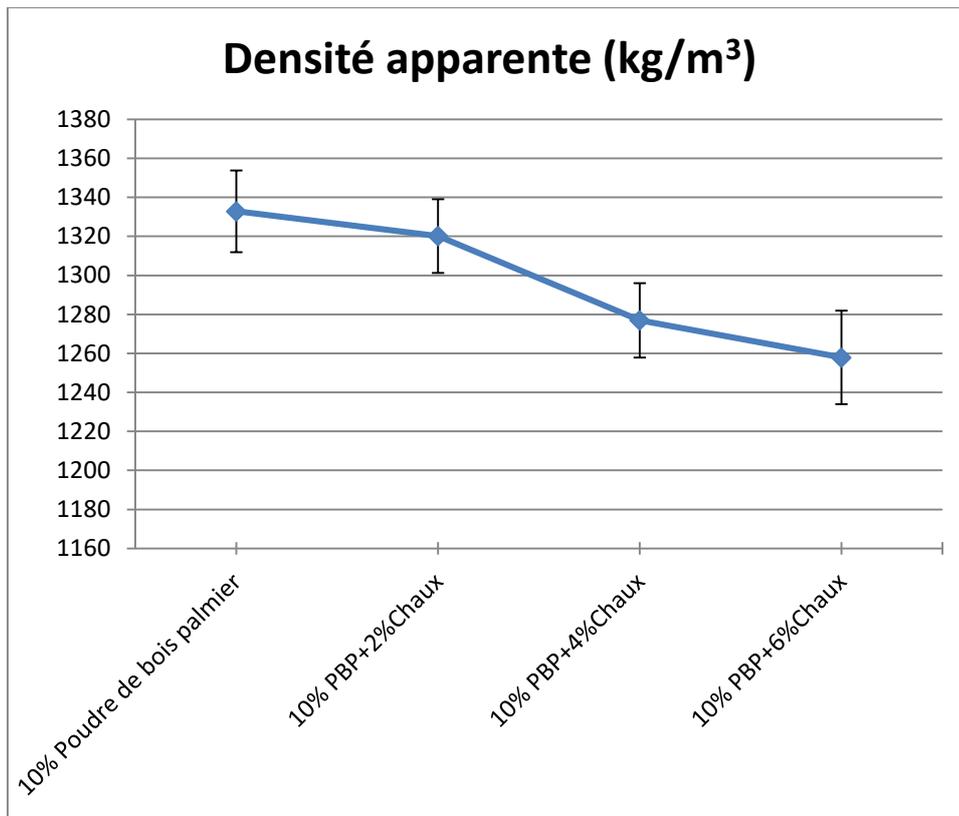


Figure IV.55. Densité apparente

En se référant à la courbe IV.55 et au tableau IV.12, on remarque que la chaux a contribué à réduire la densité apparente des échantillons de jusqu'à 5,62 % lorsqu'elle est ajoutée à hauteur de 6 % du poids de l'échantillon. Cela s'explique par le fait que la chaux aide à accélérer la fusion du mélange lors du processus de cuisson et augmente la porosité du produit final, comme l'ont démontré les chercheurs [25],[42].

5.3. Absorption totale d'eau

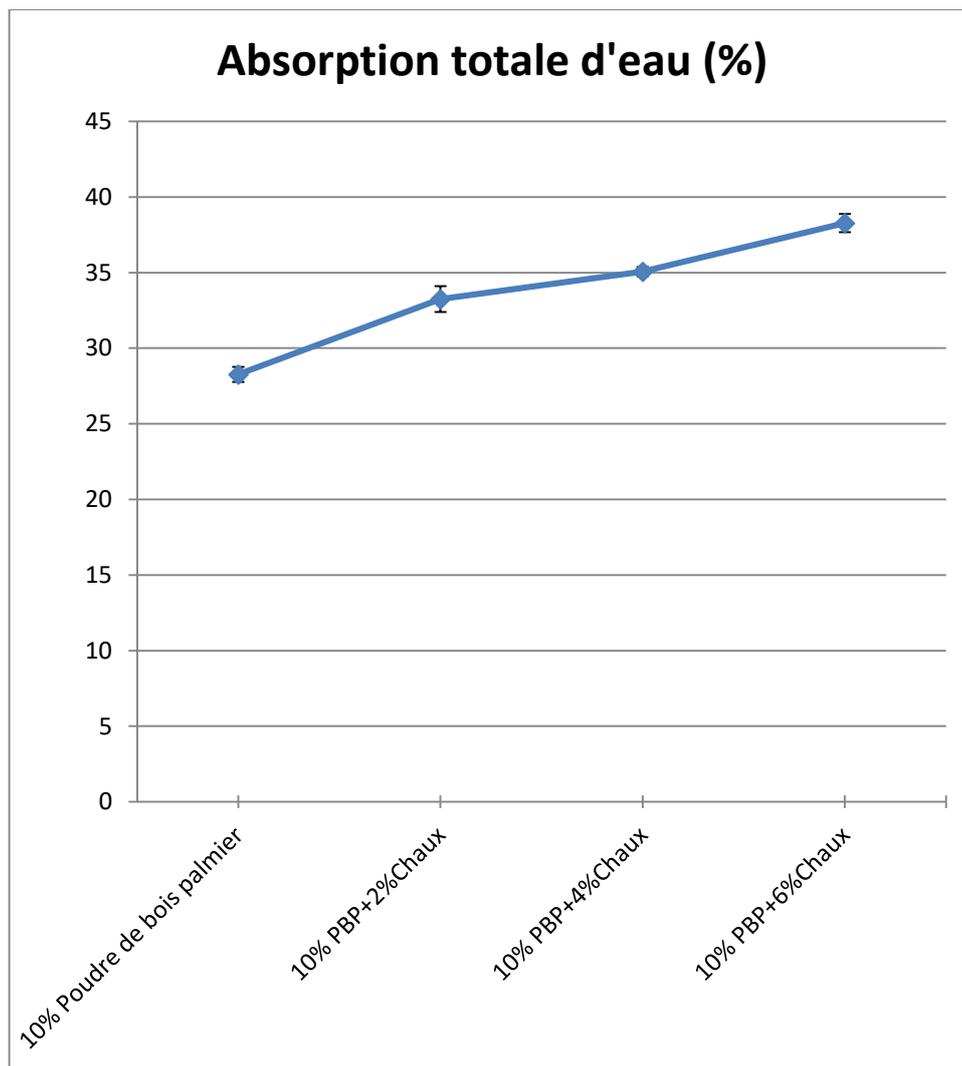


Figure IV.56. Absorption totale d'eau

5.4. Absorption capillaire d'eau

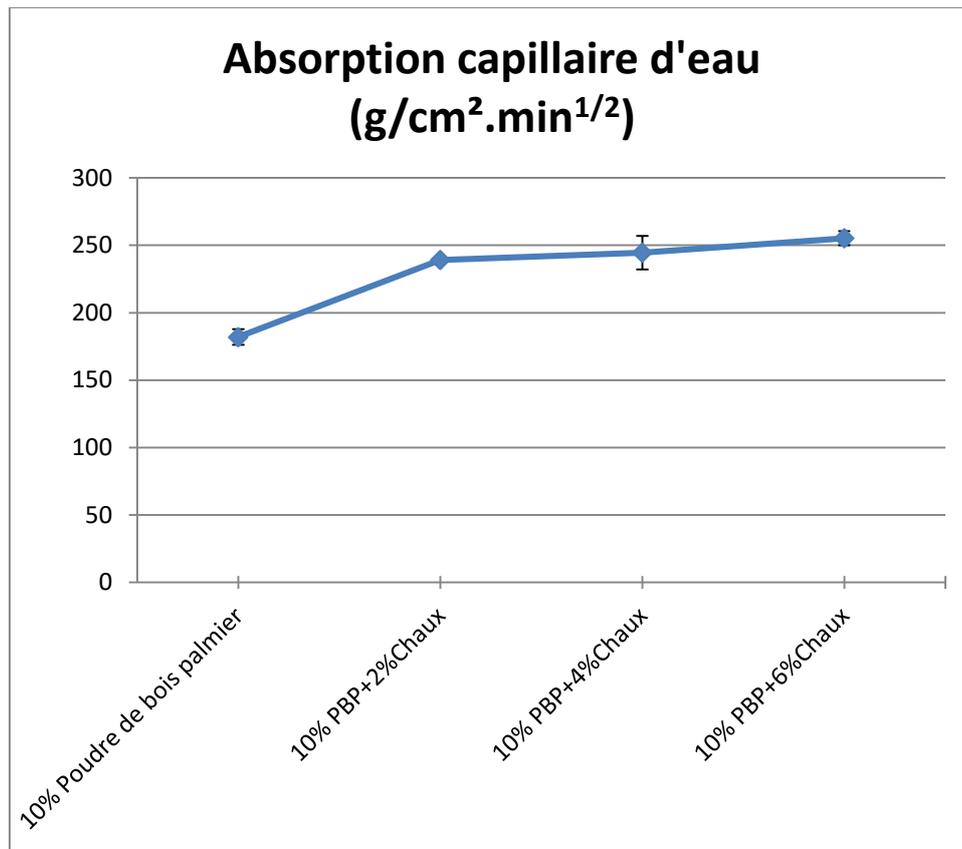


Figure IV.57. Absorption capillaire d'eau

Nous notons à travers le tableau IV.12 et les courbes graphiques IV.56 et IV.57 que l'ajout de chaux aux échantillons modifiés de manière poreuse a augmenté leur capacité d'absorption d'eau, que ce soit l'absorption totale ou capillaire. En effet, les échantillons modifiés se trouvent initialement en dehors de la plage des valeurs recommandées pour ces deux propriétés spécifiques, ce qui diminue la qualité et les performances thermiques et mécaniques des échantillons. Il est bien connu que l'eau absorbée augmente la conductivité thermique et diminue la résistance mécanique. Tout cela est dû au rôle de la chaux dans l'augmentation de la porosité des échantillons, comme nous l'avons indiqué précédemment.

5.5. Conductivité thermique (λ)

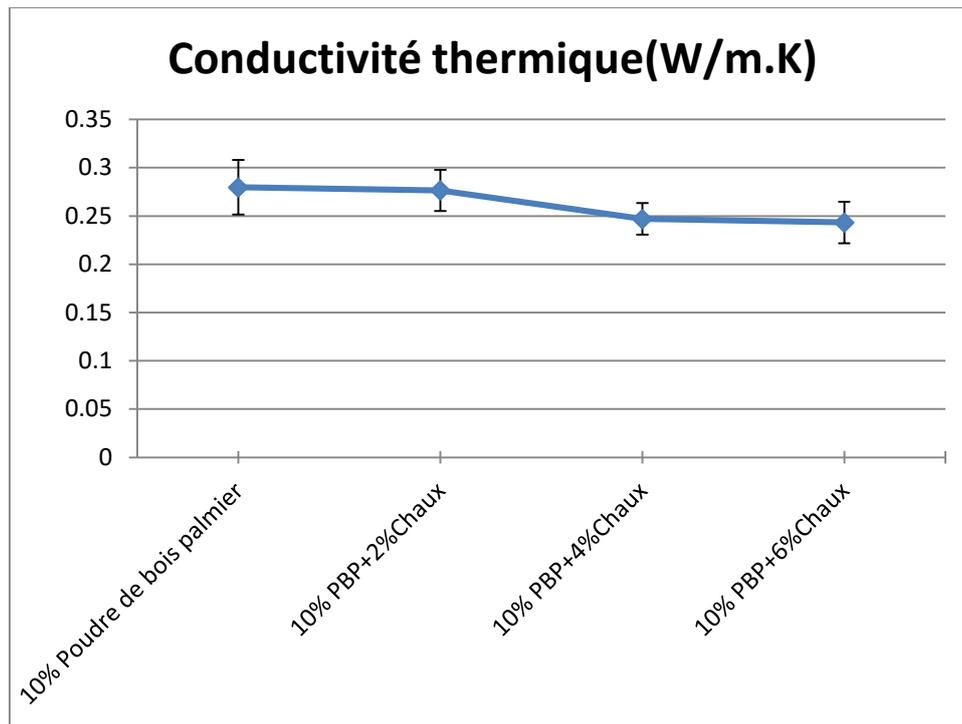


Figure IV.58. Conductivité thermique

Nous observons à travers la courbe graphique IV.58 une relation inverse entre l'ajout de chaux et la conductivité thermique des échantillons. L'ajout de chaux à l'échantillon modifié en utilisant de la poudre de bois de palmier dattier² à hauteur de 6% maximum a contribué à réduire la conductivité thermique de l'échantillon de 13%, ce qui est une proportion très significative pour améliorer les performances thermiques des échantillons modifiés.

5.6. Chaleur spécifique

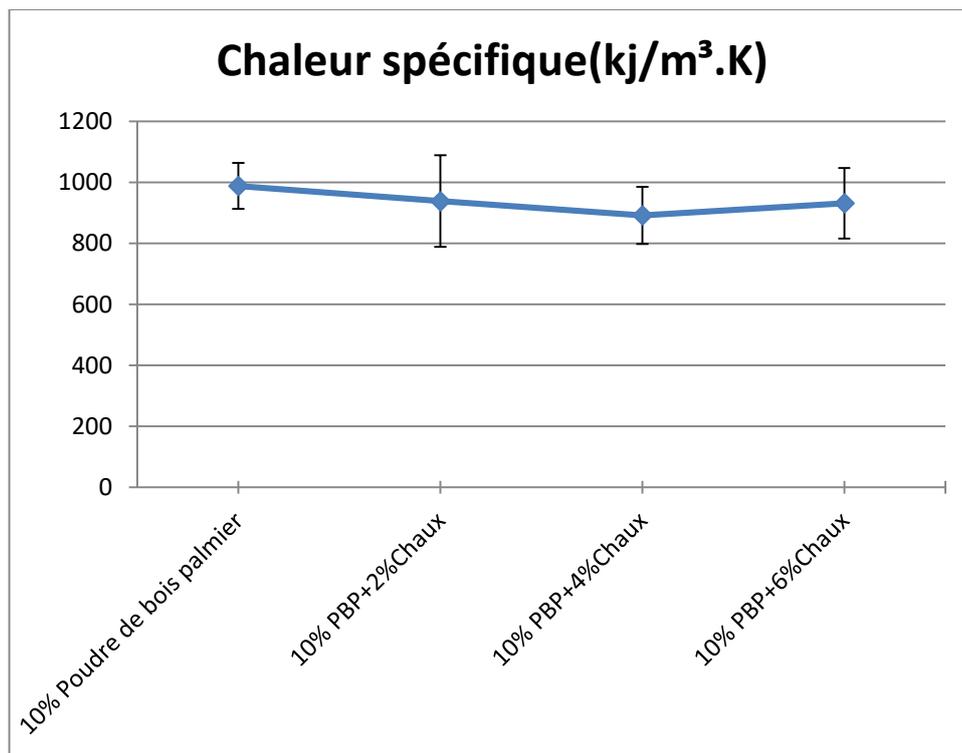


Figure IV.59. Chaleur spécifique

5.7. Diffusivité thermique (D ou α)

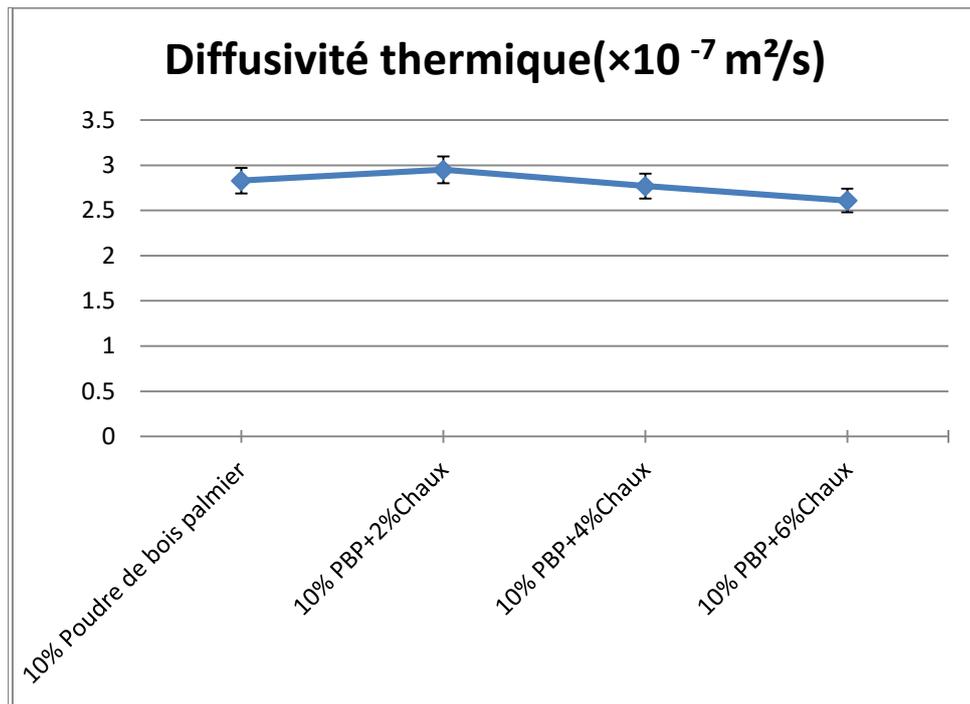


Figure IV.60. Diffusivité thermique

Nous observons à travers les courbes graphiques IV.59 et IV.60 de l'évolution de la chaleur spécifique et de la diffusivité thermique que leur variation est inversement proportionnelle au taux de chaux ajouté. En effet, l'ajout de chaux jusqu'à son maximum (6%) a contribué à réduire la chaleur spécifique et la diffusivité thermique de l'échantillon de brique modifiée poreuse de 5.73 et 7.77 % respectivement. Cela qualifie la chaux à jouer un rôle crucial dans l'amélioration de l'efficacité de la brique en terre cuite dans le processus d'isolation thermique.

5.8. Résistance à la compression

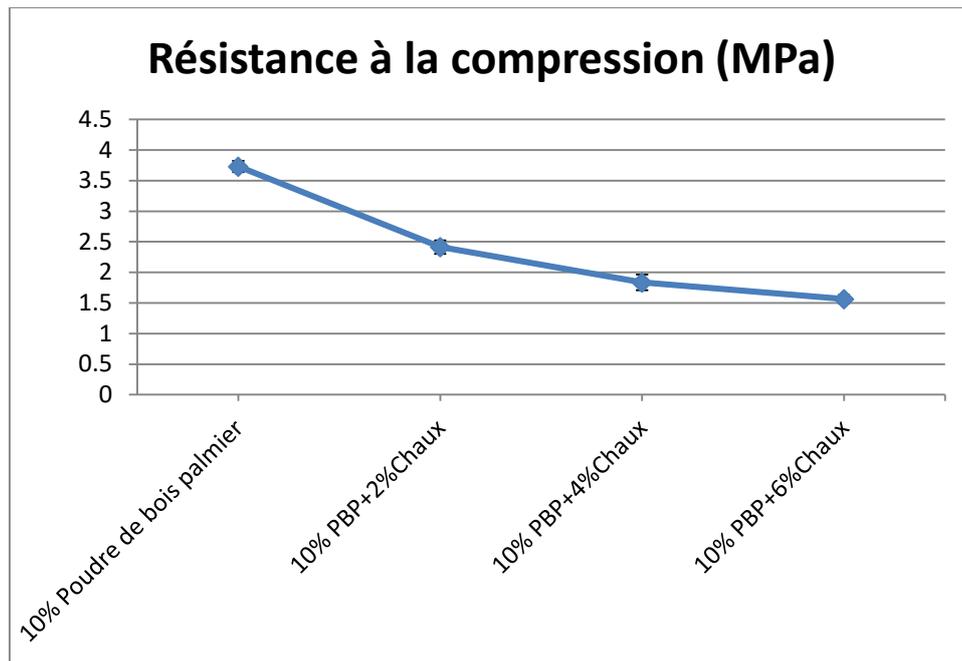


Figure IV.61. Résistance à la compression

Nous remarquons à travers la courbe graphique de la variation de la résistance des échantillons de briques à la compression (Figure IV.61) une relation inverse entre l'augmentation du taux de chaux et l'évolution de la résistance à la compression des échantillons modifiés poreux. En effet, toutes les échantillons ont dépassé les plages recommandées dans la plupart des normes internationales ,où les normes brésiliennes recommandent que la valeur minimale de la résistance des briques de terre à la compression soit de 1,5 MPa, tandis que les normes australiennes recommandent une valeur de 3 MPa, les normes indiennes (briques de terre cuite communes) une valeur comprise entre 3,5 et 35 MPa et la valeur standard nationale chinoise entre 7,35 et 14,71 MPa [92],[93]. Les normes turques recommandent une valeur minimale de 5 MPa pour les murs non porteurs dans les zones non exposées au risque sismique, selon la norme TS 705:1985 [90],[91] .

5.9. Résistance à la flexion

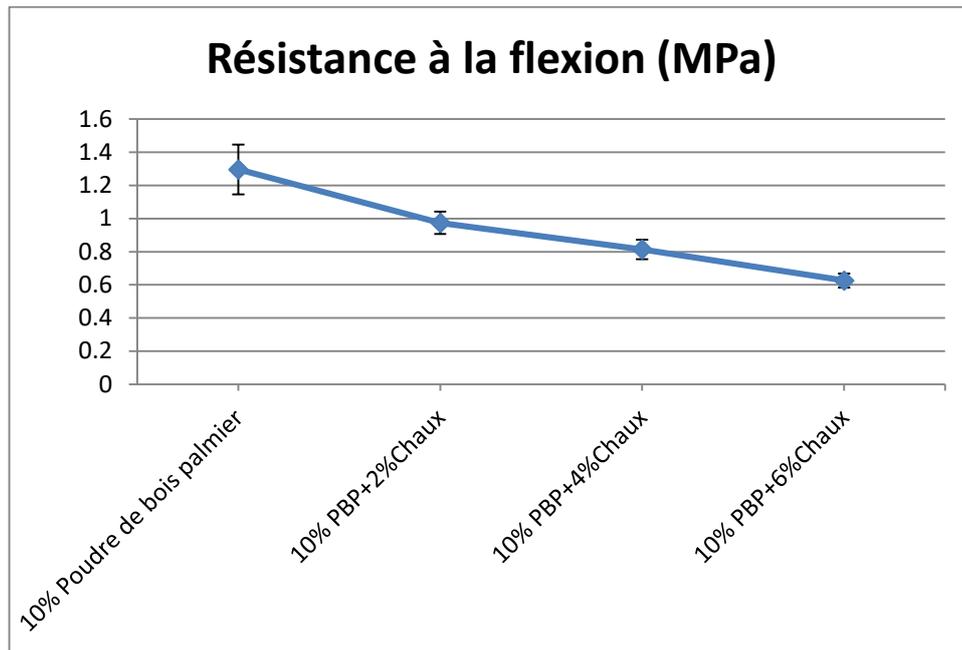


Figure IV.62. Résistance à la flexion

Les échantillons de briques en terre cuite modifiées suivent le même comportement en ce qui concerne la résistance à la flexion lors de l'addition de 2, 4 et 6 pour cent de chaux. En effet, la résistance de l'échantillon modifié poreux à la flexion a diminué de jusqu'à 51.69 % lors de l'ajout de chaux à son maximum (6 %), en enregistrant une résistance de 0.626 MPa.

6. Réalisation des prototypes et leur étude thermique

6.1. Propriétés des prototypes

Afin d'étudier l'efficacité des blocs de briques optimaux en termes de performances thermiques, que nous avons enregistrés lors d'expériences précédentes, nous avons décidé de réaliser un prototype en utilisant ces blocs qui ont fourni le meilleur résultat lors des quatre expériences précédentes.

Ces blocs étaient les briques enregistrées dans la troisième expérience, qui contenaient 10 % de poudre de bois de palmier², en plus des valeurs fixes de la matrice du sol, représentées par 75 % d'argile et 25 % de sable de dune.

Nous avons réalisé deux prototypes, le premier à partir des blocs de construction susmentionnés, le second à partir de briques perforées commerciales afin de comparer les différentes performances thermiques de ces prototypes.

Il convient de noter que les trous de la brique perforée commerciale ont été remplis d'un mélange d'argile et de sable dans des proportions de 75 % et 25 % respectivement, dans le but de permettre une comparaison équitable entre deux types de briques solides.

Le sol de ces prototypes était en plaque de polystyrène de 3 cm d'épaisseur, tandis que le toiture était constitué de plaques de polystyrène de 15 cm d'épaisseur.

Nous avons effectué cette procédure dans le but de réduire les échanges thermiques entre les milieux intérieur et extérieur des prototypes à travers ces deux barrières autant que possible (le sol et le toiture). Comme mentionné précédemment, le toiture est responsable de 30% des échanges thermiques et le sol de 7% [4], ce qui signifie que nous voulons laisser la part du lion des échanges thermiques entre les milieux pour les murs seulement, afin d'évaluer leur performance de manière précise et cruciale.

Les prototypes avaient des dimensions de $0.75 \times 0.75 \times 0.75 \text{ m}^3$ avec une petite ouverture simulant une porte à travers laquelle nous pouvons prendre des mesures internes.

Les prototypes sont conçus et orientés vers les quatre côtés N S E W et nous pouvons résumer les mesures et l'installation de ces prototypes dans le tableau suivant

Tableau IV.13. Propriétés des prototypes

Prototype	Blocs de brique	Dimensions de Prototype	Sol	Toiture	Mortier
Prototype1	Briques commerciales (Il a été rempli avec un mélange d'argile et de sable de dune) $22 \times 10.5 \times 5.5 \text{ cm}^3$	$0.75 \times 0.75 \times 0.75 \text{ m}^3$	0.75 m^2 de polystyrène et épaisseur 3cm	0.75 m^2 de polystyrène et épaisseur 15cm	Couche continue de mortier ciment-sable de dune
Prototype2	Brique plein réalisé dans les expériences $22 \times 10.5 \times 6 \text{ cm}^3$	$0.75 \times 0.75 \times 0.75 \text{ m}^3$	0.75 m^2 de polystyrène et épaisseur 3cm	0.75 m^2 de polystyrène et épaisseur 15cm	Couche continue de mortier ciment-sable



Figure IV.63. Étapes de réalisation des prototypes
198

6.2. Etude thermique des prototypes

Les températures internes et externes et l'humidité des deux prototypes terminés ont été examinées pendant la période la plus chaude de l'année, à la fin du mois d'août.

Les deux prototypes ont également réexaminés à la période la plus froide de l'année, au début du mois janvier.

Selon les recommandations du DTR algérien de thermorégulation, C3. 2/4[71], La sensation de confort thermique pendant la saison estivale est représentée par une humidité relative variant entre 30 et 60 % et une température comprise entre 24 et 30 degrés Celsius. De même, la sensation de confort thermique pendant la saison hivernale est représentée par une humidité relative variant entre 40 et 60 % et une température entre 18 et 21 degrés Celsius. [70],[72].

À l'aide des thermocouples et des thermomètres, nous avons mesuré les températures internes et externes et nous avons également mesuré l'humidité relative à l'aide d'un hygromètre.

Nous avons également mesuré la variation de température entre l'intérieur et l'extérieur de chaque prototype.

6.2.1. Températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique en été

Nous avons résumé et enregistré les mesures dans les tableaux suivants :

Tableau IV.14. Résultat du premier test des prototypes (en été)

Heures	T ext (°C)	Tint P1 (°C)	Tint P2 (°C)	T confort min(°C)	T confort max(°C)	HR confort min(%)	HR confort max(%)	HR int de Prototy pe(%)
7:00	26.2	29.3	28.8	24	30	30	60	51.33
8:00	32.1	29.9	28.9	24	30	30	60	45.5
9:00	34.3	31.5	31.5	24	30	30	60	42.5
10:00	35.2	34	33.6	24	30	30	60	37.9
11:00	40.9	38.3	37.3	24	30	30	60	26.19
12:00	43.7	40.2	39.6	24	30	30	60	20.5
13:00	44.2	41.7	39.9	24	30	30	60	17.9
14:00	45.9	40.2	39.8	24	30	30	60	12.6
15:00	47.6	42.8	40.3	24	30	30	60	12.3
16:00	48.3	43.4	41.6	24	30	30	60	13.04
17:00	46.7	42	40.2	24	30	30	60	14.75
18:00	41.3	41	39.3	24	30	30	60	14.29
19:00	38.7	39.9	38.2	24	30	30	60	15.55

Text: La température externe du prototype ; **Tint:** La température interne du prototype ; **HR int:** L'humidité interne du prototype .

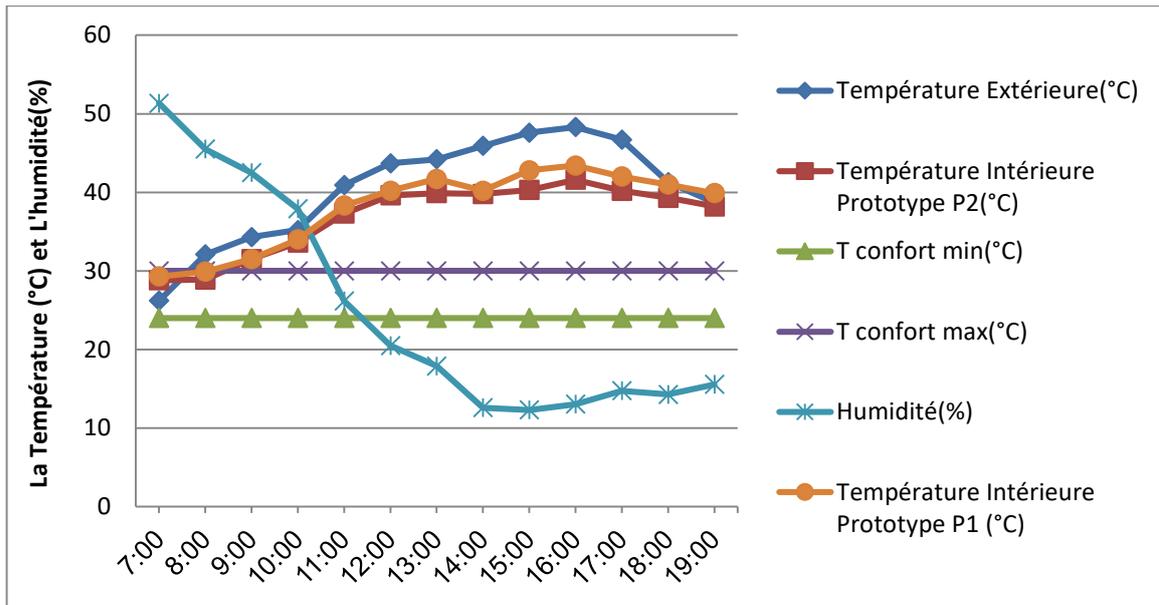


Figure IV.64. Diagramme montrant les températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique

Par la courbe graphique IV.64, nous constatons une différence nette de température entre l'intérieur et l'extérieur des prototypes, cette différence augmentant aux heures de midi et de l'après-midi en raison du rôle des murs, des toitures et de sol dans l'isolation thermique entre les milieux intérieur et extérieur du prototype. Nous notons également que le prototype réalisé avec la brique innovante modifiée présente une meilleure performance thermique que la brique commerciale, grâce à ses propriétés thermiques prouvées dans les expériences antérieures. Il est à noter que les deux prototypes se trouvent en dehors de la zone de confort thermique, et nous observons également que l'humidité relative diminue avec l'augmentation de la température, étant également en dehors des plages de confort thermique depuis onze heures du matin.

6.2.2. Écarts des températures internes et externes des prototypes en été (Text-Tint)

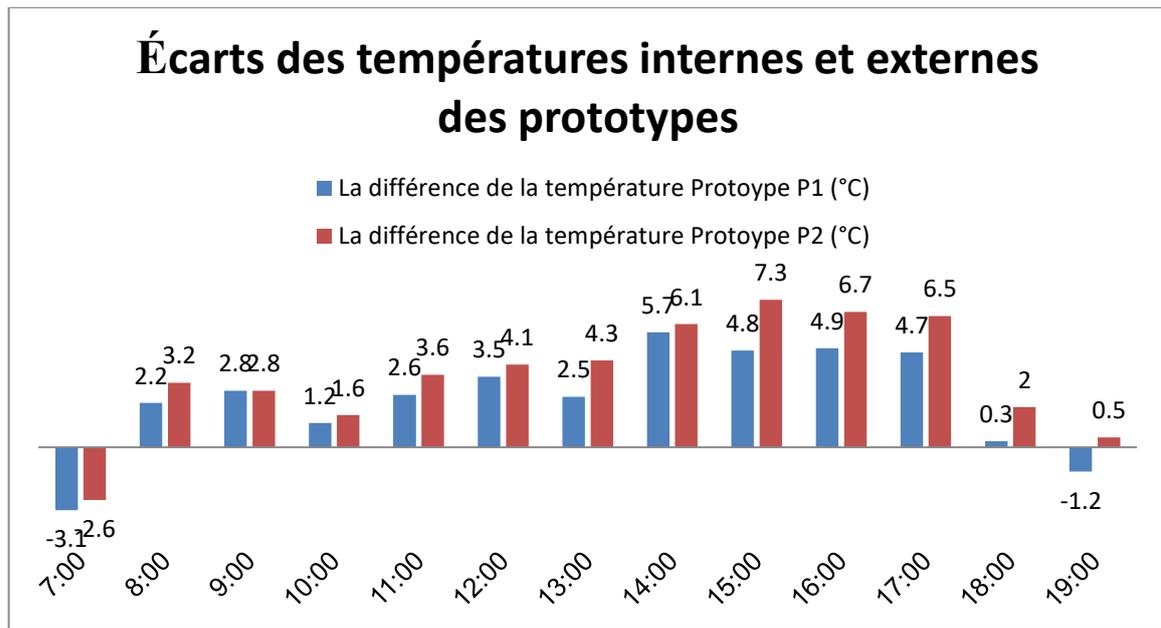


Figure IV.65. Écarts des températures internes et externes des prototypes

Nous constatons à travers le diagramme (Figure IV.65) des différences de température entre les milieux intérieur et extérieur pour chaque prototype que les deux prototypes jouent un rôle positif dans l'isolation thermique. Cette isolation augmente avec l'élévation de la température, atteignant une différence de température de 5.7 degrés à l'heure la plus chaude de la journée (au milieu de l'après-midi) pour le prototype réalisé avec des briques commerciales, et 7.3 degrés pour le prototype réalisé avec la brique innovante modifiée. Il est à noter que les deux prototypes ont un effet inverse aux premières heures de la journée en raison de l'impact du processus de stockage de chaleur sur le milieu intérieur du prototype, un phénomène qui se reproduit également dans les dernières heures de la journée pour le prototypes P1.

6.2.3. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2 en été (P1-P2)

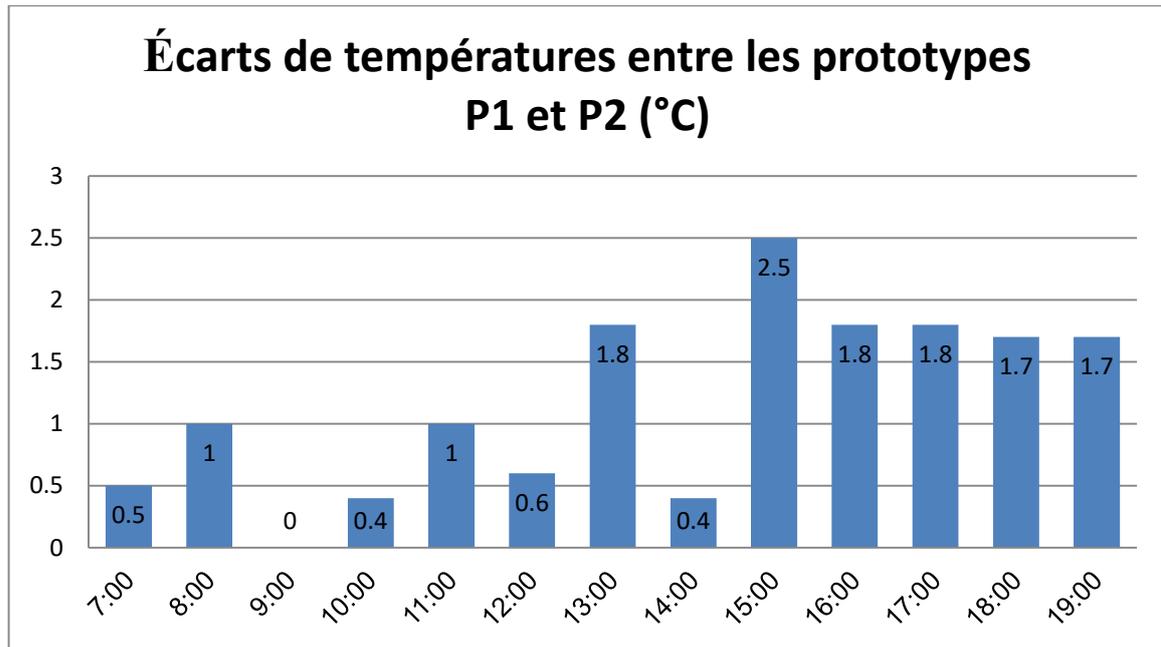


Figure IV.66. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2

Nous observons dans ce diagramme une évaluation réelle du prototype réalisé avec la brique innovante modifiée, basée sur la surveillance de ses températures par rapport au modèle réalisé avec des briques commerciales. Ce prototype a présenté une performance thermique positive grâce à son isolation thermique qui était meilleure que le prototype P1 dans la plupart des heures de mesure, avec une différence de température atteignant son apogée, en particulier aux heures de midi et au-delà, avec une valeur de 2,5 degrés Celsius à 15:00 heures.

6.2.4. Températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique en hiver

Nous avons résumé et enregistré les mesures dans les tableaux suivants :

Tableau IV.15. Résultat du deuxième test des prototypes (en hiver)

Heures	T ext (°C)	Tint P1 (°C)	Tint P2 (°C)	T confort min(°C)	T confort max(°C)	HR confort min(%)	HR confort max(%)	HR int de Prototy pe(%)
7:00	6.2	6.1	6.5	18	21	40	60	61
8:00	6.5	6.8	7.3	18	21	40	60	62
9:00	9.9	7.5	7.5	18	21	40	60	58
10:00	27.85	10.3	9.4	18	21	40	60	50
11:00	34.1	16.7	14.8	18	21	40	60	43
12:00	39.55	22	20.3	18	21	40	60	37
13:00	39.4	24.8	22.3	18	21	40	60	33
14:00	34.7	27.9	26.8	18	21	40	60	31
15:00	23.55	25.1	27.3	18	21	40	60	29
16:00	21.25	23.1	26.2	18	21	40	60	27
17:00	19.45	21	23.7	18	21	40	60	27
18:00	18.25	20.1	21.9	18	21	40	60	30
19:00	13.6	15.8	18.4	18	21	40	60	32

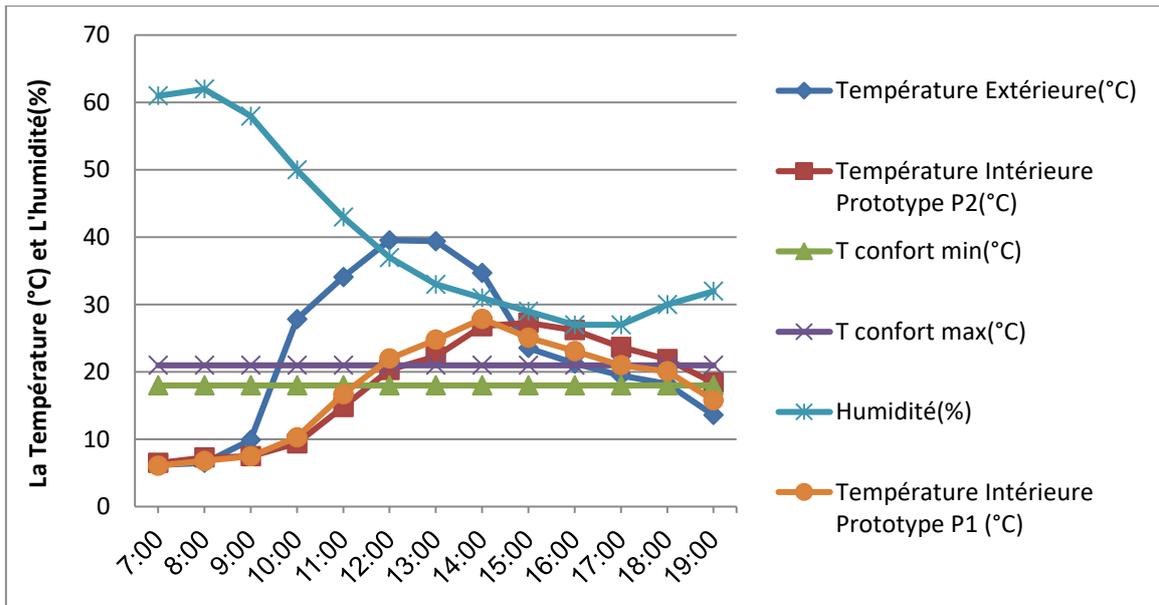


Figure IV.67. Diagramme montrant les températures à l'intérieur et à l'extérieur des prototypes et leur comparaison avec les champs de confort thermique

À travers le tableau IV.15 et la courbe graphique IV.67, on observe un changement de comportement thermique pour chaque prototype en fonction des heures de surveillance de la température. On constate une convergence des performances des deux prototypes aux premières heures du matin, où les prototypes ont une température intérieure plus chaude que l'extérieure. Cependant, avec le passage des heures et l'augmentation de la température extérieure grâce aux processus de transfert de chaleur par rayonnement (soleil) et conduction (brique), on observe que le prototype réalisé avec la brique commerciale présente une performance thermique supérieure (plus chaude) à celui réalisé avec la brique innovante modifiée. Cela est attribuable à la conductivité thermique élevée de la brique commerciale, étant donné que l'environnement extérieur est plus chaud que l'intérieur. Il est bien connu que le transfert de chaleur se fait du milieu ayant la plus haute température vers le milieu ayant la plus basse température.

Cependant, lors des cinq dernières heures de surveillance (fin de la journée), la performance thermique de la brique innovante devient meilleure, avec une température intérieure plus chaude. Cela est dû à la baisse des températures à l'extérieur des deux prototypes, ce qui inverse le transfert de chaleur, le faisant passer de l'intérieur vers l'extérieur. C'est à ce moment que le rôle efficace de la brique innovante dans l'isolation thermique devient apparent, en ralentissant la perte de chaleur acquise pendant la journée par les processus de rayonnement et de conduction par rapport à la brique commerciale. Cela confirme l'efficacité de cette brique dans les opérations d'isolation thermique.

Il convient de noter que les deux prototypes avec un environnement intérieur se situent en dehors des plages de confort thermique pendant la plupart des heures de surveillance, à l'exception de quelques heures. Cependant, l'humidité relative des deux prototypes se situe dans les plages de confort au cours des cinq premières heures de surveillance, puis dépasse ces plages pour le reste des heures en raison de l'augmentation des températures.

6.2.5. Écarts des températures internes et externes des prototypes en hiver (Text-Tint)

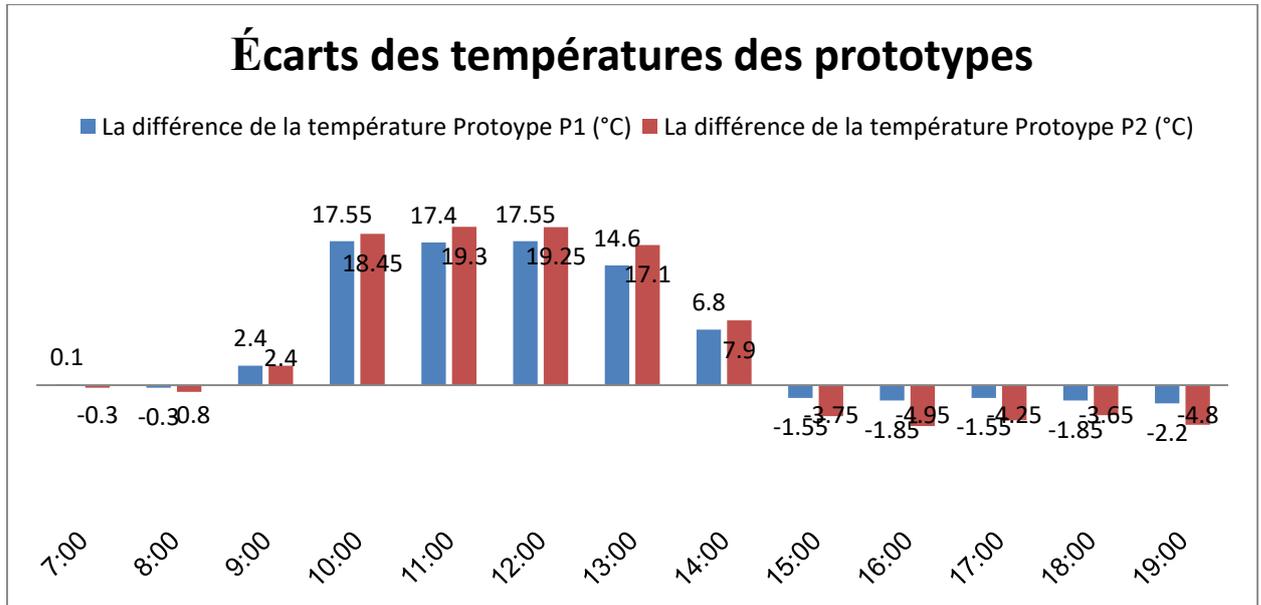


Figure IV.68. Diagramme montrant les écarts des températures internes et externes des prototypes

Nous observons à travers la courbe graphique des différences de température entre les environnements intérieur et extérieur pour chaque prototype (figure IV.68) que les deux prototypes sont plus frais que l'environnement extérieur, sauf aux deux premières heures de surveillance et aux cinq dernières heures. Cela est dû aux processus de stockage de chaleur appliqués par les briques. Il convient de noter que le chauffage effectué par le prototype réalisé avec la brique commerciale atteint une différence de 2,2 degrés Celsius entre les environnements intérieur et extérieur, et de 4,95 degrés Celsius pour le prototype réalisé avec la brique innovante modifiée.

6.2.6. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2 en hiver (P1-P2)

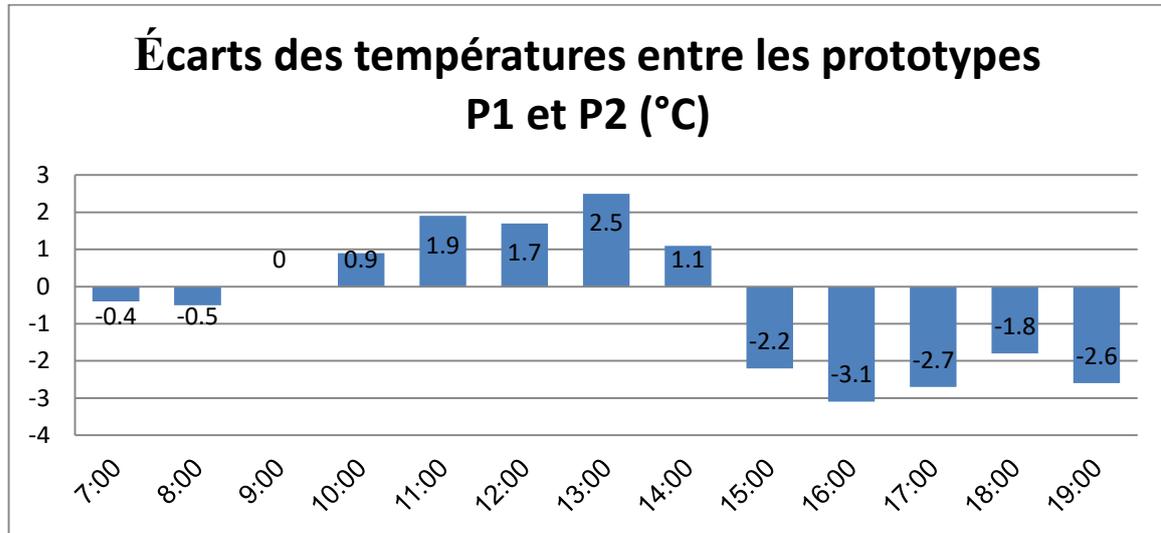


Figure IV.69. Écarts des températures entre les prototypes P1 et P2

Dans ce graphique (figure IV.69), nous observons une évaluation réelle du modèle réalisé avec la brique innovante modifiée, basée sur la surveillance de ses températures internes par rapport aux températures de la brique commerciale. Ce prototype présente une performance thermique distinctive aux heures nécessitant le chauffage, étant plus chaud que le prototype réalisé avec la brique commerciale lors des deux premières heures de surveillance au début de la journée et les cinq dernières heures de la journée, avec une différence de température atteignant jusqu'à 3,1 degrés Celsius à 16:00 heures. Il est évident que le prototype avec la brique commerciale est plus chaud pendant le reste des heures de surveillance (milieu de la journée), car la performance thermique pendant ces heures se limite au rayonnement et à la conduction thermique.

7. Conclusion

Selon des études expérimentales sur les propriétés thermiques, mécaniques et physiques de divers échantillons de briques en terre cuite, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La plupart des additifs et des déchets ajoutés aux composants des briques en terre cuite ont contribué à réduire la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique et ont augmenté la résistance thermique.
- L'ajout de sable de dune a un impact positif sur les propriétés thermiques des échantillons et améliore également leurs performances mécaniques.
- L'ajout de chaux aux échantillons de brique en terre cuite a contribué à améliorer la plasticité du mélange de fabrication, ainsi qu'à améliorer de manière significative les performances thermiques des échantillons produits. Cependant, cela a affaibli les performances mécaniques et physiques des échantillons en augmentant le taux d'absorption d'eau.
- L'ajout de déchets d'origine végétale aux briques cuites a représenté la meilleure performance thermique pour les échantillons.
- Les prototypes réalisés à partir de briques innovantes (briques en poudre de palmier dattier²) présentent un meilleur confort thermique que les briques commerciales en hiver et en été, mais ils ne répondent pas aux normes complètes de confort thermique énoncées par les réglementations thermiques modernes.
- Sur le plan économique, l'utilisation de produits innovants de briques en terre cuite modifiées contribue à réduire la facture énergétique des bâtiments.

CONCLUSION GENERALE

Le travail de cette thèse est une étude expérimentale visant à améliorer les propriétés thermiques des briques de terre cuite tout en maintenant ses propriétés mécaniques et physiques dans le champ des recommandations, en modifiant sa composition traditionnelle par l'inclusion de nouveaux éléments qui affecteront la structure poreuse du produit final, ce qui est étroitement lié au concept d'isolation thermique.

Un mélange de matrice de sol a été formé composé principalement d'argile et de sable de dune, qui est largement disponible dans la zone d'étude. Un stabilisant constitué de chaux éteinte, plus adapté aux sols cohésifs, a également été utilisé, plusieurs types de déchets industriels et végétaux ont été inclus dans le but d'atteindre la porosité souhaitée lorsque ces déchets sont brûlés au stade de l'incinération.

Ces déchets étaient représentés par des granulés et de la poudre de caoutchouc synthétique, de la poudre de verre, des granulés de polystyrène expansé, de la poudre de plant d'alfa et de la poudre de bois de palmier dattier.

L'efficacité de l'ajout de ces déchets aux propriétés thermiques des briques de terre cuite a été étudiée en menant cinq expériences principales.

Nous avons d'abord mené une expérience préliminaire basée sur l'inclusion des différents types de déchets mentionnés à un pourcentage fixe estimé à 10% du poids de la matrice du sol avec fixation de la chaux au pourcentage minimum recommandé.

Les résultats de cette expérience ont prouvé l'efficacité des additifs de déchets pour améliorer les performances thermiques des briques de terre cuite en réduisant la conductivité thermique et la diffusivité thermique, mais ils ont un impact négatif sur les propriétés mécaniques et physiques dans des proportions variables. Les échantillons contenant des additifs de déchets végétaux représentaient la meilleure performance thermique, où l'ajout de poudre de bois de palmier dattier et de poudre de plant d'alfa contribuaient à réduire la conductivité thermique des échantillons jusqu'à 19,68% et 28,24% respectivement avec des valeurs de conductivité thermique estimées à 0,31 et 0,277 W/m.K chacune, tout comme l'ajout de chaux un effet similaire est également exprimé par sa contribution à la réduction de la conductivité thermique des échantillons.

Dans la deuxième expérience, nous avons modélisé l'expérience à l'aide d'un programme statistique appelé "Statgraphics", en nous appuyant uniquement sur deux types de déchets, à savoir la poudre de verre et la poudre de plant d'alfa, en plus du stabilisant à la chaux, afin que le programme évalue l'impact de chaque type de ces composants sur les propriétés du produit final et les proportions optimales pour les ajouter.

Les résultats de cette expérience ont montré que l'échantillon, qui ne contenait que 10,26% de poudre de plant d'alfa à l'intérieur de la matrice du sol, offrait les meilleures performances équilibrées entre thermique, mécanique et physique, où la valeur de conductivité thermique de l'échantillon optimal était de 0,384 W/m.K, leur résistance à la compression est de 8,561 MPa et leur absorption d'eau totale est estimée à 26,922%.

Conclusion générale

Dans la troisième expérience, nous avons ajouté un autre type de poudre de bois de palmier dans le rapport de 0, 5, 8, 10, 12 et 15 % du poids de la matrice du sol. Les résultats ont montré que l'échantillon contenant 10% de déchets donnait les meilleures performances thermiques et maintenait les performances mécaniques et physiques dans la zone recommandée, où la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon optimal dans cette expérience était 0.279 W/m. K, leur résistance à la compression de 3.730 MPa et leur absorption d'eau totale estimée à 28.262%.

Dans la quatrième expérience, nous avons étudié l'effet de l'ajout de chaux avec des valeurs de 2, 4 et 6% à l'échantillon optimal produit dans la troisième expérience, qui contenait 10% de poudre de bois de palmier dattier 2, et l'ajout de chaux s'est avéré efficace pour améliorer encore les performances thermiques de l'échantillon mentionné précédemment, mais avec tous les pourcentages ajoutés, les performances mécaniques et physiques de l'échantillon sortent du champ des recommandations.

La cinquième expérience, que nous avons consacrée à la construction de prototypes et à la comparaison de leur isolation thermique, a montré l'efficacité de la brique développée (L'échantillon optimal qui a été fabriqué lors de la troisième expérience) et sa contribution au développement et à l'augmentation de l'isolation thermique de prototype terminé par rapport à prototype réalisés avec des briques commerciales, où la différence de température de refroidissement entre les deux prototypes a atteint 2,5 degrés Celsius en été et la différence de température de chauffage a atteint 3,1 degrés Celsius en hiver.

Recommandations

Sur la base des résultats que nous avons mis en évidence et de ce qui a été réalisé dans cette thèse, nous listons un certain nombre de recommandations qui peuvent être appliquées pour améliorer encore les propriétés des briques de terre cuite :

- Développement d'études approfondies sur l'influence de divers facteurs du processus d'achèvement tels que les températures de cuisson, la vitesse de refroidissement et le temps de cuisson sur les caractéristiques finales de la brique améliorée.
- Explorer la possibilité d'utiliser de nouveaux matériaux auxiliaires ou d'autres technologies de pointe pour améliorer les performances thermiques, mécaniques et physiques des briques de terre cuite, telles que l'utilisation de nanomatériaux et de fibres thermiques.
- Réalisation d'études sur les applications des briques de terre cuite améliorées dans divers domaines tels que la construction, les industries thermiques, les systèmes de chauffage et de refroidissement.
- Élargir le champ des recherches pour étudier l'effet des changements dans la composition de la matrice du sol, les processus de combustion et de refroidissement sur les propriétés des briques de terre cuite dans diverses conditions de fonctionnement températures élevées et conditions humides.
- Des études d'approfondissement pour déterminer les proportions et la forme des pores les plus efficaces pour obtenir les meilleures performances thermiques des

Conclusion générale

échantillons de briques de terre cuite et une évaluation précise de leur impact sur ses propriétés physiques et mécaniques

- Développer des appareils de mesure de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique et travailler à l'augmentation de la précision de leurs résultats.
- Effectuer davantage d'expériences sur les échantillons de briques modifiées, en particulier ceux liés à la durabilité, afin d'évaluer leur efficacité.

Cette thèse recommande la mise en œuvre d'études et de recherches supplémentaires dans ce domaine pour explorer les possibilités d'améliorer les performances thermiques des briques de terre cuite et leurs applications dans le futur.

Références bibliographiques

1. Policy, I.E.A.D.o.S.E., *Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050*. 2013: Organization for Economic.
2. Serrano, S., A. de Gracia, and L.F.J.A.e. Cabeza, *Adaptation of rammed earth to modern construction systems: Comparative study of thermal behavior under summer conditions*. 2016. **175**: p. 180-188.
3. l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine and I.A.A.d.l.E.e.d.l.M.d.l.E.e.l.A.d.l.e. Rhin-Meuse, *Le guide de l'éco-construction* 2006.
4. Evrard, A., A. Branders, and A. De Herde, *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines: Guide d'aide à la conception*. 2011.
5. Organization, W.M. <https://public.wmo.int/ar/media/%D8%A8%D9%8A%D8%A7%D9%86-%D8%B5%D8%AD%D9%81%D9%8A/landmark-united-science-report-informs-climate-action-summit>. 2019.
6. Sassi, B. and M. Yahya, *Energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth in Algeria a standard study for the period 1980-2018. PhD thesis*. 2021, University of Eloued
7. Bruno, A.W., et al., *Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls*. 2020. **28**: p. 101017.
8. Velasco, P.M., et al., *Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material—A review*. 2014. **63**: p. 97-107.
9. Guillaud, H.H.e.H., *TRAITE' DE CONSTRUCTION EN TERRE*. Editions Parenthèses ed. 2006: CRATerre.
10. Carazas Aedo, W., *Adobe: Guía de construcción parasísmica*. 2002.
11. Soudani, L. and L. Caroline, *Modelling and experimental validation of the hygrothermal performances of earth as a building material*. 2016, Lyon.
12. Confédération de la construction en terre crue, F., *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue*. 2018.
13. Soumia, H., *Contribution à l'étude les caractéristiques thermiques des habitations en terre (cas de pisé) renforcé par des déchets de palmier dattier dans les régions de la wilaya d'Ouargla*. 2020, KASDI MERBAH - OUARGLA-.
14. Wafer, R.-P.J.U.d.S., Québec, Canada, *L' adobe, une solution durable pour la construction d' habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili*. 2010.
15. Jean-Baptiste, M.M.M.C.V.M.G.M.B., *Projet GE12 Construction en terre* Université de Technologie Compiègne. 2010.
16. Galmiche, V., *Construction et réhabilitation en terre crue* 2019: Agence de la Qualité de la Construction et Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysage.
17. Champiré, F., *Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*. 2017, Université de Lyon.
18. Hubert, G., Joffroy Thierry, and O. Pascal, *Blocs de terre comprimée Manuel de conception et de construction* 1995: CRATerre-EAG.
19. HOUBEN, H., VERNEY, Pierre-Eric, *Compressed earth blocks : selection of production equipment*. Bruxelles : CDI. 72 p ed. 1989.
20. Abakar, A., *Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz*. 2018, Université de Lorraine.
21. CSTB, *OUVRAGES EN*

MAÇONNERIE DE BTC

parois et murs. APPRÉCIATION TECHNIQUE D'EXPÉRIMENTATION / DEMANDE D'ATEX DE TYPE A numéro de référence : 2588. 2018.

22. Terre, C., *Guide de conception et de construction*. 2021: Sophie Bioul, amàco.
23. Kornmann, M.J.T.d.l.i.C., *Matériaux de terre cuite: Matières de base et fabrication*. 2009.
24. Peirs, G., *La brique Fabrication et traditions constructives*. 2005: Eyrolles.
25. Alviset, L.J.T.d.l.i., *Matériaux de terre cuite*. 1994. **905**: p. 10-13.
26. (AFNOR), A.F.d.N., *NF P 13-301 12-74 Briques creuses de terre cuite*.

NF P 13-304 10-83 Briques en terre cuite destinées à rester apparentes

NF P 13-305 10-83 Briques pleines ou perforées et blocs perforés en terre cuite à enduire.

NF P 13-306 10-83 Blocs perforés en terre cuite destinés à rester apparents

NF P 10-202 9-85 Parois et murs en maçonnerie des petits éléments

(DTU 20.1).

NF EN 771-1/CN Spécifications pour éléments de maçonnerie —

Partie 1 : Briques de terre cuite.

27. Didier, D., et al., *Précis de bâtiment: conception, mise en oeuvre, normalisation*. 1995: Afnor.
28. R.Delebecque, *Éléments de Construction Bâtiment*. Delagrave ed. 1990.
29. VÉNUAT, M., *Produits silico-calcaires*. Techniques de l'Ingénieur, 1994.
30. Liechti, D.C.J.-C., *La brique silico-calcaire*. FBB Kalksandsteinwerk, www.fbb.ch.
31. Djouhri, M., *Confection d'une brique à base de sable de dunes*. 2007, Ouargla, Université Kasdi Merbah. Faculté des Sciences et Sciences de l'
32. Allaoua AMMICHE, H.B., Mohamed MILI, and D. DAHDOUH, *L'utilisation de la brique silico-calcaire a connu un échec*

en Algérie. Cas de la ville de M'sila. Conservation et mise en valeur du patrimoine architectural

et paysagé des sites côtiers méditerranéens, 2019.

33. Meukam, P., et al., *Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment*. 2003. **36**(7): p. 453-460.
34. El Fgaier, F., *Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue*. 2013, Ecole centrale de Lille.
35. Benmansour, N., et al., *Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building*. 2014. **81**: p. 98-104.
36. Ouedraogo, E., et al., *Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment*. 2015. **2**: p. 68-76.
37. Chaib, H., *Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale.(Cas de la ville de Ouargla)*. 2017, Thèse de Doctorat Université de Ouargla.
38. MEKHERMECHE, A., *Étude thermique des briques en terre destinées aux constructions en zones sahariennes*. 2017, Thèse de Doctorat Université de Ouargla
39. Soumia, H., *Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla*. 2015, Mémoire de MAGISTER UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA.
40. Tatane, M., et al., *Thermal, mechanical and physical behavior of compressed earth blocks loads by natural wastes*. 2018. **9**: p. 1353-1368.

41. Laoubi, H., et al., *Study of a new plaster composite based on dune sand and expanded polystyrene as aggregates*. 2018. **12**(1).
42. Khoudja, D., et al., *Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date palm waste*. 2021. **270**: p. 121824.
43. Xin, Y., et al., *Recycling Crushed Waste Beer Bottle Glass in Fired Clay Bricks*. 2021. **11**(10): p. 483.
44. El Hammouti, A., et al., *Thermal insulation of mud bricks made with walnut shells: Characterization and simulation study*. 2022.
45. Bouchefra, I., et al., *Mechanical and thermophysical properties of compressed earth brick reinforced by raw and treated doum fibers*. 2022. **318**: p. 126031.
46. Debnath, N., et al., *Preparation and characterization of semi-silica insulation refractory by utilizing lignite fly ash waste materials*. 2022. **345**: p. 128321.
47. Chaib, H., A. Kriker, and A.J.E.P. Mekhermeche, *Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers*. 2015. **74**: p. 919-925.
48. Mekhermeche, A., A. Kriker, and S. Dahmani. *Contribution to the study of thermal properties of clay bricks reinforced by date palm fiber*. in *AIP Conference Proceedings*. 2016. AIP Publishing LLC.
49. Hakkoum, S., A. Kriker, and A.J.E.P. Mekhermeche, *Thermal characteristics of Model houses Manufactured by date palm fiber reinforced earth bricks in desert regions of Ouargla Algeria*. 2017. **119**: p. 662-669.
50. Xin, Y., et al., *Transformation of waste-contaminated glass dust in sustainable fired clay bricks*. 2023. **18**: p. e01717.
51. Tonnayopas, D., P. Tekasakul, and S. Jaritgnam. *Effects of rice husk ash on characteristics of lightweight clay brick*. in *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference, Khon Kaen Univ*. 2008.
52. Martínez-García, C., et al., *Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry*. 2012. **95**: p. S343-S348.
53. Demir, I.J.B. and Environment, *An investigation on the production of construction brick with processed waste tea*. 2006. **9**(41): p. 1274-1278.
54. Bilgin, N., et al., *Use of waste marble powder in brick industry*. 2012.
55. la Rubia-García, M., et al., *Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production*. 2012. **36**: p. 495-500.
56. Monteiro, S., et al., *Red ceramic industrial products incorporated with oily wastes*. 2007. **11**(21).
57. Demir, I., M.J.B. Orhan, and Environment, *Reuse of waste bricks in the production line*. 2003. **38**(12): p. 1451-1455.
58. Kamil, M.T.A., *Heat Transfer, Basic Principales, Bilingual text book*. 2019.
59. Grandjean, B., *TRANSFERT DE CHALEUR Volume 1 Notes de cours*. 2013, Leçons commentées en ligne sur <http://www.grandjean-bpa.com/therm/>.
60. Gobain, S., *introduction a la thermique du batiment*. les essentielles de batiment 2012.
61. L'Organisme Public de Formation Technique et Professionnelle , L.D.G.d.C.e.d.D.d.P.d.é.e.A.S., *Les fondamentaux de la thermodynamique et des fluides, la mécanique des fluides*. 1429 hedjri.
62. Jannot, Y. and C.J.E.d.m.N. Moyne, *Transferts thermiques*. 2012: p. 161.
63. frious, f.l., *propriété thermique de matériaux et le références métrologique*. laboratoire national de métrologie et d'essais(LNE/DRST), 2010.
64. Un service cofinancé par l'ADEME, I.R. Auvergne-Rhône-Alpes, and e.d.c. locales., *Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable p51*

65. Un service cofinancé par l'ADEME, I.R. Auvergne-Rhône-Alpes, and e.d.c. locales., *Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable* p23.
66. "Climate", E.B.I. <https://www.britannica.com/science/climate-meteorology>. 03 Decembre 2021.
67. De Herde, A. and A. Liébard, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. 2005.
68. Viaro, M.A. and A. Ziegler, *Habitat traditionnel dans le monde: éléments pour une approche*. 1983: établissement humains et environnement socio-culturel UNISCO.
69. Soumia, H., *Contribution à l'étude les caractéristiques thermiques des habitations en terre*

(cas de pisé) renforcé par des déchets de palmier dattier dans les régions de la wilaya

d'Ouargla. 2020, KASDI MERBAH - OUARGLA.

70. Certu, *Le confort thermique*. mémento technique du bâtiment, juillet 2003.
71. (CNERIB), L.C.N.d.E.e.d.R.I.d.B., *Document Technique Réglementaire, Réglementation Thermique du Bâtiment C3.2/4*. 2016.
72. Imessad, K., et al., *Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment*. 2017. **20**(4): p. 591-597.
73. https://ar.wikipedia.org/wiki/%D9%88%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A9_%D8%A7%D9%84%D9%88%D8%A7%D8%AF%D9%8A.
74. <https://fr.weatherspark.com/y/53031/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Oued-Souf-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>.
75. (AFNOR), A.F.d.N., (AFNOR), A.F.d.N., NF P 13-301 12-74 *Briques creuses de terre cuite*. NF P 13-304 10-83 *Briques en terre cuite destinées à rester apparentes*. NF P 13-305 10-83 *Briques pleines ou perforées et blocs perforés en terre cuite à enduire*. NF P 13-306 10-83 *Blocs perforés en terre cuite destinés à rester apparents*. NF XP P 13-901(2001) *Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception*. NF P 10-202 9-85 *Parois et murs en maçonnerie des petits éléments (DTU 20.1)*. DTU 20.1 – Octobre 2008 -Ouvrages en maçonnerie de petits éléments – Parois et murs – NF EN 771-1/CN *Spécifications pour éléments de maçonnerie —Partie 1 : Briques de terre cuite*.
76. ASTM, A.S.f.T.a.M., C 67-91 *Échantillonnage et essai des briques*. C 67-03(2003) *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*. C 1167-92 *Tuiles de terre cuite*. C 1196-92 *Méthode d'essai pour la contrainte de compression In Situ à l'intérieur d'une maçonnerie en éléments pleins à l'aide du vérin plat*. C 447-92 *Méthode d'essai pour la résistance à la compression de briques de maçonnerie*. C 326-09(2014) *Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays*. D 570 – 98 (Reapproved 2018) *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*.
77. TREFILAGE, E., *La fiche technique de la chaux*;HAMMAMET-TEBESSA. 2022.
78. Izemmouren, W., A. Guettala, and K. Gadri. *Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée*. in *CFM 2013-21ème Congrès Français de Mécanique*. 2013. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
79. Laboratoire de la Société Algérienne des Eaux, P.d.E.-O., Algérie, *Analyse chimique de l'eau du robinet*. 2022.
80. <https://moroccohiking.com/l-alfa-l-herbe-du-desert-une-plante-herbacee/>.

81. Bentchikou, M., *Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique: Cas de béton de fibres de papiers recyclés*. 2008, école nationale polytechnique.
82. Peirs, G. and P. Lafaurie, *La brique: Fabrication et traditions constructives*. 2004: Eyrolles.
83. Ouedraogo, M., et al., *Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw*. 2019. **23**: p. 250-258.
84. Millogo, Y., et al., *Earth blocks stabilized by cow-dung*. 2016. **49**: p. 4583-4594.
85. Rigacci, A., *La mesure de conductivité thermique*. Ecole des Mines de Paris Centre Energétique et Procédés.
86. JANNOT, Y., *Théorie et pratique de la métrologie thermique*. Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), 2011.
87. Vijayan, D., et al., *Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: A review*. 2021. **23**: p. 101577.
88. Ouedraogo, K.A.J., et al., *Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant?* 2020. **236**: p. 117578.
89. Anjum, F., et al., *Effect of sintering temperature on mechanical and thermophysical properties of biowaste-added fired clay bricks*. 2019. **21**: p. 503-524.
90. Adazabra, A.N., et al., *Combined effects of biomass bottom ashes and spent charcoal on characteristics of fired clay bricks*. 2023. **399**: p. 132570.
91. Institution, T.S., *Solid Brick and Vertically Perforated Bricks (the Classification, Properties, Sampling, Testing and Marking of Solid Bricks and Vertically Perforated Bricks)*. 1985, Turkish Standard Institution Ankara, Turkey.
92. Dos Reis, G.S., et al., *Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive*. 2020. **258**: p. 120733.
93. Murmu, A.L., A.J.C. Patel, and b. materials, *Towards sustainable bricks production: An overview*. 2018. **165**: p. 112-125.
94. Rahman, M.J.I.J.o.C.C. and L. Concrete, *Properties of clay-sand-rice husk ash mixed bricks*. 1987. **9**(2): p. 105-108.
95. Organization, W.H., *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. 2010: World Health Organization. Regional Office for Europe.

Annexe



Photo N°1: Extraction de l'argile, sa mouture et son transport



Photo N°2: Déchets et poudre des bois de palmiers dattier 2



Phot N°3: Préparation des échantillons et leur test thermique



Photo N°4: Échantillons utilisés pour réaliser les prototypes



Photo N°5: Réalisation des prototypes



Photo N°6: Prototypes après la fin des travaux.



Photo N°7: Tests thermiques des prototypes