

UNIVERSITE DE THIES



Ecole doctorale : Développement durable et Société

ED 2DS

Année : 2015-2016

N° d'ordre : 009/ED2DS/2016

THESE DE DOCTORAT

Mention : Science et Technologie

Option : Energétique, Thermique et Environnement

Présentée par :

ABDALLAH DADI MAHAMAT



**Etude comparative des caractéristiques thermophysiques et
mécaniques de matériaux locaux de construction utilisés dans l'habitat
social au Tchad**

Date de soutenance : 13 octobre 2016

Composition du Jury :

Président

Grégoire SISSOKO

Professeur Titulaire, UCAD, Dakar, Sénégal

Rapporteurs

Gilbert MENGUY

Professeur Titulaire, UCB Lyon1, France

Mamadou SARR

Professeur Titulaire, UT, Thiès, Sénégal

Membres

Malloum SOULTAN

Maître-Assistant, INSTA, Abéché, Tchad

Djibril SOW

Maître-Assistant, UT, Thiès, Sénégal

Directeurs de Thèse

Salif GAYE

Professeur Titulaire UT, Thiès, Sénégal

Mahamoud Youssouf KHAYAL

Maître de Conférences, CNRD, Tchad

Je dédie ce travail à

- **mon défunt père El-hadj DADI MAHAMAT pour tous les sacrifices qu'il a consenti pour la réussite dans mes études.**
- **ma mère Hadjé SEIDE TOUKA HAGGAR pour les prières qu'elle ne cesse de faire à mon égard.**
- **mon oncle Mahamat Barka pour son soutien multiforme**
- **mon épouse et mes enfants pour leur compréhension et leur soutien moral indispensables pour ma réussite.**
- **mes frères, mes sœurs, mes cousins et mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements.**

Remerciements

Nous remercions **Dieu le Tout Puissant** de nous avoir prêté vie et santé pour parachever ces travaux de recherche.

Nous tenons à remercier le Directeur de l'Ecole doctorale de Développement durable et Société (ED2DS) de l'Université de Thiès, le Professeur **Mamadou Mourtalla Ka**.

Mes vifs remerciements au Professeur **Salif Gaye**, Directeur de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT), Responsable du laboratoire des Matériaux et Energétique (LME) de l'Université de Thiès pour avoir dirigé cette thèse avec beaucoup d'attentions et de l'accueil qu'il nous a réservé au sein du LME, malgré ses lourdes responsabilités.

Mes remerciements vont également au Professeur **Mahamoud Youssouf Khayal**, Directeur Général du Centre National de Recherches pour le Développement (CNRD) Tchad, pour avoir supervisé et dirigé ces travaux.

Nous adressons toute notre reconnaissance au Professeur **Grégoire Sissoko** de l'Université Cheikh Anta Diop pour avoir accepté de présider le jury.

Nos sincères remerciements vont au Professeur **Gilbert Menguy** d'Université Claude Bernard (UCB) de Lyon1 et le Professeur **Mamadou Sarr** Responsable de la Mention Sciences et Technologie de l'Ecole Doctorale de Développement Durable et société (ED2DS) de l'Université de Thiès pour leur participation au jury en qualité des rapporteurs.

Nous remercions aussi le Dr **Malloum Soultan** Directeur Général de l'Institut National Supérieur des Sciences et Techniques D'Abéché (INSTA) et le Dr **Djibril SOW** chef de département Génie Civil de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de l'Université de Thiès pour leurs participations au jury.

Nous remercions le Professeur **Mohamed Garoum** Responsable de Laboratoire de l'Energie Matériaux et Environnement (LEME) et Adjoint Directeur de L'Ecole Supérieure de Technologies de Salé Université Mohamed V de Rabat, Maroc, pour son accueil et son appui techniques lors de notre séjour dans son laboratoire.

Nos remerciements vont également au Dr **Abdoulaye Saleh** Gérant de Laboratoire de Bâtiment et Travaux Publics (LBTP) de N'Djamena qui nous a permis d'effectuer les essais mécaniques dans son laboratoire.

Nous remercions le Directeur General et les collègues enseignants chercheurs du Laboratoire Energétique de l'Institut Nationale Supérieure des Sciences et Techniques D'Abéché (INSTA), pour leurs contributions techniques lors de nos essais expérimentaux effectués dans ce laboratoire.

En fin nous remercions tout ceux de près ou de loin ont apporté leur contribution à ces travaux.

Résumé

Le coût d'investissement et la consommation de l'énergie dans le secteur du bâtiment pèsent lourdement sur l'économie et l'environnement. C'est pour cela que plusieurs études ont été effectuées au niveau du bâtiment et des équipements afin de contribuer au choix de matériaux adéquats pour l'enveloppe et à la maîtrise de l'énergie.

Le présent travail qui porte sur l'étude comparative des caractéristiques thermophysiques et mécaniques de matériaux de construction locaux à base d'argile avec incorporation des déchets agricoles en provenance de trois grandes agglomérations du Tchad (les régions d'Abéché, de N'Djamena et de Sarh), rentre dans ce cadre.

L'objectif visé est l'obtention de matériaux allégés présentant de bonnes performances thermomécaniques et pouvant contribuer à améliorer le confort thermique dans l'habitat social au Tchad tout en réduisant le coût d'investissement.

Dans ce sens, plusieurs échantillons ont été confectionnés avec des pourcentages massiques de déchets agricoles (bouse de vache ou gousse de mil) variant de 0% à 8%. Chaque échantillon a fait l'objet d'une caractérisation mécanique et thermique. Pour cela, nous avons utilisé des méthodes expérimentales appropriées pour les matériaux poreux (la presse hydraulique pour les essais mécaniques et la méthode des boîtes pour les essais thermiques).

La résistance à la compression, la conductivité thermique et la diffusivité thermique de chaque échantillon ont ainsi été déterminées grâce aux données expérimentales obtenues à partir de ces méthodes.

La simulation thermique effectuée avec ces résultats expérimentaux a permis de constater des gains d'énergie importants ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique.

Cette thèse a ainsi permis de montrer que les déchets agricoles peuvent être valorisés grâce à leur intégration dans les matériaux de construction.

Mots clés : Matériaux de construction, caractéristiques mécaniques, caractéristiques thermiques, bouse de vache, gousse de mil, argile, valorisation déchets, économie d'énergie, confort thermique.

Abstract

The capital cost and the consumption of energy in the sector of the building weigh heavily on the economy and the environment. It is for that several studies were carried out on the level of the building and the equipment in order to contribute to the choice of adequate materials for the envelope and to the control of energy.

This work, which relates to the comparative study of the thermophysical and mechanical local building material characteristics based on clay with incorporation of agricultural waste coming from three great agglomerations of Chad (areas of Abéché, Djamena and Sarh), returns within this framework.

The had aim is obtaining materials reduced presenting good thermomechanical performances and being able to contribute to improve thermal comfort in the social habitat in Chad while reducing the capital cost.

In this direction, several samples were made with mass percentages of agricultural waste (dung of cow or pod of millet) varying from 0% to 8%. Each sample was the subject of a mechanical and thermal characterization. For that, we used experimental methods adapted (the hydraulic press for the mechanical tests and the method of limp for the thermal tests) for porous materials.

The compressive strength, thermal conductivity and the thermal diffusivity of each sample were thus given thanks to the experimental data obtained starting from these methods.

The thermal simulation carried out with these experimental results made it possible to note significant profits of energy as well as an improvement of the energy.

This thesis thus made it possible to show that agricultural waste can be developed thanks to their integration in building materials.

Key words : Building materials, mechanical characteristics, thermal characteristic, dung of cow, pod of millet, clay, valorization waste, energy saving, thermal comfort.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Liste des Photos.....	xvii
Nomenclature	xviii
Liste des abréviations	xx
Introduction Générale.....	1
Partie I : Synthèse bibliographique	3
Chapitre 1 : Rappel sur le transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux ..	4
Introduction	4
1.1 Les propriétés des matériaux poreux	4
1.1.1 Les expressions des différentes porosités.....	5
1.1.1.1 Porosité ouverte	5
1.1.1.2 Porosité fermée	5
1.1.1.3 Porosité totale	5
1.1.2 Masse volumique.....	5
1.1.2.1 Masse volumique apparente	5
1.1.2.2 Masse volumique réelle	6
1.1.2.3 Masse volumique théorique.....	6
1.2 Transfert de l'humidité dans un milieu poreux	6
1.2.1 Teneur en l'humidité dans un matériau poreux.....	7
1.2.2 Modes de fixation de l'humidité	8
1.2.2.1 Adsorption physique.....	8
1.2.2.2 Condensation capillaire	9
1.2.3 Mécanisme du transfert d'humidité.....	10
1.2.3.1 Transfert en phase liquide.....	10
1.2.3.2 Transfert en phase vapeur	11
1.3 Modes de transmission de chaleur	12
1.3.1 Transfert de chaleur par convection	13
1.3.2 Transfert de chaleur par rayonnement.....	13
1.3.3 Transfert de chaleur par conduction.....	14

1.3.3.1	Equation de diffusion de la chaleur	14
1.3.3.2	Modélisation théorique de la conductivité thermique des milieux poreux	14
Conclusion :		19
Chapitre 2 : Matériaux de construction et isolation thermique de l’habitat au Tchad ...		20
2.1	Typologie de l’habitat au Tchad	20
2.1.1	Zones climatiques au Tchad	20
2.1.2	Données météorologique :	21
2.1.3	L’habitat au Tchad	23
2.1.3.1	L’habitat traditionnel	24
2.1.3.2	L’habitat urbain :	25
2.2	Les matériaux de constructions au Tchad	27
2.2.1	Les matériaux modernes classiques.	27
2.2.1.1	Le parpaing de ciment	27
2.2.1.2	Le béton	27
2.2.2	Les matériaux traditionnels d’origine naturelle	28
2.2.2.1	L’Argile	29
2.2.2.2	La latérite	29
2.2.2.3	Le sable	29
2.2.2.4	Le gravier	30
2.2.2.5	Le bois	30
2.2.2.6	La pierre	30
2.2.3	Classification des sols	31
2.2.3.1	L’analyse granulométrie par tamisage	31
2.2.3.2	Limites d’Atterberg	32
2.2.3.3	Essais Valeur de Bleu de Méthylène	34
2.2.3.4	Poids spécifique des grains solides	36
2.2.4	Les briques à base de terre	36
2.2.4.1	La brique de terre crue	37
2.2.4.2	Les briques de terre stabilisée BTS	37
2.2.4.3	Briques de terre stabilisées mécaniquement	38
2.2.4.4	Brique de terre stabilisée chimiquement	38
2.2.4.5	Briques de terre stabilisée physiquement	38
2.2.4.6	Briques de terre stabilisées par cuisson	38
2.3	Isolation thermique	39

2.3.1	L'isolation des parois d'un bâtiment :	40
2.3.2	Les isolants thermiques courant	41
2.3.3	Isolation par intégration des déchets agricoles	42
2.3.3.1	Bouse de vache (BV)	43
2.3.3.2	Gousse de mil (GM)	43
2.4	Confort thermique.....	44
2.4.1	Les paramètres du confort thermique	44
2.4.1.1	Températures	44
2.4.1.2	L'humidité	44
2.4.1.3	Le mouvement de l'air.....	45
2.4.1.4	Le métabolisme.....	45
2.4.2	Les indices de confort	46
2.4.2.1	PMV (Indice de Vote Moyen Prévisible)	46
2.4.2.2	PPD (Pourcentage Prévu des Insatisfaits).....	48
2.4.2.3	Indice DISC et TSENS	49
2.4.3	Confort thermique en climat tropical humide	50
2.4.4	Les diagrammes bioclimatiques	52
2.4.5	Table de Mahoney	52
2.4.6	Le refroidissement passif de l'habitat	53
Chapitre 3 Méthodes des mesures de propriétés thermophysiques et mécaniques		55
Introduction		55
3.1	Caractérisation mécanique.....	55
3.1.1	Dispositif utilisé pour les essais mécaniques	56
3.1.2	Mode opératoire des essais mécaniques	56
3.1.3	La résistance en compression	57
3.2	Caractérisation thermique.....	57
3.2.1	Les caractéristiques thermophysiques	57
3.2.1.1	La conductivité thermique (λ).....	58
3.2.1.2	Résistance thermique (R_{th}).....	58
3.2.1.3	La chaleur massique (C_p).....	58
3.2.1.4	La diffusivité thermique (a)	59
3.2.1.5	Effusivité thermique (E)	60
3.2.2	Les méthodes de caractérisation thermique.....	60
3.2.2.1	La Méthode des boîtes	61

3.2.2.1.1 Méthode des mesures de la conductivité thermique :.....	63
3.2.2.1.2 Le calcul des erreurs	64
3.2.2.2 La Méthode Flash	64
3.2.2.2.1 Modèle de Parker.....	65
3.2.2.2.2 Modèle de Degiovanni.....	66
Partie II : Etudes expérimentales	68
Chapitre : 4 Identification des matériaux et formulations des échantillons	69
Introduction	69
4.1 Identification de matériaux	69
4.1.1 Analyse granulométrique et sédimentométrique des sols utilisés	70
4.1.2 Les essais des limites d'Atterberg	71
4.1.3 Essai de Bleu Méthylène	71
4.2 Fabrication des briquettes pour les essais mécaniques et thermiques	71
4.2.1 Méthode de fabrication briquettes crues	72
4.2.2 Méthode de cuisson des briques.....	73
4.3 Formulations des éprouvettes cylindriques pour les essais mécaniques	73
4.4 Formulations des éprouvettes carrées pour les essais thermiques	75
4.5 Evolution des masses volumiques en fonction des adjuvants	77
Chapitre 5 : Résultats des études expérimentales	81
Introduction	81
5.1 Caractérisation mécanique.....	81
5.1.1 Résultats des éprouvettes de matériau mélange avec la bouse de vache.....	82
5.1.2 Résultats des éprouvettes de mélange de la terre avec la gousse de mil	86
5.2 Caractérisation thermique.....	90
5.2.1 Les Caractéristiques thermiques pour les matériaux avec bouse de vache	90
5.2.2 Les Caractéristiques thermiques pour les matériaux avec gousse de mil.....	99
5.3 Influences de la teneur en eau.....	108
5.4 Détermination de la diffusivité thermique avec la méthode flash	112
5.5 Etude comparative des caractéristiques thermophysiques et mécaniques.....	116
5.5.1 Caractéristiques mécaniques	116
5.5.2 Caractéristiques thermophysiques.....	118
5.5.3 Etude Thermomécanique.....	123
Conclusion.....	130

Chapitre 6 : Simulation thermique d'un bâtiment	131
Introduction	131
6.1 Réalisation de la simulation thermique	131
6.1.1 Choix d'un prototype de bâtiment.....	132
6.1.2 Définition du projet	133
6.1.3 Données climatiques du site choisi	134
6.1.4 Paramétrage des parois du bâtiment.....	135
6.1.5 Calculs des gains d'énergie	136
6.2 Résultats de simulation avec RETScreen	137
Conclusion.....	140
Conclusion Générale	141
References Bibliographiques.....	143
Annexes	148
Liste des publications	154

Liste des figures

Fig.1 : Milieu poreux	4
Fig.2 : Courbes d'adsorption et de désorption d'un milieu poreux	8
Fig.3 : Condensation capillaire dans un pore.....	9
Fig.4 : Evapo - condensation à la construction d'un pore	12
Fig.5 : Modèle série	15
Fig.6 : Modèle parallèle	16
Fig.7 : Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphasique	16
Fig.8 : Modèle du Willy et Southwick.....	17
Fig.9 : (a) Cellule de Russel et (b) cellule de Frey	17
Fig.10 : Configuration du modèle série - parallèle de Krischer.....	19
Fig.11 : Températures maximales.....	21
Fig.12 : Températures minimales	21
Fig.13 : Températures moyennes.....	22
Fig.14 : Pluviométrie annuelle.....	22
Fig.15 : Humidité relative moyenne	22
Fig.16 : Insolation mensuelle (rayonnement solaire).....	23
Fig.17 : Détermination de limite de liquidité.....	33
Fig.18 : Différents échanges de chaleur entre l'Homme et son environnement.....	45
Fig.19 : Courbe de PPD en fonction de PMV.....	48
Fig.20 : Courbe PPD en fonction de la température de l'air.....	49
Fig.21 : Zone du confort de confort -indice Disc [21].....	51
Fig.22 : Indice DISC – sensation de confort thermique en fonction de la mouillure cutanée- comparaison des corrélations de l'indice.	51
Fig.23 : Diagramme bioclimatique	52
Fig.24 : Dispositif expérimental d'écrasement d'une éprouvette	56
Fig.25 : Principe de mesure de la conductivité thermique [40]	62
Fig.26 : Coupe du dispositif 'des boîtes'	63
Fig.27 : Schéma de principe de la méthode flash	65
Fig.28 : Thermogramme de la face non éclairée	66
Fig.29 : Récapitulatif des courbes granulométriques et sédimentométrique	70
Fig.30 : Evolution de la masse volumique en fonction de l'ajout de la BV cas de EAA	77
Fig.31 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas de EAN.....	77
Fig.32 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas EAS	78

Fig.33 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas de EAAC	78
Fig.34 : Evolution de la masse volumique en fonction de l'ajout de GM cas EAA.....	79
Fig.35 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas EAN	79
Fig.36 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas EAS	80
Fig.37 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas de EAAC	80
Fig.38 : Evolution de la résistance mécanique sur des éprouvette de la terre d'Abéché avec la bouse de vache.	82
Fig.39 : Variation de la résistance mécanique avec l'augmentation de la bouse de vache.....	83
Fig.40 : Variation de la résistance à la compression avec l'ajout de la BV cas de EAS	84
Fig.41 : Evolution de la résistance mécanique des briques cuites avec la bouse de vache	85
Fig.42 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de la gousse de mil	86
Fig.43 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GM.....	87
Fig.44 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de gousse de mil	88
Fig.45 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de gousse de mil cas de EAAC ..	89
Fig.46 : Evolution de la conductivité en fonction de l'ajout de la BV cas de EAAC	91
Fig.47 : Allure de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAN	91
Fig.48 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAS	92
Fig.49 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAAC.....	92
Fig.50 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des échantillons avec BV cas EAA	93
Fig.51 : Allure de la conductivité thermique avec la masse volumique le cas de EAN	93
Fig.52 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique le cas de EAS.....	94
Fig.53 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique le cas de EAAC.....	94
Fig.54 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la BV cas de EAA	95
Fig.55 : Allure de la résistance thermique avec l'augmentation de BV le cas de EAN	95
Fig.56 : Variation de la résistance thermique avec de l'ajout de la BV cas de EAS	96
Fig.57 : Evolution de la résistance thermique avec l'ajout de la BV cas de EAAC.....	96
Fig.58 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAA.....	97
Fig.59 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAN.....	97

Fig.60 : Variation de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAS.....	98
Fig.61 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAAC	98
Fig.62 : Allure de la conductivité thermique en fonction de GM cas EAA	99
Fig.63 : Allure de conductivité thermique avec de la GM cas de EAN	100
Fig.64 : Conductivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAS	100
Fig.65 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de GM cas de EAAC	101
Fig.66 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAA.....	101
Fig.67 : Allure de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAN ..	102
Fig.68 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAS.....	102
Fig.69 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAAC.....	103
Fig.70 : Evolution de la résistance thermique en fonction de l'ajout de la GM cas de EAA	104
Fig.71 : Allure de la résistance thermique avec l'ajout de la GM cas de EAN	104
Fig.72 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas de EAS	105
Fig.73 : Variation de la résistance thermique avec la GM cas de EAAC	105
Fig.74 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique des échantillons avec GM cas de EAA.....	106
Fig.75 : Variation de la résistance thermique avec la masse volumique cas de EAN	106
Fig.76 : Variation de la résistance thermique avec de la masse volumique cas de EAS	107
Fig.77 : Evolution de la résistance thermique avec de la masse volumique cas de EAAC ...	107
Fig.78 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du teneur en eau cas de EAA .	108
Fig.79 : Evolution de la conductivité en fonction de la teneur en eau cas de EAA8%GM...	109
Fig.80 : Evolution de la conductivité en fonction de la teneur en eau cas de EAA 8% BV..	109
Fig.81 : Teneur en eau absorbée en fonction de temps.....	110
Fig.82 : Conductivité thermique en fonction du teneur en eau.....	111
Fig.83 : Résistance thermique en fonction du teneur en eau	111
Fig.84 : Evolution de la diffusivité thermique de EAA en fonction de la BV.....	112
Fig.85 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAN en fonction de la BV	112
Fig.86 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAS en fonction de la BV	113
Fig.87 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAAC en fonction de BV	113

Fig.88 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAA.....	114
Fig.89 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAN.....	114
Fig.90 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAS	115
Fig.91 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAAC.....	115
Fig.92 : Courbes des allures des résistances mécaniques en fonction de l'ajout de la BV....	116
Fig.93 : Récapitulative des allures des résistances mécaniques de EAA, EAN et EAS avec l'ajout de GM	117
Fig.94 : Allures des résistances mécaniques en fonction de l'ajout de la BV cas de EAA avant et après cuisson.....	117
Fig.95 : Allure de EAA avant et après cuisson.....	118
Fig.96 : Variations des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de la BV, cas de EAA, EAN et EAS	118
Fig.97 : Variations des résistances thermiques en fonction des l'ajout de la BV cas de EAA, EAN et EAS	119
Fig.98 : Variations des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de GM cas de : EAA, EAN et EAS	119
Fig.99 : Evolutions des résistances thermiques en fonction de l'ajout de GM pour les cas de : EAA, EAN et EAS	120
Fig.100 : Allures des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de BV avant et après cuisson de EAA.....	121
Fig.101 : Allures des résistances thermiques de EAA en fonction de l'ajout de BV avant et après la cuisson.....	121
Fig.102 : Evolutions des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de GM de EAA avant et après cuisson.	122
Fig.103 : Variation des résistances thermiques en fonction de l'ajout de la GM de EAA avant et Apres cuisson.....	122
Fig.104 : Evolution de la résistance thermique et mécanique en fonction de la BV	123
Fig.105 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la BV.....	124
Fig.106 : Allures de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la BV.....	124
Fig.107 : Variation de la résistance thermique et mécanique de EAAC en fonction de l'ajout de la BV.....	125

Fig.108 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM.....	126
Fig.109 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM.....	126
Fig.110 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM.....	127
Fig.111 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM.....	127
Fig.112 : Cas défavorables en résistance mécanique.....	128
Fig.113 : Résistances thermiques des échantillons avec 8% d'adjuvant	129
Fig.114 : Plan cellule d'étude	132
Fig.115 : Cellule d'étude dessin en 3D	132
Fig.116 : Information sur le projet	133
Fig.117 : Données climatiques de la ville d'Abéché	134
Fig.118 : Données géométriques et thermiques de l'enveloppe du bâtiment avec EAAC8%GM	135
Fig.119 : Résultat des gains d'énergie cas de EAAC8%GM.....	136
Fig.120 : Gains d'énergie pour la production de froid des matériaux mélangés avec la BV.....	137
Fig.121 : Gains d'énergie pour la production de froid des matériaux mélangés avec la GM.....	138
Fig.122 : Gains d'énergie pour la production de froid cas de EAAC8%BV et EAA8%BV.....	139
Fig.123 : Gains d'énergie pour la production de froid cas de EAAC8%GM et EAA8%GM.....	139

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Dénomination d'un sol selon la granularité	32
Tableau 2 :	Indice de plasticité des matériaux fins	34
Tableau 3 :	Etats du sol en fonction de l'indice de consistance	34
Tableau 4 :	Les ordres de grandeurs des valeurs de bleu de méthylène.....	35
Tableau 5 :	Qualificatif de fraction argileuse.....	36
Tableau 6 :	Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermique.....	46
Tableau 7 :	Valeurs du métabolisme	48
Tableau 8 :	Références des échantillons	69
Tableau 9 :	Répartition granulométrique et sédimentométrique des sols	70
Tableau 10 :	Résultats des essais des limites d'Atterberg	71
Tableau 11 :	: Résultats des essais des valeurs de bleu de méthylène.....	71
Tableau 12 :	Eprouvettes cylindriques des matériaux d'Abéché : EAA	73
Tableau 13 :	Eprouvettes cylindriques des matériaux de N'Djamena : EAN	74
Tableau 14 :	Eprouvettes cylindriques des matériaux Sarh : EAS	74
Tableau 15 :	Eprouvette cylindriques des matériaux d'Abéché (avant cuisson) : EAAC... ..	74
Tableau 16 :	Éprouvettes carrées matériaux d'Abéché	75
Tableau 17 :	Eprouvettes carrées de Ndjamena (EAN).....	75
Tableau 18 :	Eprouvettes carrées des matériaux de Sarh	75
Tableau 19 :	Eprouvettes carrées des matériaux d'Abéché (formulation avant cuisson)....	76
Tableau 20 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile Abéché	82
Tableau 21 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Ndjamena	83
Tableau 22 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Sarh	84
Tableau 23 :	Résultats des essais mécaniques échantillons briques cuite Abéché	85
Tableau 24 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile Abéché	86
Tableau 25 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Ndjamena	87
Tableau 26 :	Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Sarh	88
Tableau 27 :	Résultats des essais mécaniques échantillons briques cuites Abéché	89
Tableau 28 :	Variation de la conductivité thermique avec l'ajout de la bouse de vache.....	90
Tableau 29 :	Variation de la résistance thermique avec l'ajout de la bouse de vache.....	95
Tableau 30 :	Variation de la conductivité thermique en fonction de gousse de mil.....	99
Tableau 31 :	Variation de la résistance thermique avec l'ajout de gousse de mil.....	103
Tableau 32 :	Variation de la diffusivité thermique en fonction de la bouse de vache.....	112
Tableau 33 :	Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la gousse de mil	114

Tableau 34 :	Valeurs de la résistance thermique et mécanique de matériaux mélangés avec la BV.....	123
Tableau 35 :	Valeurs de la résistance thermique et mécanique de matériaux mélangés avec la GM.....	125
Tableau 36 :	Echantillons avec BV présentant des résistances mécaniques élevées.....	128
Tableau 37 :	Echantillons avec GM présentant des résistances thermiques élevées.....	128
Tableau 38 :	Matériaux avec mélange de la bouse de vache.....	137
Tableau 39 :	Matériaux avec mélange de gousse de mil	138

Liste des Photos

Photo.1	: Four artisanal pour la cuisson des briques	39
Photo.2	: La Bouse de vache séchée	43
Photo.3	: La gousse de mil à l'état naturel	43
Photo.4	: Phénomène de retrait dans une moule	72
Photo.5	: Briques cuites carrées	73
Photo.6	: Briques carrées pour les essais thermiques (a) Briques cylindriques pour les essais mécaniques (b)	76
Photo.7	: Presse universelle pour les essais à la compression.....	81
Photo.8	: Cellule EI 700	90

Nomenclature

Lettres latines

a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
c	Coefficient de déperdition	$W. ^\circ C^{-1}$
C	Echange au niveau de la peau par convection	$W.m^{-2}$
C _p	Chaleur massique	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
C _{resp}	Echanges au niveau des voies respiratoires par convection	$W.m^{-2}$
DS	Débit sudoral	$g.h^{-1}$
e	Epaisseur	M
E	Effusivité thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$
E _{conf}	Part d'évapore – transpiration qui apparait durant une phase de confort	$W.m^{-2}$
E _{diff}	Diffusion de chaleur évaporation par la peau	$W.m^{-2}$
E _{pév}	Perte par évaporation de la sueur	W
E _{pmax}	Pouvoir évaporatif maximal de l'air	W
E _{resp}	Echanges au niveau des voies respiratoires par évaporation	$W.m^{-2}$
F	Force	N
h _c	Coefficient de convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
H _r	Hygrométrie relative	%
I _p	Indice de plasticité	%
k	perméabilité	m^2
m	masse	Kg
M	Métabolisme	W
M _{cut}	Mouillure cutanée	Sans unité
P	Porosité	%
P	Pression	Pa
Q	Puissance	W
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
R	Rayon	mm
R	Résistance	

R	Echange au niveau de la peau par rayonnement	$W.m^{-2}$
R_{act}	Résistance de l'activité	MET
R_c	Résistance à la compression	MPa
R_{clo}	Résistance de l'habillement	CLo
R_{th}	Résistance thermique	$m^2.K.W^{-1}$
S	Surface	m^2
T	Température	$^{\circ}C$
t	Temps	S
U	Tension	V
V	Volume	m^3
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
w	Teneur en eau	%
W	Travail spécifique par m^2 de la peau	$W.m^{-2}$
w_l	Limite de liquidité	%
w_p	Limite de plasticité	%

Lettres grecs

λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ϕ	Densité de flux thermique	$W.m^{-2}$
	Flux de chaleur conductive	W
γ_s	Poids spécifique	$g.cm^{-3}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
τ_s	Taux de saturation en eau	%
χ_s	teneur pondérée en eau	%
θ_s	teneur volumique en eau	%
ρ	Masse volumique	$kg.m^{-3}$

Liste des abréviations

BV	Bouse de Vache
COP21	21 ^{ème} Conférence Parties de Paris
DISC	Thermal Discomfort
EAA	Echantillon Argile d'Abéché
EAAC	Echantillon Argile d'Abéché Cuite
EAN	Echantillon Argile de N'Djamena
EAS	Echantillon Argile de Sarh
GES	Gaz à Effet de Serre
GM	Gousse de Mil
NF	Norme Française
PMV	Indice de Vote Moyen Prévisible
PPD	Pourcentage Prévu D'insatisfaits
TSENS	Thermal Sensation

Introduction Générale

Le secteur du logement en Afrique sahélien et plus particulièrement au Tchad évolue vers une modernisation sans une étude au préalable aux conséquences multiples. Les anciens modes de constructions commencent à disparaître en laissant la place aux modèles occidentaux. Les matériaux traditionnels tels que les briques de terre cèdent de jour en jour leur place aux matériaux modernes à cause de leur résistance mécanique mais présentent un coût d'investissement et environnementaux très élevé. Ces matériaux ne sont pas adaptés au climat chaud africain, donc les maisons construites à base de ces matériaux nécessitent pour le confort thermique de ses occupants une climatisation artificiellement très consommatrice d'énergie.

L'impact du secteur du bâtiment sur les consommations énergétique et l'émission des gaz à effet de serre (GES) est de plus en plus croissant chaque année dans les pays en voie de développement et plus encore dans les pays développés.

Cet impact s'accroît du fait du réchauffement de la terre causé par le dérèglement climatique, le besoin sans cesse croissant du confort thermique dans les logements et le mauvais choix des matériaux de construction. C'est pourquoi des nombreuses conférences internationales sur l'environnement telles que la COP21 (21ème Conférence Parties de Paris) ont évoqué ces fléaux.

De nos jours la quasi-totalité de la consommation énergétique du bâtiment est liée non seulement dans sa phase de construction ou déconstruction mais plus encore dans sa phase d'exploitation, il est une nécessité impérieuse de tendre vers une construction de plus en plus adaptée et économique. Ce qui implique la place importante du choix des matériaux qui permettent une isolation des bâtiments, facteur de réduction significative des consommations énergétiques et des émissions des gaz à effet de serre.

Le béton ou mortier de ciment est le matériau classique le plus utilisé à l'échelle planétaire à cause de leurs performances mécaniques, cependant les impacts environnementaux générés par la production du ciment, son principal constituant, sont très importants.

Etant donné que ces matériaux classiques sont plus chers et leur accessibilité n'est pas du tout facile pour une population en majorité pauvre, l'utilisation des matériaux locaux pourrait alors être une alternative.

Dans ce contexte particulier, le développement et la recherche de nouveaux matériaux alternatifs à faible coût d'exploitation et impacts environnementaux s'impose comme une problématique prioritaire en Afrique et les pays en voie développement comme le Tchad, qui est un pays agro-pastoral où les déchets agricoles sont assez importants.

Dans l'objectif de concevoir des logements économiques limitant les effets néfastes sur l'environnement que nous avons porté notre choix sur les matériaux locaux à base d'argile mélangée avec des rejets agricoles tels que la bouse de vache sèche et la gousse de mil. Ces matériaux connaissent actuellement un regain d'intérêt grâce à leur disponibilité et leur exploitation plus facile et moins couteuse.

Pour une bonne représentativité des sols et différentes zones climatiques du Tchad, dans nos travaux nous avons choisi d'étudier les matériaux de trois grandes agglomérations du Tchad : Abéché au Nord-est, Ndjamena au centre et Sarh au Sud.

Ces travaux s'inscrivent dans un cadre logique de la recherche d'un modèle d'habitat économique et fiable adapté au climat sahélien tout en valorisant les matériaux locaux par une étude comparative de leurs propriétés mécaniques et thermiques.

Pour mener à bien cette étude, la presse hydraulique et la méthode des boîtes sont utilisées pour les mesures expérimentales des caractéristiques mécaniques et thermiques de nos matériaux.

Cette thèse est organisée en deux grandes parties avec chacune trois chapitres : La première partie concerne la synthèse bibliographique. La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale.

Le premier chapitre de cette thèse évoque les rappels d'une manière générale sur l'étude de transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux.

Le deuxième Chapitre s'articule autour des matériaux de construction et de l'isolation thermique. Dans cette partie, il est question de présenter la typologie de l'habitat et les conditions climatiques au Tchad avant d'aborder les matériaux de construction et la généralité sur le confort thermique.

Le troisième chapitre est dédié aux méthodes des mesures de propriétés mécaniques et thermophysiques des matériaux.

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'identification des sols et les formulations des échantillons.

La présentation des résultats des études expérimentales et de l'étude comparative feront l'objet du cinquième chapitre.

Le sixième chapitre est consacré à la simulation thermique pour déterminer les différents gains d'énergie obtenus avec nos matériaux par rapport à un matériau de référence pour la production du froid en vue d'un confort thermique.

Une conclusion générale dresse un bilan des résultats obtenus et quelques perspectives pour compléter les travaux.

Partie I : Synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Rappel sur le transfert de chaleur et de masse dans les matériaux poreux

Introduction

La connaissance des propriétés thermophysiques des matériaux de construction a une importance capitale d'autant plus que la plupart des matériaux utilisés dans l'isolation du bâtiment ont une structure poreuse. Les pores de ces matériaux sont le siège de transfert de chaleur complexe du fait du couplage conduction rayonnement ainsi que de transfert de l'humidité entre phase liquide et vapeur.

L'obtention d'un meilleur confort thermique dans l'habitat passe inévitablement par une maîtrise du comportement thermique des matériaux qui constituent les parois des habitations soumis à différentes météorologies.

Dans cette partie, pour mieux caractériser le comportement hydrique et thermique de ces matériaux, nous allons parcourir les différents modes des transferts de l'humidité et de chaleur.

1.1 Les propriétés des matériaux poreux

Un milieu poreux est un mélange polyphasique de caractéristiques différentes. Une des phases constitue la matrice solide supposée indéformable et une autre phase définit les frontières d'un certain nombre d'espace contenant un ou plusieurs fluides appelé "pores". Les pores peuvent être isolés au sein de la matrice solide (pores fermés) ou débouchant à la surface (pores ouverts).

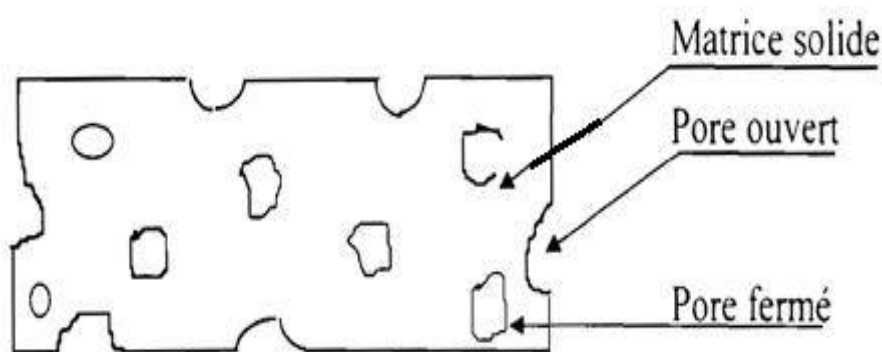


Fig.1 : Milieu poreux

1.1.1. Les expressions des différentes porosités

1.1.1.1 Porosité ouverte

La porosité ouverte P_o , appelée aussi porosité utile qui est la fraction du volume occupé par les pores ouverts v_o sur le volume total de l'échantillon v_T . P_o est la porosité facilement accessible aux fluides.

$$P_o = \frac{v_o}{v_T} \quad (1)$$

1.1.1.2 Porosité fermée

La porosité fermée d'un matériau est la fraction du volume occupé par les pores fermés v_f sur le volume total V_T . la porosité fermée est non accessible à la pénétration des fluides

$$P_f = \frac{V_f}{V_T} \quad (2)$$

La porosité fermée joue un rôle important vis-à-vis des propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques, mais n'intervient pas dans les phénomènes de diffusion et d'écoulement.

1.1.1.3 Porosité totale

C'est la fraction sans dimension du volume occupé par les pores ouverts et fermés V_v sur le volume total V_T apparent.

$$P_T = \frac{V_v}{V_T} \quad (3)$$

1.1.2 Masse volumique

La définition usuelle de la masse volumique d'un corps en tant que rapport de sa masse m sur son volume v reste imprécise dans le cas d'un matériau poreux. Ce rapport définit en effet la masse volumique apparente ρ_a du matériau qui se différencie de la masse volumique réelle ρ_r qui ne prend pas en compte les pores ouverts, ainsi que de la masse volumique théorique ρ_{th} qui ne tient pas compte de tous les espaces vides (pores ouverts et fermés), ainsi la masse volumique d'un matériau poreux peut s'exprimer sous trois formes différentes :

1.1.2.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse m du matériau et son volume apparent v_a

$$\rho_a = \frac{m}{v_a} \quad (4)$$

1.1.2.2 Masse volumique réelle

La masse volumique réelle s'exprime par le rapport entre la masse et le volumique occupé par la matrice solide et les pores fermés du matériau.

$$\rho_r = \frac{m}{V_a - V_o} \quad (5)$$

1.1.2.3 Masse volumique théorique

La masse volumique solide est le rapport entre la masse du matériau et le volume occupé seulement par la matrice solide. Cette masse est appelée souvent masse volumique absolue.

$$\rho_{th} = \frac{m}{V_a - (V_o + V_f)} \quad (6)$$

1.2 Transfert de l'humidité dans un milieu poreux

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont des matériaux poreux, on rappelle que ces matériaux sont composés d'au moins deux phases ; la phase solide, qui constitue le squelette du matériau et les pores de dimensions variables. Ces derniers peuvent être ouverts (à l'extérieur) ou fermés (entièrement entourés de la matrice solide). Cette particularité est le siège de plusieurs phénomènes tel que la transmission de la chaleur, la fixation et la migration de l'humidité, l'humidification, le changement de phase.

L'humidité est une des propriétés importante des matériaux de construction. Elle est un indice pour déterminer la teneur en eau réelle des matériaux au moment de l'expérience car la plupart des matériaux stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. [1]

L'humidité est définie par la présence de proportion d'eau sous forme liquide ou vapeur au sein d'un matériau poreux. On peut déterminer l'humidité de matériaux quelconques en utilisant la formule suivante

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (7)$$

Avec :

m_h = masse humide d'échantillon

m_s = masse sèche d'échantillon (après passage à l'étuve)

1.2.1 Teneur en l'humidité dans un matériau poreux

Les cavités d'un milieu poreux non saturé contiennent une phase liquide et une phase gazeuse. Pour évaluer la quantité d'eau stockée dans les pores trois relations entre volume et masse de trois phases du matériau sont généralement utilisées :

- La teneur volumique en eau est le rapport de volume occupé par l'eau condensée dans les pores sur le volume apparent du matériau poreux sec

$$\theta_s = \frac{\text{volume de l'eau occupant les pores}}{\text{volume apparent du matériau poreux sec}} \quad (8)$$

- Lorsque la teneur en eau vapeur est négligeable devant la teneur en eau liquide, la teneur pondérée en eau s'écrit :

$$\chi_s = \frac{\text{masse de l'eau occupant les pores}}{\text{masse apparent du matériau poreux sec}} \quad (9)$$

Taux de saturation en eau des pores est donné par l'expression :

$$\tau_s = \frac{\text{volume d'eau occupant les pores}}{\text{volume des pores ouverts}} \quad (10)$$

Lorsque tous les vides d'un corps sont remplis d'eau, on dit qu'il est saturé. Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide. Il joue un grand rôle dans les phénomènes de destruction des matériaux poreux par le gel. Le degré de saturation est l'absorption maximale des matériaux sous les conditions de pression et de température.

Ces paramètres sont liés par la relation suivante :

$$\chi_s = \frac{\rho_s}{\rho_a} \theta_s \quad (11)$$

$$\tau_s = \frac{\theta_s}{P_o} \quad (12)$$

1.2.2 Modes de fixation de l'humidité

La fixation d'humidité dans les milieux poreux est un phénomène qui s'explique par plusieurs mécanismes : l'adsorption, la condensation et la capillarité (absorption). Ces trois mécanismes sont fonction de divers paramètres dont la porosité, l'état de la phase fluide et les conditions thermodynamiques. L'eau liée par adsorption est due à la présence de la vapeur d'eau à la surface du matériau.

Au voisinage de l'interface solide -fluide. Les molécules de vapeur sont attirées dans les pores par les forces intermoléculaires (forces de Van der Waal).

1.2.2.1 Adsorption physique

Le milieu poreux absorbe de la vapeur qui se condense sous forme d'eau liquide grâce à leur capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant. Ceci se traduit par une augmentation de la masse apparente de ce milieu. Cette augmentation de masse est due à la fixation de molécules d'eau en surface du matériau c'est le phénomène d'adsorption. Inversement une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente, c'est le phénomène de désorption.

L'augmentation de la masse du corps poreux est attribuée aux forces intermoléculaires (forces de Van der Waal) agissant au voisinage de l'interface solide – fluide dans les pores.

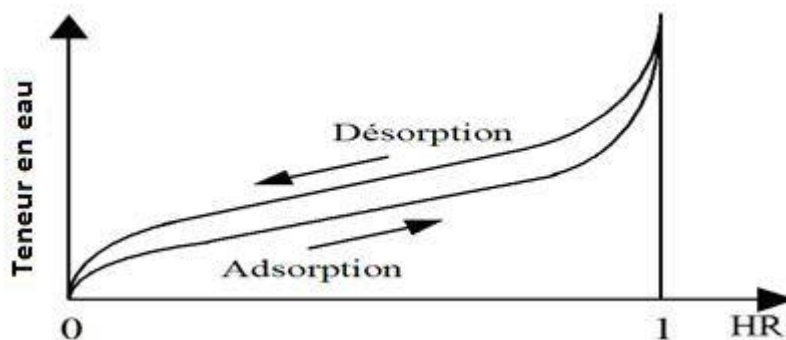


Fig.2 : Courbes d'adsorption et de désorption d'un milieu poreux

Pour une température donnée la quantité d'eau adsorbée par un matériau poreux en fonction de l'humidité relative de l'air H_r est représentée par des isothermes de sorption (figure 2) [2]. Suivant la valeur de l'humidité relative de l'air. Une ou plusieurs couches de molécules d'eau peuvent être fixées sur la paroi des pores.

Nous distinguons trois étapes dans le processus de fixation de l'humidité :

- Adsorption mono moléculaire ($0 < Hr < 0,2$)
- Adsorption pluri moléculaire ($0,2 < Hr < 0,5$)
- Condensation capillaire ($0,5 < Hr < 1$)

La teneur maximale d'adsorption varie suivant la nature du matériau et peut atteindre une proportion relativement importante par rapport à la quantité d'eau correspondant à l'état de saturation des pores pour les matériaux ayant un rayon moyen r_m de pore inférieur à $0,1\mu m$ (matériau hygroscopique).

Pour les matériaux non hygroscopiques $r_m > 0,1\mu m$, l'eau liquide pénètre dans les pores essentiellement par capillarité. Ce mécanisme n'intervient que dans le cas où la surface du matériau est mise en contact avec l'eau en phase liquide résultant d'un phénomène de condensation superficielle ou d'un phénomène de mouillage (pluie). [3].

Le liquide mouillant s'étale sur la surface des pores. Des interfaces se forment entre le liquide mouillant et le fluide non mouillant (air humide).

1.2.2.2 Condensation capillaire

La condensation capillaire est un phénomène physique permettant d'expliquer comment un matériau poreux initialement en équilibre hydrique avec le milieu extérieur se remplit peu à peu d'eau liquide lorsque l'on augmente l'humidité relative (Hr) de manière isotherme. A l'échelle d'un pore que l'on symbolise ici par deux plaques parallèles, se trouvent de l'air et de la vapeur d'eau. Si l'espace entre les deux plaques est suffisamment petit, un changement de phase s'opère et de l'eau se condense le long des parois formant des ménisques. [4], [5]

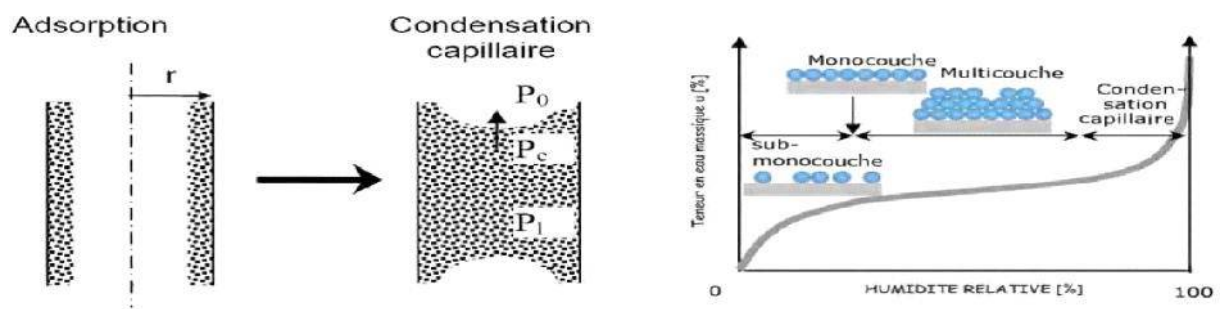


Fig.3 : Condensation capillaire dans un pore

La condition d'équilibre se traduit par la présence d'une différence de pression P_c , appelée pression capillaire déterminée à partir de la relation de Laplace. [2]

$$P_c = P_a - P_s = \frac{2\sigma(T)\cos\theta}{r} \quad (13)$$

P_a = pression atmosphérique.

P_e = pression dans la phase liquide.

r = rayon des capillaires

σ = tenseur inter-faciale du couple eau-air, fonction décroissante de la température.

θ = angle de mouillage entre la face du solide et la tangente au point de contact dans le cas de l'eau. $\theta = 0$

Dans le cas de condensation capillaire, on peut montrer que la pression de vapeur d'équilibre est reliée à la pression de vapeur saturante par la relation de Kelvin :

$$P_c = P_a = P_i = RT \rho_e \ln HR \quad (14)$$

ρ_e : Masse volumique de l'eau ;

T : Température absolue

R : Constante de gaz parfait ; r : Rayon de courbure des pores ; T : Température absolue.

A partir des équations 13 et 14 on peut tirer la relation suivante : [4] ; [6]

$$r = \frac{-2\sigma \cos \theta}{\rho_e RT \ln HR} \quad (15)$$

D'après Kelvin, on peut classer le milieu poreux comme : [1]

- Les matériaux à comportement hygroscopique lors que $r < 10^{-7}$ mm
- Les matériaux à comportement non hygroscopique lors que $r > 10^{-7}$ mm

1.2.3 Mécanisme du transfert d'humidité

Dans les structures des bâtiments, les transferts d'humidité peuvent se développer en phase gazeuse et/ou liquide. La nature et l'intensité de ces transferts sont liées aux propriétés intrinsèques des matériaux utilisés pouvant induire des phénomènes particuliers :

1.2.3.1 Transfert en phase liquide

L'eau présente sous forme liquide dans un milieu poreux est due, soit à l'adsorption des molécules d'eau, soit à la condensation capillaire.

L'eau adsorbée présente une faible migration qui est induite par le gradient de masse volumique. Les molécules d'eau se déplacent des régions où elles sont moins liées vers des zones où elles sont plus liées,

L'eau du à la condensation capillaire s'écoule sous l'effet d'un gradient de pression liquide des zones à forte concentration vers des zones à faible concentration en liquide, ce déplacement est régi par la loi de Darcy :

$$\vec{j}_l = -\frac{K_l}{\nu_l} \overrightarrow{\text{grad}} \dot{P}_l \quad (16)$$

Ou
$$\dot{P} = P_l - \rho_l g z \quad (17)$$

K_l = perméabilité du milieu à la phase liquide,

ν_l = viscosité cinématique de l'eau

P_l = pression motrice dans le liquide

1.2.3.2 Transfert en phase vapeur

- Transfert par diffusion

La diffusion de la vapeur d'eau provient des différences de concentration entre les deux composantes du mélange gazeux air sec- vapeur d'eau, il en résulte un transport moléculaire, qui se poursuit jusqu'à l'uniformisation des concentrations. La densité du flux massique par diffusion moléculaire s'exprime suivant la loi de FICK :

$$j_v = \delta \overrightarrow{\text{grad}} P_v \quad (18)$$

Avec

P_v = pression de vapeur d'eau

=le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau qui s'exprime sous forme suivante

$$\delta = f(\omega) D_v \frac{M_v P}{RT(P - P_v)} \quad (19)$$

$f(\)$ est une fonction de pondération dépendant de la teneur en eau globale et de la tortuosité du milieu poreux.

D_v , M représentent respectivement le coefficient de diffusion moléculaire, et la masse moléculaire de vapeur.

- Transfert de vapeur d'eau par évapo- condensation

Le mécanisme de transfert se décompose en quatre temps [7]

- La vapeur arrive au niveau des pores et se condense sur le ménisque amont, du fait de la réduction de la pression de vapeur d'équilibre, en raison de la courbure du ménisque.
- La condensation provoque l'élévation de la pression du liquide derrière le ménisque. La différence de pression du liquide entre les ménisques amont et aval induit un transfert convectif du liquide vers l'aval.
- Le liquide arrivant sur le ménisque aval provoque l'augmentation de son rayon de courbure d'où le déplacement de l'équilibre liquide- vapeur vers une pression partielle de vapeur plus élevée, ce qui provoque l'évaporation du liquide.
- La vapeur diffuse sous le gradient de pression partielle.

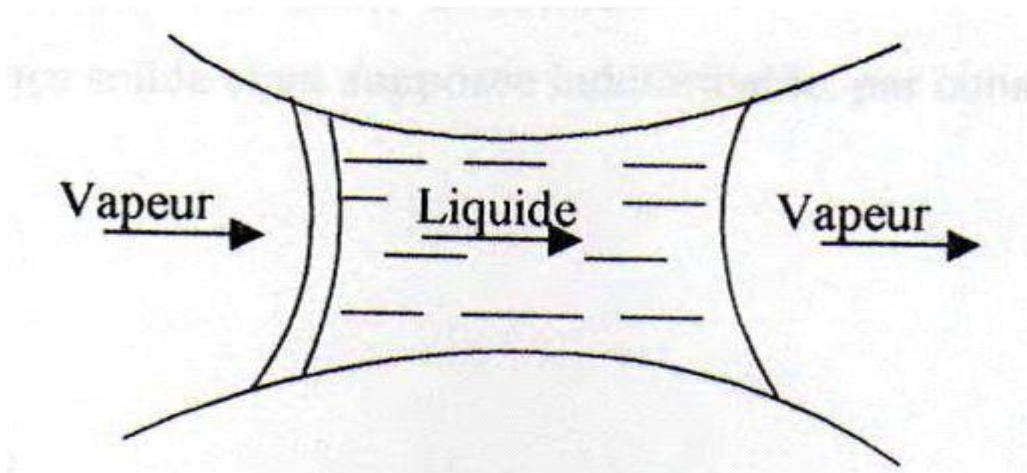


Fig.4 : Evapo - condensation à la construction d'un pore

1.3 Modes de transmission de chaleur

L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline thermodynamique en s'appuyant sur les différents modes suivants.

- Convection dans les pores
- Le rayonnement entre les parois des pores.
- Conduction thermique dans la matrice solide, dans la phase liquide et dans la phase gazeuse contenue dans les pores
- Evaporation-condensation qui implique un transfert de chaleur par chaleur latente sous l'effet d'un gradient de concentration de température.
- Diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

1.3.1 Transfert de chaleur par convection

Echange de chaleur entre une paroi et un fluide avec transport de la chaleur par le fluide en mouvement. Dans le domaine de bâtiment, on distingue la convection naturelle et la convection forcée. Le flux thermique échangé entre une surface et un fluide en mouvement est donné par la formule de Newton :

$$\phi_c = h_c S (T_p - T_f) \quad (20)$$

1.3.2 Transfert de chaleur par rayonnement

Echange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent. Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu, la convection et la conduction sont également présentes. Au voisinage de la température ambiante le rayonnement entre les parois des pores peut être négligeable.

La densité de flux de chaleur due au rayonnement en régime stationnaire s'exprime d'une manière général par : [2]

$$\phi = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{3 \alpha_e}{4} + n \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right)} \quad (21)$$

Avec

= facteur d'émission de la matrice solide

= constante de Stefan ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

= coefficient d'absorption du milieu semi transparent

n= nombre d'écran

T₁= température de la paroi chaude (K)

T₂= température de la paroi froide (K)

e = épaisseur de l'échantillon

1.3.3 Transfert de chaleur par conduction

1.3.3.1 Equation de diffusion de la chaleur

La chaleur se propage dans un solide par conduction, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier : [8]

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (22)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \partial T / \partial x \quad (23)$$

La conductivité thermique est le flux de chaleur par unité de surface, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre les deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. Cette propriété est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure. La conductivité thermique des milieux poreux doit prendre en compte certains paramètres tels que les conductivités thermiques des phases solide et fluides, leurs fractions volumiques, la structure de la phase solide, et les zones de contacts entre particules. Dans ce qui suit, nous présentons les modèles les plus simples sur le plan théorique : modèle parallèle, série, et la juxtaposition des deux. Il existe d'autres modèles. [9]

1.3.3.2 Modélisation théorique de la conductivité thermique des milieux poreux

Le milieu poreux est considéré comme une juxtaposition de couches alternées d'un solide de conductivité thermique λ_s et d'un fluide caractérisé par sa conductivité thermique λ_f . Le calcul de la conductivité thermique apparente du milieu peut se faire soit par résolution de l'équation de la chaleur appliquée à la géométrie du milieu considéré, soit par l'analogie électrique, en assimilant le milieu à un ensemble de résistances en série et en parallèle. Suivant l'orientation de ces couches planes dans un cube d'arête unitaire par rapport à la direction du flux de chaleur, on énumère trois modèles théoriques : [10], [11]

- Modèle série
- Modèle parallèle
- Modèle série-parallèle
- Modèle poreux triphasique

➤ Modèle série

Dans ce modèle, le flux de chaleur est supposé de direction perpendiculairement à la succession de couches solides, fluide disposées perpendiculairement à la direction du flux de chaleur. La conductivité thermique à n couches correspondantes s'écrit : [12]

$$\lambda_{\perp} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\theta_i}{\lambda_i} \right]^{-1} \quad (24)$$

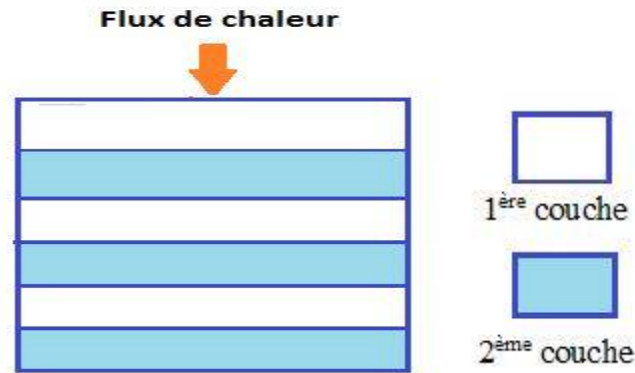


Fig.5 : Modèle série

Pour un milieu biphasique la conductivité se résume à

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{(1 - P_T)}{\lambda_f} + \frac{P_T}{\lambda_s}} \quad (25)$$

Où

P_T = la porosité totale du matériau.

Dans le cas où la conductivité du fluide tend vers 0, la conductivité totale tend aussi vers 0.

La couche de fluide isole le matériau global et crée une rupture dans le chemin de propagation de la chaleur. Ce schéma fait jouer un rôle prépondérant à l'air qui va imposer la conductivité globale du matériau.

➤ Modèle parallèle

Le milieu parallèle est aussi considéré comme une succession des couches alternées entre la phase solide et la phase fluide. Le transfert de flux de chaleur dans le modèle en parallèle se fait parallèlement aux couches. La conductivité correspondante est : (loi de Wiener 1912)

$$\lambda_{//} = \sum_{i=1}^n \theta_i \lambda_i \quad (26)$$



Fig.6 : Modèle parallèle

Dans le cas où le milieu est diphasique la conductivité devient :

$$\lambda_{//} = P\lambda_f + (1 - P)\lambda_s \quad (27)$$

La conductivité thermique dans le cas du modèle série n'est autre que celle de la valeur harmonique. Alors que le modèle parallèle est représenté par la valeur de la moyenne arithmétique.

Lorsque la conductivité du fluide devient négligeable devant celle du solide ($\lambda_f \ll \lambda_s$), la phase solide impose la conductivité totale, et λ tend vers lui. Il en est de même lorsque la phase fluide a une conductivité très faible comme c'est le cas pour l'air. La conductivité thermique du milieu poreux est toujours comprise entre deux valeurs limites correspondant respectivement aux milieux série (borne inférieure) et parallèle (borne supérieure).

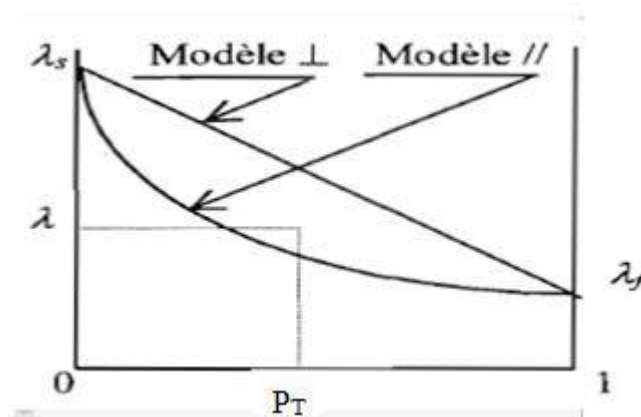


Fig.7 : Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphasique

- **Modèle série – parallèle**
- **Modèle de Willy et Southwick**

Willy et Southwick assimilent le milieu poreux à un ensemble formé d'un modèle série et parallèle en parallèle. ; Le milieu poreux est périodique, et chaque cellule de base est présentée par trois strates en parallèle

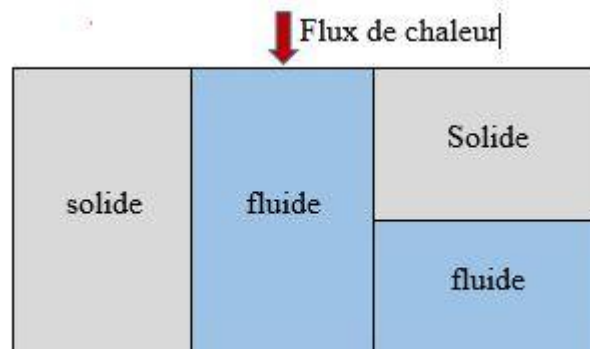


Fig.8 : Modèle du Willy et Southwick

En notant par les parts respectives des dispositions parallèle et série, La conductivité thermique de ce milieu a pour expression. [13]

$$\lambda = \theta \lambda_{//} + (1 - \theta) \lambda_{\perp} \quad (28)$$

- **Modèle de Russel et Frey**

Les pores sont supposés cubiques et de taille identique et régulièrement espacé dans cette modèle. Deux formulations sont présentées dans ce modèle.

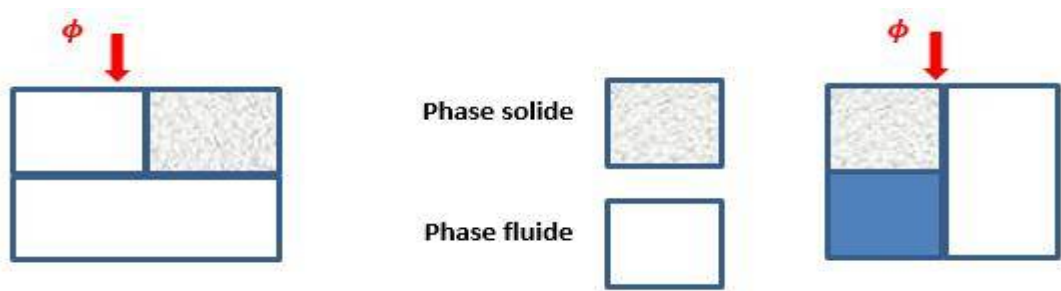


Fig.9 : (a) Cellule de Russel et (b) cellule de Frey

Les surface isotherme sont planes, la conductivité découle d'une association série - parallèle et aucun contact entre les constituants de la phase dispersée.

L'expression de la conductivité avec la cellule de Russel est :

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \frac{\theta_s^{2/3} + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(1 - \theta_s^{2/3})}{(\theta_s^{2/3} - \theta_s) + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(1 - \theta_s^{2/3} + \theta_s)} \quad (29)$$

s la teneur volumique de la phase solide ($\theta_s = 1 - \theta$)

Dans le cas de la cellule de Frey, la conductivité équivalente s'écrit :

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \frac{(1 - \theta_s^{1/3} + \theta_s) + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(\theta_s^{1/3} - \theta_s)}{(1 - \theta_s^{1/3}) + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}\theta_s^{1/3}} \quad (30)$$

- Modèle de Krischer

Krischer combine les deux série et parallèle. Pour essayer de faire le calcul théorique de la conductivité thermique de matériaux à plusieurs phases. [14]

Dans ce modèle, la cellule de base est constituée de trois strates : phase solide, phase fluide, et une phase constituée de solide et fluide en série, les trois strates sont en série par rapport à la direction du flux thermique.

Krischer suppose que le milieu poreux est constitué d'une phase solide et d'une phase fluide. La cellule unitaire est constituée par un arrangement de couches disposées en une fraction volumique $1 - \theta$ perpendiculairement à la direction du flux et d'une fraction complémentaire θ en parallèle avec le flux de chaleur. [15]

La conductivité thermique est donnée par la formule :

En prenant pour volume du matériau un volume unitaire, les parts respectives des dispositions en série et parallèle seront notés par

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\theta}{\lambda_{//}} + \frac{1 - \theta}{\lambda_{\perp}} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{\theta}{\lambda_{//}} + \frac{(1 - \theta)}{\lambda_{\perp}}} \quad (32)$$

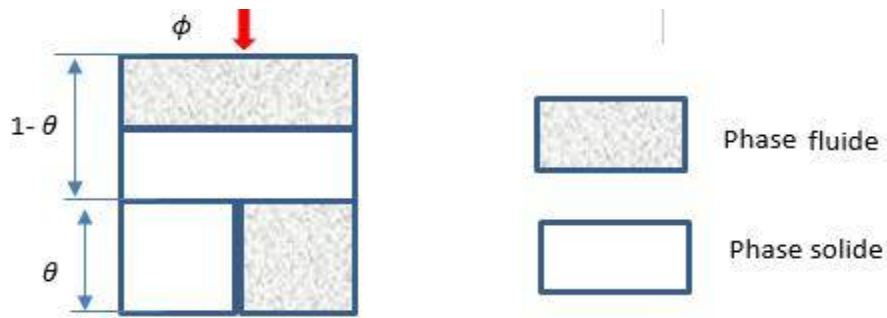


Fig.10 : Configuration du modèle série - parallèle de Krischer

Conclusion :

Il apparaît nettement que les matériaux poreux du fait de leur structure, sont le siège de transferts thermiques complexes dus au couplage conduction - convection - rayonnement et au transfert d'humidité en phase liquide et vapeur. Une meilleure connaissance des caractéristiques thermophysiques des matériaux mis en œuvre dans la construction, permettra une approche plus précise des échanges d'énergie qui s'établissent entre une ambiance extérieure naturelle et une ambiance intérieure contrôlée.

L'étude théorique du comportement hydrique bien qu'elle ne couvre pas toute la connaissance des caractéristiques au niveau des conditions thermodynamique et hydrodynamique, nous permettra de mieux analyser la conductivité thermique des matériaux poreux de construction en fonction de la teneur en eau.

Les matériaux qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dus au couplage conduction- convection- rayonnement. Dans la structure du bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront pas également prises en compte. Par conséquent le transfert thermique peut être considéré purement conductif.

Chapitre 2 : Matériaux de construction et isolation thermique de l'habitat au Tchad

Introduction

L'habitat au Tchad se caractérise généralement autour de quatre principaux matériaux de constructions : la terre crue, la brique cuite, le parpaing, et le béton de ciment.

L'utilisation des matériaux est liée aux revenus du ménage. C'est pour cela que la terre crue appelée communément banco ou poto-poto, est couramment employée par les habitants pour leur faible coût, le parpaing, la brique cuite et le béton sont réservés à ceux qui peuvent les payer.

La principale préoccupation des bâtisseurs concerne la pérennité de leurs constructions et le confort. Cette dernière est rendue possible par l'emploi de matériaux performants en termes de résistance mécanique, de durabilité, de l'isolation thermique et acoustique.

Bien qu'il existe d'autres matériaux importés ou exploités localement leurs utilisations et exploitations restent difficiles ou plus onéreuses. On note principalement deux types de classification des matériaux de constructions au Tchad : les matériaux traditionnels d'origine naturelle et les matériaux modernes classiques parfois importés.

2.1 Typologie de l'habitat au Tchad

2.1.1 Zones climatiques au Tchad

Le Tchad est un pays de l'Afrique centrale qui se situe entre les 7^{ème} et le 24^{ème} degré de latitude Nord d'une part et le 13^{ème} et 24^{ème} degré de longitude Est d'autre part. La superficie de 1.284.000 km² composées de 98,1% de terres et 1,9% d'eau pour une population estimée à 11 000 000 d'habitants. Le pays est globalement très chaud et très sec, les températures maximales varient entre 43 et 45°C pendant la plus torride de l'année. La période pluvieuse la plus fraîche dans le Sud de la Savane est entre Mai et Octobre. En montant vers le Nord, l'air devient plus chaud et humide. Le paysage ressemble de plus en plus à la savane, puis la savane désertique (Sahel) finissant par le désert (Sahara). [1]

Il existe 3 zones climatiques au Tchad :

- Un climat tropical au sud : qui occupe le 12°30 N et 8° N avec une précipitations annuelle allant jusqu'à 1100 mm
- Un climat sahélien au Centre qui se situe entre les isohyètes 800 et 350.
- Un climat saharien désertique au Nord de l'isohyète 350 avec de très précipitations faible et nulle par endroit.

2.1.2 Données météorologique :

Les températures, les précipitations, l'humidité relative, et l'ensoleillement de la ville d'Abéché, Ndjamena et Sarh sont représentées sur les figures : 11 à 16. (Source : Météo vista <http://www.meteovista.fr/Afrique/Tchad28> Aout 2016).

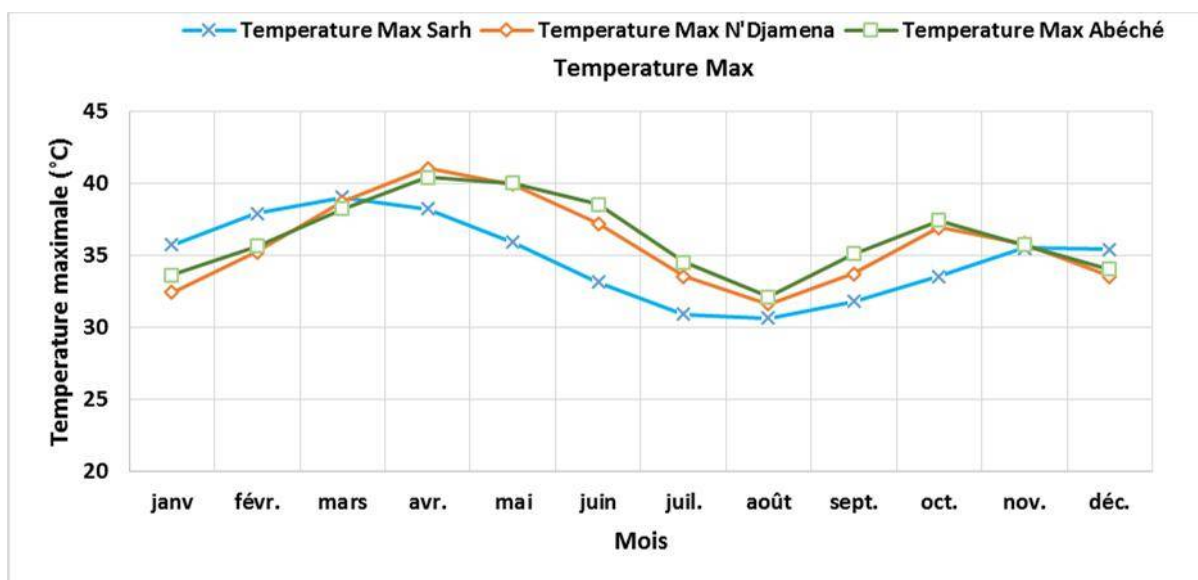


Fig.11 : Températures maximales

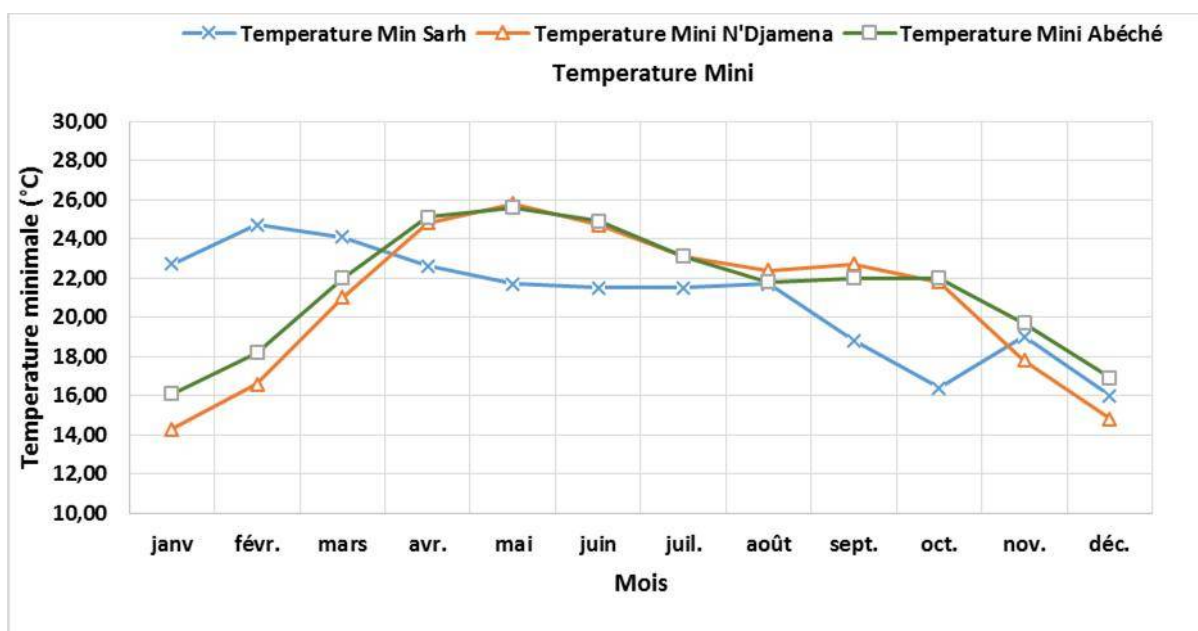


Fig.12 : Températures minimales

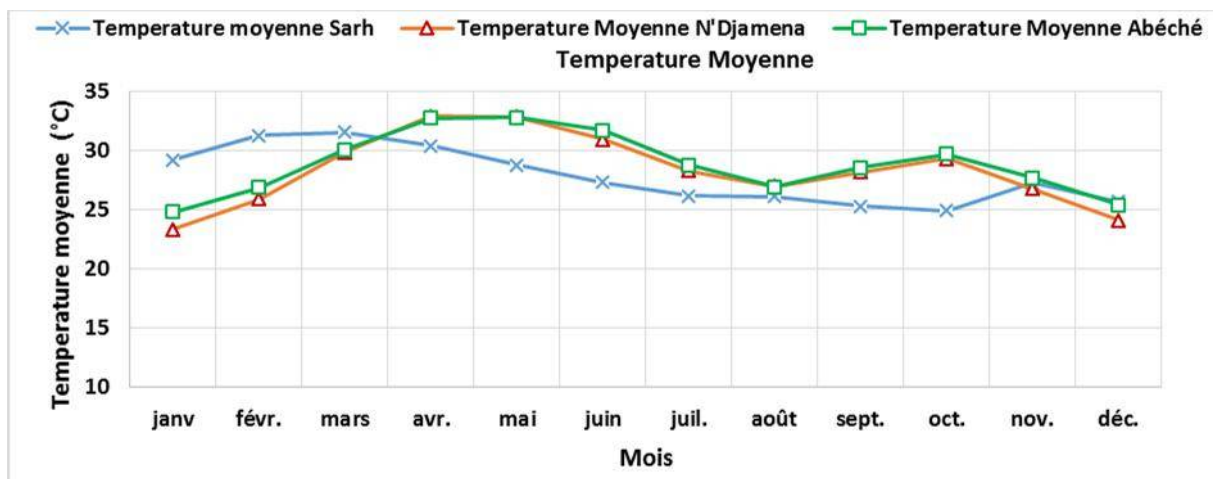


Fig.13 : Températures moyennes

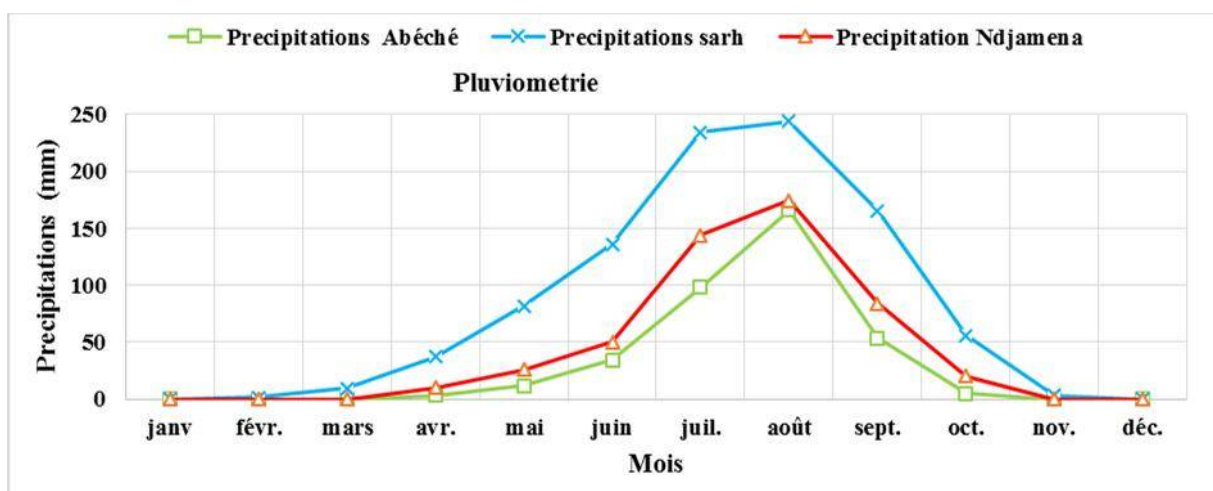


Fig.14 : Pluviométrie annuelle

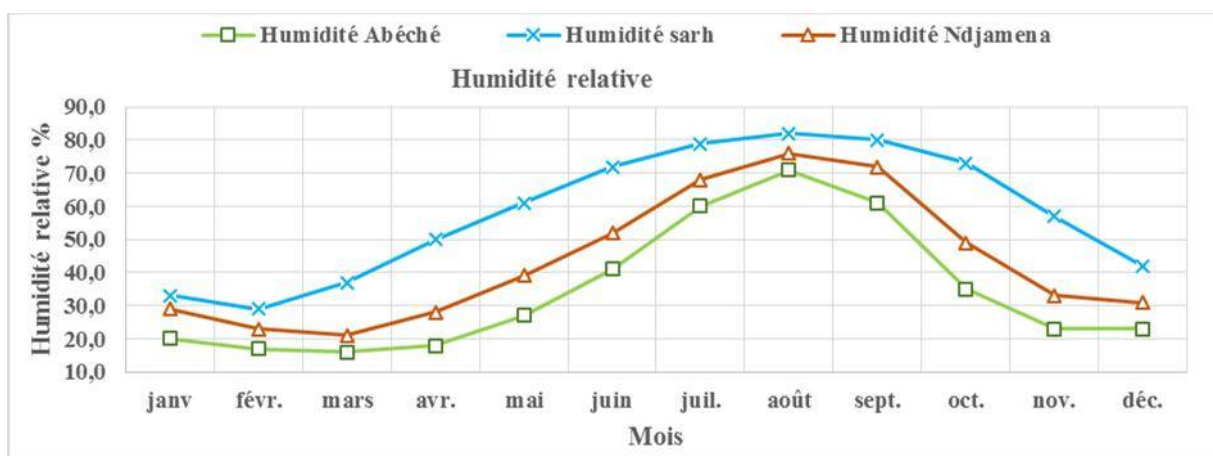


Fig.15 : Humidité relative moyenne

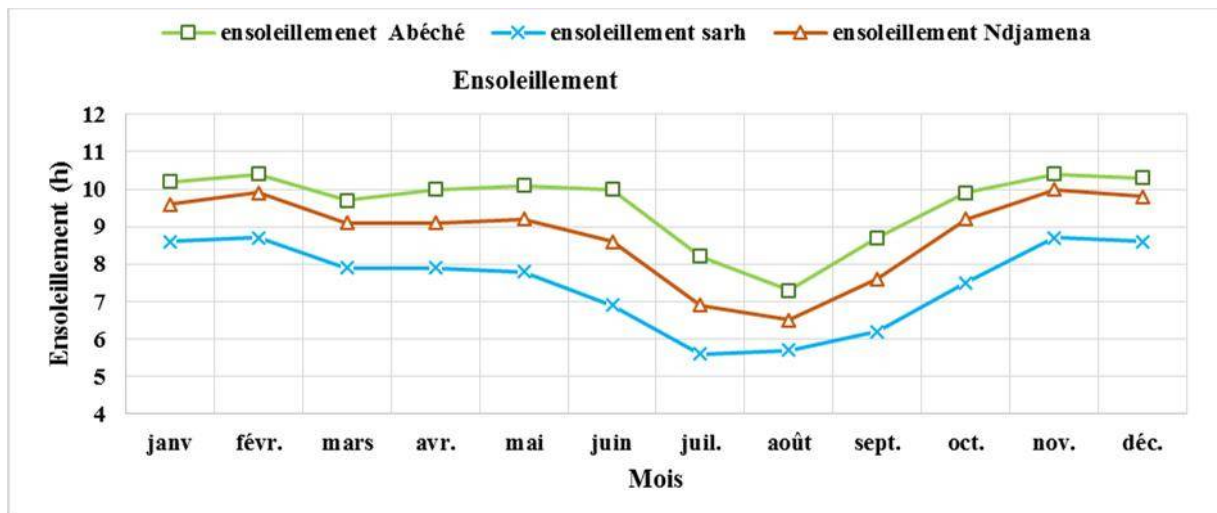


Fig.16 : Insolation mensuelle (rayonnement solaire)

L'intensité du rayonnement solaire global varie en moyenne de 4,5 à 6,5 kWh / (m².jour). Le Tchad se situe dans la zone d'ensoleillement supérieur de l'Afrique. Le nombre d'heures de cet ensoleillement par an varie de 2850 heures au sud à 3750 heures au nord du pays.

2.1.3 L'habitat au Tchad

Aujourd'hui au Tchad et un peu partout en Afrique sahélienne, nous assistons à des multiples problèmes de l'habitat causés par l'explosion démographique, les changements climatiques, la crise économique et énergétique. Les problèmes de logement se posent avec acuité. La population et les gouvernements dépourvus des moyens financiers et matériels conséquents aspirent à des logements décents pour tous. Un logement décent doit remplir les conditions suivantes :

- Une résistance mécanique acceptable pour une bonne sécurité des occupants lors des inondations et autres aléas climatiques ;
- Un bon confort thermique ;
- Un coût de construction et une consommation énergétique acceptables et accessibles à la grande tranche de la population.

Dans cette partie, nous parlerons de différentes typologies de l'habitat rencontré au Tchad et les matériaux utilisés dans la construction des habitations.

Le Tchad présente deux grands types de typologies à savoir l'habitat traditionnel et l'habitat moderne.

2.1.3.1 L'habitat traditionnel

On rencontre ce type d'habitation de conception rudimentaire dans les villages. L'habitation traditionnelle est constituée des logements en cases dont les formes et l'architecture sont typiques à chaque région. Les murs sont construits le plus souvent des briques en adobe ou en bauge avec une légère fondation. Les cases sont de formes circulaires parfois carrées avec les toits de forme conique en pailles supportées par une ossature de bois souples.

Pour les protéger de l'érosion, les murs sont badigeonnés par la terre mélangée de l'eau avec les excréments des animaux ou la paille avant chaque passage de la saison de pluie.

Bien que l'habitat traditionnel possède une richesse identitaire, culturelle et touristique, il présente des défauts pour être un habitat idéal :

- Inefficace contre les différents aléas climatiques causés par le changement climatique ;
- Insuffisance de confort thermique ;
- Vulnérable aux incendies ;
- Utilisation des bois dont la coupe est réglementée.

L'habitat traditionnel possède des avantages qui sont :

- Un faible coût de construction ;
- Une bonne isolation thermique ;
- Un confort thermique intérieur relatif pendant les journées chaudes sans ventilation artificielle.

Les maisons traditionnelles sont destinées à l'habitation individuelle dans les logements familiaux. La construction en adobe se fait par une fondation de 2 ou 3 briques posées dans le sens de la largeur pour supporter la maçonnerie. L'élévation du mur se fait par la superpositionnement des briques avec des joints de terre humidifiée. L'épaisseur du mur, facteur de rigidité, peut être choisie en doublant les briques dans le sens de la largeur.

Les matériaux utilisés sont de terre à base d'argile (briques crues, briques cuites, briques de terre stabilisées) qui sont disponibles localement, avec une exploitation moins chère.

Ce type d'habitat est spécifique à chaque région et répond parfois aux contraintes climatiques, il est constitué de parois soit en terre argileuse ou en pisé soit en boues de terre mélangées à de la paille et façonnées à la main.

La couverture est généralement en végétaux, spécialement en tige de mil ou de paille. Les ouvertures sont en bois, le plancher en terre ou en pierre, le plafond est en paille ou en contre-plaqué artisanal.

On dénombre plus d'une cinquantaine de formes dont la case « obus » de la population Massa de Mayo Kebbi mais la forme la plus dominante est la forme ronde. Les murs dont l'épaisseur varie de 20 cm à 30 cm, assure une meilleure isolation thermique contre les intempéries extérieures, mais le cadre bâti ne tient pas compte de l'orientation où la direction du vent est dominante.

L'inertie thermique très élevée des parois crée un écart entre les températures des parois intérieure et extérieure de l'habitat. Ceci entraîne donc des conditions intérieures de confort pour les occupants pendant les heures les plus chaudes de la journée, même sans la ventilation. Mais les occupants sont dans l'inconfort aux heures les plus fraîches de la nuit, s'il n'y a pas un bon renouvellement d'air d'intérieur, par ventilation. [15]

On remarque que depuis quelque temps dans les villages les murs se font en forme carrée par endroit ce qui tend vers une mutation d'habitation moderne.

L'habitat traditionnel est adapté au climat local et utilise les matériaux locaux et les méthodes naturelles de climatisation ; cependant il est en voie de disparition.

L'habitat semi moderne est constitué des logements simples avec des chambres construites avec des briques en argile crue ou cuite et le plus souvent avec des parpaings de ciment. On remarque ce type d'habitat dans les villages et dans les périphéries des grandes villes.

Il est avéré que d'après les travaux des chercheurs, [1] et [17] que l'habitat traditionnel qui est construit essentiellement des matériaux de la faible conductivité thermique procure une bonne sensation de confort thermique pendant les périodes les plus chaudes de l'année et que l'utilisation des matériaux locaux pourrait améliorer le confort thermique dans l'habitat.

2.1.3.2 L'habitat urbain :

Rencontré en milieu urbain, ce type d'habitat symbolise une réussite sociale, l'habitat moderne est l'ensemble des maisons construites en parpaing, brique cuite ou en béton armé ; les toitures sont faites en béton ou en tôle en zinc, le faux plafond par un contre-plaqué ou en plâtre. Le plancher est en béton ou avec des carreaux en marbre. Les portes et fenêtres peuvent être en acier ou aluminium vitrées.

La construction de ces habits se fait au préalable par des études en génie civil, par des spécialités en études de sols, architecturales, en confort thermique et ainsi en électricité

Dans ce type d'habitats, on rencontre des maisons en “dur” et des maisons modernes.

- **Les maisons en dur ou spontanés**

Egalement appelé habitat des populations à faibles revenus, l'habitat spontané est la résultante de multiples formes d'un habitat en marge de la légalité suite à une pression démographique urbaine très forte.

Les maisons sont généralement à base des murs et enduits de terre crue et parfois avec des briques cuites ou brique en ciment. On remarque aussi des maisons en dur et semi dur qui sont construites à partie rarement avec fondation en dalle en béton armée enterrée.

Ces habitations peuvent être parfois achevées par la dalle en béton armé. Les chevrons de charpente sont "noués" aux murs pour résister aux vents et supportent la toiture mono pente en tôle ondulée et dont l'étanchéité avec le mur est assurée par une rangée de parpaings disposés sur trois côtés de la tôle. Les portes et fenêtres sont en acier, persienne ou rarement en vitre en cadre d'aluminium.

Un faux plafond composé de contreplaqué permet d'atténuer la chaleur transmise par la toiture en tôle pendant la période de canicule de chaleur (mois de mars et avril) [1].

Une vue d'ensemble de cet habitat fait apparaître les formes suivantes : les pseudos villages urbains (semblables à des constructions rurales), les bidons villes, etc.

- **Les Maisons modernes**

Cet habitat est construit en matériaux lourds (parpaings, béton) et dans certains cas, même le plafond de ces habitations est constitué par une dalle en béton.

La toiture est parfois en tôle d'aluminium, le plafond en contre-plaqué, les ouvertures en verre, le plancher en béton nu ou du carrelage.

On retrouve dans ce type d'habitat, les habitations individuelles et les immeubles. Le confort thermique est prioritaire et assuré par des installations de conditionnement d'air. La protection solaire des habitations modernes est médiocre, l'orientation du cadre bâti n'est pas respectée.

Généralement localisé dans la zone résidentielle, l'habitat moderne est un ensemble des grands immeubles et grands standing réalisés selon les conceptions architecturales fixées par les règles des sécurités des occupants et leur confort thermique. [1]

Ces habitats qui sont des propriétés étatiques, paraétatiques ou sociétés immobilières favorables à la climatisation électrique pour le confort thermique qui est une grande consommatrice d'énergie électrique.

Les maisons issues de l'habitat urbain présentent des inconvénients tels que :

- Le coût de construction très élevé donc inaccessible à la grande majorité de la population.
- L'inconfort thermique qui nécessite la ventilation artificielle assez énergivore.

2.2 Les matériaux de constructions au Tchad

Au Tchad, on utilise plusieurs types des matériaux, les matériaux traditionnels et des matériaux modernes classiques.

2.2.1 Les matériaux modernes classiques.

Les matériaux modernes sont généralement de matériaux composites à base de ciment. Bien que le Tchad possède une seule cimenterie qui est celle de Baoré dans la région de Mayo Kebi avec une production très limitée inférieure à 5% de ciment utilisé au Tchad. Le ciment reste le matériau de construction le plus utilisé dans l'habitat moderne. Le ciment est un mélange broyé de calcaire et argile cuite, fabriqué dans les cimenteries. La grande partie ciment utilisé est importée des pays voisins tel que le Cameroun (cimencam) et Nigeria (Dangotté) pour la fabrication des briques de ciment appelées parpaings et aussi des bétons dans les constructions au Tchad.

2.2.1.1 Le parpaing de ciment

Le parpaing de ciment est une brique fabriquée à base de ciment mélangé avec du sable et de l'eau. L'ensemble du mélange malaxé et façonné dans une moule qui lui octroie la forme parallélépipédique. Ce matériau est composé d'environ 87% de granulats calibrés (gravier, sable), 7% de ciment et environ 6% de l'eau. Le parpaing de ciment présente des côtes standards dans les nombreuses formes, puisqu'il est fabriqué par moulage de blocs de différentes épaisseurs, boisseaux, hourdis, etc.

2.2.1.2 Le béton

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le liant le plus couramment est appelé ciment ; on obtient dans ce cas un béton de ciment.

En général, le béton peut être classé en trois groupes suivant la norme NF EN 206-1 articles 3.1.7 à 3.1.9, selon sa masse volumique :

- béton normal : entre $2\,000 < < 2\,600 \text{ kg/m}^3$;
- béton lourd : $> 2\,600 \text{ kg/m}^3$;
- béton léger : $800 < < 2\,000 \text{ kg/m}^3$;

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- béton de ciment ;
- béton silicate (chaux) ;

- béton de gypse (gypse) ;
- béton asphalte.

Les résistances mécaniques en compression obtenues classiquement sur des éprouvettes cylindriques normalisées vont de 16 à 120 MPa en fonction du type de béton.

Le béton ou mortier de ciment sont les matériaux les plus utilisés à l'échelle planétaire à cause de leurs performances mécaniques. Cependant les impacts environnementaux générés par la production du ciment, son principal constituant, ne sont plus à démontrer. [16]

2.2.2 Les matériaux traditionnels d'origine naturelle

Parmi les matériaux traditionnels, on distingue la pierre, la terre crue et le bois.

La pierre est d'utilisation très ancienne, s'expliquant par sa disponibilité (carrières), sa grande résistance et sa durabilité. Cependant, elle est difficile à façonner et à mettre en œuvre à cause de son poids.

La terre crue, matière première disponible, est d'une mise en œuvre aisée et peu coûteuse. Ceci justifiait son utilisation dans le passé, mais ce matériau économique a été peu à peu remplacé par d'autres plus performants et plus chers dans les pays industrialisés. L'utilisation de la terre est devenue l'apanage des pays en voie de développement tel que le Tchad.

Le bois enfin, nécessitant peu de transformations et facile à travailler, était et reste apprécié dans la construction pour ses propriétés mécaniques (résistance en traction) et son pouvoir isolant, son utilisation est très réglementée à cause de la déforestation qui est une dégradation de l'environnement. [17]

La majeure partie des sols du territoire du Tchad est constituée d'alluvions argilo sableuses à très forte dominance argileuse, par endroit, on rencontre de sols qui sont latéritiques particulièrement au sud du pays. On trouve au Nord des dunes et quelques gisements d'argile dans les oasis.

Le matériau terre utilisé en construction est un matériau homogène et dont les caractéristiques sont très diverses d'une région à une autres [1].

Ces matériaux extraits et façonnés d'une manière naturelle et traditionnelle sont exploités sans supports et équipement lourds.

2.2.2.1 L'Argile

L'argile qui est un produit à base de terre utilisée anciennement dans les constructions surtout en milieu rural est présente sur l'ensemble du territoire national. C'est un matériau qui a un fort caractère liant mais les phénomènes de retrait qui sont présents rendent quelque peu difficile son utilisation par rapport à la latérite. Les argiles sont des silicates d'alumine hydratés dont la structure lamellaire permet de fixer l'eau et d'obtenir des pâtes plus ou moins plastiques facilitant leur façonnage. Leur extraction s'effectue à ciel ouvert. Les argiles communes sont la matière première de base des produits de terre cuite (briques d'argiles et briques essentiellement). Les argiles nobles (ou kaoliniques) servent à la fabrication de porcelaines et céramiques ou d'additifs pour de nombreux produits intermédiaires ou finis (ciment, mortiers, bétons, peintures, caoutchouc ...).

L'argile de termitière est beaucoup plus appréciée pour la fabrication des briques cuite à cause de caractéristiques très homogènes.

2.2.2.2 La latérite

Les latérites peuvent être considérées comme des roches sédimentaires par le fait qu'elles résultent d'une accumulation et d'une sédimentation de roches transportées ou existantes sur place et qui sont des concrétions ou des grains de quartz altérés. On peut les considérer comme des roches métamorphiques en ce sens qu'elles résultent d'un processus d'altération de roches mères silico-alumineuse en milieu tropical qui favorise le départ de la silice et bases solubles ainsi que l'enrichissement relatif en oxydes et hydrates non solubles tels que l'hydroxyde de fer et d'alumine. Les définitions sont nombreuses et nuancées. C'est au Sud et à l'Est du Tchad qu'on trouve des grands gisements des sols latéritiques.

2.2.2.3 Le sable

Le sable se définit par l'intervalle [0,02 mm ; 2mm] de diamètre des grains d'un échantillon de sol, est l'aboutissement du processus des matériaux graveleux. Il est exploité dans les lits des rivières ou des dunes. On peut dénombrer six gisements de sable situés sur un rayon de 12 km autour de Ndjamena : Farcha, Mani siaka, Milezi, Cabrini, Gassi et Tassi. A Sarh les principaux gisements se trouvent dans le nid du fleuve Barh-Ko. Dans l'Est du Tchad, certains oasis produisent une bonne qualité du sable. On note que le Nord du pays est désertique et parsemé de nombreuses dunes de sables.

Le sable bien est très employé avec des liants tels que le ciment pour la fabrication des briques parpaings, le béton et le mortier de ciment. [1]

2.2.2.4 Le gravier

Les graviers proviennent des concassages des fractures des roches. La carrière de Dandi à 50 km de Ndjamena est le plus grand site d'exploitation ; actuellement les grands travaux de construction des routes a permis l'ouverture de plusieurs carrières à travers le pays.

Le gravier en fonction de ses différentes dimensions mélangées avec le ciment est utilisé pour les bétons. Le concassage et le triage se font avec des engins lourds et modernes nécessitant des gros moyens financiers.

2.2.2.5 Le bois

Le Tchad est un pays désertique, le désert avance chaque année à grands pas, la coupe des arbres est réglementée, l'utilisation de bois vert est strictement interdite. Le bois mort est utilisé pour les besoins domestiques et la construction de la charpente de toiture des habitations traditionnelles. Le renouvellement se fait chaque année par la plantation des arbres dans tous les pays pour éviter la déforestation totale. La grande partie des bois utilisée dans la construction est importée des pays voisins comme le Cameroun et la République Centre Africaine.

2.2.2.6 La pierre

Bien que le pays ait un immense gisement rocheux, l'utilisation des pierres dans la construction reste très faible, l'exploitation, les transports et la transformation de ce matériau nécessitent des équipements adéquats et des moyens financiers qui ne sont pas accessibles à la plus grande partie de la population. Les briques de terre sont les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, la brique stabilisée enfin la brique industrielle .La brique de terre est une plaquette crue, cuite ou stabilisée qui est fabriquée à partir du sol, qu'on transforme en une pâte de consistance et de finesse régulières, qui est humidifiée avant sa mise en forme dans une moule, puis séchée longuement à l'air libre. Les matières premières pour la fabrication des produits tels que les briques d'argiles crues ou cuites, les hourdis ou des produits de parement, sont des argiles mélangées éventuellement avec des produits dégraissants tels que les sables argileux ou siliceux, de la paille, des adjuvants provenant des déchets agricoles. Ces matières sont utilisées telles qu'elles se présentent dans la nature hormis l'élimination de quelques impuretés. Généralement l'argile mélangée aux adjuvants est utilisée comme des matériaux porteurs dans les constructions traditionnelles planes à un niveau et matériaux de remplissage des murs dans la construction des bâtiments.

2.2.3 Classification des sols

Les sols sont classés d'après leur nature, leur état et leur comportement selon des critères conventionnels. Classer un sol consiste à lui donner un nom, après en avoir donné une description qualitative et l'avoir identifié grâce à des mesures quantitatives. C'est un processus qui permet de chercher à rattacher un sol au groupe de sol de caractéristiques semblables.

Les sols sont dénommés en associant à un nom donné par un paramètre de nature, au moins un qualificatif lié à son état ou à son comportement.

Il existe plusieurs normes pour la classification géotechnique des sols. Les essais d'identification des sols constituent l'une des premières étapes avant toute utilisation. Les essais permettent de connaître la nature des sols, leur composition et la répartition des grains qui les composent. Nous énumérons plusieurs essais qui nous permettent de donner des renseignements sur la nature et les propriétés des sols.

2.2.3.1 L'analyse granulométrie par tamisage (NF P 94-056 et NF P 94-057)

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les répartitions massiques des grains de différentes tailles contenues dans le sol.

Cet essai s'effectue :

- Par tamisage pour des grains de taille de diamètre supérieur à 80 μ m (NF P 94-056) ;
- Par sédimentométrie pour des grains plus fins (NF P 94-057).

L'analyse granulométrique par tamisage s'effectue sur les particules supérieures à 0,08 mm. L'essai peut se faire par voie sèche ou après lavage. La granulométrie par tamisage après lavage consiste à tremper dans l'eau pendant 24 heures puis à laver à l'aide du tamis 80 μ m, afin de permettre à toutes les particules de dimensions inférieures à 80 μ m de disparaître. L'échantillon est ensuite mis à l'étuve à 105°C pendant 24 heures afin qu'il puisse sécher puis, mis dans une colonne de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est faible conformément à la loi de Navier- Stokes sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau. La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont exprimés sous forme d'une courbe appelée courbe granulométrique qui donne les pourcentages cumulés d'éléments de dimension inférieure à chaque diamètre. Les limites des dimensions des grains qui définissent les fractions granulaires sont fixées selon l'échelle conventionnelle reproduite dans le Tableau 1. Ces fractions sont déterminées à partir d'une analyse conforme aux normes **NF P 94-056** et **NF P 94-057**.

Tableau 1 : Dénomination d'un sol selon la granularité

Nom	Sol à matrice fine		Sol à matrice grossière			
	Argile	limon	Sable Fin	Sable Gros	Grave	Cailloux
Dimension des particules (mm)	< 0,002	< 0,02	< 0,2	< 2	< 20	< 200

2.2.3.2 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg ont été élaborées au XX^{ème} siècle, par un pédologue suédois du nom d'Atterberg, suite à des recherches de plasticité sur des argiles en vue de la fabrication des produits céramiques. Casagrande a repris et modifié les travaux du suédois, afin de trouver une relation entre la teneur en eau du sol et son comportement.

Compte tenu de leur structure, les argiles ont des propriétés d'absorption des quantités importantes d'eau et peuvent se dessécher plus rapidement en fonction de conditions d'humidité auxquelles elles sont soumises.

L'essai de limite d'Atterberg permet de caractériser l'état de consistance des sols fins, ce qui consiste à :

- Rechercher la limite de liquidité (w_L), pour laquelle une rainure de dimension normalisée, appliquée dans le sol situant dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs.
- Rechercher la limite de plasticité (w_p), pour laquelle des cylindres de sol de 3 mm de diamètre sont confectionnés. La limite est atteinte, lorsque ces cylindres commencent à se fissurer par simple soulèvement.

➤ La limite de liquidité :

La limite de liquidité est déterminée à partir de la représentation graphique de la teneur en eau W , mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coups correspondant. Elle correspond à la teneur en eau pour $N = 25$ coups.

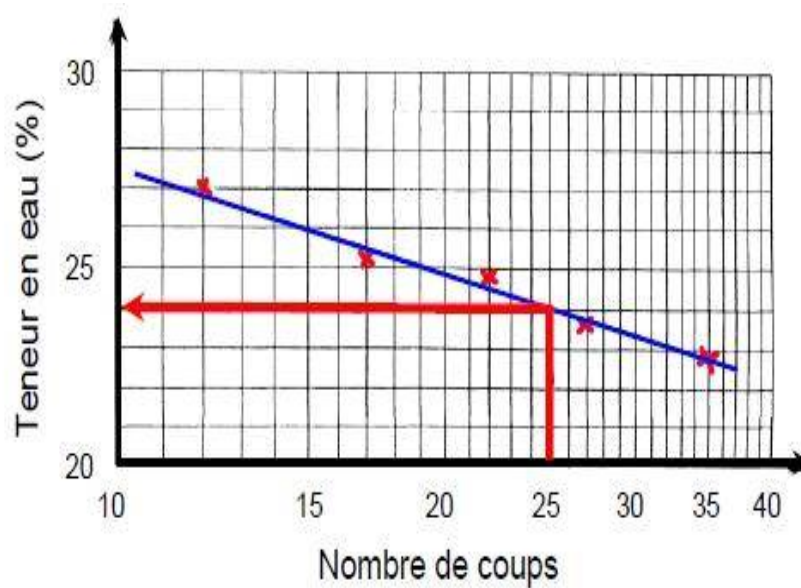


Fig.17 : Détermination de limite de liquidité

La limite de liquidité se calcule également à partir de la formule :

$$w_l = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (33)$$

➤ la limite de plasticité

La limite de plasticité w_p traduit le passage entre l'état plastique et l'état solide

➤ Indice de plasticité

Les paramètres w_l et w_p sont complétées par l'indice de plasticité I_p qui s'exprime par la relation :

$$I_p = w_l - w_p \quad (34)$$

L'indice de plasticité caractérise l'étendue du domaine plastique ; plus I_p est grand, plus le sol est plastique et est susceptible de se gonfler ou de se rétracter. Selon la valeur de I_p , on peut définir différents états de sol.

Les valeurs w_l , w_p et I_p sont fonction de la proportion et l'activité des particules argileuses contenues dans le sol.

Tableau 2 : Indice de plasticité des matériaux fins

Indice de plasticité (Ip)	Etat du sol
0 -5	Non plastique
5 -15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

- L'activité d'une argile A_c se définit par :

$$A_c = \frac{I_p}{\% \text{ element } < 2\mu m} \quad (35)$$

- L'indice de consistance

L'indice de consistance est déterminé par :

$$I_c = \frac{w_p - w}{I_p} \quad (36)$$

L' I_c est aussi obtenu par la formule :

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p} \quad (37)$$

Tableau 3 : Etats du sol en fonction de l'indice de consistance

Indice de consistance (Ic)	Etat du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

2.2.3.3 Essais Valeur de Bleu de Méthylène (NF P 94-068)

Les argiles se présentent sous la forme de plaquettes très fines, constituées par l'assemblage de feuillets liés entre eux. Cette structure particulière, confère aux argiles, un ensemble de propriétés dont l'activité. Cette propriété permet aux argiles de fixer des cations quand elles sont mises en solution.

L'essai de bleu de méthylène caractérise alors l'activité de la fraction argileuse contenant dans un sol. Il permet aussi de quantifier de manière sûre et simple, la propreté des sols.

L'essai consiste à introduire par dosages successifs des quantités croissantes de solution de bleu dans la prise d'essai, jusqu'à ce que la fraction argileuse soit complètement saturée de bleu.

- La valeur de bleu du sol (V_{BS})

La valeur du bleu du sol est calculée par la formule suivante :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \quad (38)$$

Avec

$$B = V \times 0,01 \quad (39)$$

$$m_0 = \frac{m_s}{1 + w} \quad (40)$$

V : volume de bleu injecté (cm³)

m_s : masse de la prise d'essai (g)

w : teneur naturelle en eau

B : est la masse de bleu introduite dans la solution

Le VBS s'exprime en gramme de bleu pour 100g de matériau.

Tableau 4 : Les ordres de grandeurs des valeurs de bleu de méthylène

VBS < 0,2	sols sableux
0,2 < VBS < 2,5	sols limoneux
2,5 < VBS < 6	sols limoneux argileux
6 < VBS < 8	sols argileux
VBS > 8	sols très argileux

- **L'activité de bleu de la fraction argileuse** (NF P 94-011)

L'activité argileuse A_{CB} est le rapport entre la valeur de bleu de méthylène VBS déterminée selon la norme NF P 94-068 et la teneur C en particules de dimensions inférieures à 2µm estimée selon la norme NF P 94-057.

$$A_{CB} = \frac{VBS}{C} \quad (41)$$

Tableau 5 : Qualificatif de fraction argileuse

A_{CB}	Qualificatif
0 A _{CB} 3	Inactive
3 A _{CB} 5	peu active
5 A _{CB} 13	moyenne
13 A _{CB} 18	Active
18 A _{CB}	très active

Cet essai est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par adsorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à la saturation.

2.2.3.4 Poids spécifique des grains solides (NF-P 94-054)

L'essai permet de déterminer le poids spécifique γ_s des grains solides. Ce dernier est un paramètre important pour la caractérisation de l'indice des vides, de la porosité et surtout de l'état de saturation d'un sol.

Le poids spécifique est donné par la relation suivante :

$$\gamma_s = \frac{(P_3 - P_1) \times C_T}{P_3 + P_2 - P_4 - P_1} \quad (42)$$

C_T est une constante dépendant de la température ($C_T = 0,99$)

P_1 : poids pycnomètre seul

P_2 : poids pycnomètre + eau

P_3 : poids pycnomètre + matériau

P_4 : poids pycnomètre + matériau + eau

2.2.4 Les briques à base de terre

La brique de la terre est le matériau de construction le plus utilisé au Tchad à cause de sa disponibilité et son coût d'exploitation très faible.

La brique en terre, comme la pierre et le bois, a été un des premiers matériaux utilisés par l'homme pour construire, facilement disponible, la terre a été mise en œuvre suivant différentes techniques, selon les régions et en fonction de ses caractéristiques, pour améliorer celles-ci, la terre a parfois été additionnée de matériaux d'origine minérale ou végétale ou même animale.

Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique industrielle stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc, etc.).

Dans le contexte actuel, on peut classer les briques de terre dans deux catégories : les briques de terre crue sans adjuvants et les briques de terres stabilisées. Les Briques sont produites à partir d'un mélange d'argile, de sable, de paille, de déchets agricoles et d'eau, le moulage se fait manuellement grâce aux moules en bois, le séchage se fait à l'ombre pendant plusieurs jours pour éviter les fissurations. Les briques de terre sont utilisées dans la construction à partir des plusieurs procédés, ces briques peuvent être utilisées crues, cuites ou stabilisées.

2.2.4.1 La brique de terre crue

La méthode de fabrication de la brique de terre appelée banco ou “potopoto” au Tchad demeure toujours traditionnelle.

Le moule doit être propre et préalablement mouillé pour faciliter le démoulage. A la fin, niveler la surface avec une truelle. Les briques présentent un retrait et de fissurations assez importantes et leur qualité doit être soignée

La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler. Il faut aussi bien avoir conscience que le financement de ce type de maison n'est pas conventionnel, en effet il vous sera difficile d'obtenir un prêt hypothécaire pour ce genre d'habitation.

2.2.4.2 Les briques de terre stabilisée BTS

La stabilisation est un ensemble de procédés visant à améliorer les caractéristiques d'un sol, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. [10]

Elle doit permettre de réduire le volume des vides entre les particules solides, de colmater les vides que l'on peut supprimer, de créer des liens ou d'améliorer les résistances mécaniques et d'améliorer ses caractéristiques pour garder un caractère réversible. Il existe dans la littérature plusieurs type de stabilisation des briques de terre parmi lesquelles, on peut citer : la stabilisation mécanique, chimique, physique, au ciment et par cuisson. La stabilisation dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

La nature du stabilisant et sa qualité, la qualité de la terre, la qualité du compactage [17].

2.2.4.3 Briques de terre stabilisées mécaniquement

La stabilisation vise à améliorer les caractéristiques des matériaux, la stabilisation mécanique consiste à réduire la porosité du matériau par compactage. Le compactage permet de resserrer les particules du matériau ce qui conduit à la diminution de sa perméabilité, de sa compressibilité de l'absorption d'eau et le gonflement. La stabilisation mécanique par compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées. Bien que la brique terre comprimée a une résistance mécanique acceptable elle demeure très sensible à l'eau c'est pourquoi son utilisation de cette méthode reste très faible au Tchad mais toute fois au nord de pays où la pluviométrie est très faible son utilisation peut être envisageable.

2.2.4.4 Brique de terre stabilisée chimiquement

L'utilisation des adjuvants modifie les propriétés des briques de terre, le mélange de l'argile avec de la paille, des excréments des animaux, ou des gousses des céréales, malaxés avec l'eau pour obtenir une pâte homogène contribuant à la réduction de la sensibilité à l'érosion. La stabilisation chimique consiste à rendre le matériau moins hydrophile et plus résistant par l'addition de l'adjuvant. généralement au Tchad la stabilisation chimique s'accompagne par un pourrissement, le mélange argile, adjuvant et eau est bien mélangé jusqu'à un homogénéisation de l'ensemble puis laisser pendant trois à quatre jours jusqu'à la décomposition complète avant son emploi.

D'après les travaux de [18] et [17] l'ajout de 4% de ciment améliore la résistance à sec tandis que qu'après 8% de ciment cette résistance est multipliée par trois. Un BTS avec 8% de chaux permet un gain important par rapport à la terre simple en ayant à peu près la même efficacité que le ciment à 8%.

2.2.4.5 Briques de terre stabilisée physiquement

La stabilisation physique vise à améliorer les caractéristiques du matériau par correction de la granularité. L'objectif de cette opération est soit de diminuer l'indice de plasticité soit fournir une certaine cohésion du matériau pour permet d'obtenir un matériau plus performant.

2.2.4.6 Briques de terre stabilisées par cuisson

La stabilisation par cuisson consiste à faire passer dans un four la terre fabriquée à base d'un mélange d'argile d'adjuvant tel que la bouse de vache et de l'eau. Pendant la cuisson dans le four la bouse qui est un sous forme des grains combustibles se consume en économisant d'énergie du four et disparaît en créant des pores qui améliorent l'isolation thermique et

acoustique. La brique de terre cuite permet d'évacuer efficacement l'humidité vers l'extérieur. Donc la brique cuite possède l'avantage de maîtriser l'hygrométrie et de la ventilation. Une maison construite à base des briques cuites est un habitat bioclimatique qui permet l'isolation thermique, acoustique, hygrométrique. Elle présente une résistance mécanique remarquable et une protection contre l'incendie. Par contre la consommation énorme de l'énergie lors de la cuisson coûte très chère et contribue à la dégradation de l'environnement. [17].

Au Tchad la fabrication traditionnelle des briques cuites prend une ampleur considérable dans la construction des logements modernes. Les briques sont cuites grâce à des fours traditionnels comme le montre la photo ci-après.



Photo.1 : Four artisanal pour la cuisson des briques

Les combustibles généralement utilisés sont le bois et le charbon, compte tenu de l'interdiction par l'état tchadien la coupe des bois verts pour lutter contre la déforestation, on utilise les noix de palmier doum et la bouse de vache séchée qui sont des matériaux de récupérations comme une substitution au bois.

2.3 Isolation thermique

Pour améliorer le confort thermique et l'économie d'énergie dans les bâtiments, il faut des matériaux performants qui permettent une grande isolation thermique.

Un isolant thermique est un matériau qui, de par sa nature ou sa composition, ralentit la transmission de la chaleur. Dans le bâtiment, l'appellation isolant thermique est réservée aux matériaux dont leurs résistances thermiques sont supérieures à $0,5\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ et leurs conductivités thermiques sont au plus égales à $0,065\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. [17]

Les deux critères nécessaires de la conception thermique des bâtiments sont la protection des occupants d'une manière automatique et passive, des facteurs climatiques (pluies, vent, rayonnement, chaud ou froid des diverses parois) et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la réglementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort défini par le maître d'ouvrage. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les apports de chaleur, de réaliser des économies d'énergie pour la climatisation et le chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de bénéficier d'un meilleur confort de vie.

2.3.1 L'isolation des parois d'un bâtiment :

L'isolation d'un bâtiment peut se faire par sa façade intérieure ou extérieure et par intégration des matières isolantes dans les matériaux de construction.

- Isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter.

- Isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse.

- Isolation intégrée au matériau

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est performante et durable généralement utilisée en construction neuve. La recherche des conditions de confort dans l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois. Aujourd'hui

les matériaux de récupérations, des déchets agricoles intègrent le matériau porteur ou non porteur pour améliorer l'isolation thermique des bâtiments. Les matériaux à base d'argile mélangée avec des adjuvants naturels et des fibres présentent un regain d'intérêt dans l'isolation thermique. A ce titre, des éminents chercheurs ont travaillé sur les matériaux de construction mélangés aux adjuvants ou de déchets agricole. Nous citons P. Meukam sur la latérite avec la pouzzolane [17], A. Charfadine sur l'argile avec la paille [1], H. Bal sur la latérite avec la gousse de mil [12] et D. Sow sur l'argile avec la paille du riz [19].

2.3.2 Les isolants thermiques courant

Les isolants thermiques diffèrent les uns des autres par de nombreux paramètres. Nous présentons ci-après un aperçu des principales caractéristiques par types d'isolant.

- La laine de verre minérale (MW)

La laine de verre minérale se présente sous différentes formes (matelas ou panneaux). Les produits sont fabriqués par un mélange de matière première en fusion (pour la laine de roche, il s'agit essentiellement de diabase et de calcaire, pour la laine de verre essentiellement de sable et de débris de verre) jusqu'à l'obtention de fibres de consistance laineuse.

- Le polystyrène expansé (EPS)

On distingue le polystyrène expansé modifié non résistant au feu et le polystyrène expansé modifié résistant au feu. La masse volumique et les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. En effet, la conductivité thermique par exemple est liée à la masse volumique. La masse volumique est fonction de la taille des billes et de leur vitesse d'introduction et du débit de vapeur.

- Le verre cellulaire (CG)

Les isolants en verre cellulaire se présentent sous la forme de panneaux à bords ou de pièces découpés dans les panneaux. La masse volumique ou les propriétés spécifiques d'isolation thermiques sont adaptés en cours de fabrication. Le produit est obtenu par fusion pure et d'additifs, puis passé dans une étireuse, vitrifié et broyé.

- Le polystyrène extrudé (XPS)

Le polystyrène extrudé se présente sous forme de panneaux à bords droits, à rainure et languettes ou à butée. Les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. Le produit est obtenu par mélange de granulats, de polystyrène et d'additifs (agent expansif notamment) jusqu'à l'obtention d'une pâte que l'on introduit dans une extrudeuse pour produire l'épaisseur désirée. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif utilisé ainsi qu'à la vitesse de montée en température et à

la vitesse d'intrusion. L'adjonction de l'agent expansif engendre une migration air/agent expansif qui se stabilise avec le temps.

- Polyuréthane (PUR)

Les produits se présentent sous forme de panneaux à bords droit pourvus éventuellement de rainures et de languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme de mousse rigide en PUR/PIR et sont dotés d'un parement sur les deux faces..

- La laine de bois

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibres de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède un coefficient de conductivité thermique identique aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très longue longévité.

- Le phénol (PF)

Ce produit se présente sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme en mousse phénolique et sont dotés d'un parement sur les deux faces qui conditionne en partie les propriétés isolantes. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif et à la formulation adoptée.

- La perlite expansée (EPB)

Le processus de fabrication consiste à poser sur un tapis roulant un mélange composé d'eau de perlite expansé, de fibres de verre, de cellulose et d'un liant bitumeux. Le mélange est comprimé jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue.

Les matériaux comme les granulats de verre, le chanvre, la terre cuite sont utilisés dans la confection des briques spécifiques qui entrent dans la composition d'éléments particulièrement isolants. Avec le granulat de verre, on confectionne un béton isolant. C'est aussi le cas du chanvre qui est un bon isolant biologique sur les plans thermique et phonique, et difficilement inflammable.

2.3.3 Isolation par intégration des déchets agricoles

Plusieurs types des adjuvants ont fait l'objet des études ces dernières années dans les recherches de développement des nouveaux matériaux qui contribuent à l'isolation thermique du bâtiment. Le Tchad est un pays à vocation agro-pastoral, les déchets agricoles sont assez importants. Dans le cadre de cette étude nous nous sommes intéressés par la bouse de vache et la gousse de mil qui sont parmi les rejets agricoles les plus rependus et qui peuvent être facilement incorporé dans les matériaux de construction des bâtiments.

2.3.3.1 Bouse de vache (BV)

C'est la fiente de bovin, au Tchad l'élevage de bovins est très développé à cause des climats favorables à cette espèce. La bouse de vache est assez disponible, on l'utilise souvent comme engrais dans les champs et sert aussi avec le mélange d'argile d'enduit des murs en adobe [9].



Photo.2 : La Bouse de vache séchée

2.3.3.2 Gousse de mil (GM)

Le mil est la céréale la plus cultivée et aussi la plus consommée au Tchad. La gousse de mil (photo 3) est le rejet d'épi du mil consommé seulement que par certains animaux pendant les périodes difficiles et une grande partie constituant un déchet encombrant est souvent brûlée. Elle a une faible masse volumique et son incorporation dans les briques de terre a pour but d'obtenir un matériau plus léger avec une meilleure isolation thermique. [12].



Photo.3 : La gousse de mil à l'état naturel

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre ces matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipement de climatisation moins puissant donc plus économiques. D'autres adjuvants naturels sont aussi d'actualité entre autre : la paille, le Typha, Le kapok, Fibres Alfa, les feuilles de palmier doum, Fibre de palmier dattier etc.

2.4 Confort thermique

Le confort thermique c'est une sensation physique ou un état de satisfaction de bien-être du corps vis-à-vis de l'environnement thermique. Pour assurer le confort thermique une personne ne doit avoir ni trop chaud, ni trop froid et ne ressentir aucun courant d'air gênant. [20]

Le confort thermique est une notion difficile à quantifier. Elle dépend d'un grand nombre de paramètres thermiques ayant pour but la réalisation d'un équilibre thermique adéquat entre le corps humain et son environnement. [16]

Les audits effectués dans les bâtiments climatisés en Afrique Tropicale font ressortir que la part de la consommation électrique due à la climatisation se situe dans une plage de 40 à 80 % de la consommation électrique totale du bâtiment, ce qui place ce poste au centre des actions d'économie d'énergie. [15]

2.4.1 Les paramètres du confort thermique

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de définir les paramètres caractéristiques de l'environnement qui peuvent, dans certaines conditions, entraîner une sensation d'inconfort.

Ces paramètres sont pour l'essentiel :

- Les températures ;
- L'humidité de l'air ambiant ;
- Les mouvements de l'air ambiant ;
- Le métabolisme ;
- L'habillement.

2.4.1.1 Températures

La température se définit comme la manifestation mesurable de la chaleur stockée. Elle est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps. C'est par une différence de température qu'un transfert de quantité de chaleur a lieu de la température la plus haute vers la température la plus basse. L'unité SI de la température est le Kelvin « K ».

2.4.1.2 L'humidité

L'humidité de l'air peut être exprimée comme la pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

La sensation d'inconfort liée à l'humidité provient de l'importance de la transpiration qui se fait d'autant plus difficilement que le milieu ambiant a une humidité relative plus grande. En effet, plus il y a d'humidité dans l'air, plus il est difficile d'évaporer la sueur et donc d'évacuer la chaleur dégagée par le métabolisme.

L'inconfort n'apparaît que dans des situations extrêmes :

- Soit une humidité relative inférieure à 30 % ;
- Soit une humidité relative supérieure à 70 %.

Cette sensation d'inconfort est aussi fonction de la température ambiante T_a puisque la puissance échangée sous la forme latente croît avec T_a .

2.4.1.3 Le mouvement de l'air

C'est un paramètre à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. La vitesse de l'air influence les échanges par convection et par évaporation.

A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas **0,2 m/s**.

Le taux de renouvellement de l'air dans un local dépend lui aussi de la vitesse du vent en particulier quand une ventilation transversale est possible. Cependant, dans ce cas, les occupants tentent de régler les ouvertures de façon à éviter les courants d'air.

2.4.1.4 Le métabolisme

Le métabolisme qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de $36,7^{\circ}\text{C}$. Un métabolisme de travail correspond à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.



Fig.18 : Différents échanges de chaleur entre l'Homme et son environnement

2.4.2 Les indices de confort

On distingue plusieurs types d'indices de confort thermique. Nous pouvons citer le PMV, le PPD, l'indice DISC et l'indice TSENS.

2.4.2.1 PMV (Indice de Vote Moyen Prévisible)

En écrivant le bilan thermique, l'indice PMV décrit la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui qui correspondent aux conditions de confort.

L'indice PMV donne l'avis moyen d'un groupe important de personnes (plus de 1000) exprimeraient un vote de sensation de confort thermique en se référant à l'échelle subjective comportant 7 points de « très chaud » à « très froid » :

Une valeur de PMV de zéro exprime une sensation de confort thermique optimale.

Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale. [1]

Une valeur de PMV positive signale que la température est plus élevée que la température idéale. On considère que la zone de confort thermique s'étale de la sensation de légère fraîcheur (-1) à la sensation de légère chaleur (+1), soit de -1 à +1.

Tableau 6 : Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermique

PMV	Sensation thermique
+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement Tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

L'équation de Fanger, telle que présentée dans la norme internationale EN ISO 7730, est donnée ci-dessous. Dans cette équation, toutes les variables sont exprimées en unités SI :

$$PMV = \alpha [(M - W) - E_{diff} - E_{resp} - E_{conf} - C_{resp} - C - R] \quad (43)$$

Avec :

$$\alpha = 0,303 \exp(-0,036xM) \quad (44)$$

M : Activité métabolique par m² de la peau (W.m⁻²)

W : Travail spécifique par m² de la peau (W.m⁻²)

C_{resp} : Echanges au niveau des voies respiratoires par convection (W.m⁻²)

E_{resp} : Echanges au niveau des voies respiratoires par évaporation (W.m⁻²)

C : Echange au niveau de la peau par convection (W.m⁻²)

R : Echange au niveau de la peau par rayonnement (W.m⁻²)

E_{diff} : Diffusion de chaleur évaporation par la peau (W.m⁻²)

E_{conf} : Part d'évapore – transpiration qui apparait durant une phase de confort (W.m⁻²)

Le travail spécifique peut s'exprimer par le rendement mécanique fois l'activité métabolique M.

$$W = \eta \cdot M \quad (45)$$

$$E_{diff} = 17,46((M - W) - P_a) \quad (46)$$

P_a : pression de vapeur d'eau dans l'air (kpa)

$$E_{conf} = 0,42(M - W - 58,12) \quad (47)$$

$$E_{resp} = 0,0173 \cdot M(5867 - P_a) \quad (48)$$

$$C_{resp} = 0,0014 \cdot M(34 - T_a) \quad (49)$$

$$C = h_c \cdot F_{clC} (T_{sk} - T_a) \quad (50)$$

h_c : coefficient d'échange par évaporation (W.m².kpa)

f_{clC} : facteur de réduction des échanges évaporation par le vêtement.

T_{sk} : température de la surface de la peau (°C)

T_a : Température de l'air inspiré (°C)

$$R = \frac{h_r \cdot AR}{AD \cdot F_{clR} \cdot (T_{sk} - T_r)} \quad (51)$$

Avec

h_r: coefficient d'échange par rayonnement (W.m⁻².°C)

AR : Facteur de réduction des échanges par rayonnement due aux vêtements

F_{clR} : Facteur de réduction des échanges par rayonnement due aux vêtements

T_{sk} : Température moyenne de la peau (°C)

T_r : Température moyenne de rayonnement (°C)

Tableau 7 : Valeurs du métabolisme

Activité	M (W/m2)	η (%)
Sommeil	41	0
Repos assis	58	0
Repos debout	70	0
Marche 5 km/h	160	0
Travail physique léger	120	0 à 0,1
Travail physique lourd	250	0,1 à 0,2
Sport	250 à 400	0 à 0,1

Le rendement dépend essentiellement des types d'activités physiques.

2.4.2.2 PPD (Pourcentage Prévu des Insatisfaits)

La sensation thermique n'étant pas suffisante pour exprimer le confort, FANGER a proposé un autre indice qui complète le **PMV**, le « **PPD** » (Pourcentage Prévu Des Insatisfaits).

$$PPD = 1 - 0,95^{(-0,00353PMV^4 - 0,2179PMV^2)} \quad (52)$$

Les indices PPD et PMV sont liés par une relation dont il ressort qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des individus et que dans le cas le plus favorable il subsiste 5 % d'insatisfaits.

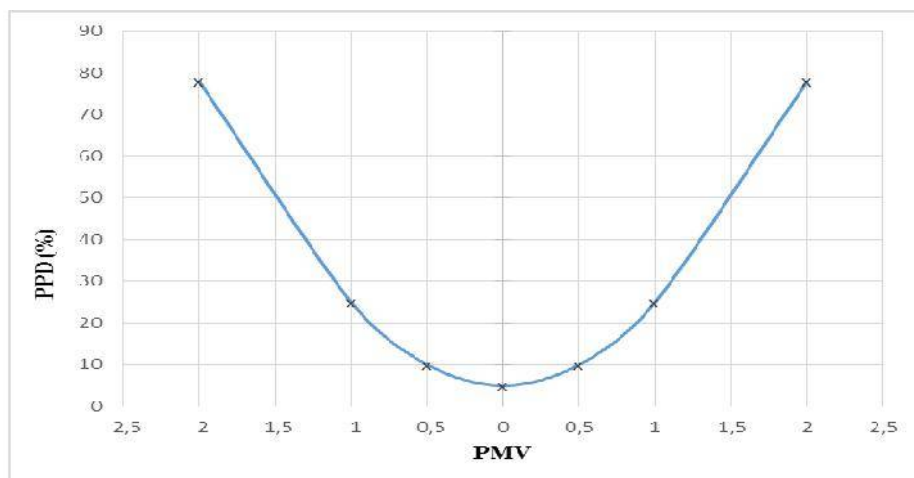


Fig.19 : Courbe de PPD en fonction de PMV

La figure ci-dessous montre qu'avec un PMV nul, on arrive à satisfaire le 95% de la population, soit un état de confort thermique optimal, il y a encore 5% d'insatisfaits.

Généralement, on se contente de satisfaire le 90% des gens (ce qui est généralement l'objectif à atteindre dans un bâtiment), ce qui veut dire que l'on accepte des valeurs du PMV comprise entre -0,5 et +0,5.

Un PMV de -1 ou +1, entraine un indice d'insatisfaction de la population (PPD) de près de 25%.

On peut représenter à travers la figure suivante la courbe PPD en fonction de la température de l'air pour des groupes de personnes occupées soit à des travaux sédentaires (assis), soit des travaux légers, les autres paramètres étant constants.

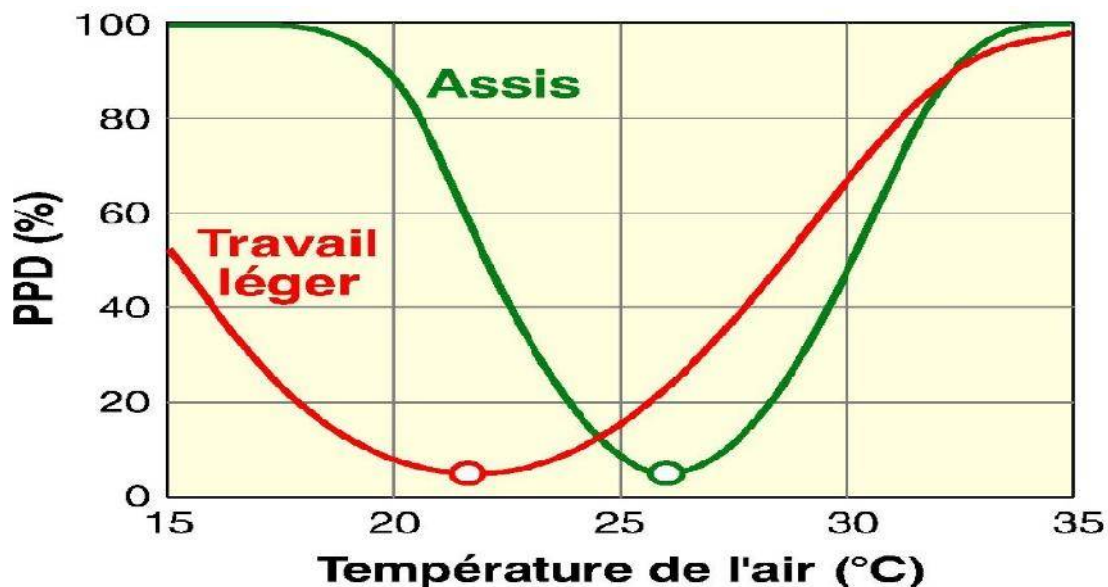


Fig.20 : Courbe PPD en fonction de la température de l'air

2.4.2.3 Indice DISC et TSENS

ASHRAE propose deux autres indices empiriques TSENS (thermal sensation) et DISC (thermal discomfort). Ces deux indices sont calculés à partir de la température moyenne corporelle qui est une moyenne pondérée de la température interne et cutanée. Le TSENS détermine la sensation thermique sur l'échelle de l'ASHRAE en y ajoutant deux degrés extrêmes (± 4 pour extrêmement chaud/froid et ± 5 pour intolérablement chaud/froid). DISC détermine le niveau d'inconfort thermique sur une échelle à 6 points allant de confortable (DISC=0) à intolérable (DISC=5). [16]

2.4.3 Confort thermique en climat tropical humide

Le climat tropical par rapport au climat tempéré l'humidité est beaucoup plus importante. Les échanges par évaporation sont considérables. La mouillure cutanée et le taux de sudation sont des facteurs incontournables pour l'évaluation du confort thermique. [20]

- Mouillure cutanée

C'est le rapport entre la surface de la peau mouillée et la surface totale de la peau :

$$M_{cut} = \frac{E_{pév}}{E_{pmax}} \quad (53)$$

M_{cut} : mouillure cutanée ;

$E_{pév}$: perte par évaporation de la sueur ;

E_{pmax} : Pouvoir évaporatif maximal de l'air.

- Le débit sudoral

Pour apprécier le confort thermique on doit considérer la mouillure cutanée et le débit sudoral.

Le débit sudoral est donné par l'expression suivante :

$$DS = \frac{E_{pév}}{0,86e} \quad (54)$$

Où e est le rendement évaporatoire obtenu par la relation :

$$e = 1 - 0,42.e^{-6(1-M_{cut})} \quad (55)$$

Des notes de confort thermique (indice DISC) en fonction des variations de la mouillure cutanée et du débit sudoral ont été établies.

Les valeurs de cet indice aux quelles une évaluation subjective a été proposé sont :

- Zone 1 : agréable ;
- Zone 2 : légèrement désagréable ;
- Zone 3 : désagréable ;
- Zone 4 : très désagréable.

Mouillure					
25%	4	4	4	4	
15%	3	3	3	4	
6%	2	2	2	4	
0%	1	2	3	4	
	0	50	150	250	Débit sudoral (g.h ⁻¹)

Fig.21 : Zone du confort de confort -indice Disc [21]

Pour un sujet portant un vêtement léger ayant une résistance d'habillement de 0,5 CLo et une activité sédentaire de résistance à l'activité équivalente à 1,1 MET, trois chercheurs ont proposé des corrélations linéaires pour l'indice DISC. Ces relations répertoriées par Géry sont les suivantes :[21]

$$\text{Berglund} \quad \text{DISC} = 4,13M_{\text{cut}} + 0,013 \quad (56)$$

$$\text{Cunningham} \quad \text{DISC} = 5,06M_{\text{cut}} + 0,09 \quad (57)$$

$$\text{Hoeppe} \quad \text{DISC} = 3,6M_{\text{cut}} + 0,25 \quad (58)$$

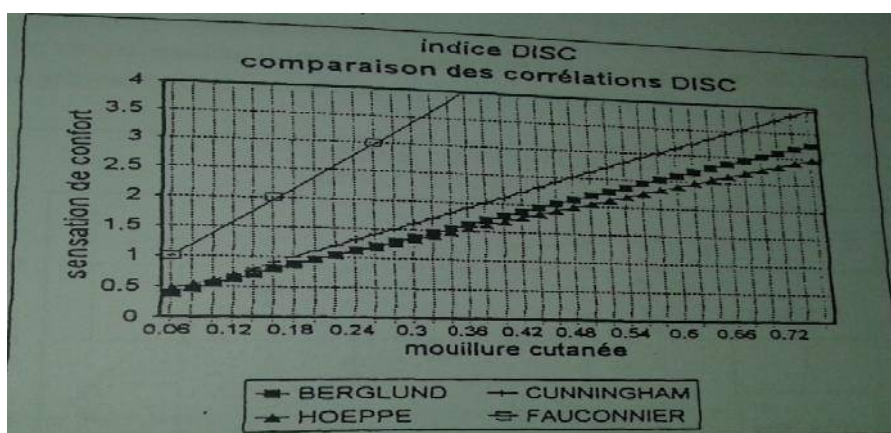


Fig.22 : Indice DISC – sensation de confort thermique en fonction de la mouillure cutanée- comparaison des corrélations de l'indice.

2.4.4 Les diagrammes bioclimatiques

Les diagrammes bioclimatiques sont des outils de synthèse qui permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat. Le principe consiste à confronter sur un même graphique, « un polygone de confort », représentant les conditions extérieures et l'aire d'influence thermique et hygrométrique de certaines solutions architecturales ou de certains dispositifs. Parmi les outils les plus connus dans ce domaine on peut citer le diagramme bioclimatique d'Olgyay (Olgyay, 1963) et celui de DeGivoni.

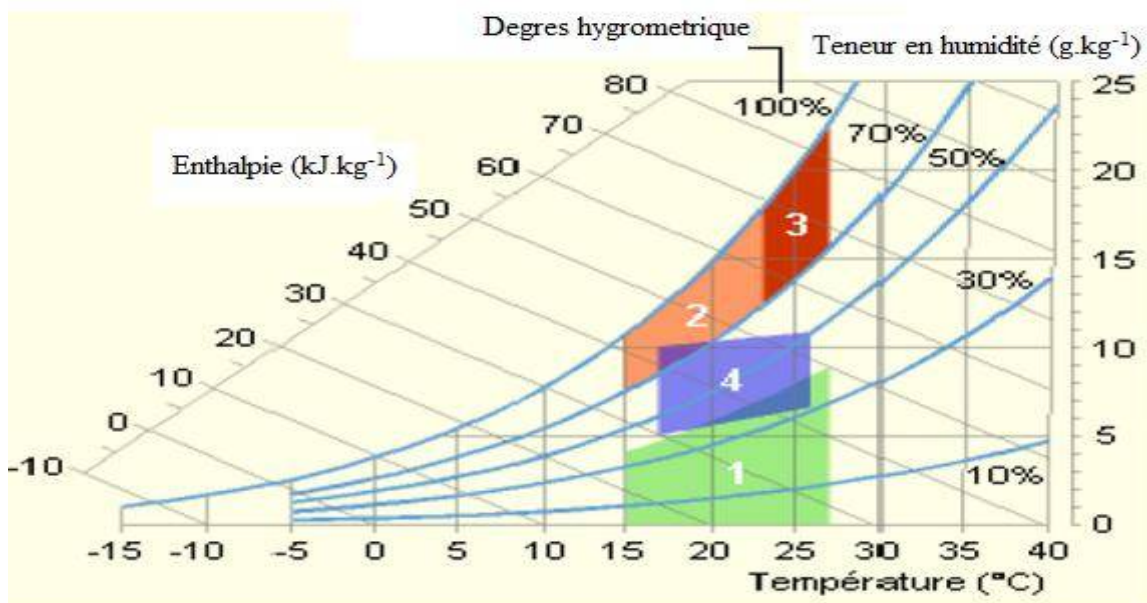


Fig.23 : Diagramme bioclimatique

Les zones sur le diagramme traduisent ce qui suit :

- 1- Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- 2,3- Zone à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
- 3- Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
- 4- Polygone de confort hygrothermique.

2.4.5 Table de Mahoney

L'architecte Carl Mahoney a développé une série de tableaux de référence utilisée comme méthode de base dans l'architecture. C'est une méthode de traitement des données climatiques très simple qui permet d'obtenir des bâtiments confortables adaptés aux conditions climatiques.

Les tables de Mahoney sont une série de six tableaux dont les quatre sont utilisées pour entrer les données climatiques :[16]

- Températures : moyenne mensuelles des températures maximales et minimales ;
- Humidité, précipitations et vent ;
- Comparaison des limites de confort et du climat ;
- Indicateurs : par combinaison des données des tables précédentes, classification de l'humidité ou de l'aridité pour chaque mois.

Les deux tableaux restants indiquent les recommandations architecturales à respecter telle que la forme et l'orientation du bâtiment, la position, la dimension ou l'exposition des ouvertures. En fonction des données climatiques, la méthode de Mahoney peut aider l'architecte à prendre les meilleures décisions en phase esquisse.

2.4.6 Le refroidissement passif de l'habitat

Dans le contexte climatique tropical et subtropical la conception bioclimatique se résumera aux techniques de refroidissement passif et d'éclairage naturel. Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement. Le refroidissement passif couvre tous les processus naturels et les techniques de refroidissement ne nécessitant aucune forme d'apport énergétique, autre que les sources d'énergie renouvelables.

Conclusion :

Le Tchad présente un climat chaud et tempéré, un facteur que l'habitat doit tenir compte pour équilibrer le confort thermique dans les logements sans une consommation excessive d'énergie électrique. L'ambiance thermique dans les bâtiments est essentielle pour le confort des occupants. Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches statiques, simplifiant la complexité des phénomènes interactifs. Ainsi, les exigences constructives favorisent le dimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment. L'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit, alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment, et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Par conséquent, le choix adapté des matériaux de construction est un préalable. Dans ce chapitre, nous avons vu assez de facteurs qui peuvent affecter l'environnement intérieur d'un bâtiment, tels que, les sources de chaleur et d'humidité intérieures et extérieures, les matériaux de construction

utilisés et la conception thermique de la structure, la température de l'air ambiante. De ce fait, pour une conservation d'énergie, une protection optimale de l'environnement et un confort maximum, il est essentiel de bien maîtriser ces paramètres en faisant un choix objectif des matériaux qui constituent l'enveloppe du bâtiment. Pour les pays comme le Tchad, le choix des matériaux locaux à base de terre mélangée avec des adjuvants naturels issus des rejets agricoles dans l'habitat est justifié tout d'abord par leurs disponibilités et leurs accessibilités pour une population à revenu faible.

Chapitre 3 Méthodes des mesures de propriétés thermophysiques et mécaniques

Introduction

Les changements de mode de vie, mode de construction et les exigences de besoins du confort dans les logements ont incité les chercheurs à se focaliser sur la recherche des matériaux de construction plus adaptés. Pour cela la connaissance des différentes propriétés intrinsèques des matériaux permet de mieux caractériser ces matériaux. Parmi ces caractéristiques intrinsèques, on trouve :

Les caractéristiques mécaniques représentatives telles que la résistance mécanique en compression et en traction et les déformations élastique, plastique et visqueuse.

Les caractéristiques thermophysiques qui sont : la conductivité thermique la diffusivité thermique la chaleur massique ainsi que l'effusivité thermique.

Dans cette partie nous allons parcourir les méthodes de caractérisation mécanique et thermique que nous avons utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux.

3.1 Caractérisation mécanique

Parmi les principaux facteurs qui poussait l'homme au cours de l'histoire à changer la façon de construction d'un habitat et à la substitution des anciens matériaux (pierres, argiles) par d'autres plus résistants (béton armé), c'est le problème d'effondrement des bâtiments qui se produit chaque jour à cause de la résistance qu'ils n'avaient pas pour supporter une telles charges ou aux aléas climatiques qui leur ont été imposés.

La connaissance de comportement aux sollicitations mécaniques est très fondamentale dans la construction d'un bâtiment. La mesure de la résistance à la compression et à la traction des briques nous permet de prédire si la maison construite peut supporter les charges mécaniques auxquelles elle sera soumise.

Les matériaux de constructions suivent des normes strictes quant à la détermination de leurs caractéristiques. Les grandeurs mécaniques représentatives de leurs propriétés généralement utilisées, sont :

- la résistance en compression
- la résistance en traction

- le module d'Young (MPa) : raideur du matériau
- la déformation à la rupture : déformation du matériau au niveau du maximum de contrainte
- le coefficient de Poisson

Ces valeurs permettent alors de dimensionner les structures en fonctions des sollicitations subies par le matériau et comme le matériau étudié est une brique qui est assimilé à une poutre dont les secteurs sont inférieurs à deux fois sa longueur. La résistance en compression fera l'objet de nos essais dans cette étude.

3.1.1 Dispositif utilisé pour les essais mécaniques

Les essais de résistance à la compression ont été effectués grâce à une presse universelle avec une force de compression allant jusqu'à 1500 kN. Ce dispositif permet d'indiquer la valeur maximale de la rupture de l'éprouvette après le retour à zéro de la charge. Cette machine dispose d'un levier pour une mise en charge et d'un volant qui permet de contrôler la vitesse de la mise en charge.

3.1.2 Mode opératoire des essais mécaniques

Les éprouvettes de forme de cylindrique sorties de l'étuve sont centrées entre les deux plateaux de la presse. La charge par effort de compression est effectuée progressivement à une vitesse moyenne jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Ainsi on pourra déterminer la résistance à la compression R_c qui n'est autre que le produit de l'effort de compression maximal F_c et la section droite de l'éprouvette avant l'écrasement

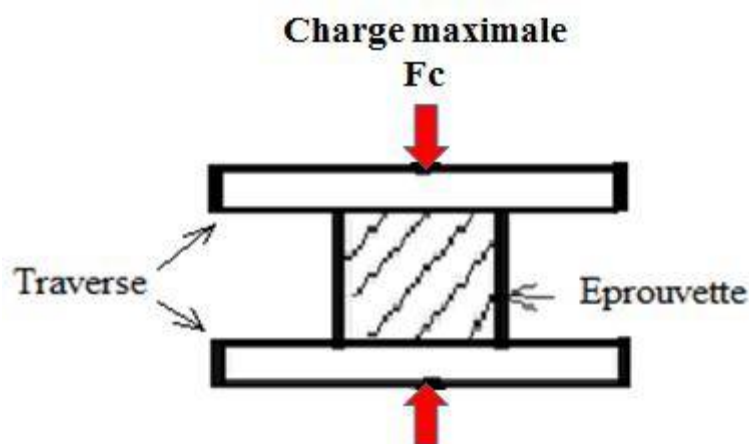


Fig.24 : Dispositif expérimental d'écrasement d'une éprouvette

3.1.3 La résistance en compression

La résistance en compression se mesure par compression axiale de cylindre droit de révolution de section S et d'une hauteur double de leur diamètre. Elle se fait à l'aide d'une pression et s'exprime par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (59)$$

F_c : la force appliquée en Newton (N)

S : section de l'éprouvette en mm^2

R_c : Résistance en compression en MPa

3.2 Caractérisation thermique

La détermination des caractéristiques thermophysiques usuelles telle que la conductivité, la diffusivité thermique, la chaleur massique ainsi que l'effusivité thermique contribue à une meilleure connaissance du comportement thermique des matériaux. Les méthodes de caractérisation de ces paramètres peuvent se faire en régime permanent ou en régime transitoire. [2]

3.2.1 Les caractéristiques thermophysiques

Dans l'optique d'une préconisation ultérieure des produits étudiés dans les constructions surtout en milieu tropical, il est important de connaître leurs caractéristiques thermophysiques afin de prédire le confort thermique dans les espaces qu'ils envelopperont.

En effet, ce sont ces paramètres qui traduisent la capacité de propagation ou de stockage de chaleur dans un matériau donné. Dès lors, il semble utile de rappeler quelques définitions et explications qui pourraient permettre de mieux comprendre ces phénomènes de transfert de chaleur et les incertitudes liées à leur méthode de détermination.

Les grandeurs thermophysiques que nous pouvons déterminer pour les briques de terre à base d'argiles sont : [22]

- la conductivité thermique ;
- la résistance thermique ;
- la chaleur massique ;
- la diffusivité thermique ;
- l'effusivité thermique.

3.2.1.1 La conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermophysiques la plus recherchée pour les matériaux de construction. En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur e et de température de surface uniforme T_i et T_e , la densité de flux de chaleur ϕ en $\text{W.m}^2 \text{s}^{-1}$ s'exprime sous la forme :

$$\phi = \frac{\lambda}{e} (T_i - T_e) \quad (60)$$

La conductivité thermique mesure donc la faculté qu'a la chaleur de traverser plus ou moins aisément un matériau en régime stationnaire. Elle dépend essentiellement de la nature du matériau et de la température. Plusieurs dispositifs expérimentaux tel que la méthode de la boîte chaude gardée, la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode du flux radial, ou la méthode des boîtes ont été utilisés pour mesurer la conductivité thermique des matériaux par différents auteurs. Les techniques utilisées dépendent surtout de l'état du milieu à tester (solide, liquide, granulaire). [23]

3.2.1.2 Résistance thermique (R_{th})

Sur le plan thermique, une paroi est caractérisée par sa résistance thermique en conduction R_{th} , qui quantifie la capacité de la paroi à s'opposer aux échanges thermiques. En effet, la résistance thermique est d'autant plus élevée que l'isolation est plus efficace. A la différence du coefficient de conductivité (λ), qui caractérise intrinsèquement un matériau, la résistance thermique est significative pour les parois, car elle tient compte de leurs géométries. Elle est définie par la relation suivante :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (61)$$

3.2.1.3 La chaleur massique (C_p)

La chaleur massique d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré.

$$Q = m C_p (T_e - T_i) \quad (62)$$

3.2.1.4 La diffusivité thermique (a)

Elle est inversement proportionnelle à l'inertie du matériau. Elle décrit la vitesse d'un transfert de chaleur à travers toute la masse d'un matériau, et plus précisément, elle caractérise la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau.

Lorsque la température du milieu est fonction du temps et que la conductivité dépend de la température et des coordonnées spatiales ; l'équation de Fourier s'écrit : [24]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}) \quad (63)$$

Lorsque les paramètres thermiques sont indépendants de la température, la relation devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad (64)$$

Avec

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (65)$$

Cette relation fait apparaître le rapport

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (66)$$

Ce qui représente la diffusivité thermique du milieu. On peut donc écrire :

$$\alpha \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (67)$$

La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation d'une onde dans un corps et intéresse le problème d'inertie thermique des matériaux. Elle est donc liée à la conductivité thermique, à la chaleur massique et ainsi qu'à la masse volumique. [22]

Il existe deux types d'inertie, une inertie par absorption et une autre par transmission. Celle d'absorption augmente avec l'épaisseur et avec l'effusivité de la paroi. Celle de transmission augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi.

3.2.1.5 Effusivité thermique (E)

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle concerne les phénomènes de contact entre deux parois.

Elle est proportionnelle à la conductivité thermique et à l'inertie du matériau (plus précisément à leur racine carrée). L'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe ou cède la chaleur. [25]

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (68)$$

Plus l'effusivité thermique d'un matériau est faible, plus la température de surface sera sensible aux changements de la densité de flux thermique en surface et vice versa.

Les valeurs d'effusivité les plus élevées sont rencontrées pour les métaux. Les valeurs d'effusivité les plus faibles sont rencontrées pour les matériaux organiques tels que les polymères, le bois, la peau humaine et les matériaux d'isolation tels que les matériaux fibreux ou alvéolaires. [17], [25-27]

3.2.2 Les méthodes de caractérisation thermique

L'estimation des paramètres thermophysiques des matériaux de construction joue un rôle primordial dans un grand nombre de domaines scientifiques et industriels. Ce sont ces caractéristiques qui traduisent la capacité de propagation ou de stockage de chaleur dans un matériau donné. Plusieurs méthodes nous permettent de déterminer les propriétés thermiques.

La conductivité thermique et la diffusivité thermique sont les caractéristiques que nous allons mesurer. Les autres caractéristiques sont ensuite déduites à partir de corrélations simples.

La conductivité thermique est généralement déterminée en régime permanent alors que la diffusivité se détermine en régime variable.

Pour nos expériences, nous avons utilisé la méthode des boîtes pour déterminer la conductivité thermique en régime permanent. La diffusivité thermique est estimée par la méthode de flash en régime transitoire. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de mesurer les caractéristiques thermiques des matériaux, dans ces travaux nous avons utilisé la méthode des boîtes pour effectuer nos essais de calculs de la conductivité thermique et la méthode Flash pour estimer la diffusivité thermique.

3.2.2.1 La Méthode des boîtes

La méthode des boîtes est une technique qui permet de déterminer la conductivité thermique en régime permanent couramment utilisée pour caractériser les matériaux de construction. [9] [10] [12] [25] [28] ; Il s'agit du dispositif « EI700 » (figure 24) qui été mis au point au laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'université Claude Bernard Lyon [29] . Cette technique permet de déduire la conductivité thermique des matériaux testés en régime permanent en réalisant un bilan énergétique du système. La méthode des boîtes a l'avantage d'une mise en œuvre très simple et a fait l'objet de plusieurs travaux et publications. [30-34] ; Elle utilise des échantillons de tailles significatives et présente en outre les avantages suivants :

- Méthode rapide avec une bonne précision et dans des conditions réelles d'utilisation,
- Capacité d'effectuer simultanément deux mesures différentes dans les mêmes conditions expérimentales :
- Mesures sur des matériaux humides ;
- Mesures sur tous les types de matériaux utilisés dans l'industrie et le bâtiment, à l'exception des métaux [6], qu'ils soient solides, granulaires, pulvérulents ou liquides. Néanmoins il faut noter que cette méthode est plus appropriée à des matériaux homogènes, pas trop conducteurs ($< 3 \text{ W/m. K}$), de plus la précision est moins bonne quand la température augmente. [17] ;[35-37]

Ce dispositif permet les calculs simultanés de la conductivité thermique et ainsi de la diffusivité thermique d'un matériau. A partir de la connaissance de ces deux paramètres, les autres tels que l'effusivité thermique et la chaleur massique, pourront être déduites. [1] ;[7] ; [9] ; [12] ; [17] ;[20] ; [36-39]

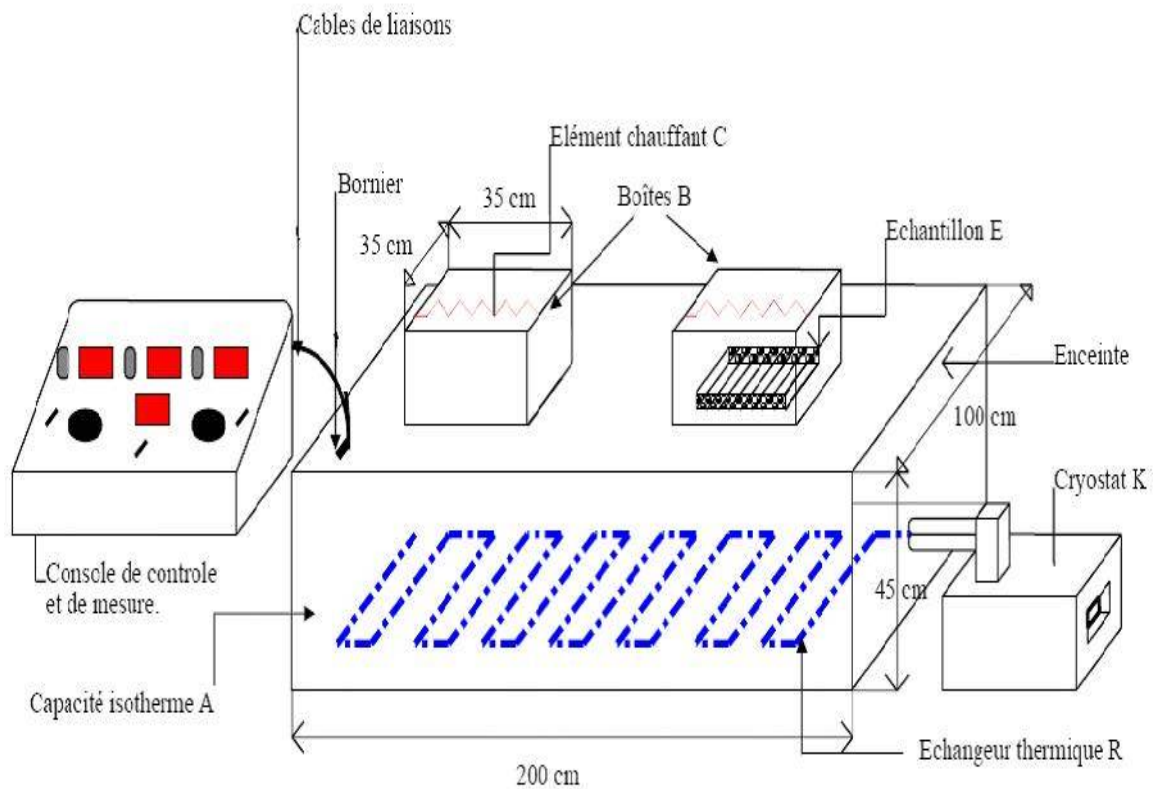


Fig.25 : Principe de mesure de la conductivité thermique [40]

Le principe consiste à créer deux enceintes isothermes à différentes températures. Les parois latérales de l'enceinte chaude sont bien isolées. Il s'établit un écoulement de chaleur supposé monodimensionnel, à travers l'échantillon à tester. Des thermosondes sont fixées sur chacune des faces de l'échantillon (face chaude et face froide). Une fois, le régime est établi, c'est à dire quand les températures T_c et T_f restent constantes pendant au moins trente minutes, une console de mesure affiche les différentes données permettant de déterminer la conductivité thermique, à partir du flux de chaleur traversant l'échantillon et des différentes températures mesurées. L'émission d'énergie est réglée à l'aide d'un rhéostat de sorte que la température de la boîte, T_b soit supérieure à la température ambiante T_a . [9] ; [37]

3.2.2.1.1 Méthode des mesures de la conductivité thermique :

- les échantillons de dimensions normales

La méthode des boîtes est conçue pour les essais sur des échantillons de dimension 270 x 270 x e mm³, avec e l'épaisseur qui peut varier de 30 à 70 mm [29],[40]

$$\frac{U^2}{R} = c(T_b - T_a) + \frac{\lambda S}{e}(T_c - T_f) \quad (69)$$

$\frac{U^2}{R}$: Puissance dissipée par effet joule de la résistance chauffante ;

$c(T_b - T_a)$: Chaleur perdue à travers la boîte ;

$\frac{\lambda S}{e}(T_c - T_f)$: Chaleur transférée par conduction à travers l'échantillon.

c : Coefficient de déperdition souvent donnée par le fabricant de la cellule.

De cette relation, on en déduit l'expression de la conductivité, qui est en fait une valeur expérimentale λ_{exp} :

$$\lambda_{exp} = \frac{eU^2}{SR} \left(\frac{1}{T_c - T_f} \right) - \frac{c}{S} \left(\frac{T_b - T_a}{T_c - T_f} \right) \quad (70)$$

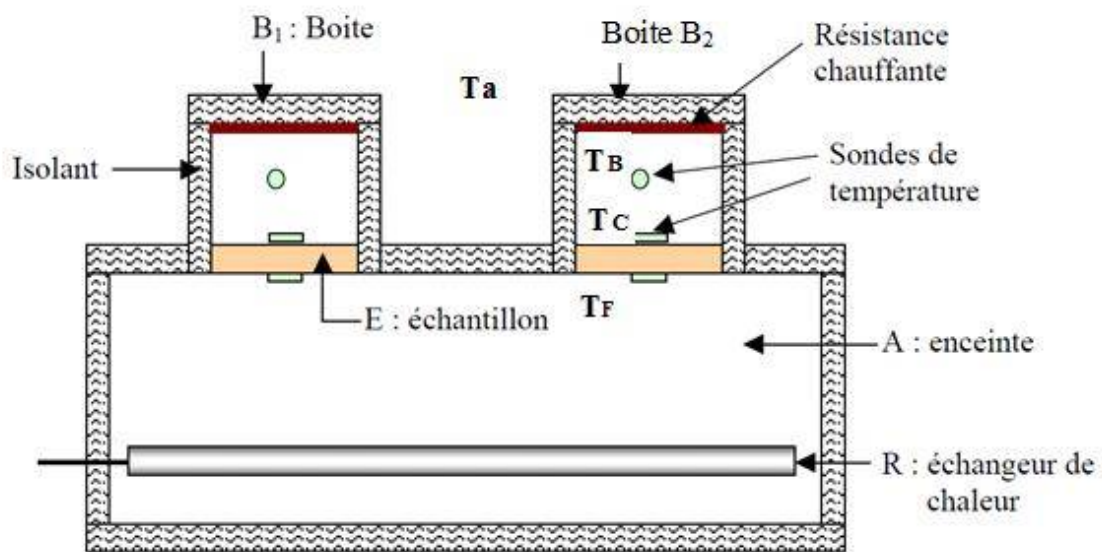


Fig.26 : Coupe du dispositif 'des boîtes'

- Echantillons des petites dimensions : méthode par encastrement

Pour un échantillon des dimensions plus petites par rapport aux dimensions normales, on peut l'encastrer dans un cadre en polystyrène de 270 x 270 x 40mm³ de conductivité thermique

connue avant son introduction dans la machine. La méthode de calcul de la conductivité thermique est donnée par les relations 65 et 66.

$$\lambda_T = \frac{e}{S(T_c - T_f)} [Q - c(T_B - T_a)] \quad (71)$$

$$\lambda_e = \frac{S_T}{S_e} \lambda_T - \frac{S_i}{S_e} \lambda_i \quad (72)$$

Avec λ_e : conductivité thermique échantillons ; S_e = surface échantillons ; λ_T = conductivité thermique totale ; S_T = surface totale (échantillons + isolant) ; λ_i = conductivité thermique isolant (polystyrène) ; S_i surface isolant ; T_c = température face chaude ; T_f = température face froide ; T_B = température boîte, T_a température ambiance salle de mesure. [2] ; [41]

3.2.2.1.2 Le calcul des erreurs

Malgré un nombre important de travaux basés sur cette méthode, il subsiste quand même quelques sources d'incertitudes sur la mesure de la conductivité λ_{exp} . Les erreurs accidentelles sont dues à l'instabilité des appareils tels que la tension électrique, la précision visuelle et le temps de réponse des appareils de mesure. En se basant sur l'expression de la conductivité donnée par la relation on quantifie ces erreurs par l'utilisation des différentielles logarithmiques et on aboutit à une erreur relative de la forme suivante : [2] ; [19]

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{\Delta q + c(\Delta T') + \Delta c \Delta T'}{q + c \Delta T'} \quad (73)$$

$$T = T_c - T_f$$

$$T' = T_b - T_a$$

$C = 0,16 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ et l'erreur est estimée à 5% environ par le fabricant de la cellule.

3.2.2.2 La Méthode Flash

La diffusivité thermique est mesurée directement en régime instationnaire par la méthode « Flash ». Son principe consiste à appliquer un flux lumineux de 1000W pendant quelques secondes sur l'une des faces de l'échantillon. La température de la face froide est enregistrée à partir de l'application du flash. La valeur de la diffusivité est estimée après lecture du thermographe obtenu. [20] ; [22]

La diffusivité thermique a s'exprime en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, elle caractérise la vitesse de diffusion d'un flux de chaleur conductif au sein d'un matériau. C'est une propriété intervenant dans tous les processus de transfert de chaleur en régime non stationnaire, c'est-à-dire pour lesquels la température varie en fonction du temps. La connaissance de ce paramètre est essentielle pour résoudre de nombreux problèmes de transfert thermique. Elle permet en outre d'accéder indirectement à la conductivité thermique lorsque la capacité thermique massique et la masse volumique sont connues car ces grandeurs sont reliées par la relation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (74)$$

La méthode flash permet de déterminer la diffusivité thermique en envoyant sur l'une des faces de l'échantillon à faces parallèles un flux lumineux de forte puissance pendant un temps relativement court. Le thermocouple placé sur la face arrière permet de prélever l'augmentation de sa température [2] ; [28]

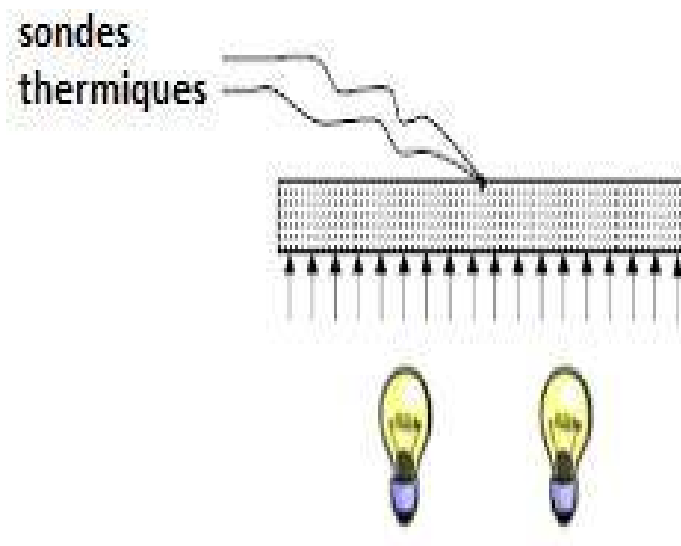


Fig.27 : Schéma de principe de la méthode flash

Il existe plusieurs modèles qui permettent de calculer la diffusivité thermique, à savoir le modèle de Parker, le modèle de Degiovanni et le modèle de Yezou. [26]

3.2.2.2.1 Modèle de Parker

Le principe du modèle de Parker consiste, dans un système thermique, à introduire une perturbation plus ou moins localisée dans le temps et dans l'espace et à relever en un ou

plusieurs endroits les évolutions de température en fonction du temps. A partir de ces thermogrammes, on déterminera une ou plusieurs caractéristiques du système.

La diffusivité thermique est calculée à partir du temps $t_{1/2}$ nécessaire pour la température $T_{2(t)}$ de la face arrière soit égale à la moitié de la température maximale atteinte T_{2m} : [17]

$$a = \frac{1,38e^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (75)$$

Cette méthode ne s'applique que dans le cas où la durée de l'éclair de flash est très petite et où les pertes thermiques sur les différentes faces de l'échantillon sont négligeables.

3.2.2.2.2 Modèle de Degiovanni

Cette méthode prend en compte les pertes thermiques mais ne s'applique toutefois que dans le cas où la durée du flash est très petite.

Le principe repose sur l'utilisation de quatre points du thermogramme représentés sur la figure suivante : [42]

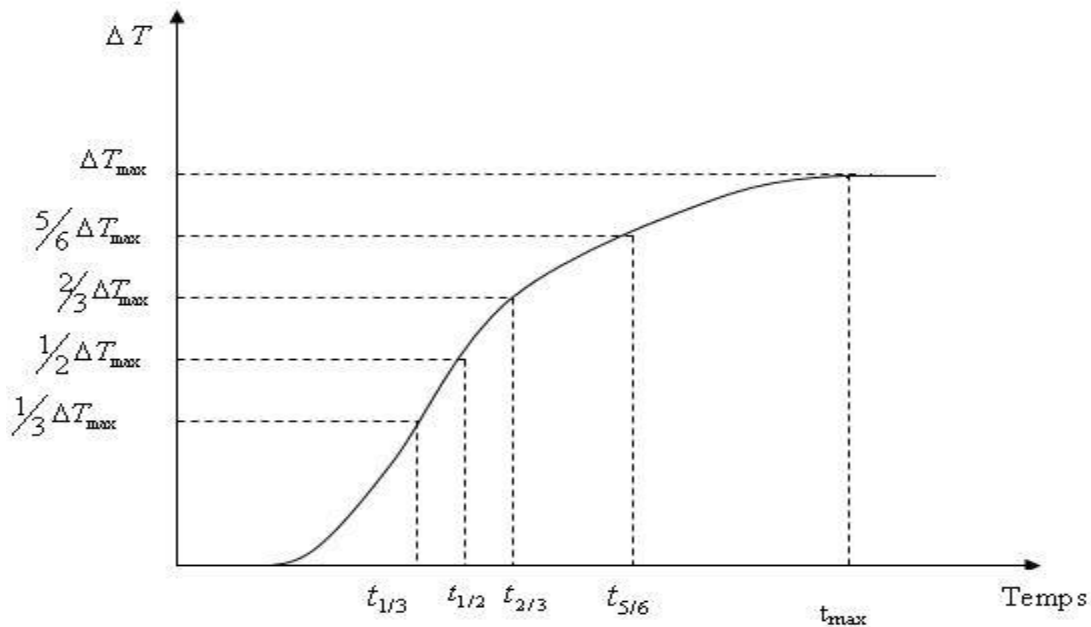


Fig.28 : Thermogramme de la face non éclairée

La diffusivité thermique peut être obtenue à partir des formules suivantes : [2] ; [17]

$$a_1 = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(1,15 - 1,25 \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right) \quad (76)$$

$$a_2 = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(0,761 - 0,926 \frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} \right) \quad (77)$$

$$a_3 = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(0,617 - 0,9626 \frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} \right) \quad (78)$$

Avec

e: l'épaisseur de l'échantillon en mètre ;

tp : le temps écoulé depuis l'excitation pour que la température de la face irradiée s'élève de p fois son élévation maximale au cours de l'expérience.

On retient dans la pratique la moyenne de trois valeurs obtenues

$$a = \frac{1}{3} (a_1 + a_2 + a_3) \quad (79)$$

En somme, on peut dire que cette méthode de caractérisation en régime transitoire est assez simple de mise en œuvre, de faible coût et permet d'avoir des mesures fiables. [26]

Dans le cas de nos travaux, nous avons opté pour la méthode de Degiovanni pour déterminer les diffusivités thermiques de nos échantillons.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux ainsi que les différentes techniques de mesures utilisées dans nos travaux.

Le choix de ces méthodes pour la caractérisation mécanique et thermique est justifié par la fiabilité de leurs résultats, leurs utilisations dans de nombreux travaux de recherches et aussi par la disponibilité de ces appareils dans les laboratoires des recherches où nous avons eu la chance de travailler.

Partie II : Etudes expérimentales

Chapitre : 4 Identification des matériaux et formulations des échantillons

Introduction

Pour mieux connaître les comportements mécaniques et géotechniques des matériaux utilisés, une série des essais pour l'identification des matériaux est nécessaire. Ce qui permettra grâce à des mesures issues des essais normalisés de déterminer la nature d'un sol et à dégager ses caractéristiques physiques.

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de différents essais d'identification géotechnique des matériaux utilisés, avant de procéder aux différentes formulations de nos éprouvettes.

4.1 Identification de matériaux

Pour mener à bien nos travaux, nous avons prélevé des échantillons de sols aux niveaux des briqueteries de la ville d'Abéché, de la ville de N'djamena et de la ville de Sarh, trois grandes agglomérations du Tchad. L'identification et la classification de ces sols sont effectuées suivant la norme française **XP P94-011 d'aout 1999**.

Les sites et les profondeurs de prélèvement de différents types de sols utilisés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Références des échantillons

Références échantillons		viles	Sites et profondeurs de prélèvement
EAA	Echantillon d'Argile d'Abéché	Abéché	Briqueterie Seidou, 120 cm
EAN	Echantillon d'Argile de N'Djamena	N'Djamena	Briqueterie Almour, 150 cm
EAS	Echantillon d'Argile de Sarh	Sarh	Rive Barh Ko 70 cm

4.1.1 Analyse granulométrique et sédimentométrique des sols utilisés (NF P94-05- NF P94-057)

Cette opération consiste à faire la répartition massique de la dimension des particules solides exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau.

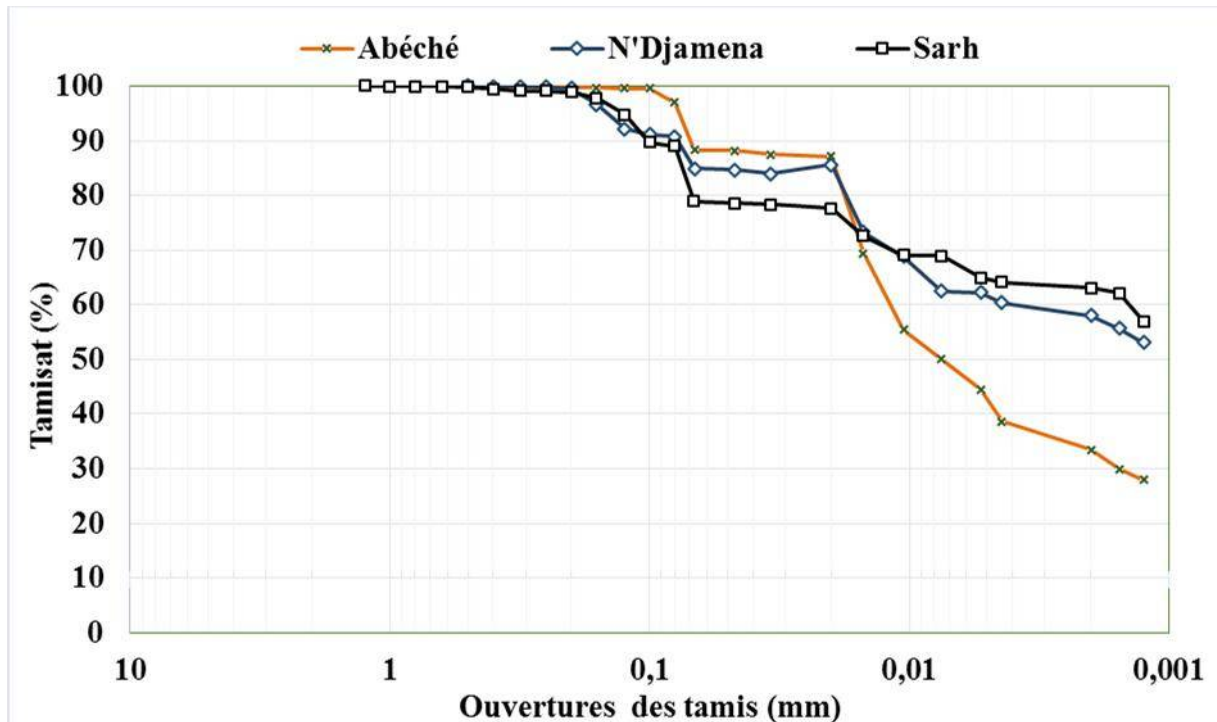


Fig.29 : Récapitulatif des courbes granulométriques et sédimentométrique

Les répartitions granulaires de chaque matériau sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Répartition granulométrique et sédimentométrique des sols (XP P94-011 d'aout 1999)

Nom	Sol à matrice fine				Sol à matrice grossière		
	Argile (%)	Limon (%)			Sable (%)		
		fin	moyen	grossier	Fin	moyen	grossier
Abéché	33,5	4	17,5	32,12	10,38	2,5	
N'Djamena	58	4,5	1	22,1	14	0,4	
Sarh	63	5,9	4,3	4,37	21,28	1,15	

L'analyse granulométrique montre que les sols d'Abéché, de Ndjamen, et de Sarh sont natures fines c'est-à-dire plus de 50 % passe par le tamis de diamètre 0,08mm.

4.1.2 Les essais des limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les résultats découlant des essais par l'appareil de Casagrande sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Résultats des essais des limites d'Atterberg (XP P94-011 d'aout 1999)

	w _l	w _p	I _p	I _c	classification
Abéché	31	18	13	2,28	peu plastique
Ndjamena	67	36	31	2,00	plastique
Sarh	54	27	27	1,9	plastique

4.1.3 Essai de Bleu Méthylène

Tableau 11 : : Résultats des essais des valeurs de bleu de méthylène

Les limites	V	VBS	A _{CB}	
Abéché	85	2,83	8,44	A _{CB} moyenne
Ndjamena	90	3	9,13	A _{CB} moyenne
Sarh	85	2,6	9,2	A _{CB} moyenne

D'après l'analyse granulométrique, les essais des limites d'Atterberg et les essais au bleu de méthylène, les résultats de l'identification donnent :

- Un sol argileux limoneux peu plastique avec une activité moyenne pour l'échantillon d'Abéché ;
- Des sols argileux limoneux plastiques avec une activité moyenne pour les échantillons de Ndjamena et Sarh.

Ces essais nous ont permis d'identifier les différents sols que nous allons les utiliser en les mélangeant en fraction massique avec la bouse de vache ou la gousse de mil pour confectionner.

4.2 Fabrication des briquettes pour les essais mécaniques et thermiques

Nous avons fabriqué des échantillons à base d'argile d'Abéché, Ndjamena et de Sarh puis des échantillons à base de ces argiles mélangées avec la bouse de vache (BV) pour certains et la gousse de mil (GM) pour les autres. Pour les essais mécaniques, plusieurs éprouvettes cylindriques des dimensions h=2D (Norme NF P 18-400) ont été confectionnées. Le choix du

format des moules pour les éprouvettes est conditionné par la dimension D du granulat. Pour les essais thermiques, des échantillons carrés des dimensions $270 \times 270 \times 40 \text{ mm}^3$, $120 \times 120 \times 40 \text{ mm}^3$ et $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$, les mêmes formulations que les échantillons cylindriques ont été fabriqués.

Pour confectionner les échantillons, nous avons utilisé des dispositifs expérimentaux suivants : un bac pour faire les mélange, des moules pour façonner les échantillons, une règle à raser, une balance électronique de précision, une éprouvette graduée pour mesurer l'eau de gâchage ...

Les éprouvettes sont séchées à la température ambiante du laboratoire pendant au moins trois jours à l'abri du rayonnement solaire, puis étuvées à 105°C avant les essais. On rappelle que les éprouvettes cylindriques sont destinées pour les essais mécaniques d'écrasement et les éprouvettes carrées sont fabriquées pour les essais thermiques. Nous avons aussi effectué la cuisson de briques de matériaux (argile plus adjuvants) d'abêché pour étudier leurs comportements après la cuisson.

4.2.1 Méthode de fabrication briquettes crues

Pour la fabrication des éprouvettes, on mesure d'abord à l'aide d'une balance les masses nécessaires d'argile, des adjuvants et de l'eau convenables pour les différentes formulations. On verse une quantité d'argile et d'adjuvant dans un bac puis on malaxe avec une truelle, l'ajout de l'eau se fait progressivement jusqu'à l'obtention d'un mélange presque homogène. On remplit en suite la moule du mélange humidifié avec une petite pression avant de racler l'excès du matériau au niveau de la dimension de la moule grâce à une règle.

Le démoulage se fait avec beaucoup de précaution pour éviter la déformation de l'éprouvette et le séchage est effectué à l'ombre à la température ambiante du laboratoire. Le phénomène des retraits facilite le démoulage dans le cas de l'argile plus plastique.



Photo.4 : Phénomène de retrait dans une moule

4.2.2 Méthode de cuisson des briques

On entrepose les briques crues tout en laissant des foyers de part et d'autre, on badigeonne les parois avec de la terre mélangée à la bouse de vache avant d'allumer les foyers qui se trouvent en bas du four (voir photo 1). Les combustibles utilisés sont les noix de palmier doum et la bouse vache sèche. La cuisson se fait progressivement en contrôlant la teneur de feu avec l'ajout des combustibles jusqu'à 72h, généralement la température de cuisson se situe entre 400 et 600°C.



Photo.5 : Briques cuites carrées

Pendant la cuisson, l'adjuvant qui se trouve dans le mélange du matériau se consume et laisse des pores. Après la cuisson, les briques prennent la couleur rouge et deviennent plus légères.

4.3 Formulations des éprouvettes cylindriques pour les essais mécaniques

Les formulations des briquettes cylindriques pour les essais en compression mécaniques sont représentées dans les tableaux 11 à 14, le mélange se fait en fraction massique.

Tableau 12 : Eprouvettes cylindriques des matériaux d'Abéché : EAA

Echantillons	% Argile	% GM	% BV	D (mm)	h (mm)	Nombre
EAA100%	100	0	0	72,5	145	4
EAA2%GM	98	2	0	74	148	4
EAA4%GM	96	4	0	76	152	4
EAA6%GM	94	6	0	72,5	145	4
EAA8%GM	92	8	0	76	152	4
EAA2%BV	98	0	2	74	148	4
EAA4%BV	96	0	4	74	148	4
EAA6%BV	94	0	6	76	152	4
EAA8%BV	92	0	8	73	146	4

Tableau 13 : Eprouvettes cylindriques des matériaux de N'Djamena : EAN

Echantillons	% Argile	% BV	% GM	D (mm)	h (mm)	Nombre
EAN100%	100	0	0	63	126	4
EAN2%BV	98	2	0	64	128	2
EAN4%BV	96	4	0	65	130	4
EAN6%BV	94	6	0	65	130	4
EAN8%BV	92	8	0	64	128	4
EAN2%GM	98	0	2	64	128	2
EAN4%GM	96	0	4	64	128	4
EAN6%GM	94	0	6	63	126	4
EAN8%GM	92	0	8	65	130	4

Tableau 14 : Eprouvettes cylindriques des matériaux Sarh : EAS

Echantillons	% Argile	% GM	% BV	D (mm)	h (mm)	Nombre
EAS100%	100	0	0	62	124	3
EAS2%GM	98	2	0	65	130	3
EAS6%GM	94	6	0	65	130	3
EAS8%GM	92	8	0	65	130	3
EAS2%BV	98	0	2	65	130	3
EAS6%BV	94	0	6	65	130	3
EAS8%BV	92	0	8	65	130	3

Tableau 15 : Eprouvette cylindriques des matériaux d'Abéché (avant cuisson) : EAAC

Echantillons	% Argile	% GM	% BV	D (mm)	h (mm)	Nombre
EAAC100%	100	0	0	63	126	3
EAAC2%GM	98	2	0	63	126	2
EAAC4%GM	96	4	0	65	130	2
EAAC6%GM	94	6	0	63	126	2
EAAC8%GM	92	8	0	63	126	3
EAAC2%BV	98	0	2	63	126	2
EAAC4%BV	96	0	4	63	126	3
EAAC6%BV	94	0	6	64	128	3
EAAC8%BV	92	0	8	64	128	3

4.4 Formulations des éprouvettes carrées pour les essais thermiques

Des éprouvettes des différentes dimensions ont été confectionnées pour les essais thermiques.

Les éprouvettes des dimensions 270 x 270 x 40mm³ ; 100 x 100 x 40mm³, et 120 x 120 x 40 mm³, sont représentés dans les tableaux 15 à 18 :

Tableau 16 : Éprouvettes carrées matériaux d'Abéché

Echantillons	% GM	% BV	Dimensions (mm ³)	Nombre
EAA100%	0	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	16
EAA2%GM	2	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA6%GM	6	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA8%GM	8	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA2%BV	0	2	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA4%BV	0	4	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA6%BV	0	6	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAA8%BV	0	8	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12

Tableau 17 : Eprouvettes carrées de Ndjamena (EAN)

Echantillons	% GM	% BV	Dimensions (mm)	Nombre
EAN100%	0	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	14
EAN2%GM	2	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAN6%GM	6	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAN8%GM	8	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAN2%BV	0	2	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAN6%BV	0	6	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAN8%BV	0	8	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12

Tableau 18 : Eprouvettes carrées des matériaux de Sarh

Références échantillons	% GM	% BV	Dimensions (mm ³)	Nombre
EAS100%	0	0	120 x120 x 40	4
EAS2%GM	2	0	120 x120 x 40	4
EAS6%GM	6	0	120 x120 x 40	4
EAS8%GM	8	0	120 x120 x 40	4
EAS2%BV	0	2	120 x120 x 40	4
EAS4%BV	0	4	120 x120 x 40	4
EAS6%BV	0	6	120 x120 x 40	4
EAS8%BV	0	8	120 x120 x 40	4

Tableau 19 : Eprouvettes carrées des matériaux d'Abéché (formulation avant cuisson)

Echantillons	% GM	% BV	Dimensions (mm ³)	Nombre
EAAC100%	0	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	14
EAAC2%GM	2	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	6
EAAC4%GM	4	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC6%GM	6	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC8%GM	8	0	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC2%BV	0	2	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC4%BV	0	4	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC6%BV	0	6	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12
EAAC8%BV	0	8	270 x 270 x 40 / 100 x 100 x 40 / 120 x 120 x 40	12



a)



b)

Photo.6 : Briques carrées pour les essais thermiques (a) Briques cylindriques pour les essais mécaniques (b)

Dans ce chapitre après identification des sols plusieurs formulations des différents matériaux ont été effectuées. Les éprouvettes de dimensions variées sont fabriquées pour les caractérisations mécaniques et thermiques.

Le choix de s'arrêter à 8% de mélange avec l'argile est justifié par le fait qu'à partir de ce mélange l'incorporation est difficile sans un compactage et que certaines formulations ne tiennent plus on observe le phénomène de frittage.

4.5 Evolution des masses volumiques en fonction des adjuvants

➤ Variations de la masse volumique avec l'ajout de la Bouse de vache

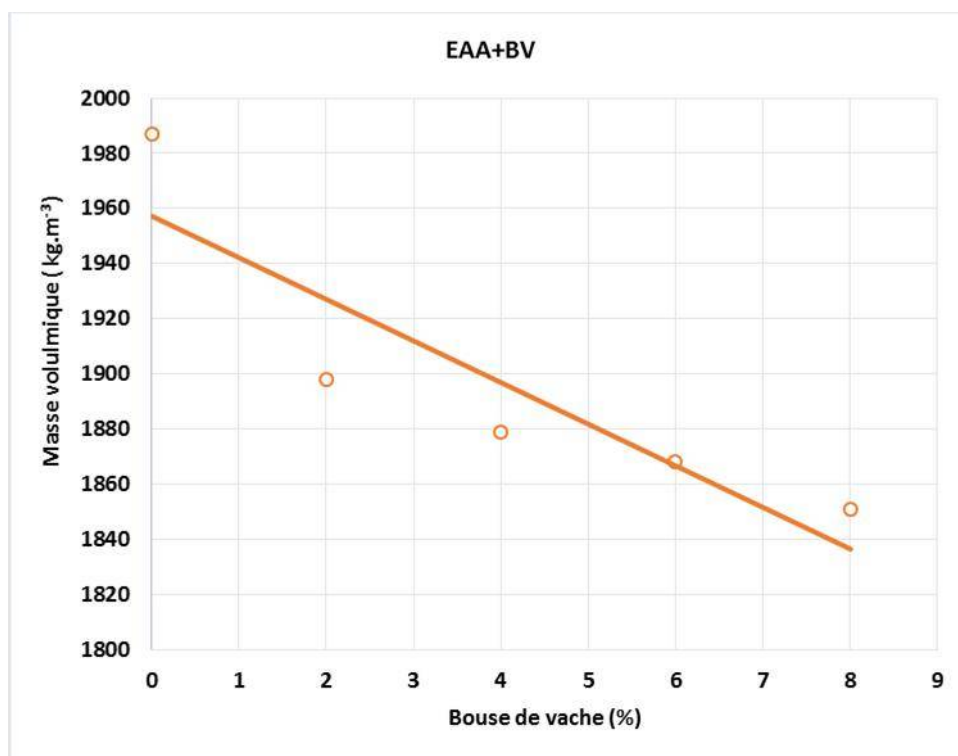


Fig.30 : Evolution de la masse volumique en fonction de l'ajout de la BV cas de EAA

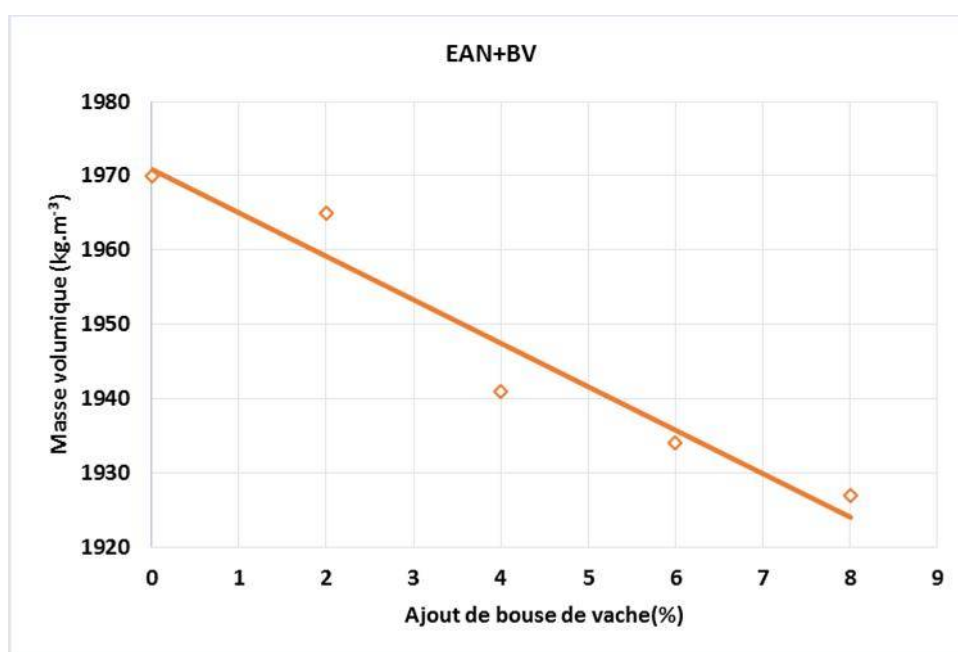


Fig.31 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas de EAN

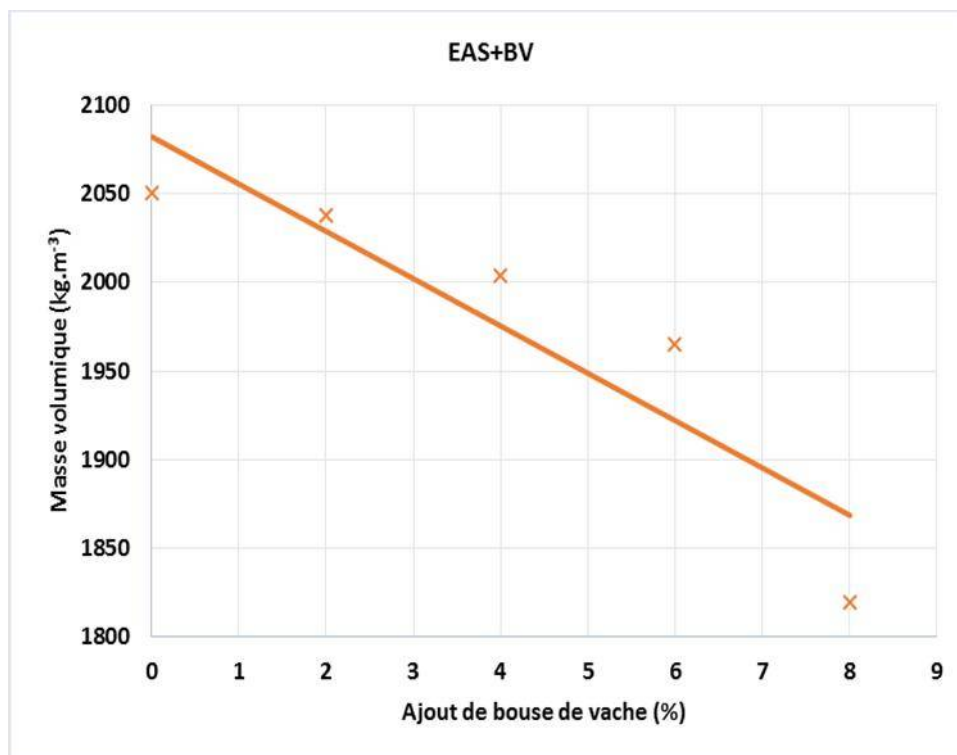


Fig.32 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas EAS

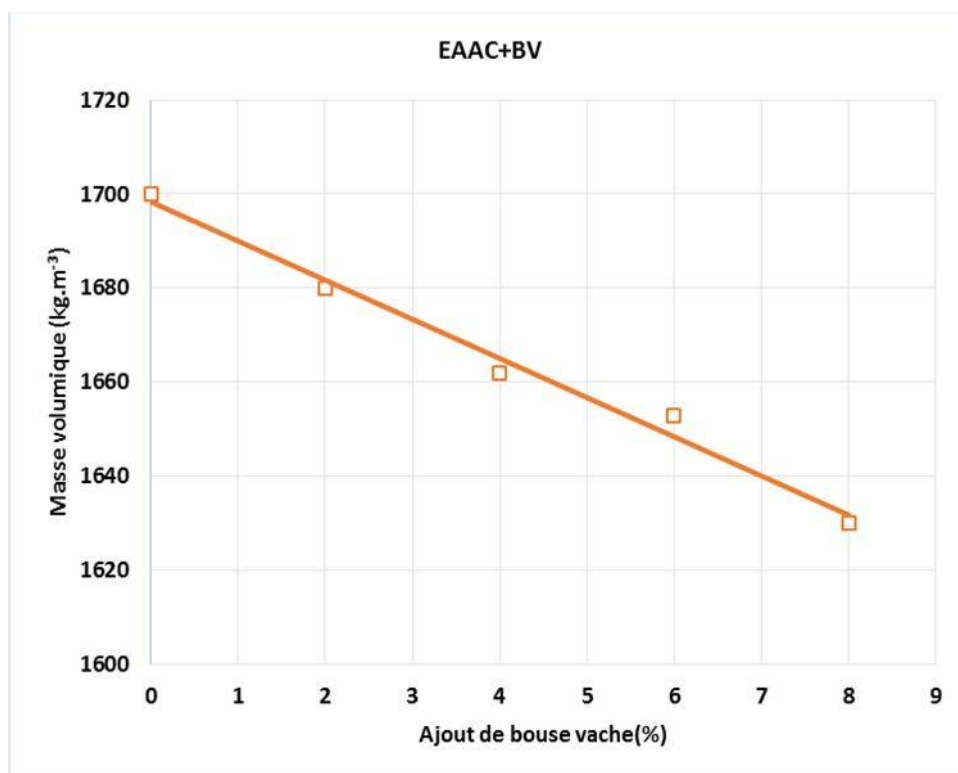


Fig.33 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la BV cas de EAAC

➤ **Variations de la masse volumique en fonction de l'ajout de la gousse de mil**

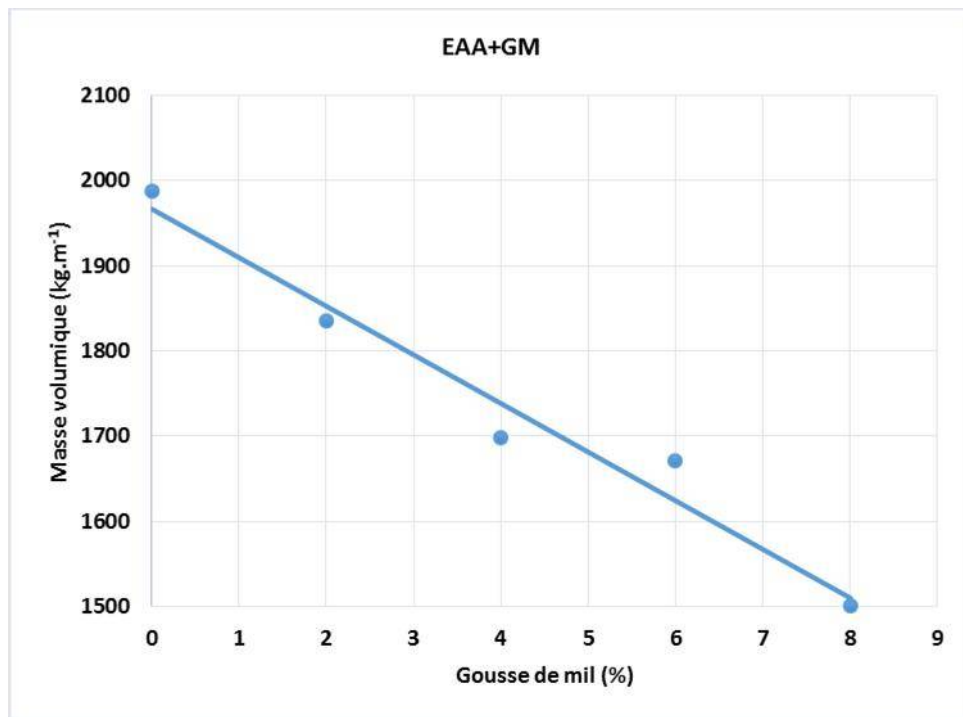


Fig.34 : Evolution de la masse volumique en fonction de l'ajout de GM cas EAA

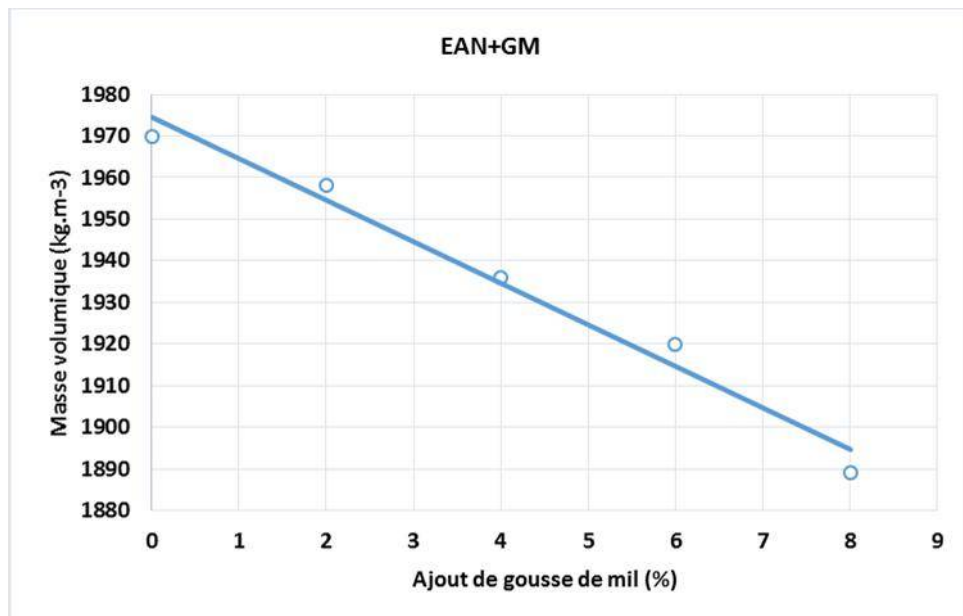


Fig.35 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas EAN

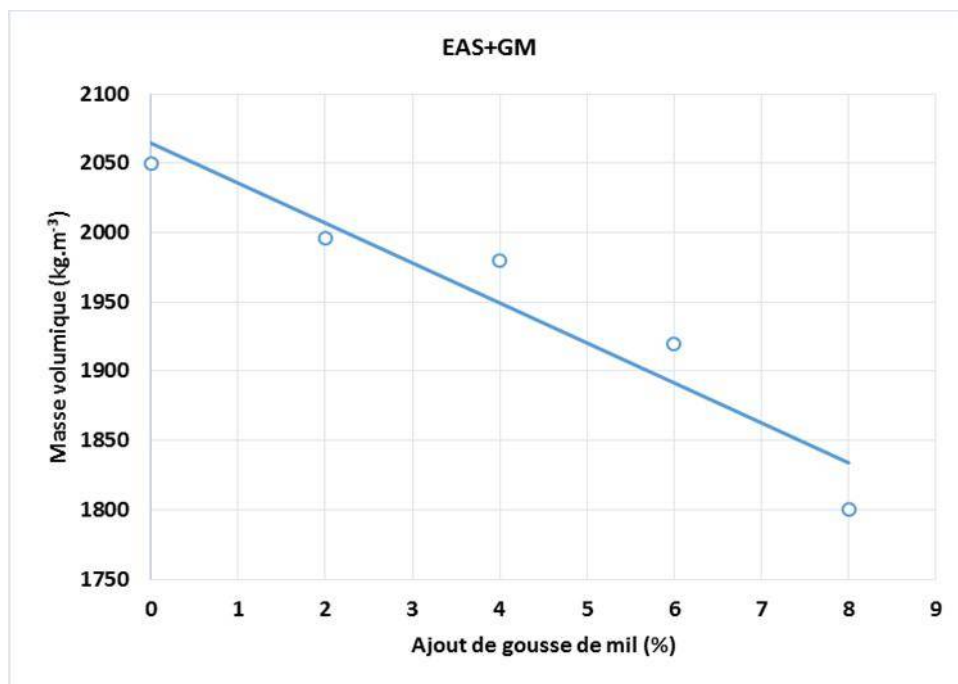


Fig.36 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas EAS

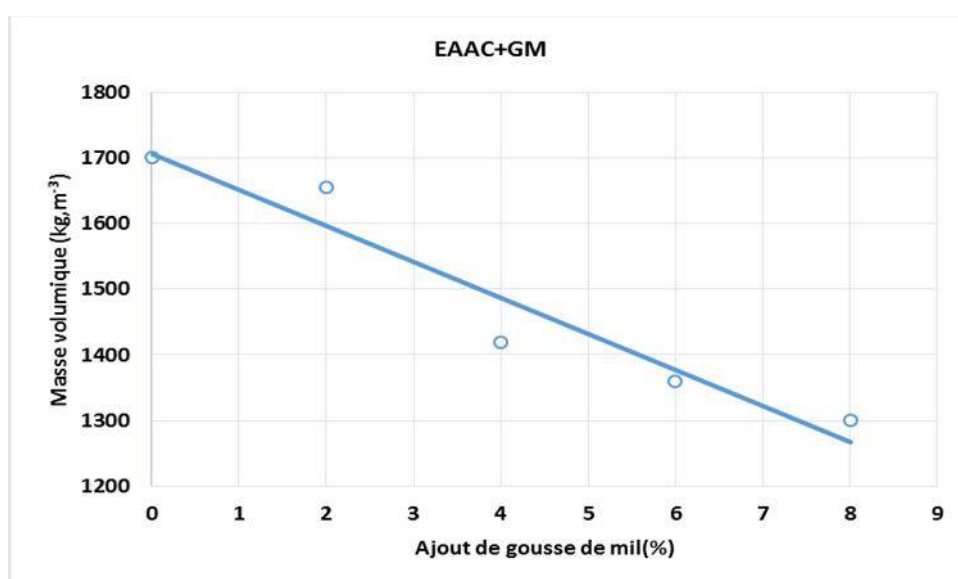


Fig.37 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas de EAAC

La bouse de vache et la gousse du mil sont des matériaux de faible masse volumique, la masse volumique du mélange diminue avec l'augmentation de la fraction massique de la bouse de vache ou de la gousse de mil. Ce qui permet d'obtenir un matériau de plus en plus allégé.

Pendant la cuisson la bouse de vache et la gousse de mil contenues dans les mélanges de EAA se consomment et laissent des poches d'air dans la structure du matériau, c'est pourquoi la masse volumique de l'échantillon EAA diminue après la cuisson.

Chapitre 5 : Résultats des études expérimentales

Introduction

Dans cette partie, il serait question de faire la caractérisation mécanique et thermique de nos matériaux confectionnés avec l'argile d'Abéché, de N'Djamena et de Sarh mélangées avec la bouse de vache sèche ou la gousse de mil.

Nous rappelons que la presse hydraulique a servi pour déterminer la résistance à la force maximale de compression qui un facteur pour la stabilisation mécanique et la dureté d'une structure bâtis essentiels pour une sécurité mécanique. En ce qui concerne les essais thermiques, la méthode des « boîtes » a servi pour la détermination de la conductivité thermique puis la méthode flash pour l'estimation de la diffusivité thermique de nos matériaux. Dans ce chapitre, après avoir déterminé les paramètres mécaniques et thermiques citées ci haut, une étude thermo-hydrigue et une étude comparative de caractéristiques thermo-mécaniques sont effectuées.

5.1 Caractérisation mécanique

Pour déterminer la résistance à la compression des éprouvettes, nous avons utilisé une pression hydraulique de marque STRASSENTEST. Les briquettes, après étuvage, sont placées au centre des plateaux de la machine. La charge se fait de façon continue à une vitesse régulière par un effort de compression jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La machine fonctionnant de manière automatique, la lecture des résultats se fait grâce aux deux aiguilles du cadran. Une aiguille indique la force maximale d'écrasement et une autre revient à zéro lors que l'effort maximal est atteint.



Photo.7 : Presse universelle pour les essais à la compression

5.1.1 Résultats des éprouvettes de matériau mélange avec la bouse de vache

- **Matériaux d'Abéché**

Tableau 20 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile Abéché

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S _o (mm ²)	Charge Fc (N)	Résistance de compression Rc (MPa)
EAA100%	1966,3	4126	8500	2,06
EAA2% BV	1846,0	4298,66	9000	2,09
EAA4% BV	1841,2	4298,66	11000	2,56
EAA6% BV	1673,6	4534,16	12000	2,65
EAA8% BV	1644,7	4183,265	11000	2,62

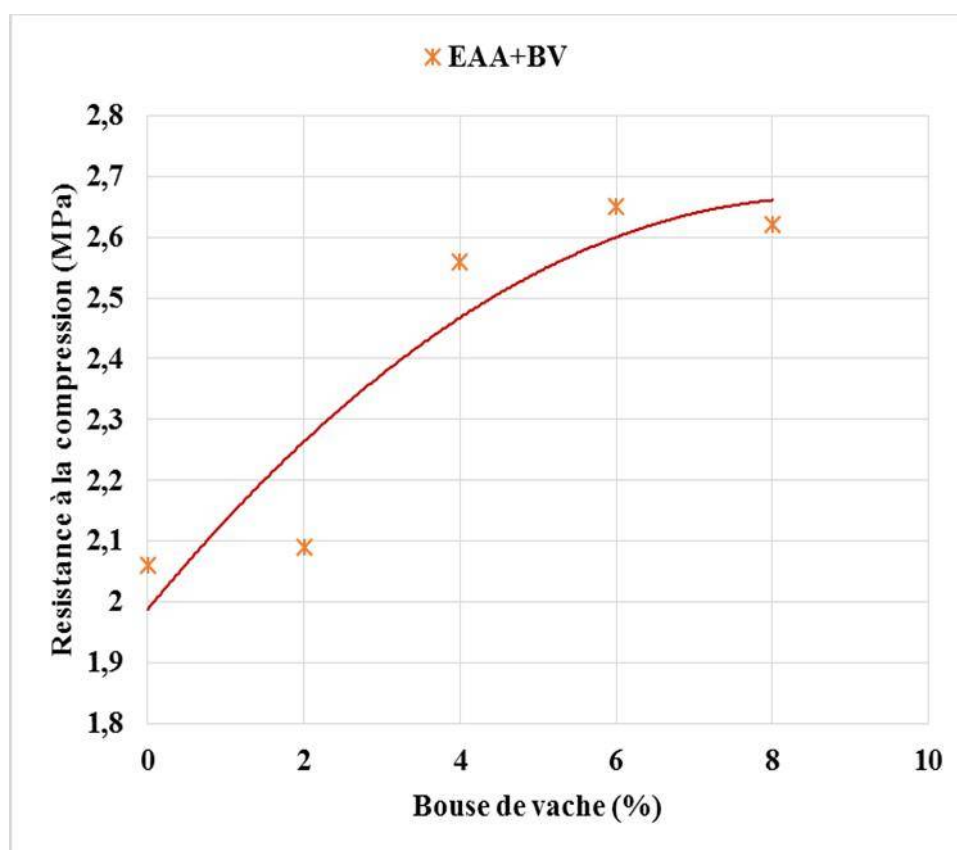


Fig.38 : Evolution de la résistance mécanique sur des éprouvette de la terre d'Abéché avec la bouse de vache.

La résistance mécanique s'augmente avec l'ajout de la bouse de vache jusqu'à un pic au tour de 6% avant de faire une chute.

▪ **Matériaux de Ndjamena**

Tableau 21 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Ndjamena

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section (mm ²)	Force maximale F _c (N)	Résistance de compression Rc (MPa)
EAN100%	1985,9	3115,665	6000	1,93
EAN2% BV	1894	3215,36	6500	2,021
EAN4% BV	1828,7	3215,36	7000	2,18
EAN6% BV	1676	3316,625	8500	2,56
EAN8% BV	1604	3215,36	7000	2,18

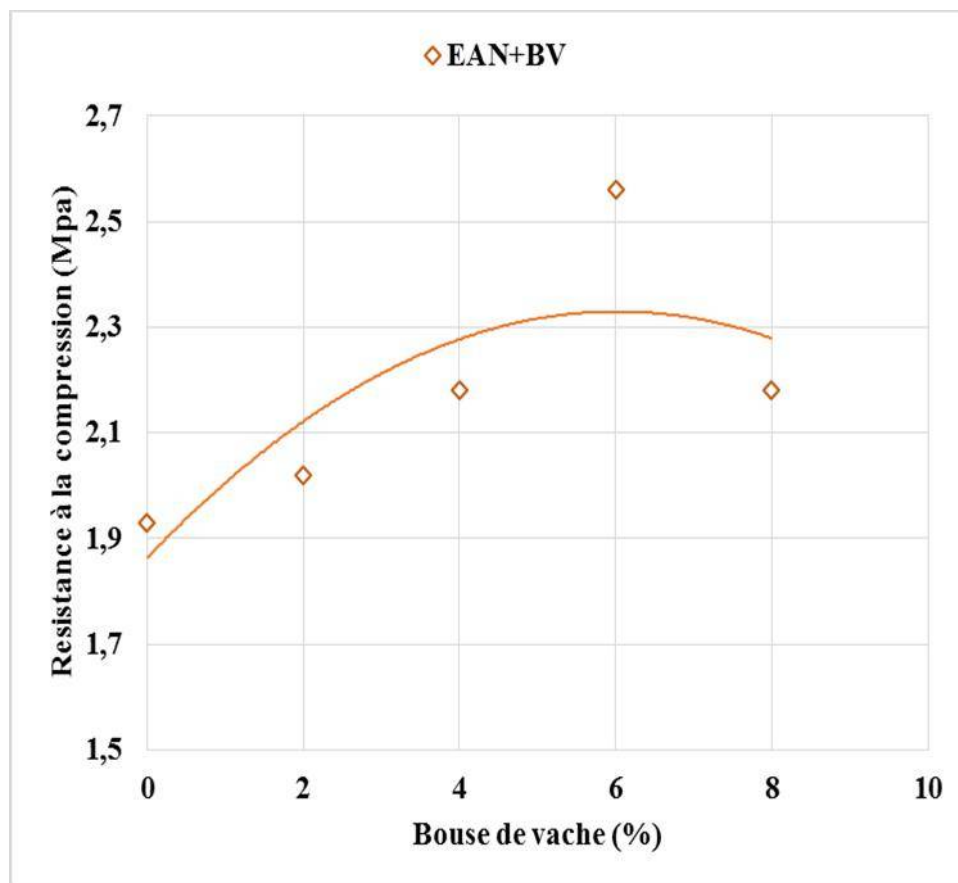


Fig.39 : Variation de la résistance mécanique avec l'augmentation de la bouse de vache.

On note que pour les matériaux de Ndjamena, la résistance à la compression augmente jusqu'à un pic autour de 6% avant de faire une régression.

- **Matériaux de Sarh**

Tableau 22 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Sarh

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S ₀ (mm ²)	Charge F _c (N)	Résistance de compression R _c (MPa)
EAS100%	2182,4	3017,5	5000	1,66
EAS2%BV	1891,6	3316,6	5500	1,65
EAS4%BV	1866,1	3316,6	6000	1,81
EAS6% BV	1840,6	3316,6	4500	1,66
EAS8% BV	1747,9	3316,6	5000	1,51

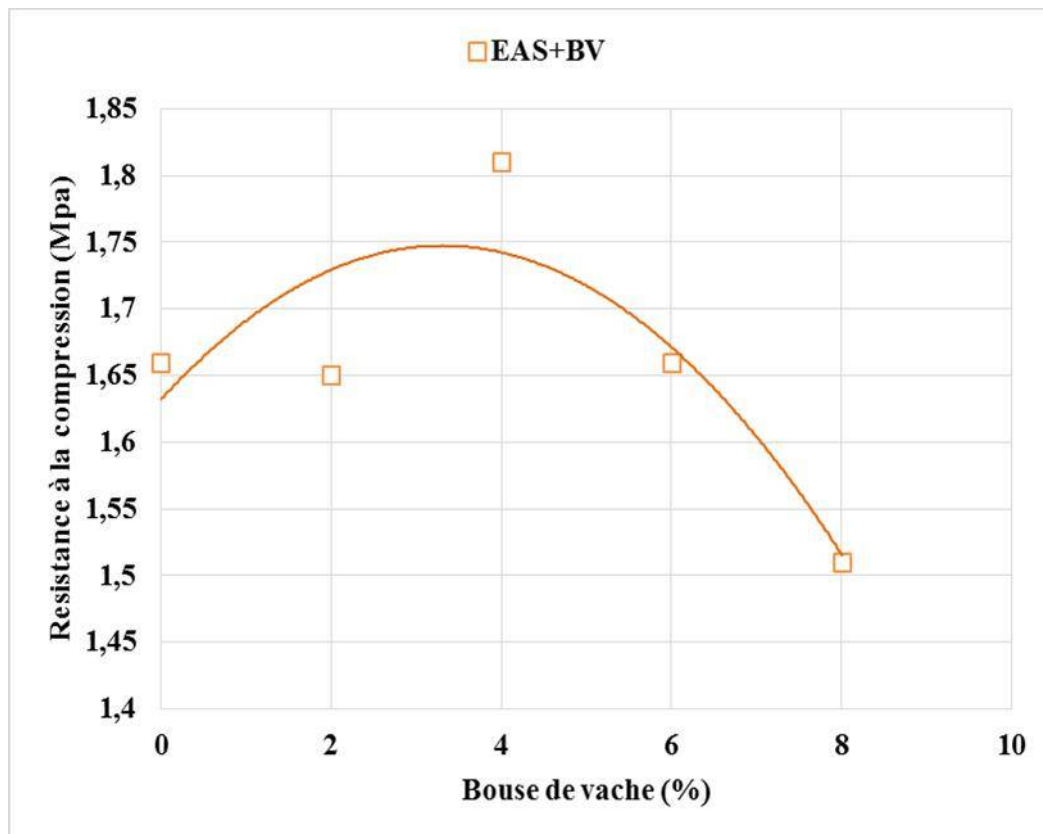


Fig.40 : Variation de la résistance à la compression avec l'ajout de la BV cas de EAS

Pour les échantillons EAS+BV, on remarque une légère diminution de la résistance à la compression jusqu'à 2% du mélange puis une augmentation jusqu'à 4% de mélange avant d'effectuer une chute de la résistance.

- **Argile Cuite d'Abéché (EAA après cuisson)**

Tableau 23 : Résultats des essais mécaniques échantillons briques cuite Abéché

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S _o (mm ²)	Charge F _c (N)	Résistance de compression R _c (MPa)
EAAC100%	1884,0	3115,7	15000	4,81
EAACA2%BV	1802	3115,7	17000	5,45
EAAC4%BV	1787,3	3115,7	20000	6,41
EAAC6%BV	1853,8	3017,54	20000	6,22
EAAC8%BV	1641,7	3215,36	25000	7,77

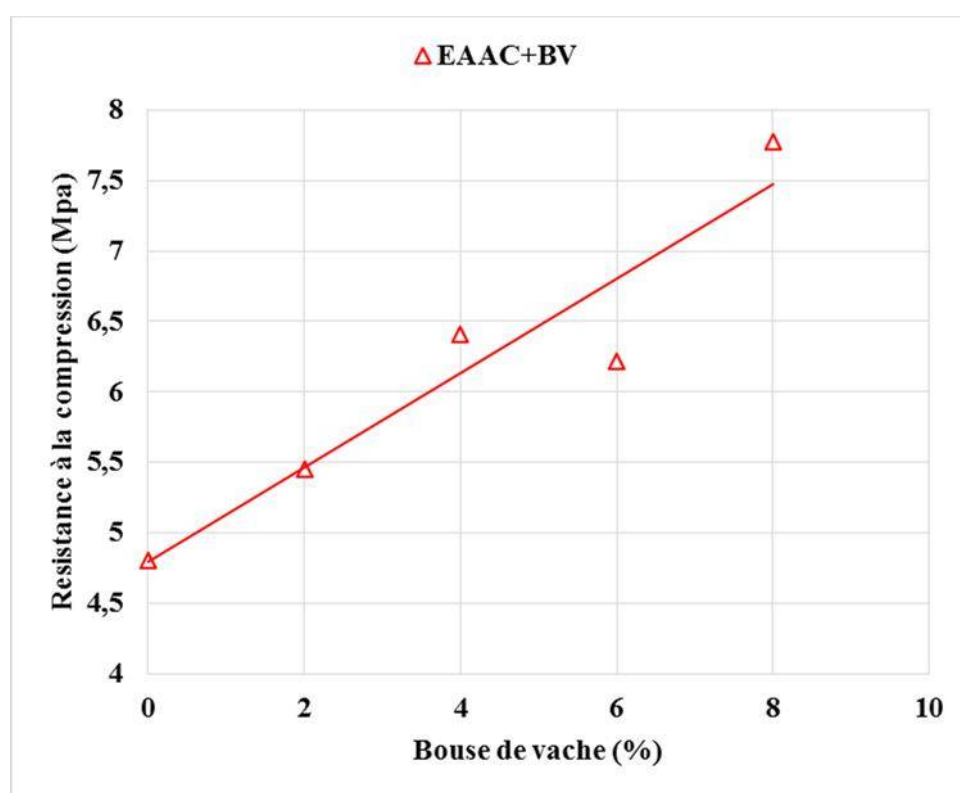


Fig.41 : Evolution de la résistance mécanique des briques cuites avec la bouse de vache

On constate qu'une augmentation progressive de la résistance mécanique avec l'augmentation de la bouse vache, par contre on remarque un léger déclive au tour de 6% avant de reprendre une augmentation jusqu' 8%.

D'une manière générale, la bouse de vache contribue à l'augmentation de la résistance à la compression de nos échantillons. On peut constater que la bouse de vache a permis de consolider les échantillons selon l'augmentation en fractions massiques.

5.1.2 Résultats des éprouvettes de mélange de la terre avec la gousse de mil

▪ Matériaux d'abéché et GM

Tableau 24 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile Abéché

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section So (mm ²)	Charge Fc (N)	Résistance de compression Rc (Mpa)
EAA100%	1993,7	4126,15	8500	2,06
EAA2%GM	1767,4	4298,66	8000	1,86
EAA4%GM	1731,6	4534,16	7400	1,63
EAA 6% GM	1810,7	4126,44	6500	1,59
EAA8%GM	1515,5	4534,16	6000	1,32

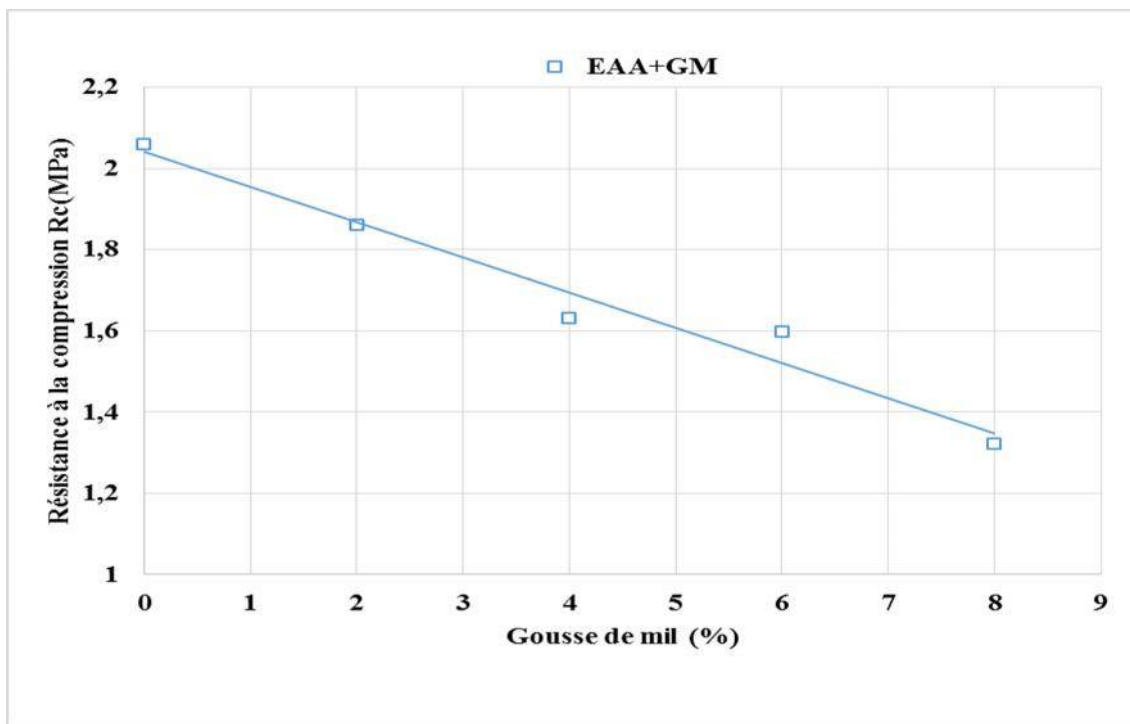


Fig.42 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de la gousse de mil

On note pour les échantillons confectionnés avec les matériaux d'Abéché une régression de la résistance mécanique avec l'ajout en fractions massiques de la gousse de mil.

▪ Matériaux de Ndjamena et GM

Tableau 25 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Ndjamen

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S ₀ (mm ²)	Charge F _c (N)	Résistance de compression R _c (Mpa)
EAN100%	2001,8	3316,625	5000	1,926
EAN2% GM	1886	3215,36	6000	1,86
EAN 4% GM	1870,0	3316,625	6500	1,960
EAN6% GM	1761,8	3215,36	6000	1,866
EAN8% GM	1594,9	3316,625	5000	1,508

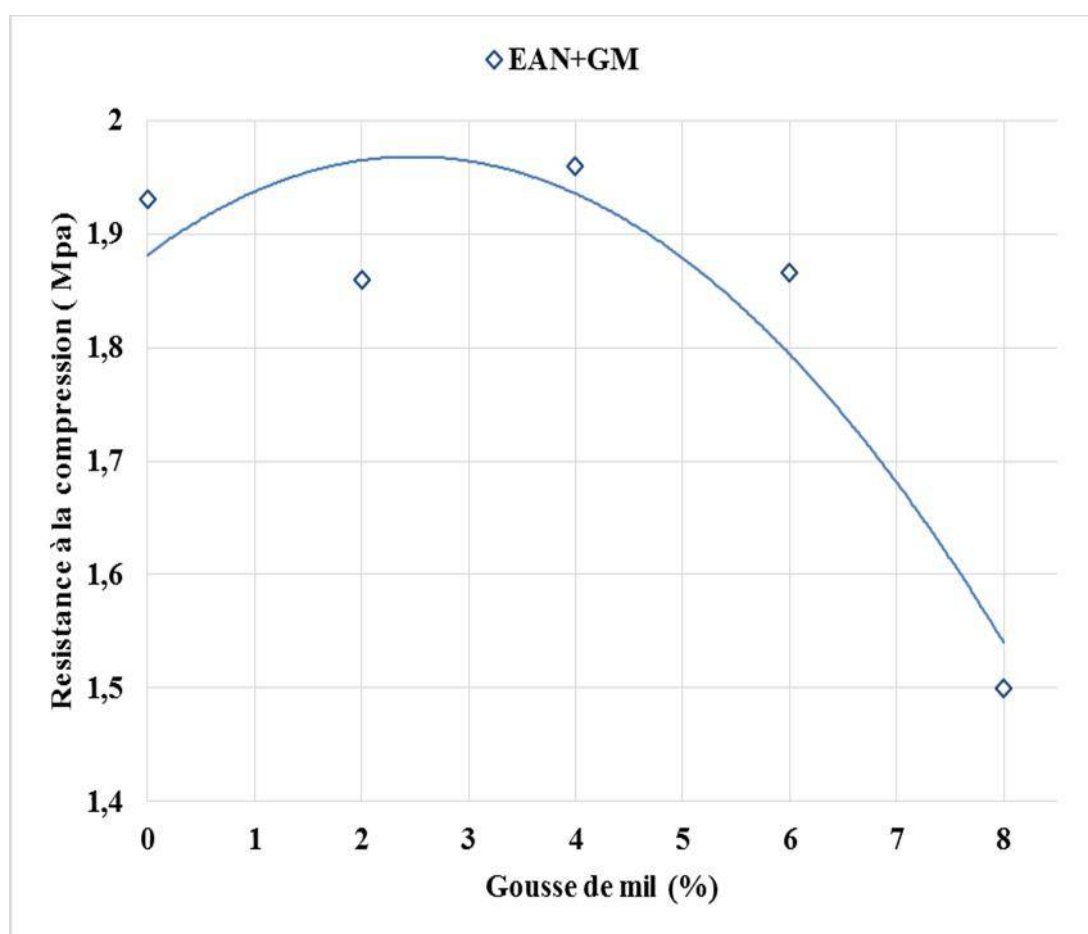


Fig.43 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GM

Pour les échantillons fabriqués avec l'argile de Ndjamen mélangée avec la gousse de mil on remarque une réduction de la résistance à la compression à 2% du mélange de gousse de mil, puis une augmentation jusqu'à un pic à 4% du mélange avant de faire une rechute.

▪ Matériaux de Sarh et GM

Tableau 26 : Résultats des essais mécaniques échantillons argile de Sarh

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S ₀ (mm ²)	Charge F _c (N)	Résistance de compression R _c (Mpa)
EAS100%	2182,4	3017,5	5000	1,66
EAS 2%GM	1866,1	3316,6	4500	1,36
EAS4% GM	1849,9	3316,6	3000	0,90
EAS6% GM	1743,2	3316,6	2800	0,84
EAS8% GM	1694,6	3316,6	2700	0,81

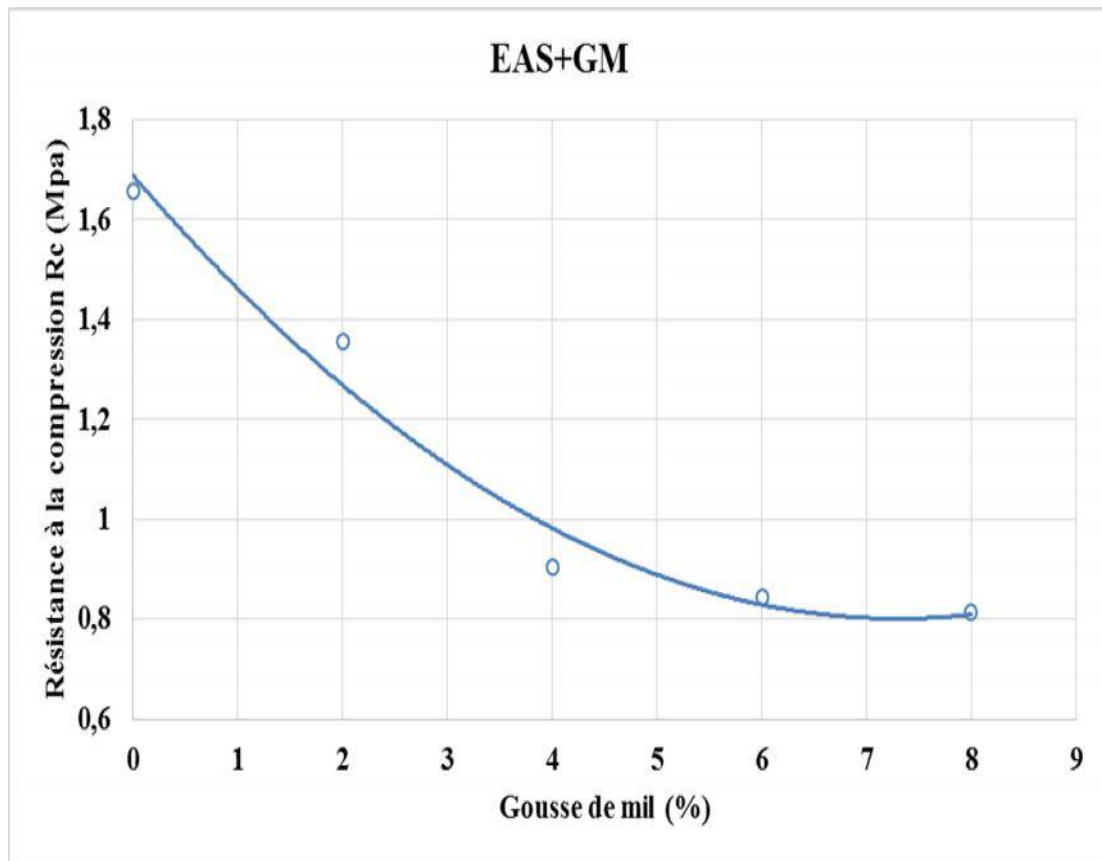


Fig.44 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de gousse de mil

Lorsqu'on mélange l'argile de Sarh avec la gousse de mil, la résistance à la compression diminue progressivement.

▪ Matériaux d'Abéché et GM après cuisson

Tableau 27 : Résultats des essais mécaniques échantillons briques cuites Abéché

Echantillons	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Section S ₀ (mm ²)	Charge F _c (N)	Résistance de compression R _c (Mpa)
EAAC100%	1884,0	3115,7	15000	4,81
EAAC2%GM	1825,5	3115,7	12500	4,01
EAAC4%GM	1764,1	3316,6	27000	8,14
EAAC6%GM	1731,3	3115,7	22500	7,22
EAAC8%GM	1677,8	3115,7	15000	4,81

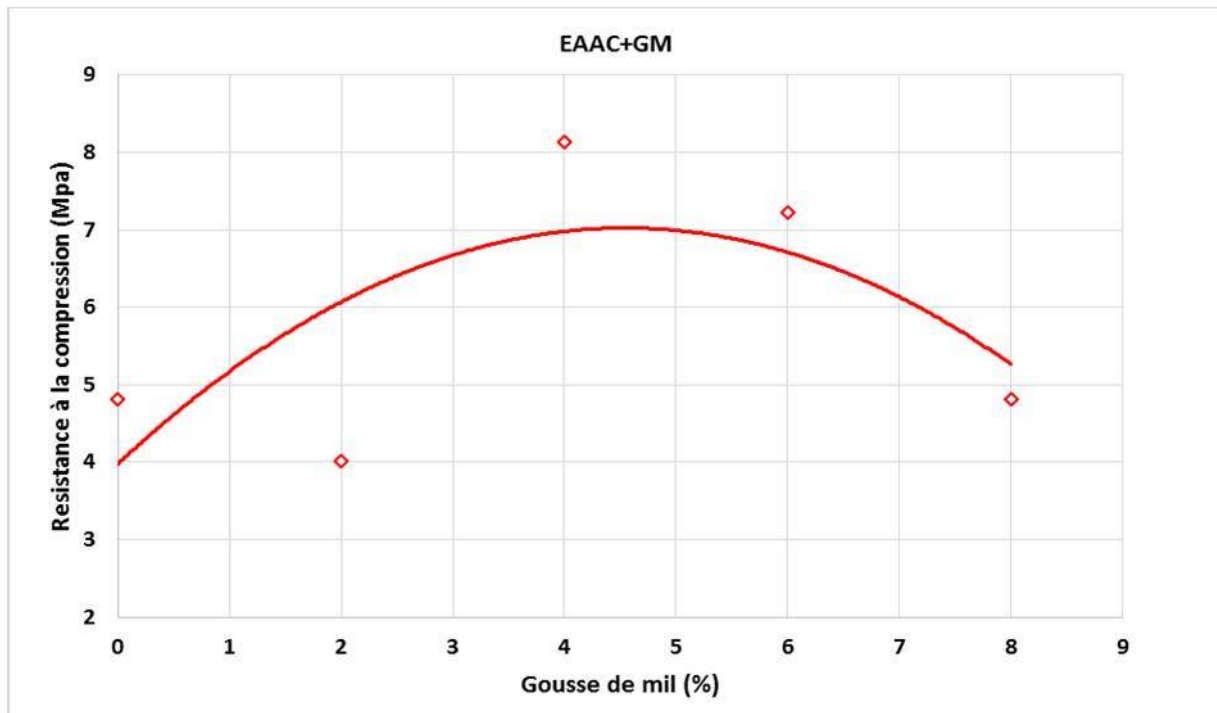


Fig.45 : Evolution de la résistance mécanique avec l'ajout de gousse de mil cas de EAAC

Après la cuisson du mélange de l'argile d'Abéché avec la gousse de mil, on remarque une réduction de la résistance mécanique à 2% puis une augmentation jusqu'à 4% du mélange avant de faire une rechute. Par ailleurs on note une nette amélioration de la résistance mécanique par rapport aux échantillons d'Abéché crus.

D'après les résultats des essais mécaniques sur les matériaux avec le mélange d'argile et la gousse de mil, on peut dire que la résistance mécanique est en régression avec l'ajout de la gousse de mil sauf pour quelles formulations des matériaux de Ndjamena et les matériaux d'Abéché à l'état cuite.

5.2 Caractérisation thermique

Pour mieux appréhender les différentes méthodes de caractérisation thermique, nous avons utilisé la méthode des boîtes pour déterminer la conductivité thermique et la méthode flash pour la diffusivité thermique. Connaissant la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la masse volumique, les autres caractéristiques peuvent être déduites par les relations 66 et 68. La cellule EI700 de la méthode des boîtes (photo 8) a servi pour déterminer les conductivités thermiques des différents échantillons.



Photo.8 : Cellule EI 700

5.2.1 Les Caractéristiques thermiques pour les matériaux avec bouse de vache

➤ Conductivité thermique des matériaux avec la bouse de vache

Tableau 28 : Variation de la conductivité thermique avec l'ajout de la bouse de vache

Bouse de vache (%)	Références échantillons / conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	0,51	0,62	0,88	0,564
2	0,45	0,58	0,78	0,53
4	0,43	0,52	0,66	0,5
6	0,41	0,44	0,5	0,42
8	0,39	0,37	0,36	0,32

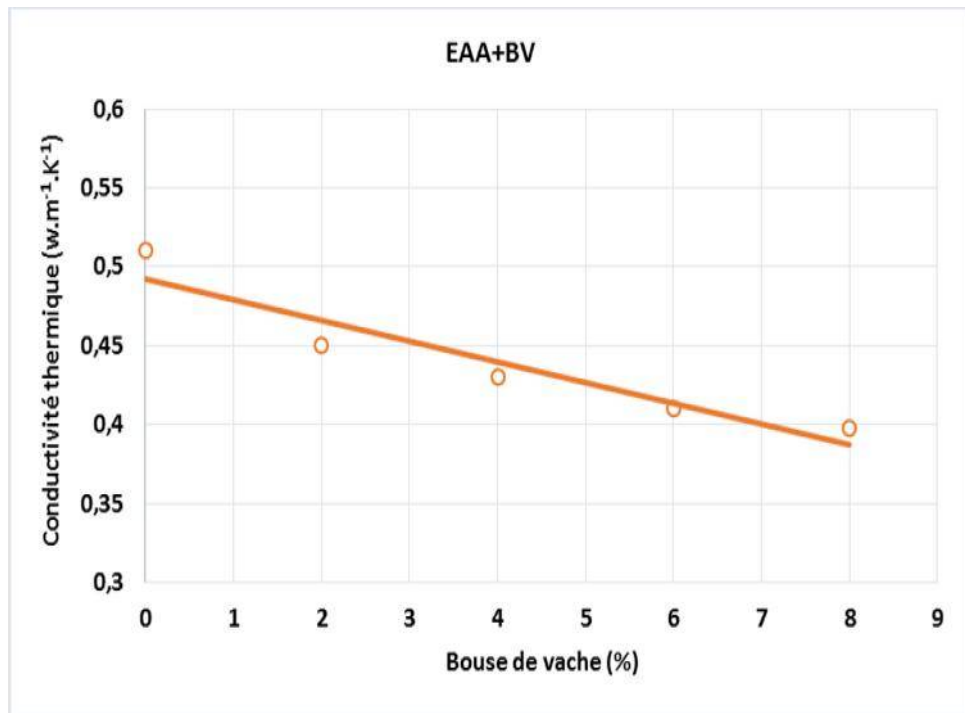


Fig.46 : Evolution de la conductivité en fonction de l'ajout de la BV cas de EAAC

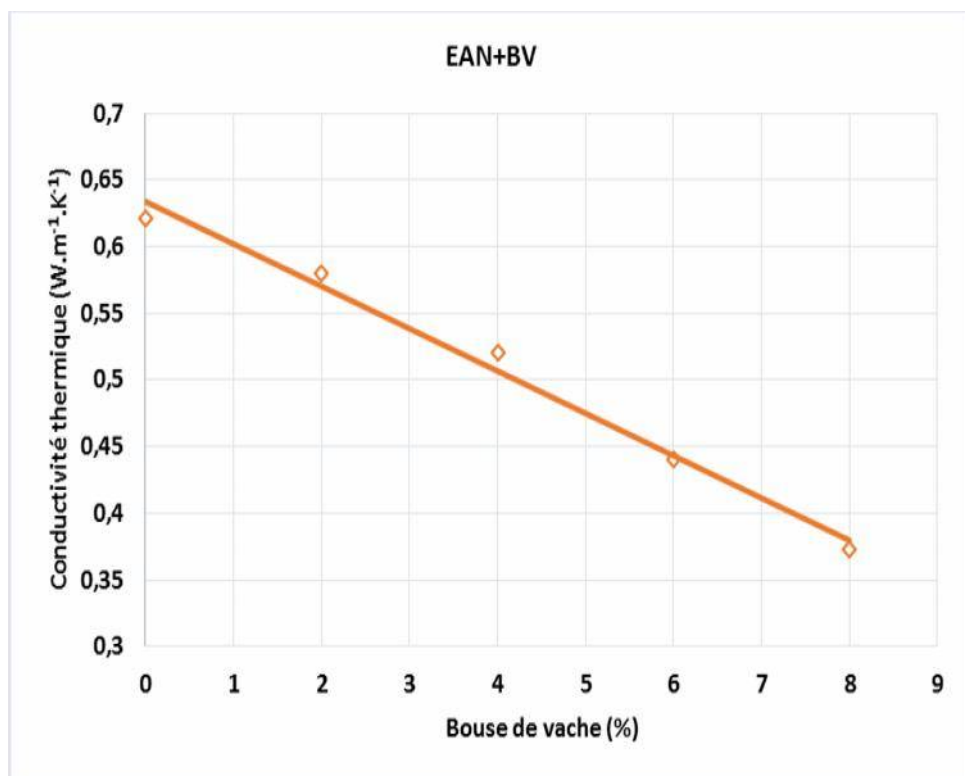


Fig.47 : Allure de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAN

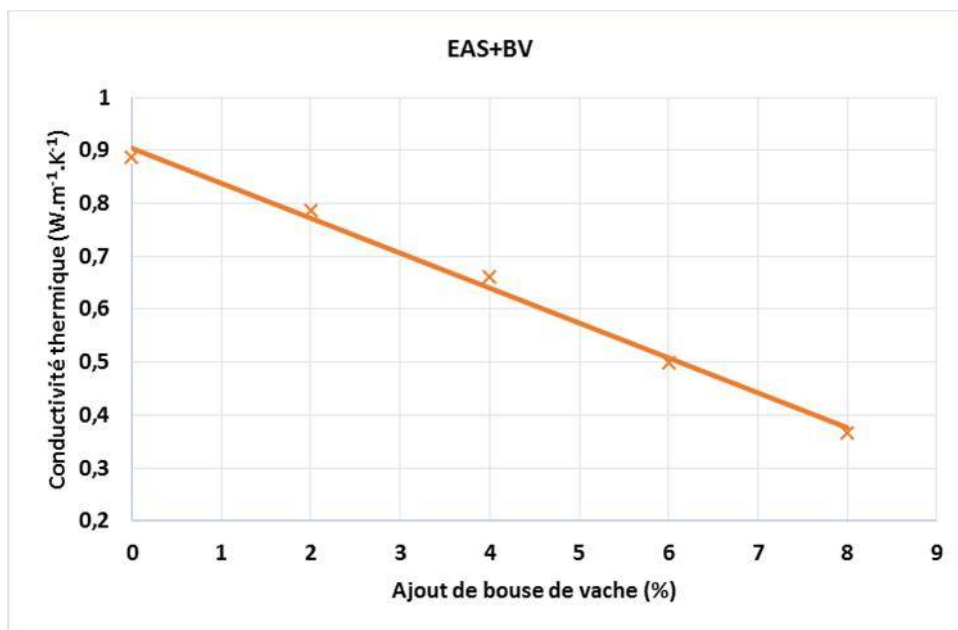


Fig.48 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAS

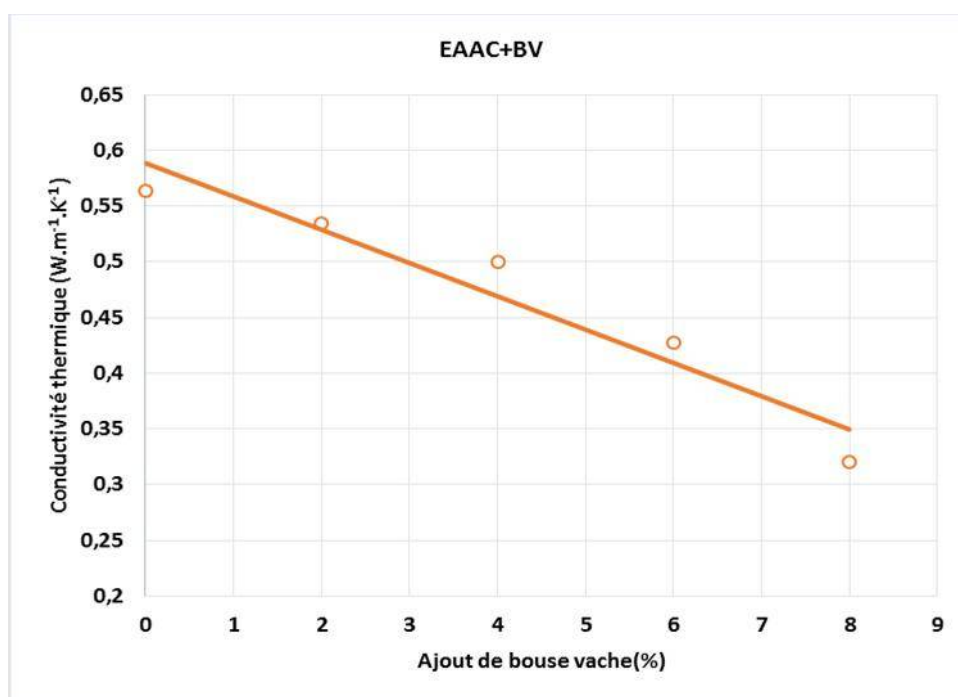


Fig.49 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de la BV cas de EAAC

Pour tous les matériaux, on note une diminution de leurs conductivités thermiques avec l'ajout de la bouse de vache. La bouse de vache est favorable à la réduction de la conductivité thermique.

➤ **Conductivité thermique en fonction de la masse volumique**

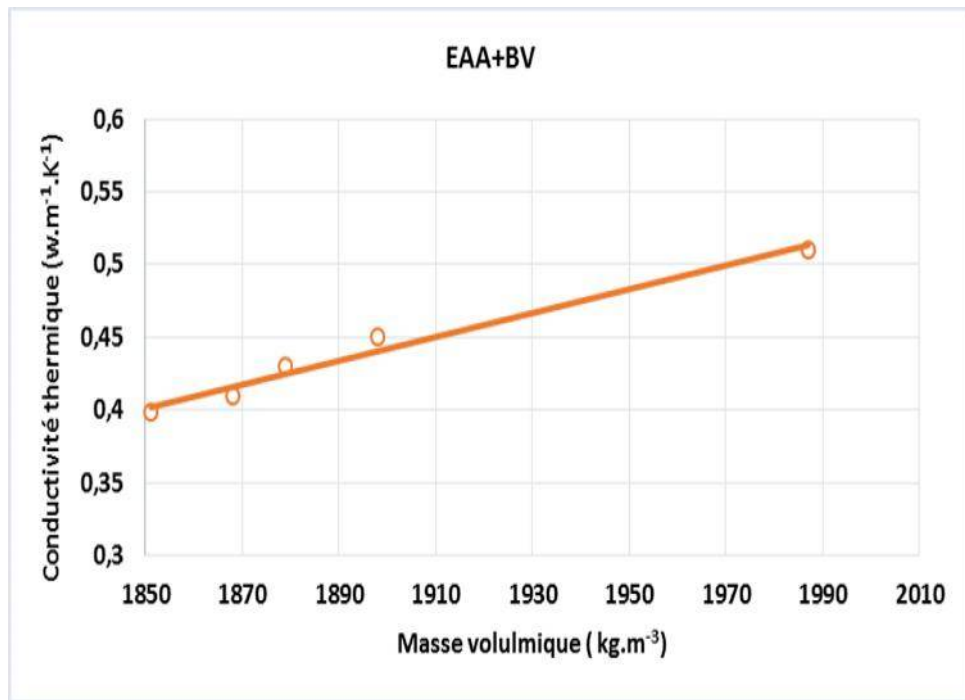


Fig.50 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des échantillons avec BV cas EAA

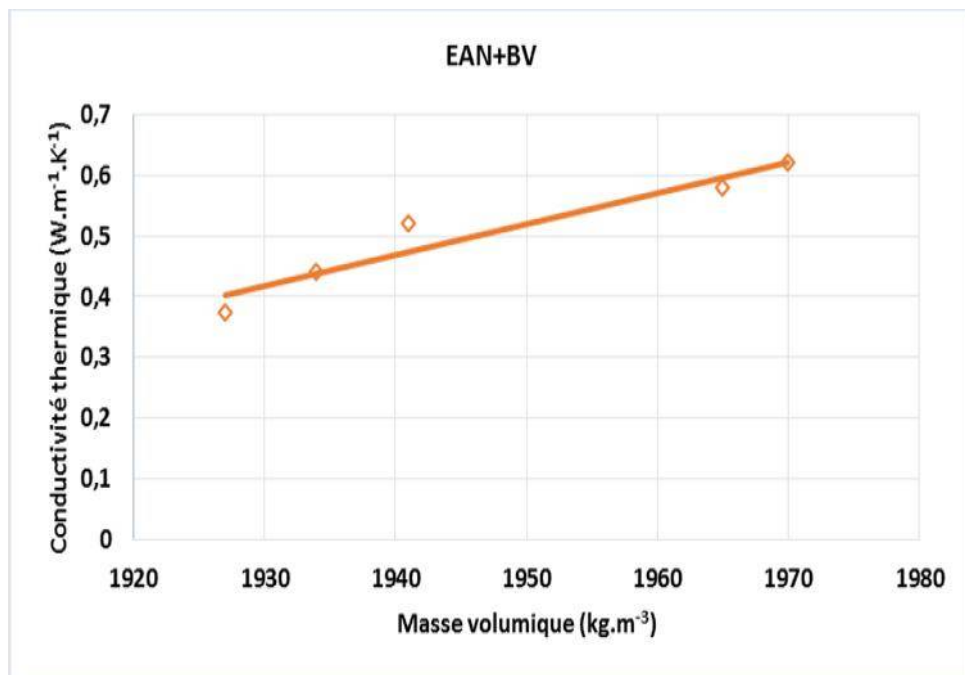


Fig.51 : Allure de la conductivité thermique avec la masse volumique le cas de EAN

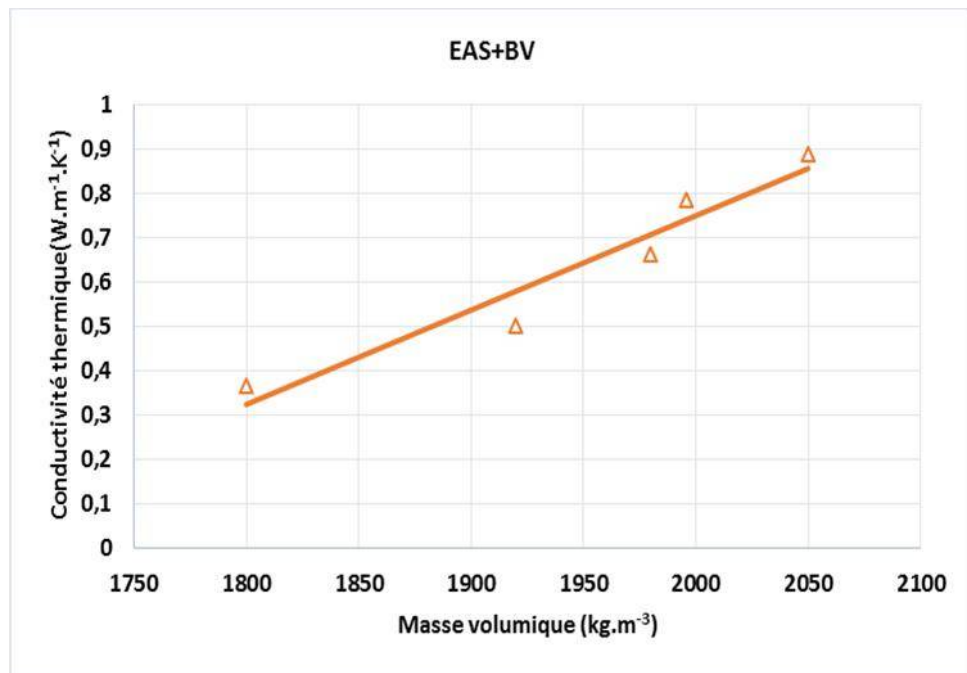


Fig.52 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique le cas de EAS

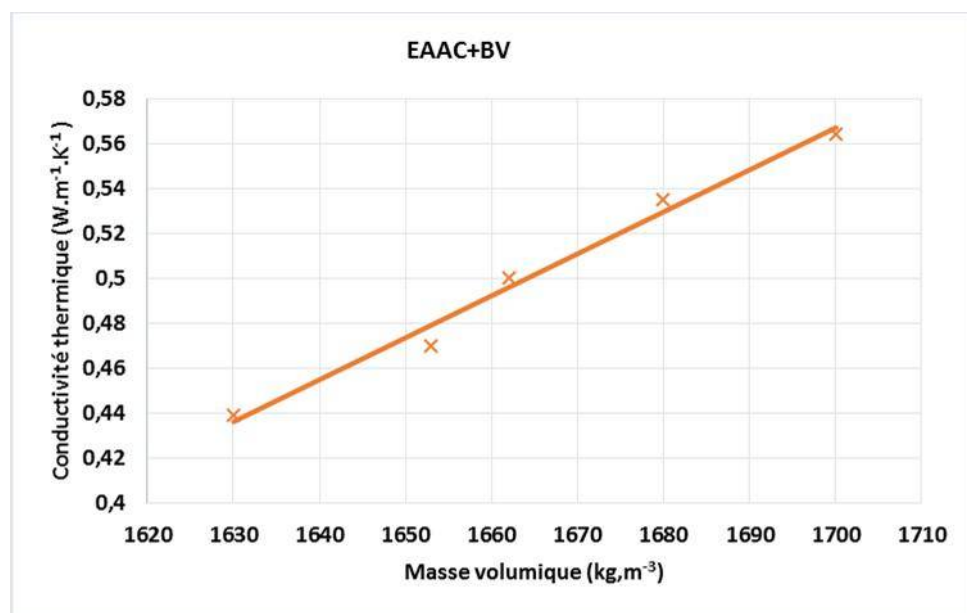


Fig.53 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique le cas de EAAC

La conductivité thermique s'augmente avec l'augmentation de la masse volumique. Plus le matériau est dense plus sa porosité est faible, ainsi le matériau avec forte densité conduit mieux la chaleur.

➤ **Résistance thermique en fonction de la BV (une épaisseur de 20cm)**

Tableau 29 : Variation de la résistance thermique avec l'ajout de la bouse de vache

% Bouse de vache	Références échantillons / Résistance thermique ($\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$)			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	0,39	0,32	0,22	0,35
2	0,44	0,34	0,25	0,37
4	0,46	0,38	0,30	0,4
6	0,48	0,45	0,4	0,47
8	0,50	0,53	0,55	0,62

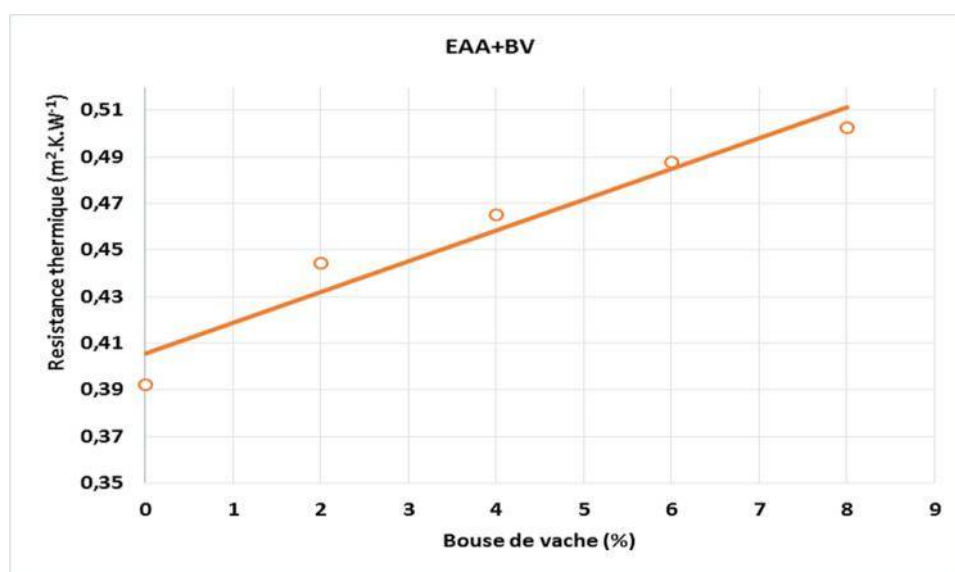


Fig.54 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la BV cas de EAA

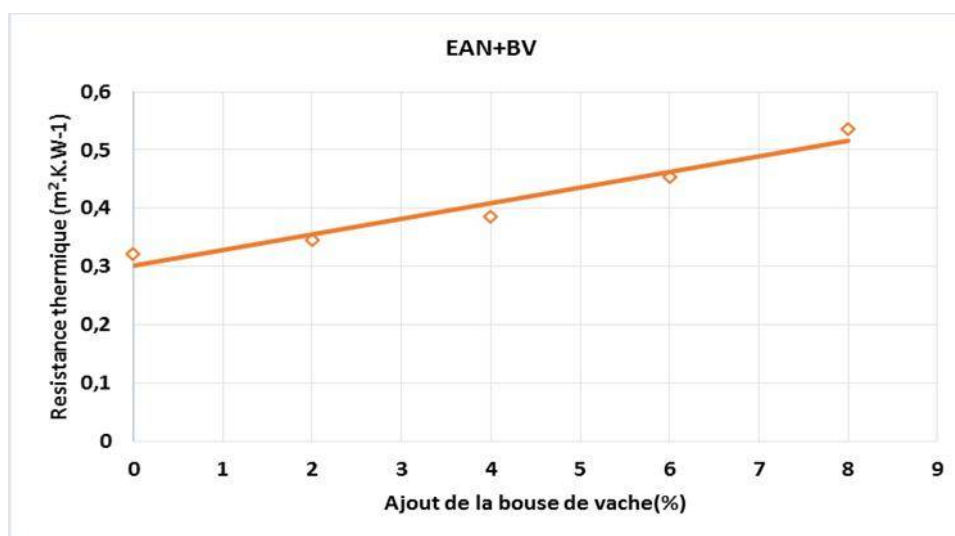


Fig.55 : Allure de la résistance thermique avec l'augmentation de BV le cas de EAN

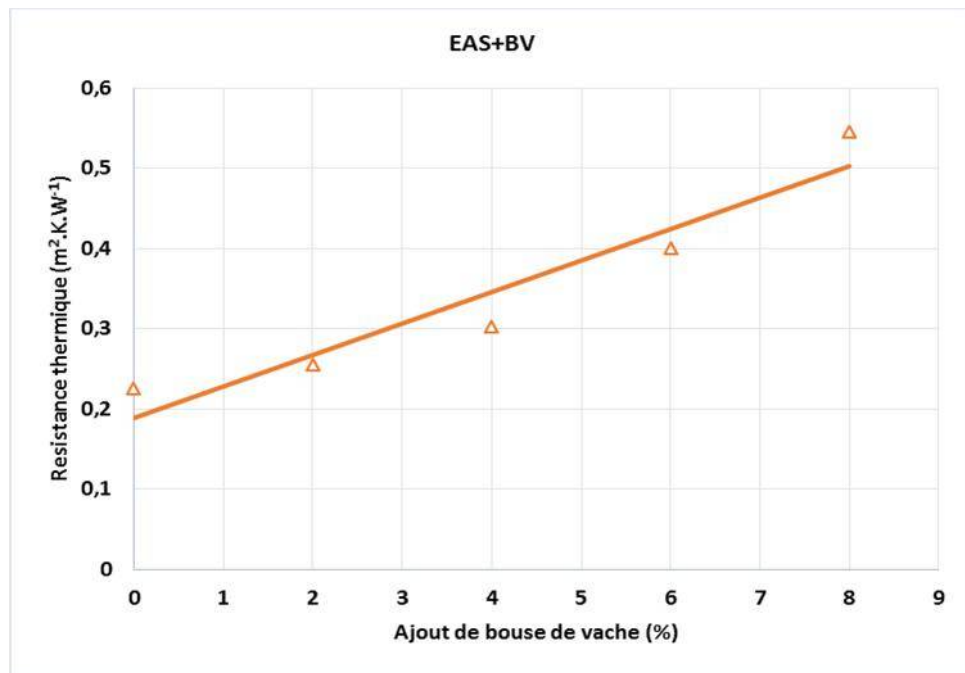


Fig.56 : Variation de la résistance thermique avec de l'ajout de la BV cas de EAS

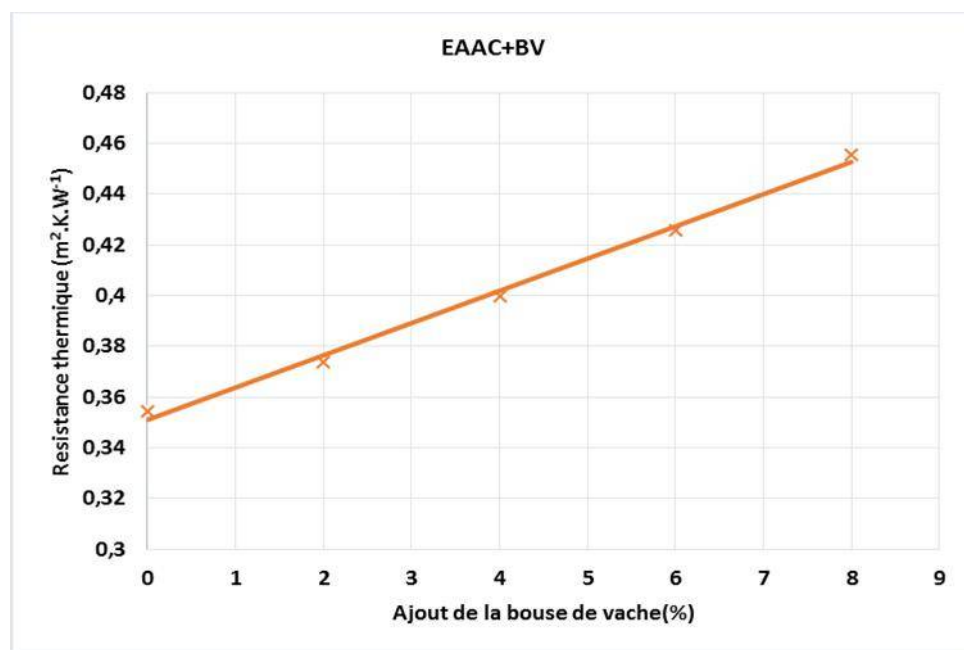


Fig.57 : Evolution de la résistance thermique avec l'ajout de la BV cas de EAAC

D'après les résultats de calculs pour un mur d'épaisseur 20cm, les résistances thermiques augmentent avec l'ajout de la bouse de vache. Ce qui veut dire que la bouse de vache contribue à l'amélioration du pouvoir d'isolation du matériau auquel elle est incorporée.

➤ **Variation de la résistance thermique en fonction de la masse volumique**

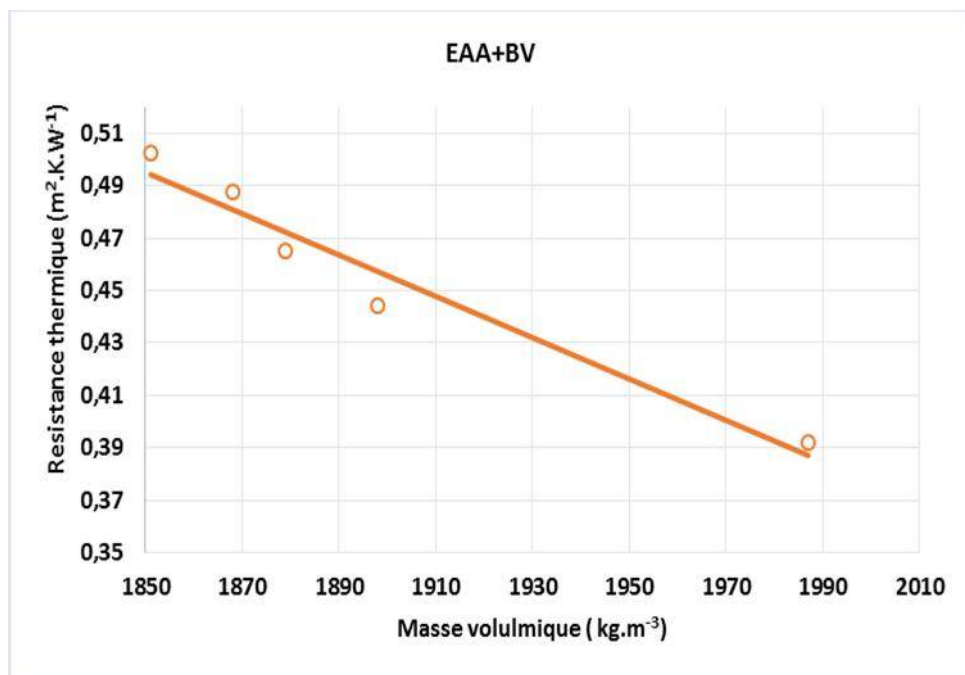


Fig.58 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAA

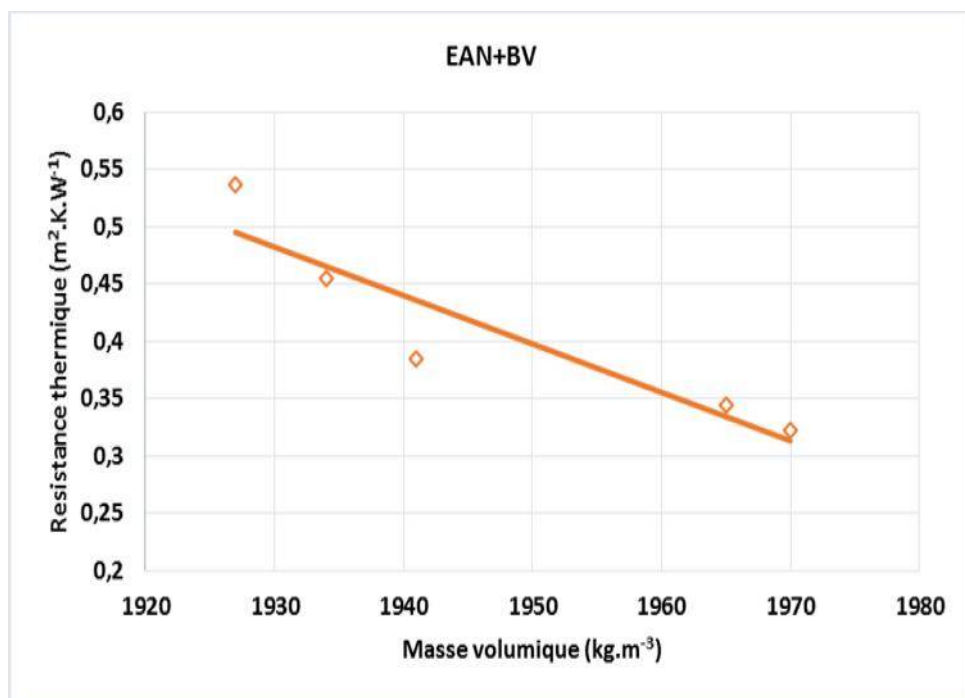


Fig.59 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAN

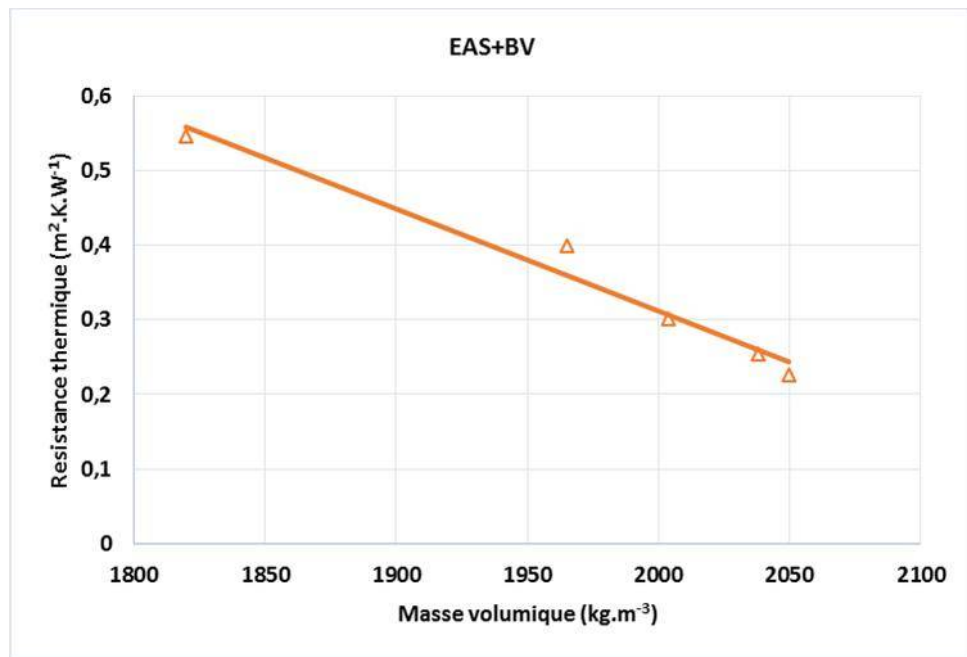


Fig.60 : Variation de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAS

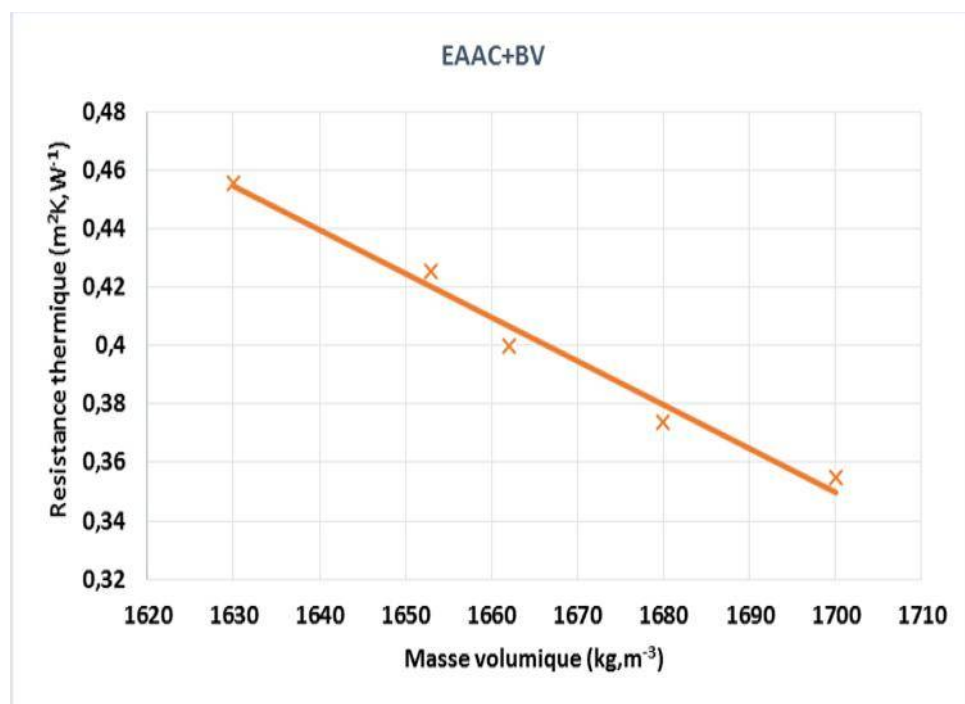


Fig.61 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique cas de EAAC

La résistance thermique régresse lorsque la masse volumique augmente. D'après les résultats de nos essais, les matériaux moins denses possèdent une résistance thermique plus élevée.

5.2.2 Les Caractéristiques thermiques pour les matériaux avec gousse de mil

➤ Variations de la conductivité thermique des matériaux avec gousse de mil

Tableau 30 : Variation de la conductivité thermique en fonction de gousse de mil

% Gousse de mil	Références échantillons / Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	0,51	0,62	0,88	0,56
2	0,44	0,58	0,72	0,48
4	0,4	0,41	0,59	0,4
6	0,37	0,35	0,41	0,32
8	0,27	0,317	0,25	0,23

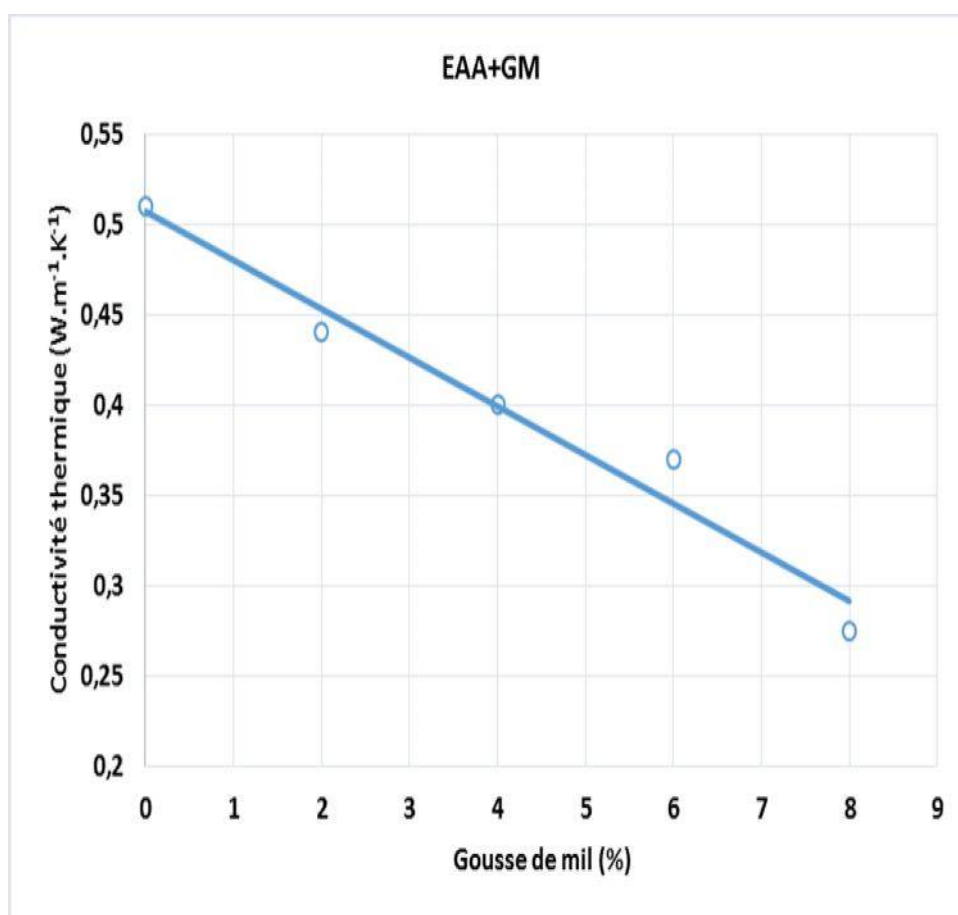


Fig.62 : Allure de la conductivité thermique en fonction de GM cas EAA

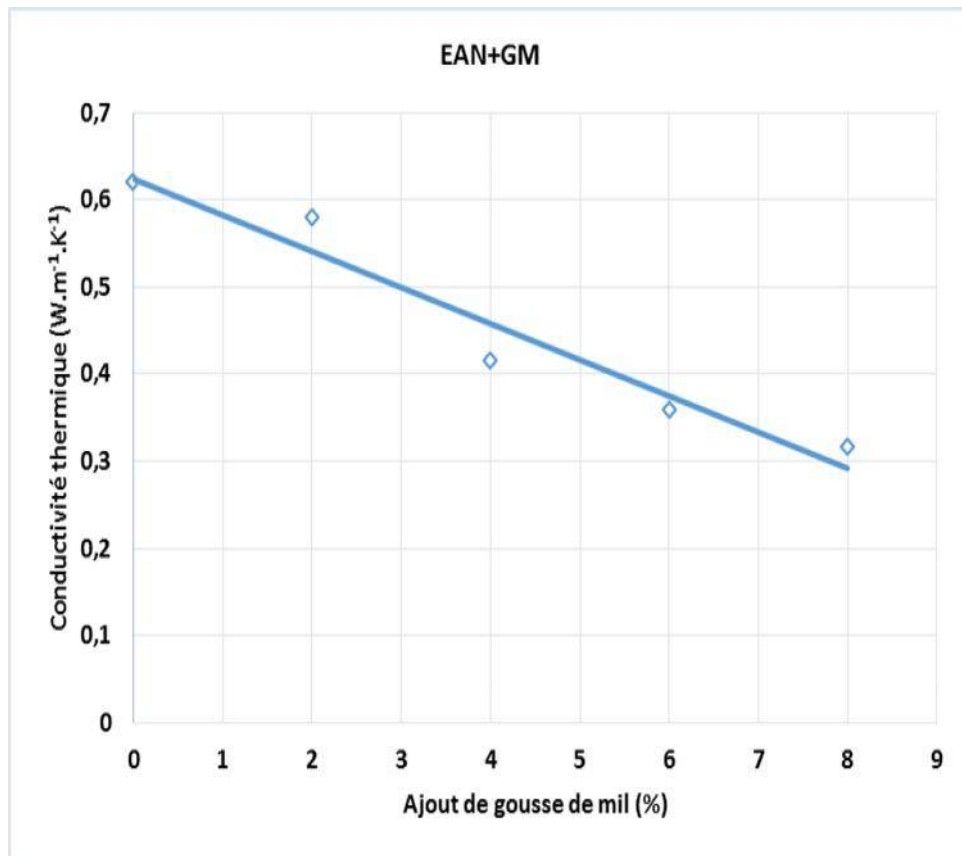


Fig.63 : Allure de conductivité thermique avec de la GM cas de EAN

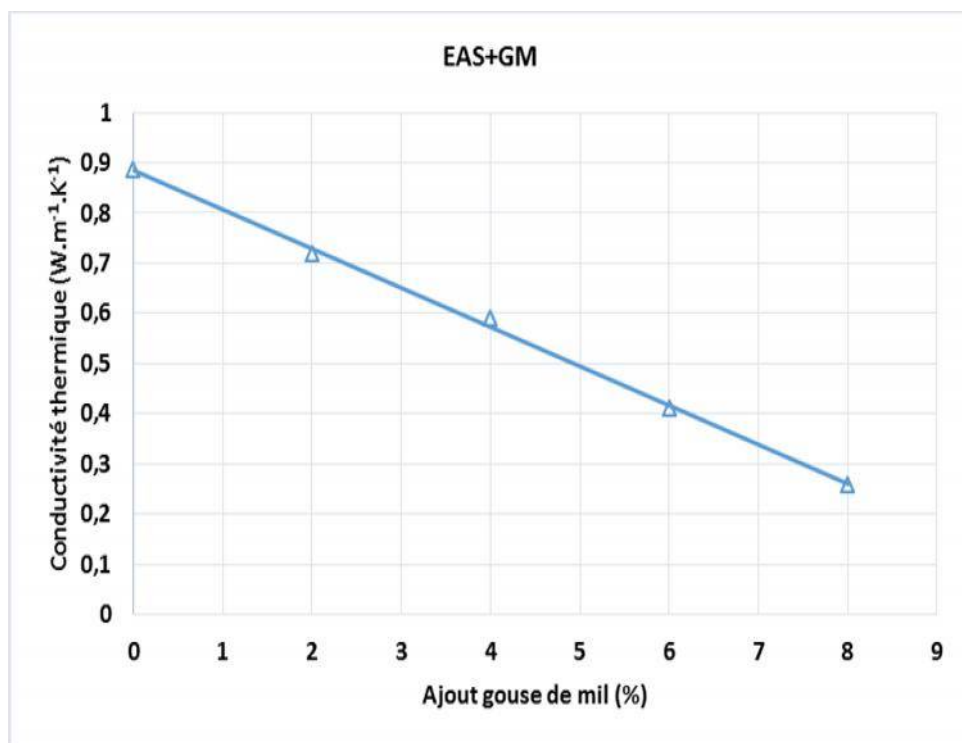


Fig.64 : Conductivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAS

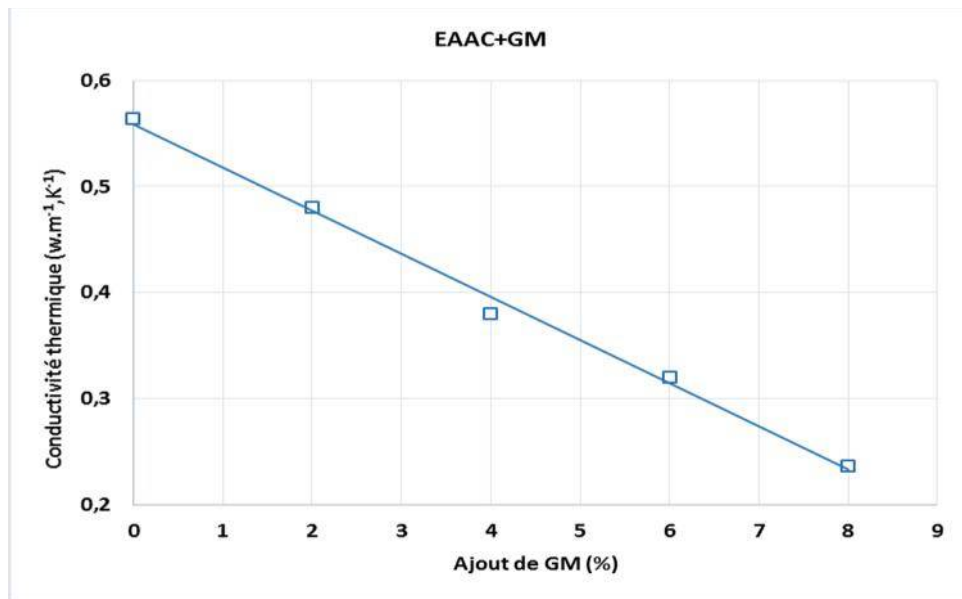


Fig.65 : Evolution de la conductivité thermique avec l'ajout de GM cas de EAAC

Les conductivités thermiques diminuent quand on augmente la gousse de mil. Etant donné que la gousse de mil a une faible masse volumique, par conséquent elle a une faible conductivité thermique par rapport à l'argile. Le mélange de cet adjuvant à ces matériaux contribue à l'amélioration de la conductivité thermique du mélange.

➤ Variation de la conductivité avec la masse volumique

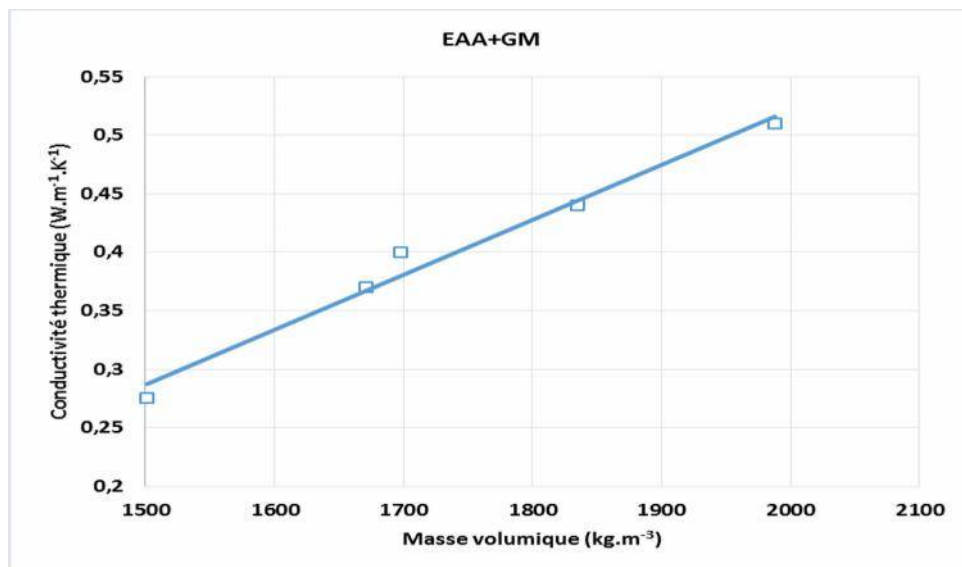


Fig.66 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAA

D'après la figure 66, la conductivité thermique du matériau EAA augmente avec la masse volumique, plus le matériau est allégé plus sa porosité est importante.

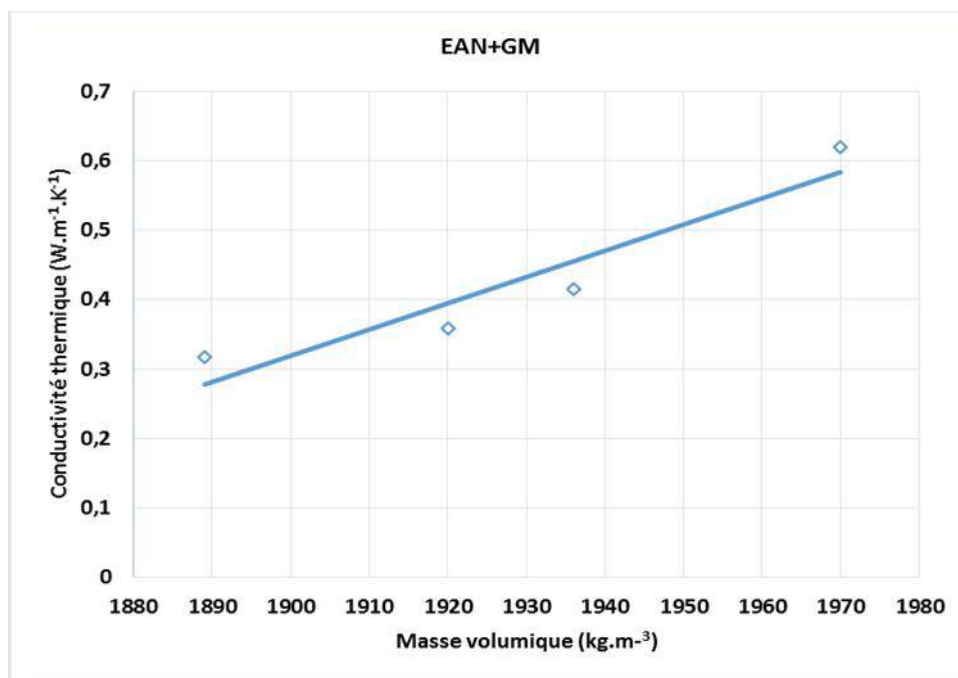


Fig.67 : Allure de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAN

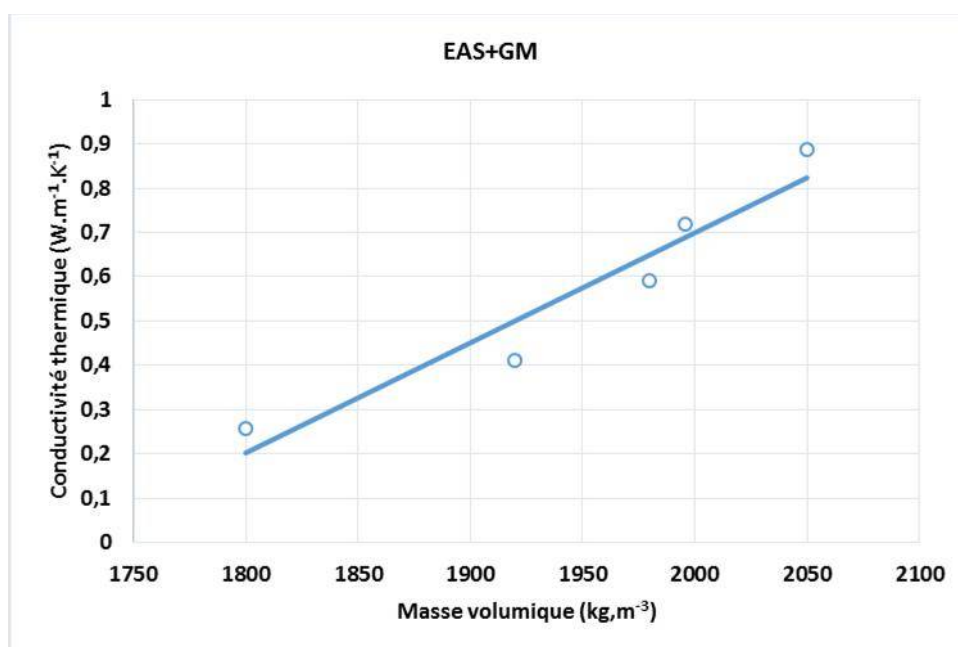


Fig.68 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAS

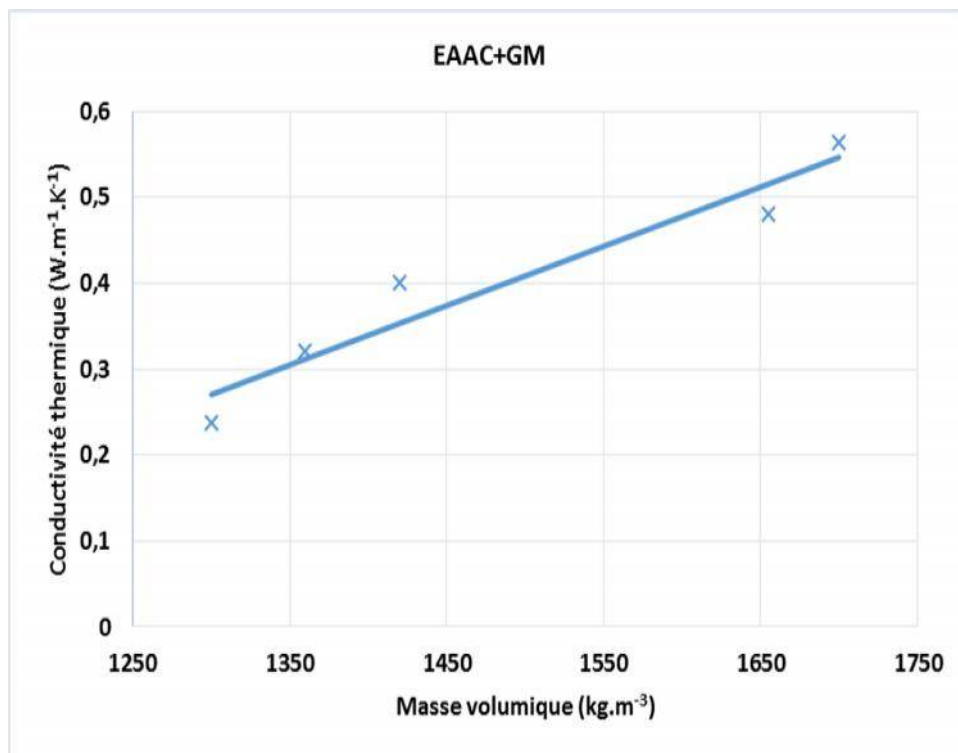


Fig.69 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de EAAC

On note que plus le matériau devient dense plus sa conductivité thermique s'augmente. Etant donné que la masse volumique diminue avec l'ajout de la gousse de mil, sa conductivité thermique diminue.

➤ **Variation de la résistance en fonction de l'ajout de gousse de mil**

Tableau 31 : Variation de la résistance thermique avec l'ajout de gousse de mil

% Gousse de mil	Références échantillons / Résistance thermique (m ² .K.W ⁻¹) pour 20 cm de mur			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	0,39	0,32	0,22	0,35
2	0,45	0,34	0,27	0,41
4	0,5	0,48	0,33	0,5
6	0,54	0,55	0,48	0,62
8	0,72	0,63	0,77	0,84

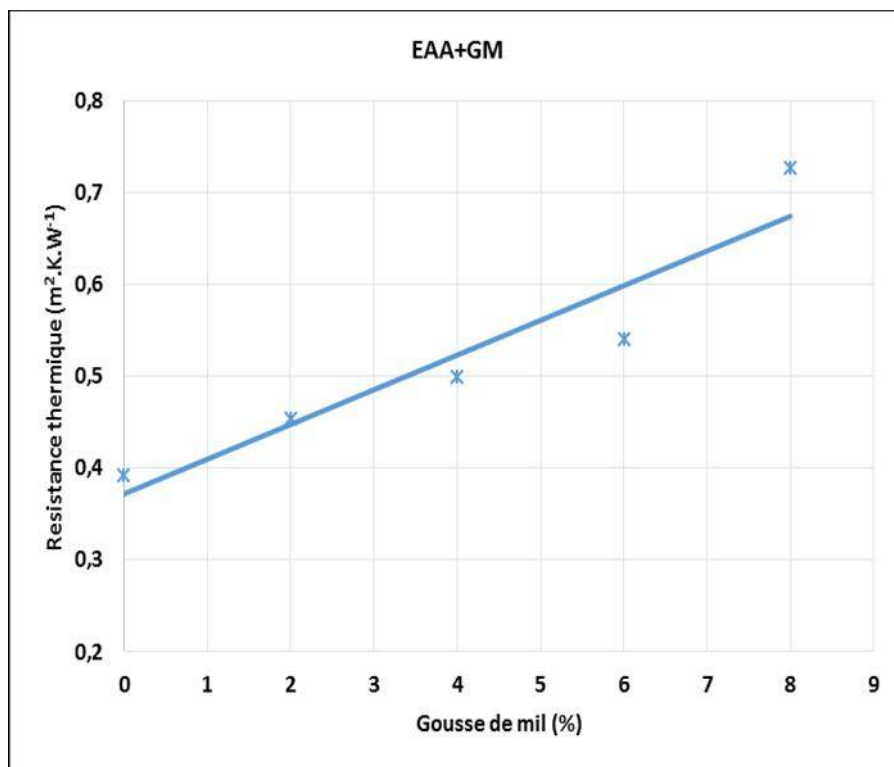


Fig.70 : Evolution de la résistance thermique en fonction de l'ajout de la GM cas de EAA

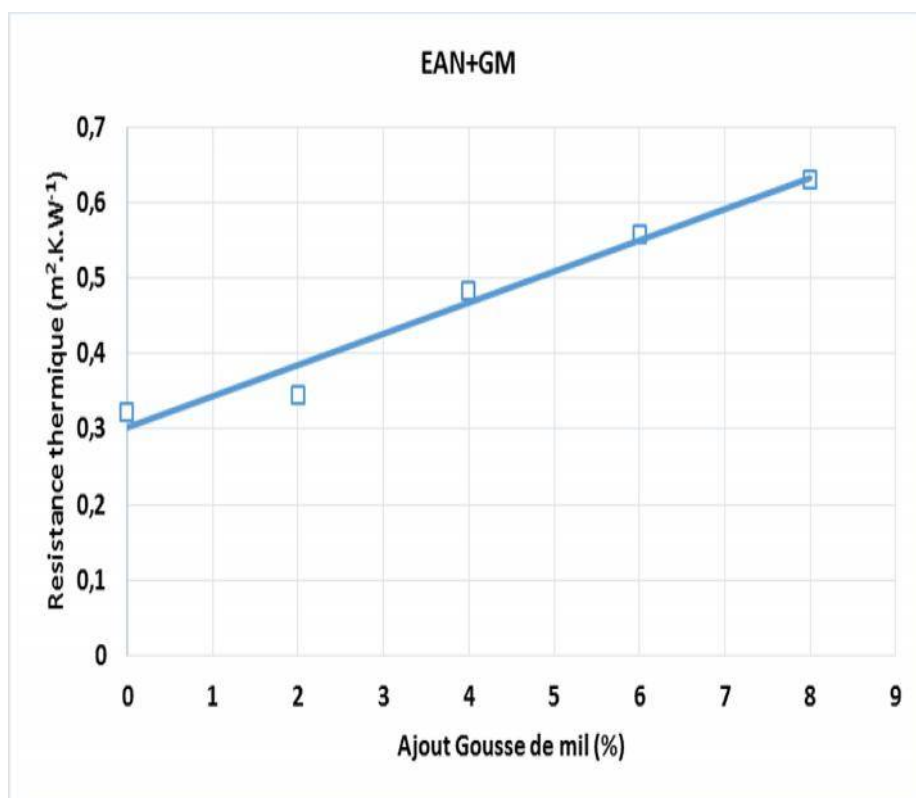


Fig.71 : Allure de la résistance thermique avec l'ajout de la GM cas de EAN

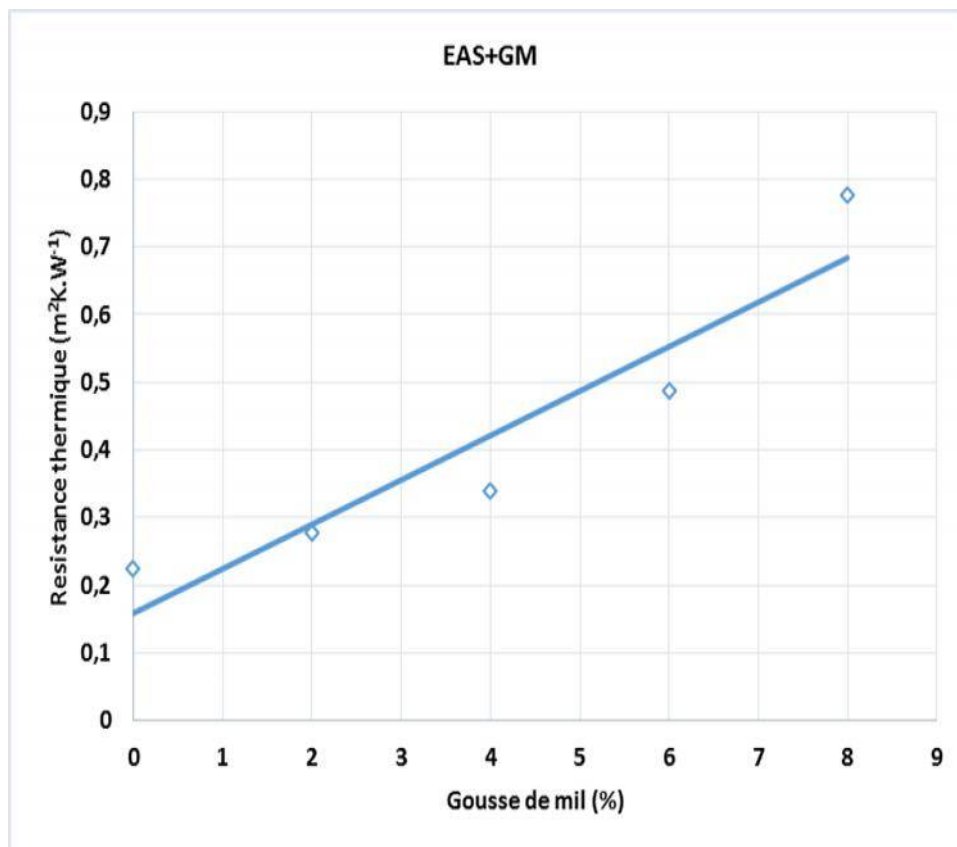


Fig.72 : Evolution de la masse volumique avec l'ajout de la GM cas de EAS

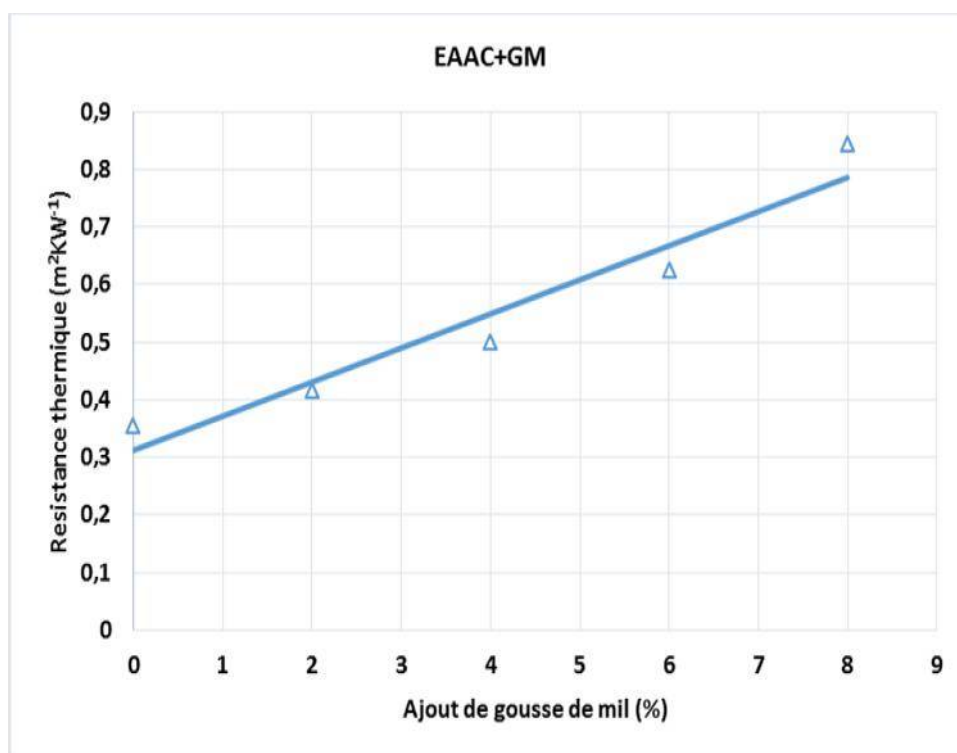


Fig.73 : Variation de la résistance thermique avec la GM cas de EAAC

Inversement à la conductivité thermique, la résistance thermique des différents matériaux s'augmente quand on ajoute de la gousse de mil. L'augmentation de la gousse de mil favorise le pouvoir d'isolation thermique des matériaux mélangés avec la gousse de mil.

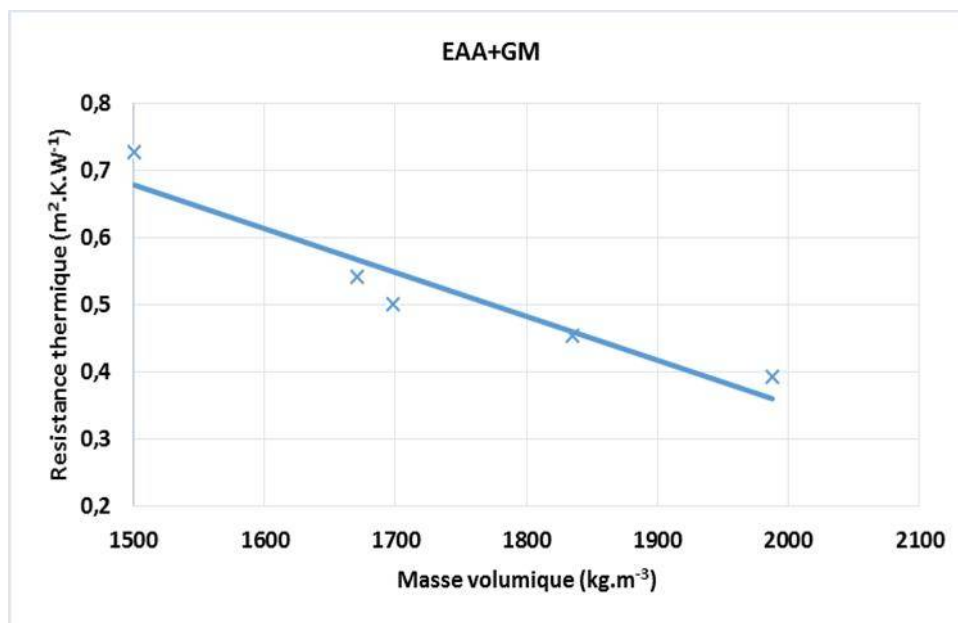


Fig.74 : Evolution de la résistance thermique en fonction de la masse volumique des échantillons avec GM cas de EAA

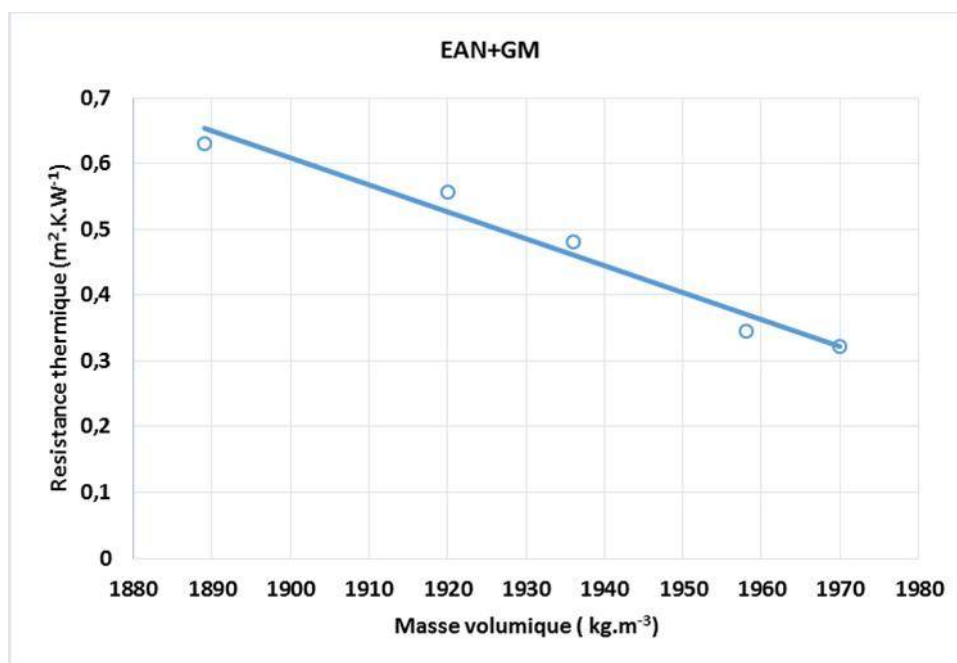


Fig.75 : Variation de la résistance thermique avec la masse volumique cas de EAN

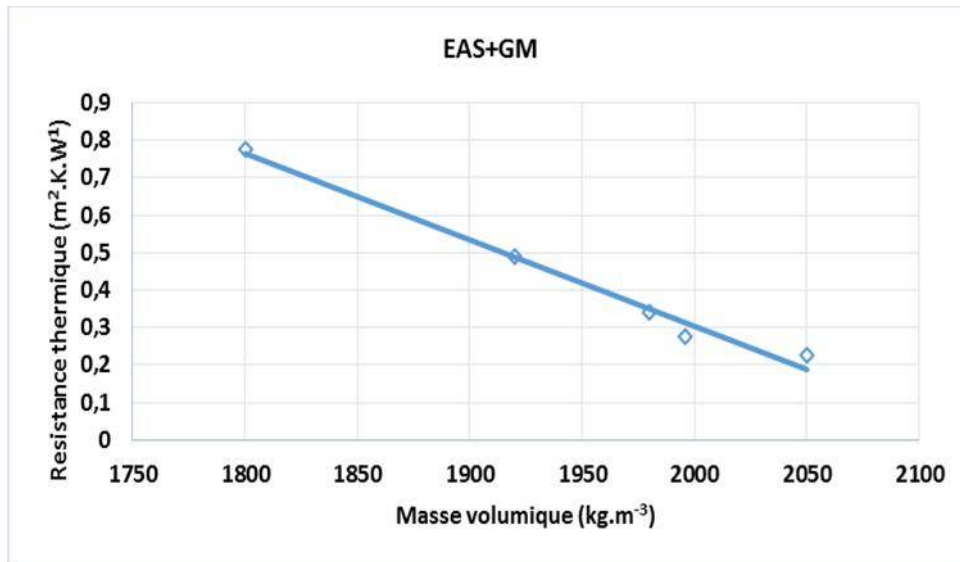


Fig.76 : Variation de la résistance thermique avec de la masse volumique cas de EAS

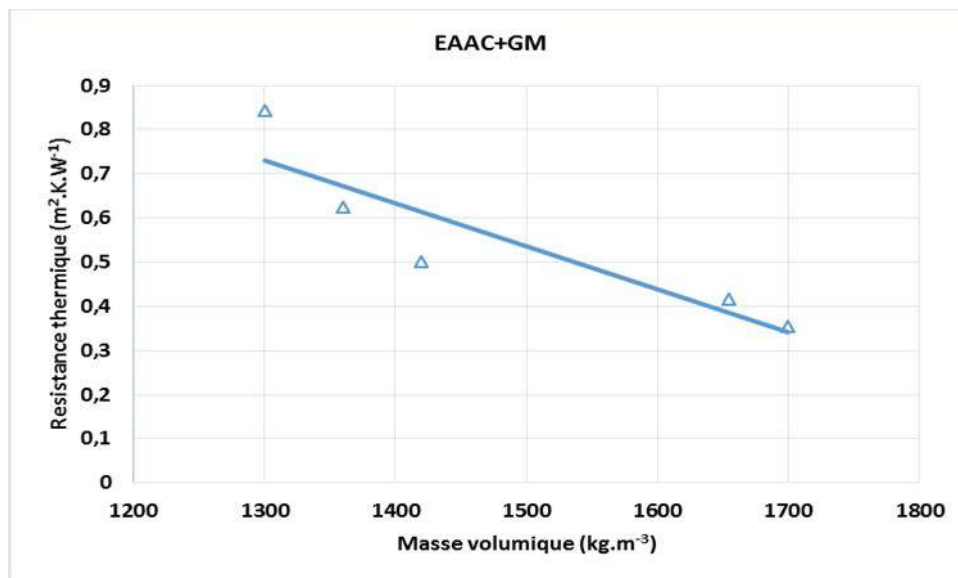


Fig.77 : Evolution de la résistance thermique avec de la masse volumique cas de EAAC

D'après les résultats thermiques, nous avons constaté que la conductivité thermique évolue dans le sens inverse de l'augmentation en pourcentage massique de la bouse de vache ou la gousse de mil. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la bouse de vache et la gousse de mil engendre la multiplication des pores dans la matrice solide des mélanges. L'ajout de ces adjuvants est favorable à la diminution de la conductivité thermique et à l'augmentation de la résistance thermique ainsi les matériaux étudiés deviennent plus isolants l'ajout de ces adjuvants.

5.3 Influences de la teneur en eau

Les matériaux utilisés dans le domaine de la construction et du génie civil ont une structure poreuse. Les pores sont les sièges de plusieurs phénomènes tel que la fixation, la migration de l'humidité, l'humidification, le changement de phase, etc. Ces matériaux ont ainsi tendance à capter l'humidité de diverses provenances.

Dans cette partie, nous essayerons de comprendre de façon précise le comportement des paramètres thermiques des matériaux avec la variation de la teneur en eau. La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois qui sont soumises à différents types de météorologies.

➤ Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau

Pour déterminer la teneur en eau, nous avons utilisé la méthode gravimétrique qui consiste à peser la masse du matériau après humidification.

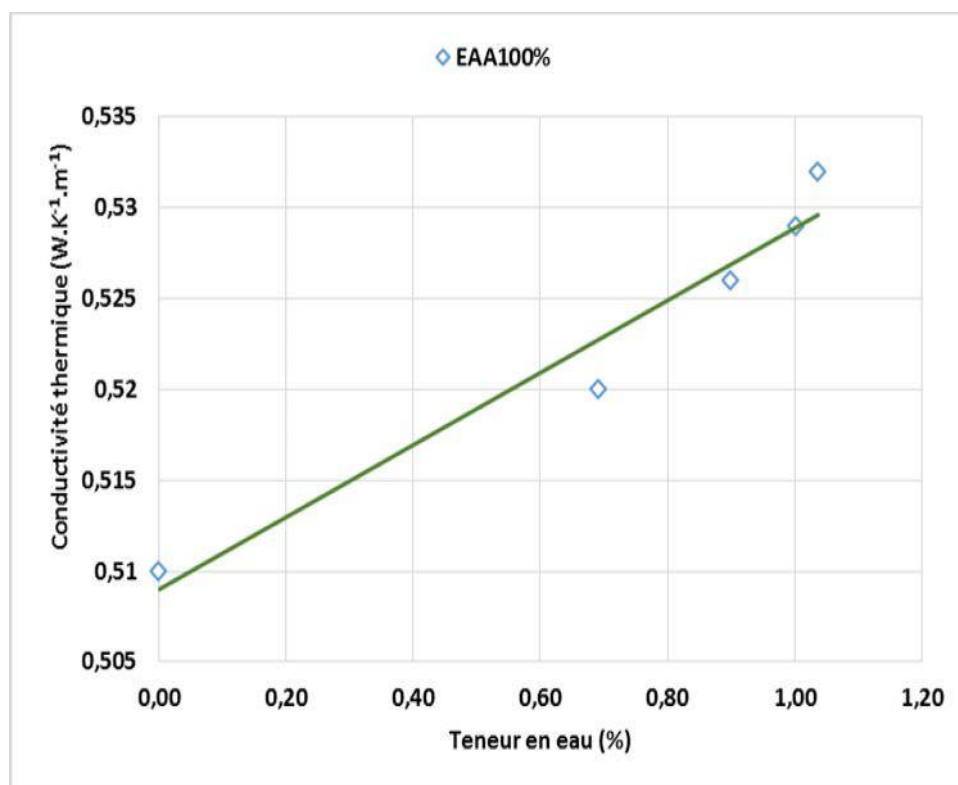


Fig.78 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du teneur en eau cas de EAA

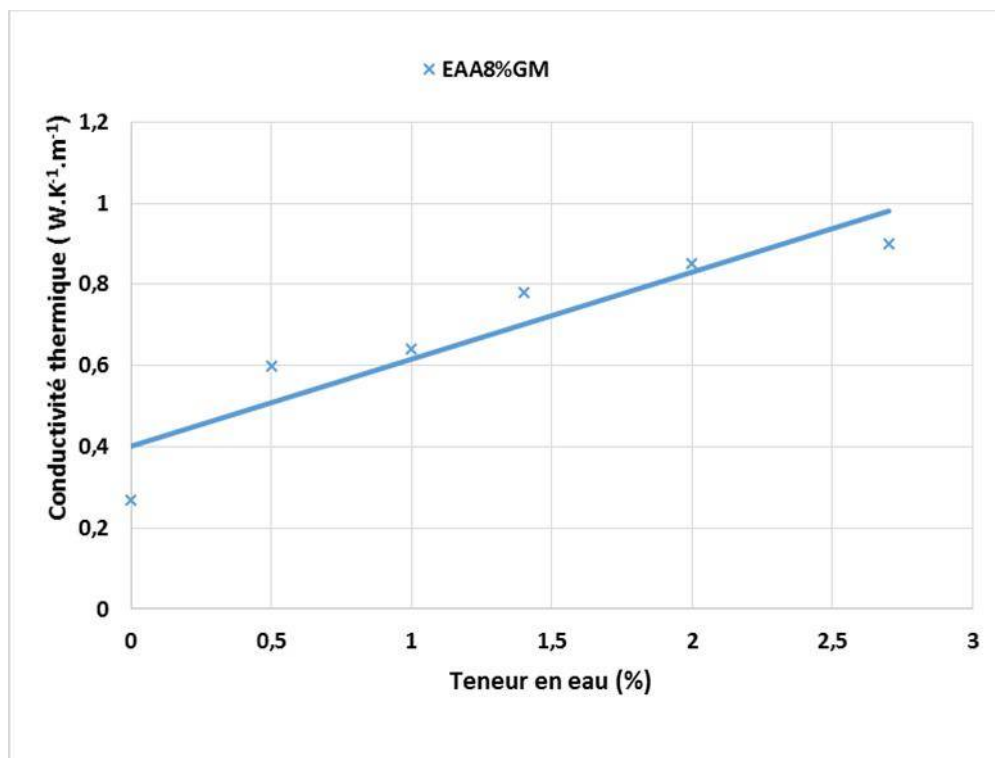


Fig.79 : Evolution de la conductivité en fonction de la teneur en eau cas de EAA8%GM

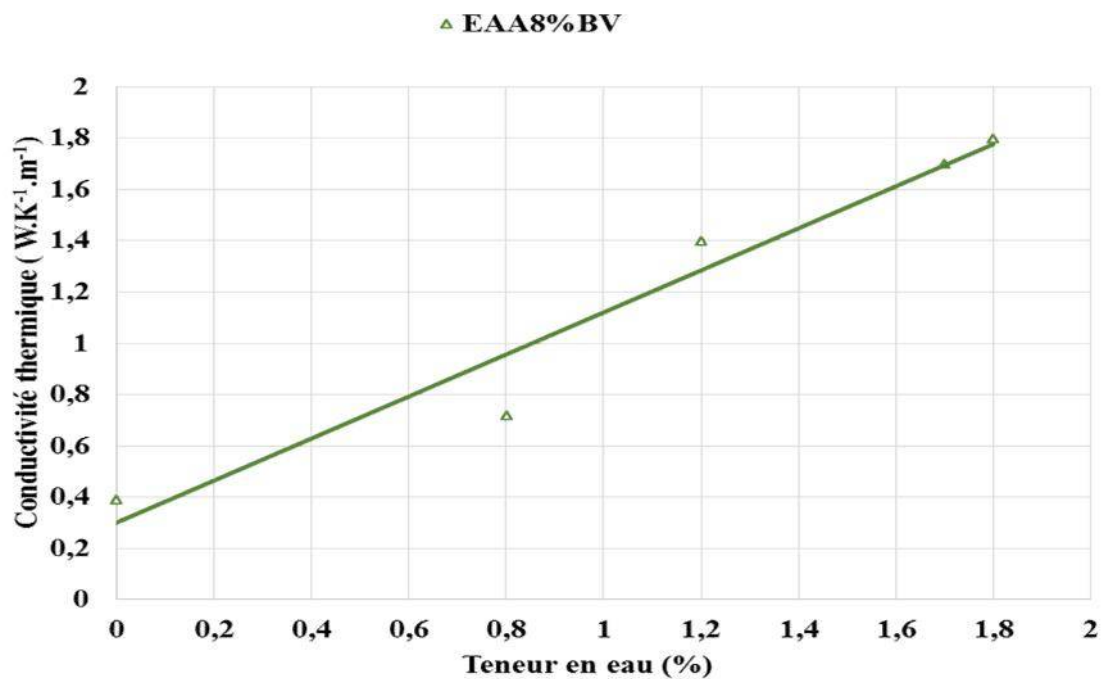


Fig.80 : Evolution de la conductivité en fonction de la teneur en eau cas de EAA 8% BV

On remarque que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation en teneur en eau. La présence de l'eau dans les matériaux diminue son pouvoir d'isolation thermique.

Pendant l'humidification, l'eau remplace l'air qui se trouve dans les pores et la conductivité thermique augmente.

L'augmentation de la conductivité thermique avec de la teneur en eau s'explique par le fait que l'eau qui remplace l'air dans les pores possède une conductivité thermique supérieure à celle de l'air ($\text{eau} = 0,60 \text{ W. m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $\text{air} = 0,026 \text{ W. m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$). En présence d'eau, les résistances thermiques des matériaux diminuent considérablement.

En présence de l'eau les éprouvettes de terre crue se disloquent rapidement, c'est pourquoi l'utilisation de ces matériaux n'est pas conseillée dans des zones à risque d'inondations. Pour améliorer le comportement hydrique, nous avons stabilisé nos échantillons par cuisson.

Pour une étude thermique avec une forte teneur en eau, des échantillons des briques cuites sont immergés dans l'eau pendant plusieurs heures jusqu'à l'absorption d'une certaine quantité en teneur en eau. La figure ci-après montre la variation de teneur en eau absorbée en fonction de temps.

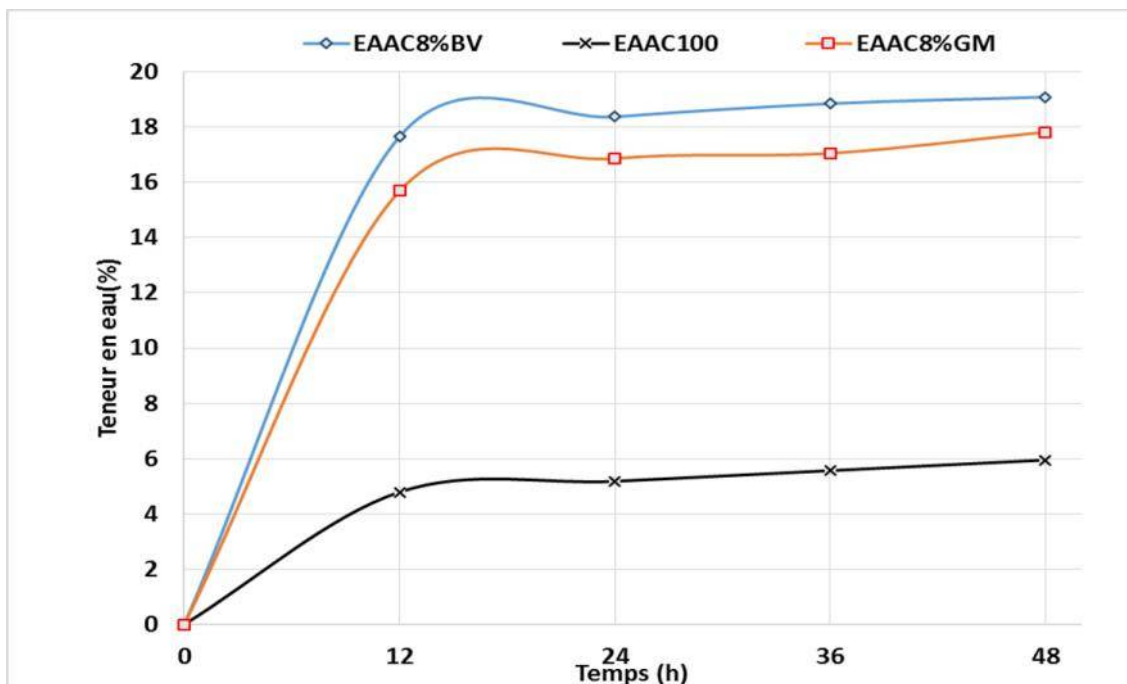


Fig.81 : Teneur en eau absorbée en fonction de temps.

Les échantillons des briques cuites ont une grande capacité d'absorption à cause de leur porosité élevée.

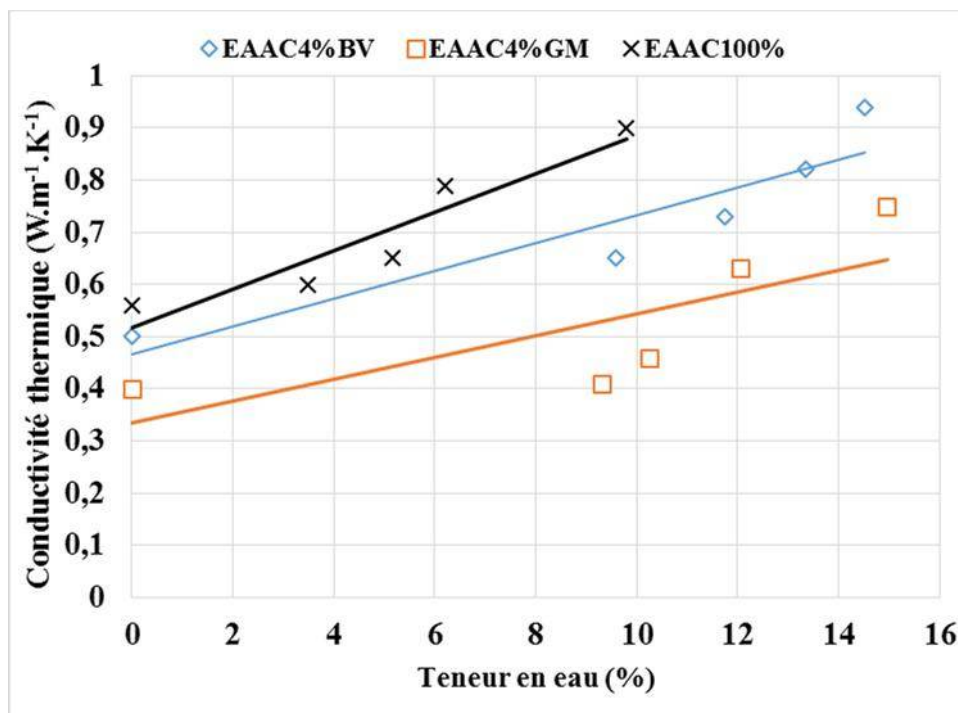


Fig.82 : Conductivité thermique en fonction du teneur en eau

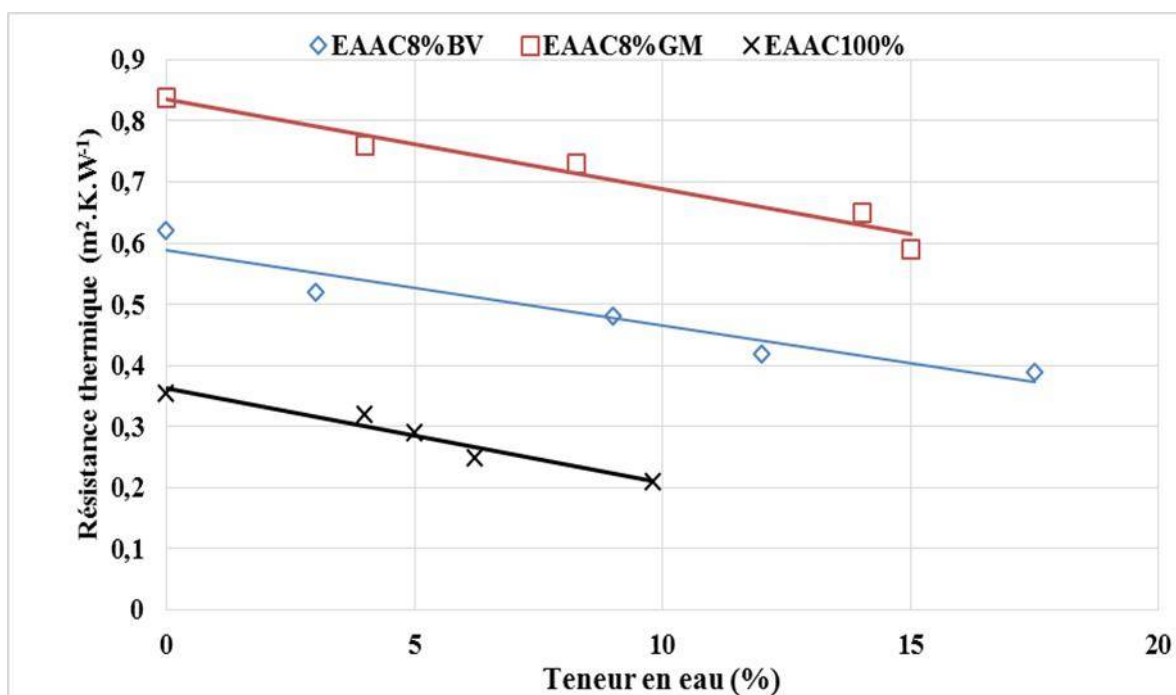


Fig.83 : Résistance thermique en fonction du teneur en eau

D'après les figures 82 et 83, la conductivité thermique des matériaux augmente avec l'augmentation de la teneur en eau. La présence de l'eau influence négativement la résistance thermique ainsi le pouvoir d'isolation des matériaux est réduit.

5.4 Détermination de la diffusivité thermique avec la méthode flash

➤ Diffusivité thermique pour les échantillons avec Bouse de vache

Tableau 32 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la bouse de vache

Bouse de vache (%)	Références échantillons / Diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	4,92E-07	3,50E-07	2,20E-07	4,88E-07
4	3,82E-07	2,71E-07	1,76E-07	4,40E-07
6	3,46E-07	2,76E-07	1,70E-07	3,70E-07
8	3,27E-07	2,60E-07	1,46E-07	3,50E-07

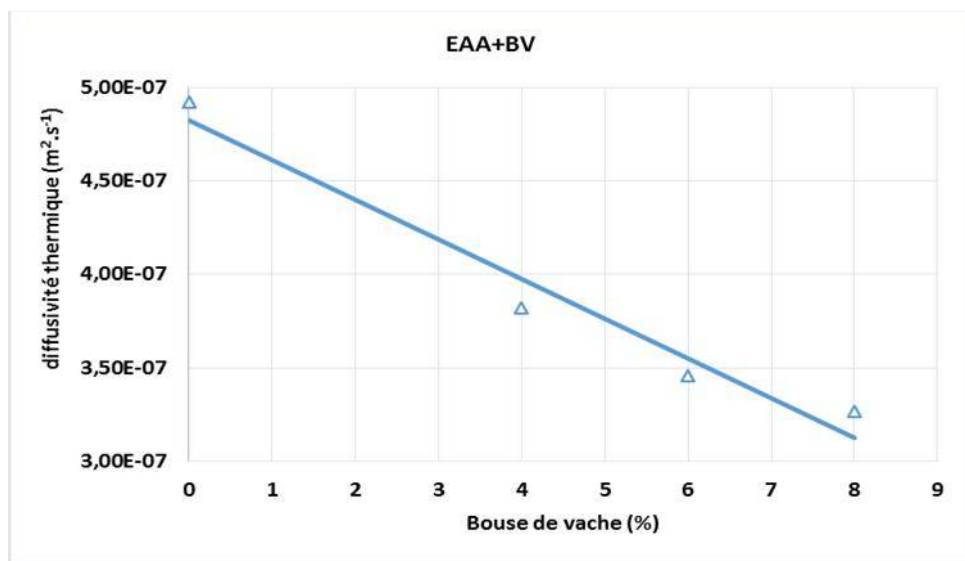


Fig.84 : Evolution de la diffusivité thermique de EAA en fonction de la BV

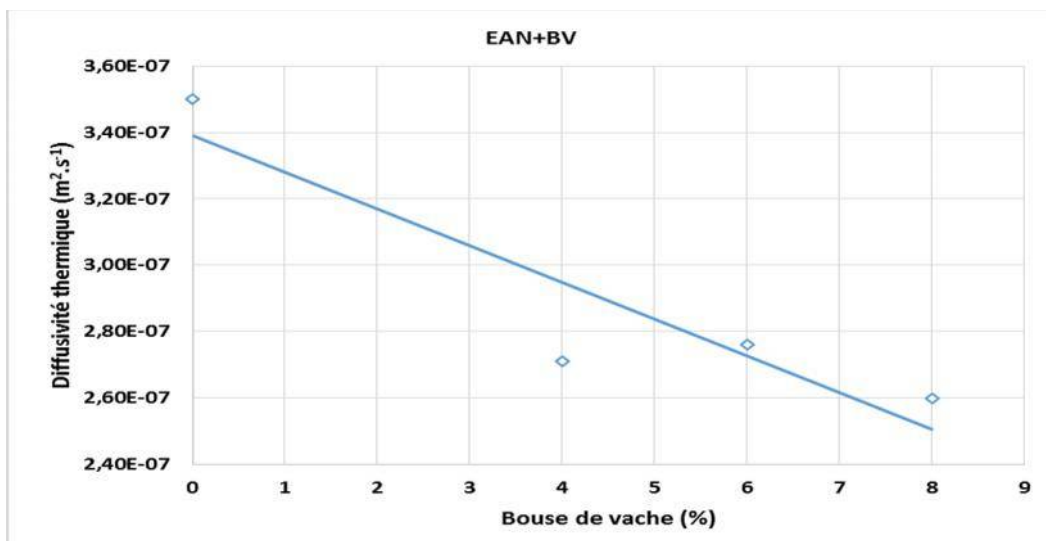


Fig.85 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAN en fonction de la BV

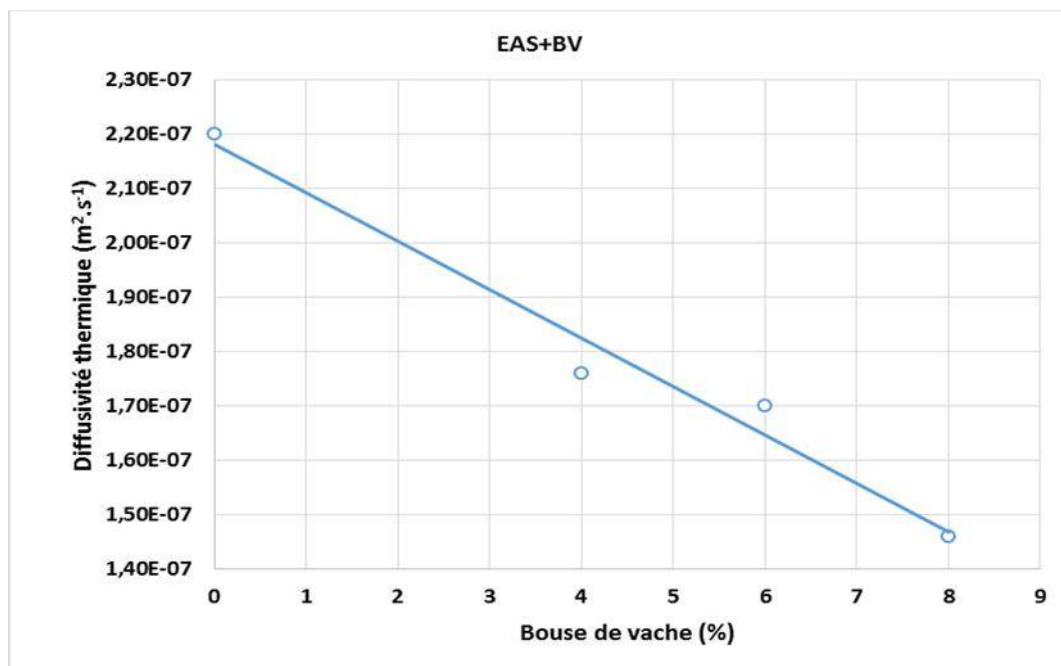


Fig.86 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAS en fonction de la BV

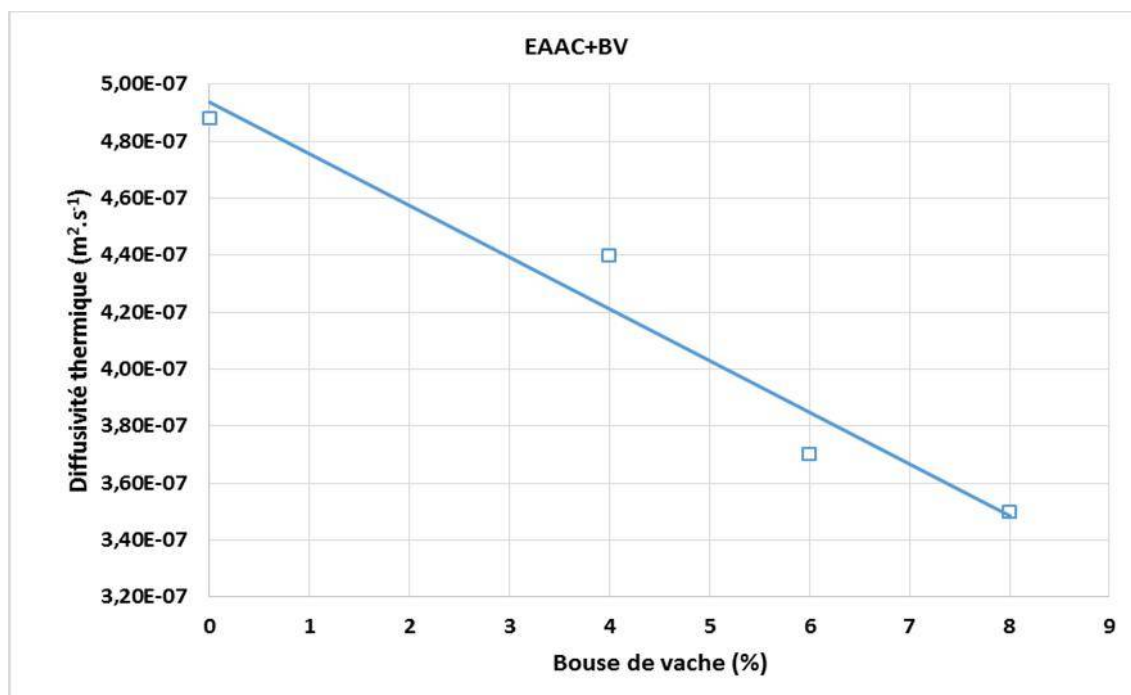


Fig.87 : Evolution de la diffusivité thermique d'EAAC en fonction de BV

La diffusivité diminue avec l'augmentation en pourcentage massique de la bouse de vache. L'incorporation de la bouse de vache augmente la porosité du matériau, ce qui engendre une augmentation de la résistance thermique, en d'autre terme, la vitesse de propagation de la chaleur est réduite.

➤ **Diffusivité thermique avec la gousse de mil.**

Tableau 33 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la gousse de mil

Gousse de mil (%)	Références échantillons / Diffusivité thermique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)			
	EAA	EAN	EAS	EAAC
0	4,92E-07	2,60E-07	3,40E-07	5,88E-07
4	3,70E-07	2,30E-07	2,30E-07	4,88E-07
6	3,70E-07	2,00E-07	1,90E-07	4,36E-07
8	2,90E-07	1,30E-07	1,70E-07	3,80E-07

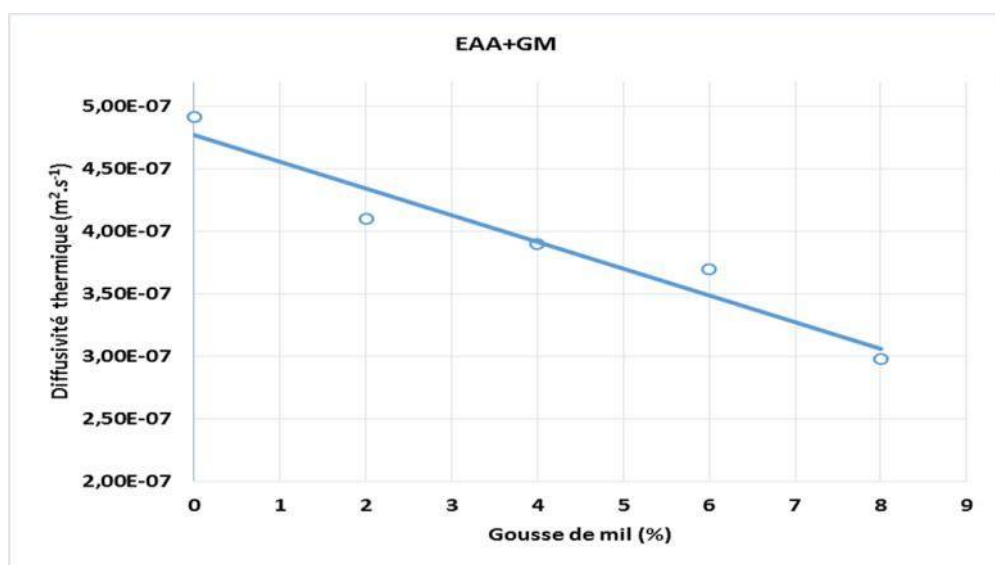


Fig.88 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAA

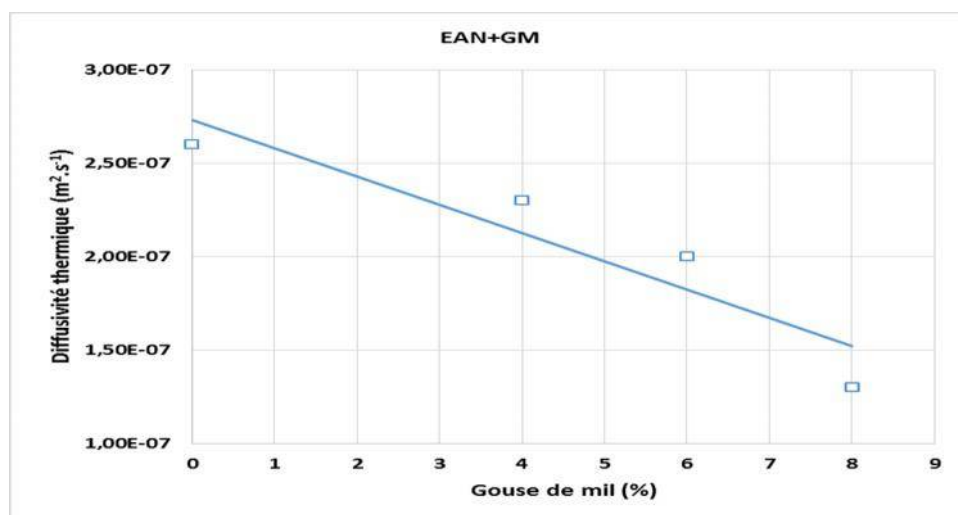


Fig.89 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAN

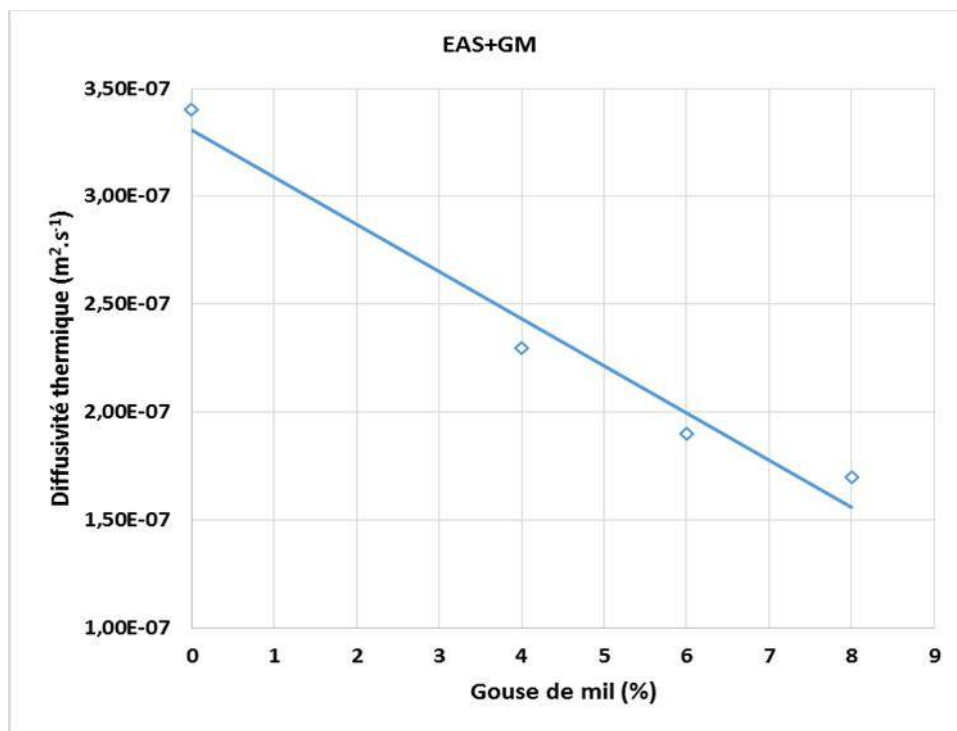


Fig.90 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAS

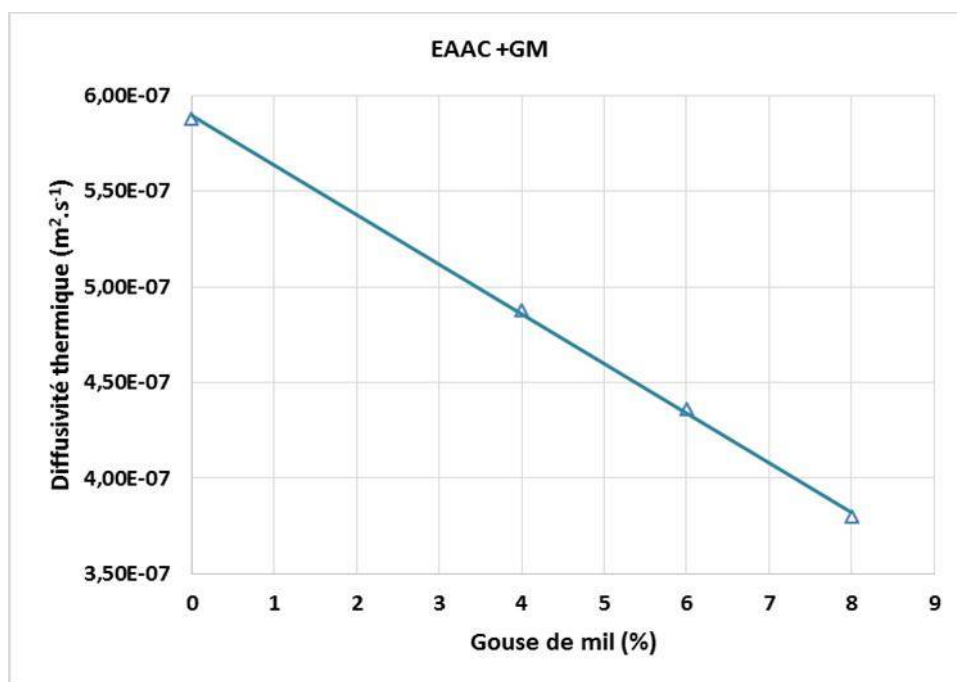


Fig.91 : Variation de la diffusivité thermique avec l'ajout de la GM cas de EAAC

On remarque que, pour toutes mesures effectuées, la diffusivité thermique diminue avec l'ajout de la bouse de vache ou la gousse de de mil, ce qui veut dire que les échantillons diffusent moins avec l'augmentation des ces adjuvants.

5.5 Etude comparative des caractéristiques thermophysiques et mécaniques

Un logement doit satisfaire les besoins de confort thermique et sécuritaires de ses occupants. Une bonne résistance thermique des matériaux contribue à l'isolation de bâtiment par rapport à l'insolation, ce qui permet une sensation de confort thermique. Une meilleure résistance mécanique permet une stabilité mécanique contre les risques des écroulements des habitations. Concilier les deux facteurs (thermique et mécanique) est une chose très difficile car les matériaux qui sont des bons isolants thermiques présentent les plus souvent des défaillances mécaniques.

D'une manière générale, la résistance mécanique évolue dans le sens inverse de la résistance thermique, plusieurs travaux ont essayé de trouver les voies et moyens pour avoir des matériaux de construction capables de relever les défis mécaniques et thermiques.

Dans cette partie, nous allons faire une étude comparative des caractéristiques thermophysiques et mécaniques en fonction de l'augmentation des adjuvants des matériaux d'Abéché par rapport aux matériaux de N'Djamena et de Sarh.

5.5.1 Caractéristiques mécaniques

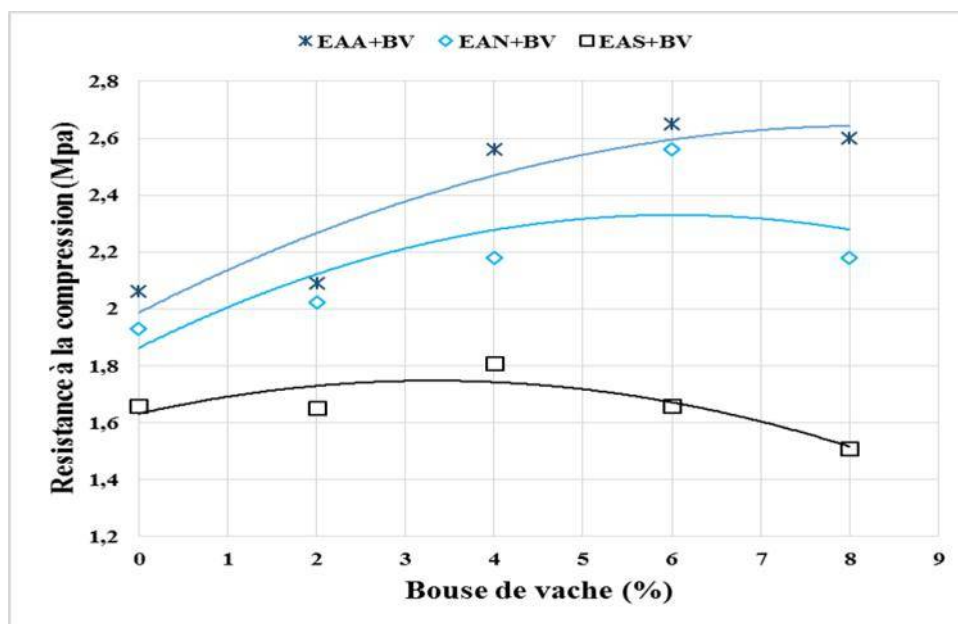


Fig.92 : Courbes des allures des résistances mécaniques en fonction de l'ajout de la BV

Sur la figure 92, on remarque que les matériaux avec incorporation de la bouse de vache d'Abéché et de Ndjamena donnent une résistance optimale à 6% et pour les matériaux de Sarh le pic est à 4%. On peut affirmer que la bouse de vache consolide les matériaux quand elle est incorporée à certaine proportion à l'argile d'Abéché, de N'Djamena et de Sarh.

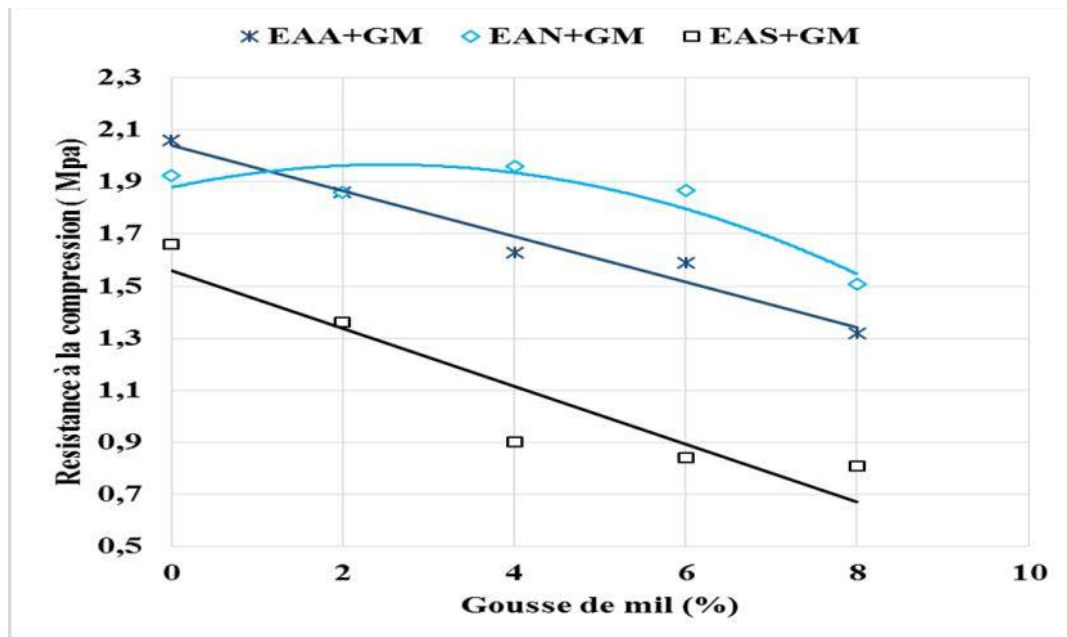


Fig.93 : Récapitulative des allures des résistances mécaniques de EAA, EAN et EAS avec l'ajout de GM

On remarque que la gousse de mil est moins favorable du point vue mécanique mais on note une amélioration de la résistance mécanique pour l'échantillon EAN4% et les échantillons EAAC.

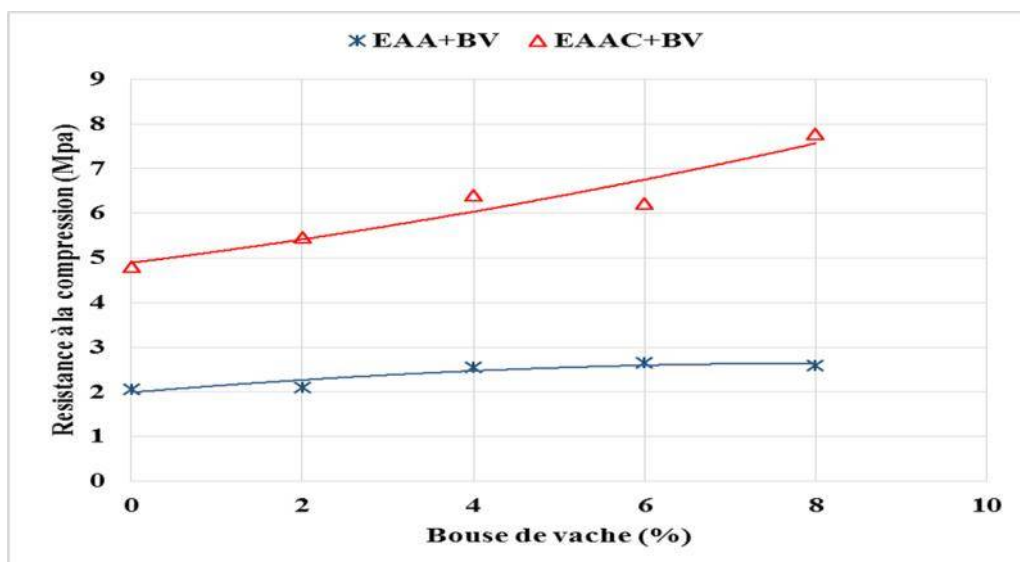


Fig.94 : Allures des résistances mécaniques en fonction de l'ajout de la BV cas de EAA avant et après cuisson

La résistance mécanique s'améliore pour les échantillons en terre cuite jusqu'au 8% du mélange avec bouse de vache. On note une nette amélioration de la performance mécanique de l'échantillon EAA après la cuisson.

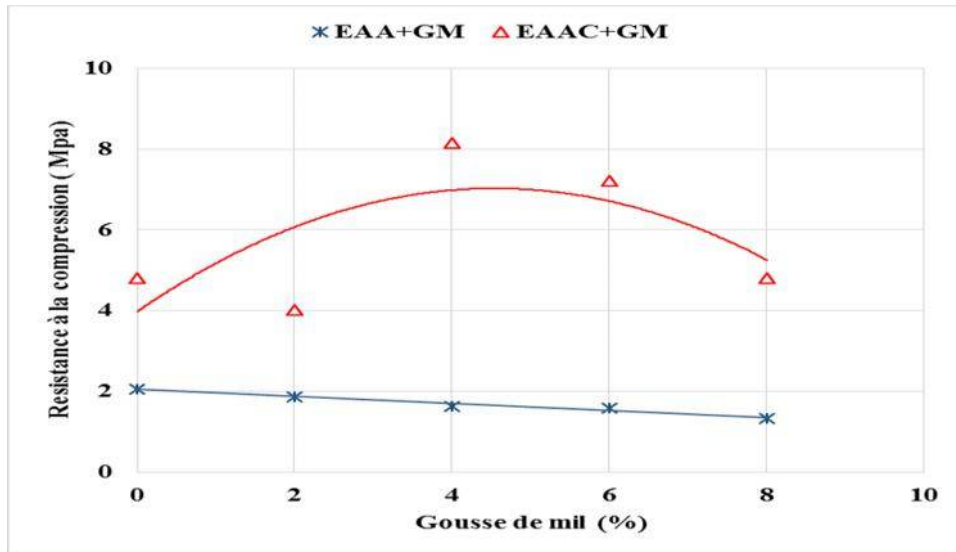


Fig.95 : Allure de EAA avant et après cuisson

Pendant la cuisson du matériau EAA+GM, la matrice solide devient plus rigide, la gousse de mil se consume et devient des pores, on obtient un matériau de couleur rouge avec une résistance mécanique améliorée.

On remarque à la lumière des résultats mécaniques que les échantillons avec incorporation de la bouse de vache présentent les plus fortes résistances mécaniques par rapport aux échantillons avec gousse de mil.

5.5.2 Caractéristiques thermophysiques

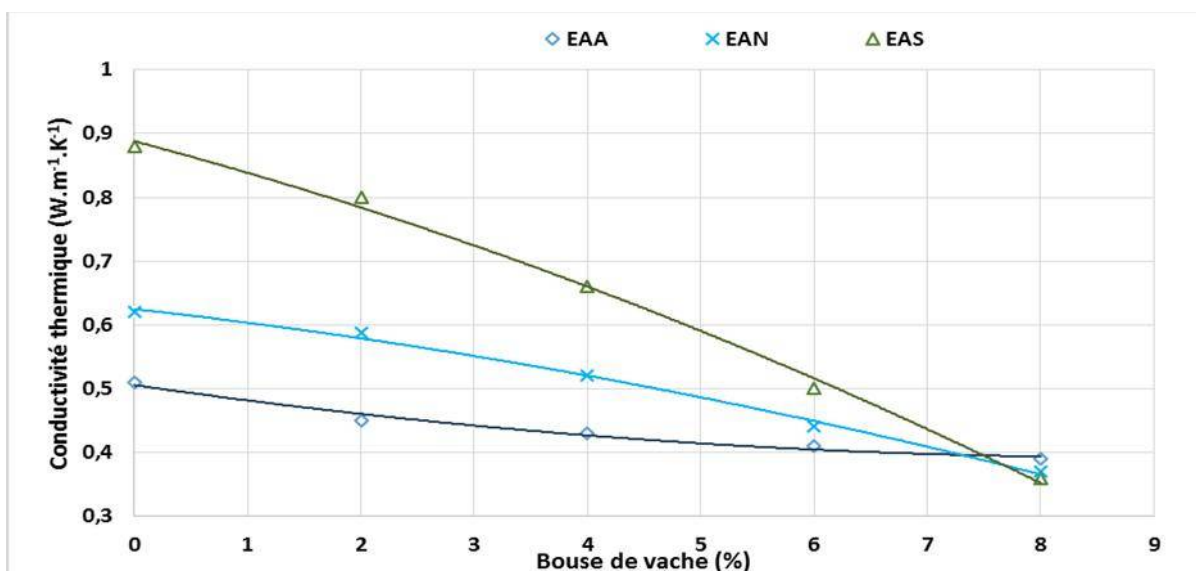


Fig.96 : Variations des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de la BV, cas de EAA, EAN et EAS

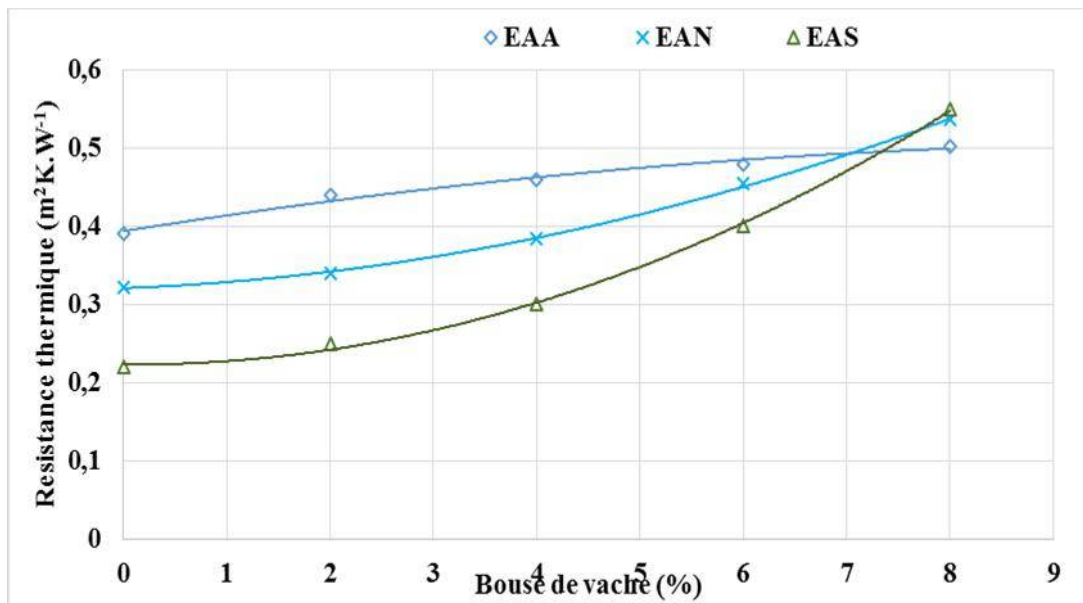


Fig.97 : Variations des résistances thermiques en fonction des l'ajout de la BV cas de EAA, EAN et EAS

L'ajout bouse de vache améliore les caractéristiques thermiques de tous les trois matériaux mais d'après les résultats, on remarque que la bouse de vache influence plus les matériaux de Sarh, et de Ndjamena.

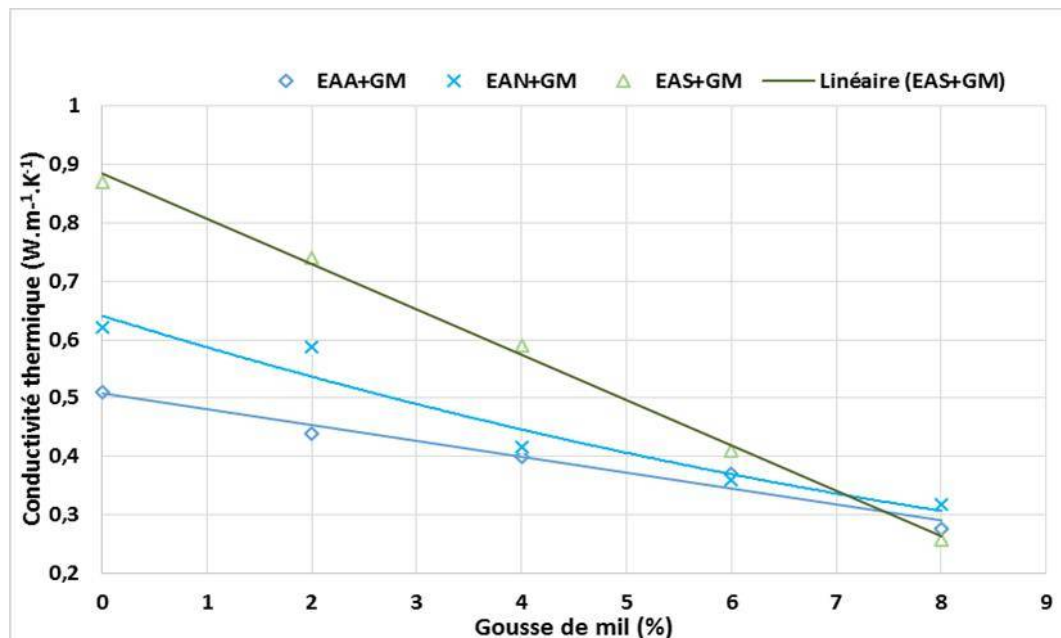


Fig.98 : Variations des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de GM cas de : EAA, EAN et EAS

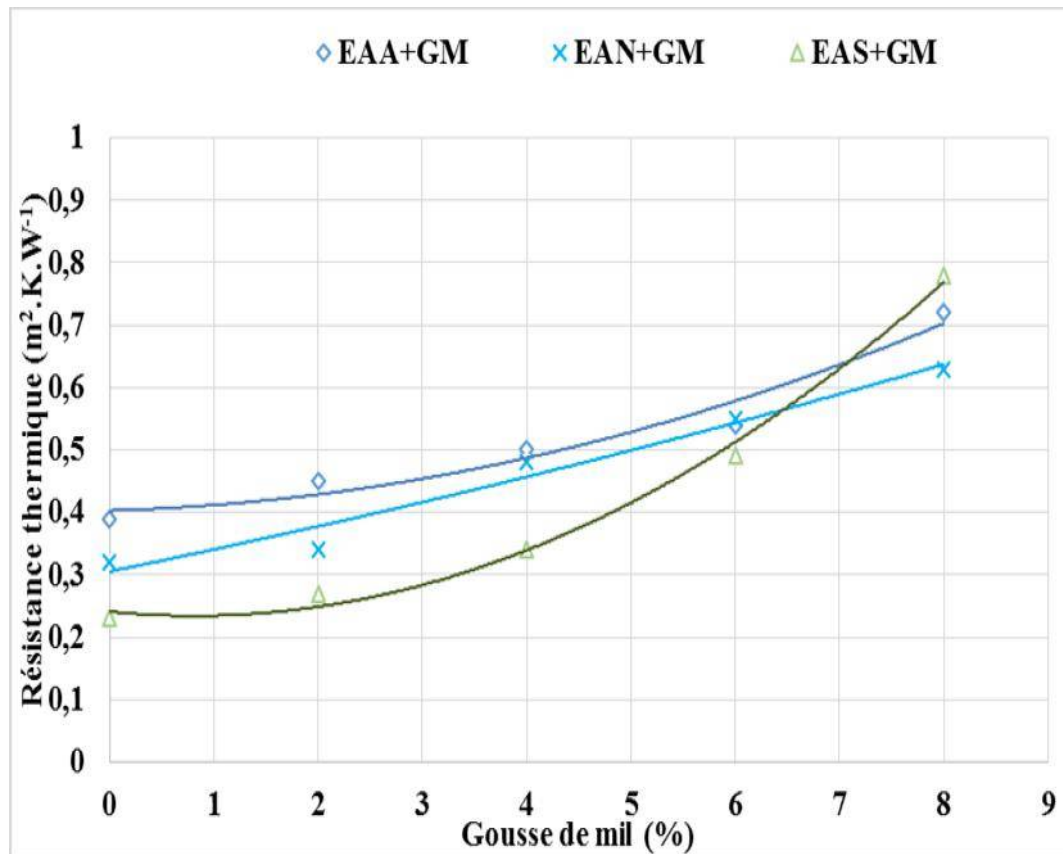


Fig.99 : Evolutions des résistances thermiques en fonction de l'ajout de GM pour les cas de : EAA, EAN et EAS

On remarque que l'ajout de la gousse de mil améliore les caractéristiques thermiques de tous les trois matériaux mais on note aussi d'après les résultats qu'il influence beaucoup plus l'échantillon des matériaux de Sarh et de Ndjama. Le matériau de Sarh à 100% d'argile possède une faible résistance thermique et à 8% du mélange on note que le matériau de Sarh qui possède la plus forte résistance thermique suivi de l'échantillon d'Abéché. On peut dire donc que, la gousse de mil influence plus les caractéristiques thermiques le matériau de Sarh. Les matériaux avec l'incorporation de gousse de mil présentent les meilleures résistances thermiques, donc on peut affirmer que la gousse de mil isole mieux que la bouse de vache.

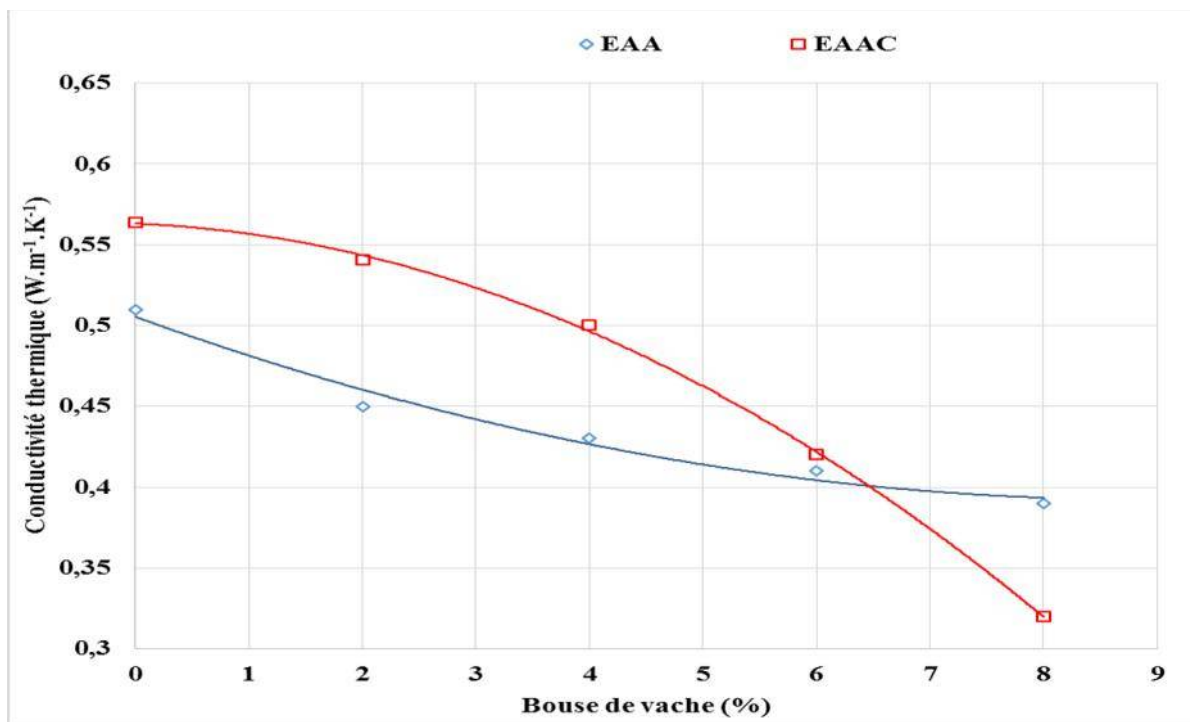


Fig.100 : Allures des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de BV avant et après cuisson de EAA

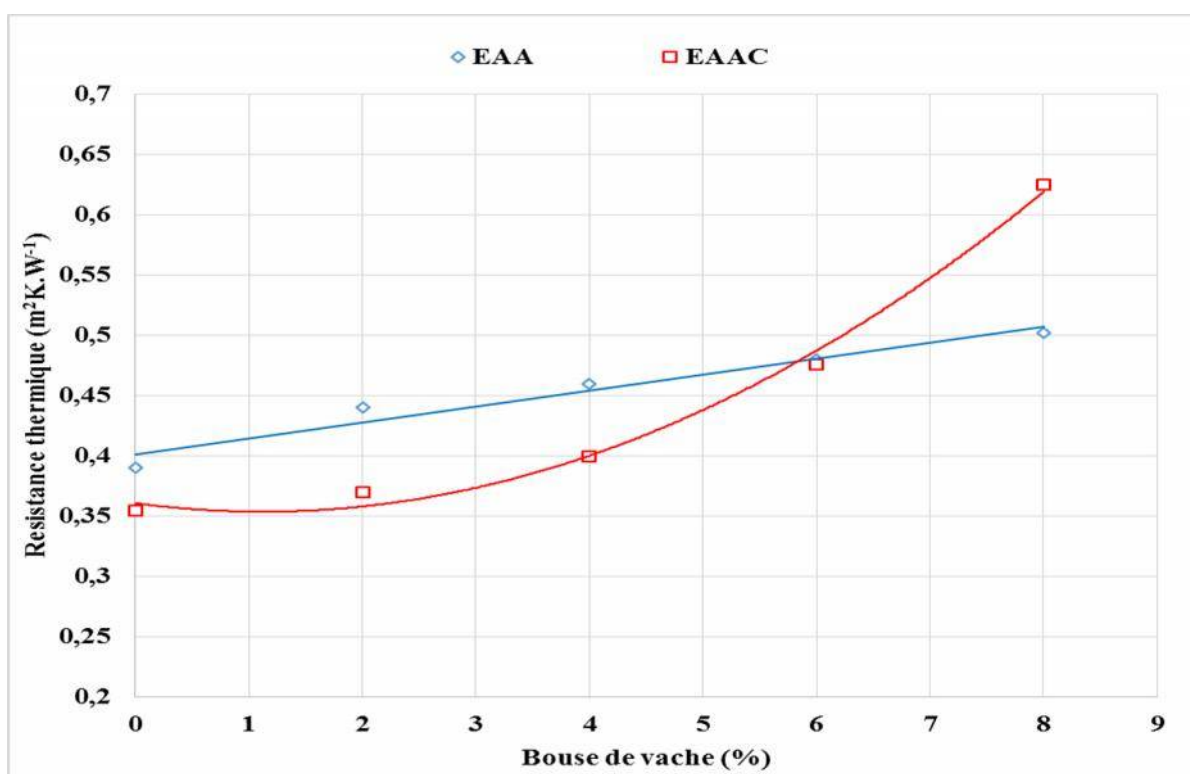


Fig.101 : Allures des résistances thermiques de EAA en fonction de l'ajout de BV avant et après la cuisson

D'après la figure 101, la conductivité s'améliore d'avantage après la cuisson du mélange d'argile et la bouse de vache, car pendant la cuisson, la bouse de vache contenue dans le mélange se consume et devient des poches d'aire (pores) qui sont favorables à la réduction de la conductivité thermique. Le matériau devient de plus en plus isolant avec l'ajout de la fraction massique de la bouse de vache.

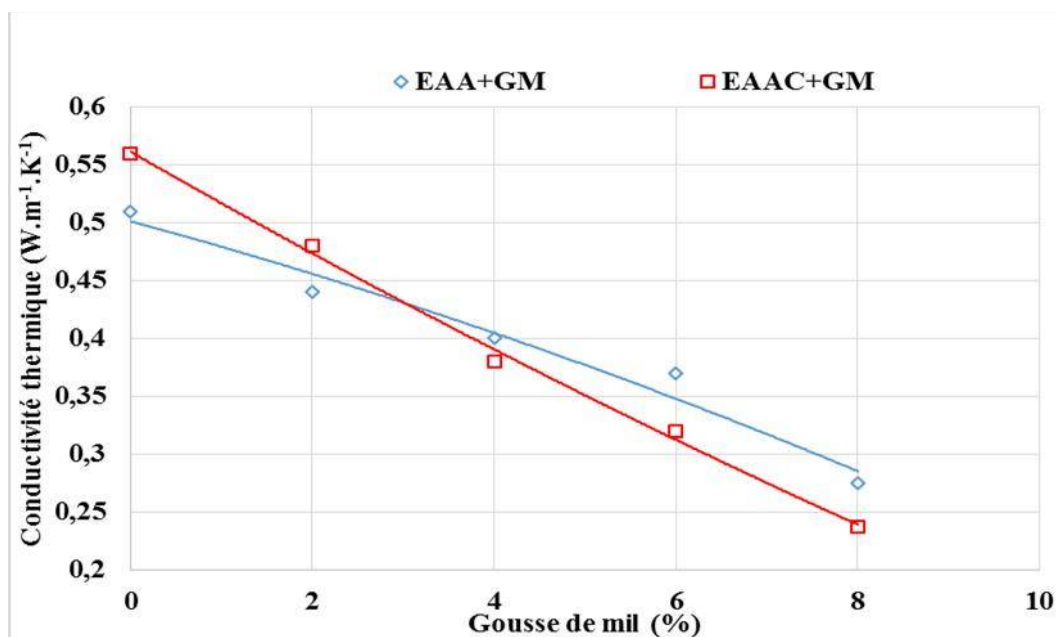


Fig.102 : Evolutions des conductivités thermiques en fonction de l'ajout de GM de EAA avant et après cuisson.

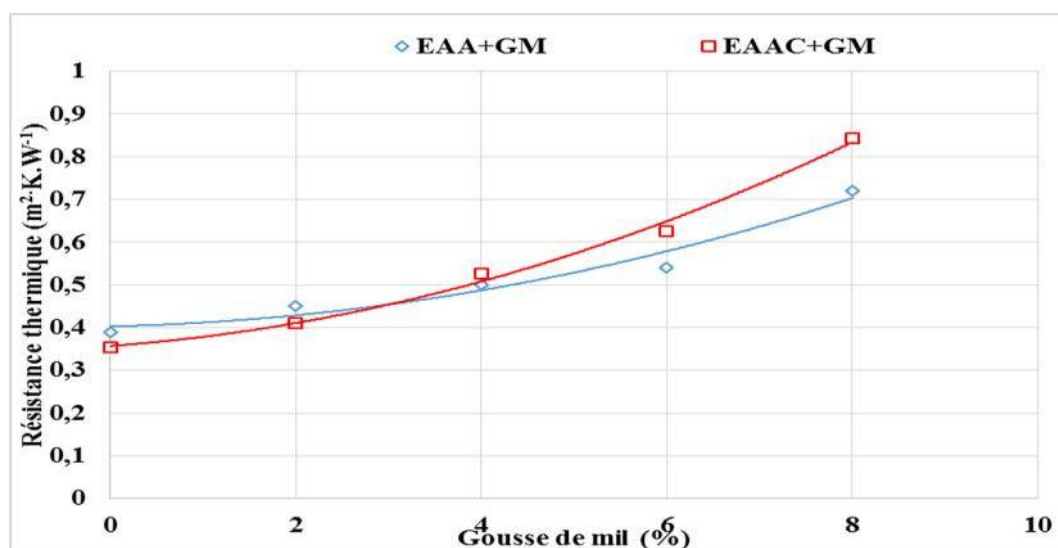


Fig.103 : Variation des résistances thermiques en fonction de l'ajout de la GM de EAA avant et Après cuisson

La conductivité s'améliore après la cuisson du mélange d'argile et la gousse de mil, car pendant la cuisson, la gousse de mil contenue dans le mélange se consume et devient des poches d'air (pores) qui sont favorables à la réduction de la conductivité thermique. On remarque que la cuisson améliore nettement les résistances thermiques de matériaux d'Abéché.

5.5.3 Etude Thermomécanique

➤ Matériaux avec la bouse de vache

Tableau 34 : Valeurs de la résistance thermique et mécanique de matériaux mélangés avec la BV

% Bouse de vache	Références échantillons							
	EAA		EAN		EAS		EAAC	
	Rc	Rth	Rc	Rth	Rc	Rth	Rc	Rth
0	2,06	0,39	1,93	0,322	1,66	0,22	4,81	0,355
2	2,09	0,44	2,021	0,34	1,65	0,25	5,45	0,37
4	2,56	0,46	2,18	0,384	1,81	0,3	6,41	0,4
6	2,65	0,48	2,56	0,454	1,66	0,4	6,22	0,476
8	2,62	0,502	2,18	0,536	1,51	0,55	7,77	0,625

- Matériaux Abéché

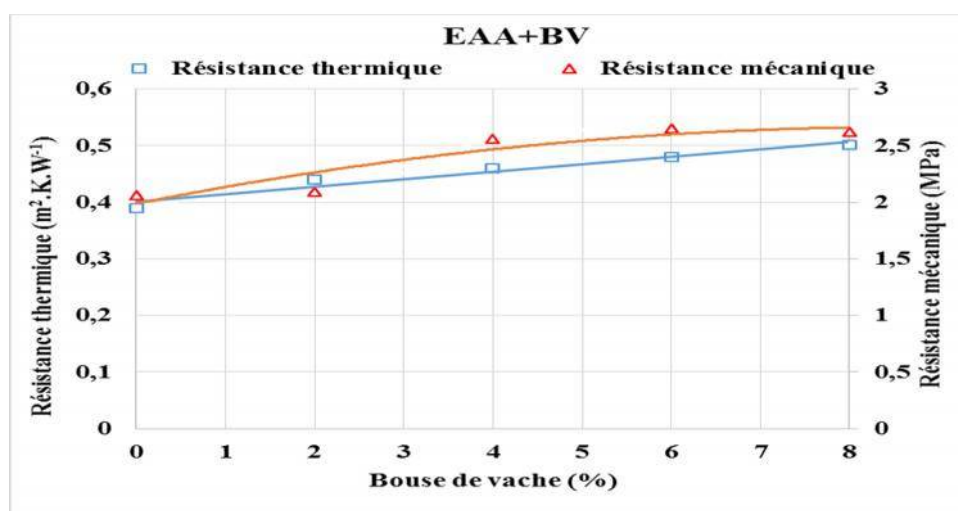


Fig.104 : Evolution de la résistance thermique et mécanique en fonction de la BV

On note que l'échantillon EAA présente à la fois une augmentation des résistances mécaniques et thermiques lorsqu'on ajoute de la BV jusqu'à la formulation de 6% avant que la résistance mécanique commence à décroître.

- **Matériaux de Ndjamena**

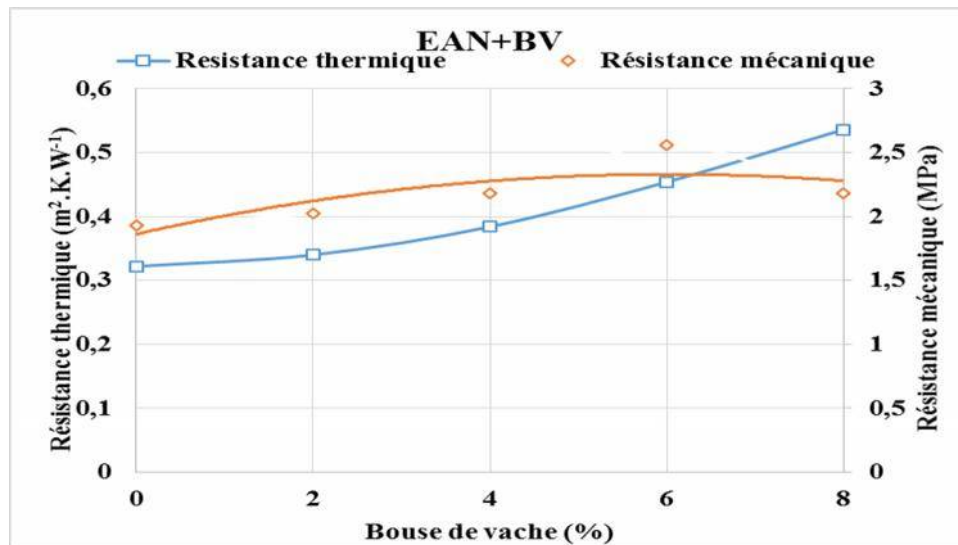


Fig.105 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la BV

L'échantillon EAN se voit sa résistance thermique évoluer avec l'augmentation de la fraction massique de la bouse de vache mais par contre, sa résistance mécanique s'augmente jusqu'à 6% du mélange avant de faire une régression.

- **Matériaux de Sarh**

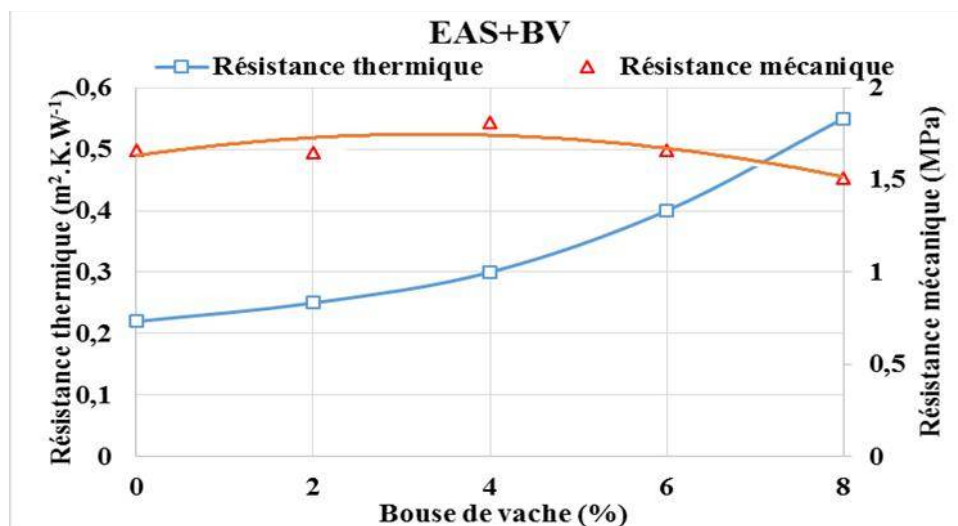


Fig.106 : Allures de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la BV

On remarque que sur la figure 106 pour le cas de l'échantillon EAS, l'ajout de la bouse de vache est favorable à l'augmentation de la résistance thermique, mais on remarque une réduction de la résistance mécanique après 4% du mélange.

- Terre cuite Abéché

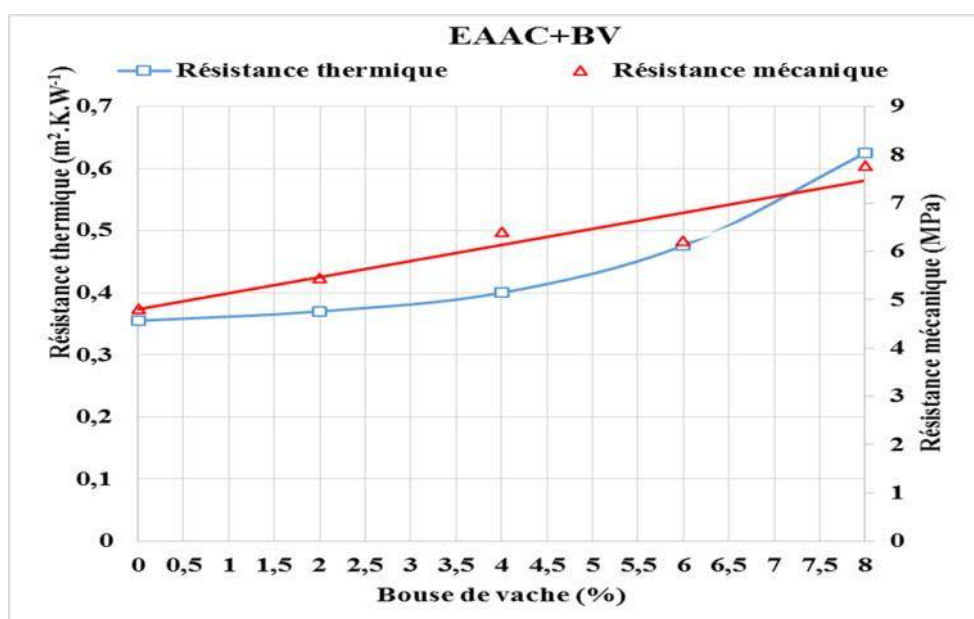


Fig.107 : Variation de la résistance thermique et mécanique de EAAC en fonction de l'ajout de la BV

Après la cuisson, on constate que, pour le cas EAAC+BV, la résistance mécanique évolue dans le même sens que la résistance thermique après un léger déclin au niveau de 6 % du mélange.

➤ Matériaux avec la gousse de mil :

Tableau 35 : Valeurs de la résistance thermique et mécanique de matériaux mélangés avec la GM

% Gousse de mil	Références échantillons							
	EAA		EAN		EAS		EAAC	
	Rc	Rth	Rc	Rth	Rc	Rth	Rc	Rth
0	2,06	0,39	1,93	0,32	1,66	0,23	4,81	0,354
2	1,86	0,45	1,86	0,34	1,36	0,27	4,01	0,41
4	1,63	0,5	1,960	0,48	0,90	0,34	8,14	0,5
6	1,59	0,54	1,866	0,55	0,84	0,49	7,22	0,625
8	1,32	0,72	1,508	0,63	0,81	0,78	4,81	0,843

- **Matériaux Abéché**

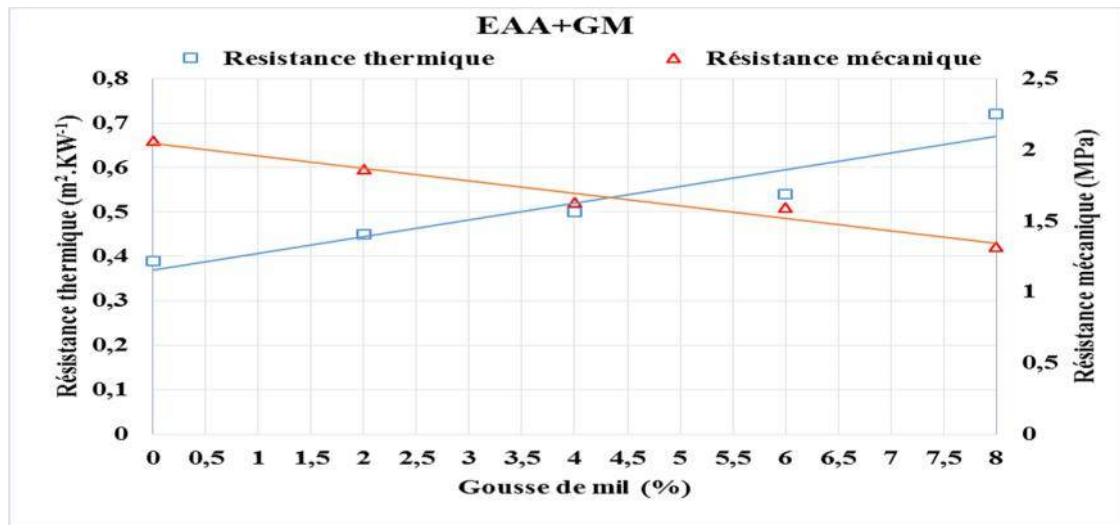


Fig.108 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM

Sur la figure 108, on constate que, la résistance mécanique décroît et la résistance thermique croît avec l'augmentation de teneur massique de la gousse de mil. Pour l'échantillon EAA, l'ajout de la GM est favorable pour les caractéristiques thermiques mais cet ajout crée une défaillance mécanique au niveau de sa structure.

- **Matériaux de Ndjamena :**

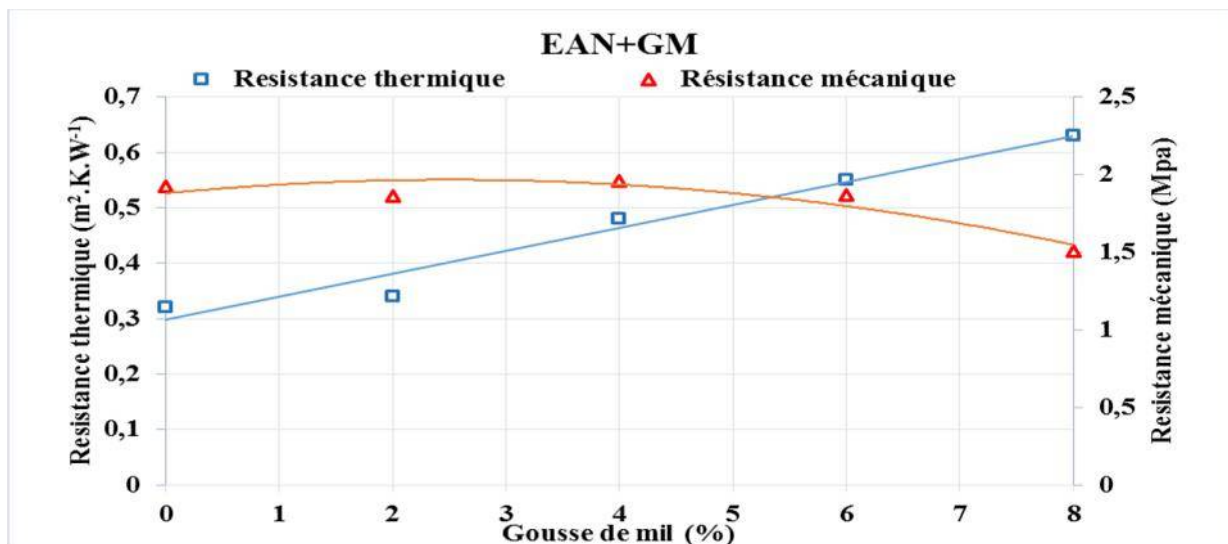


Fig.109 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM

La résistance mécanique diminue tandis que celle de la thermique augmente avec l'ajout de la gousse de mil pour le cas de l'échantillon EAN.

- **Matériaux de Sarh**

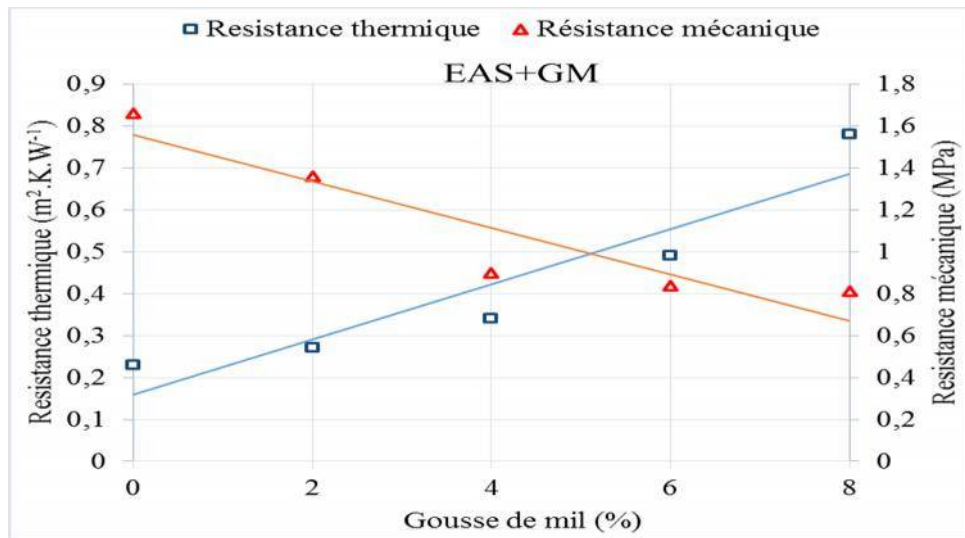


Fig.110 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM

On observe d'après la figure 110 que la résistance thermique évolue dans le sens contraire de la résistance mécanique quand on ajoute à l'argile de Sarh la gousse de mil.

- **Terre cuite Abéché**

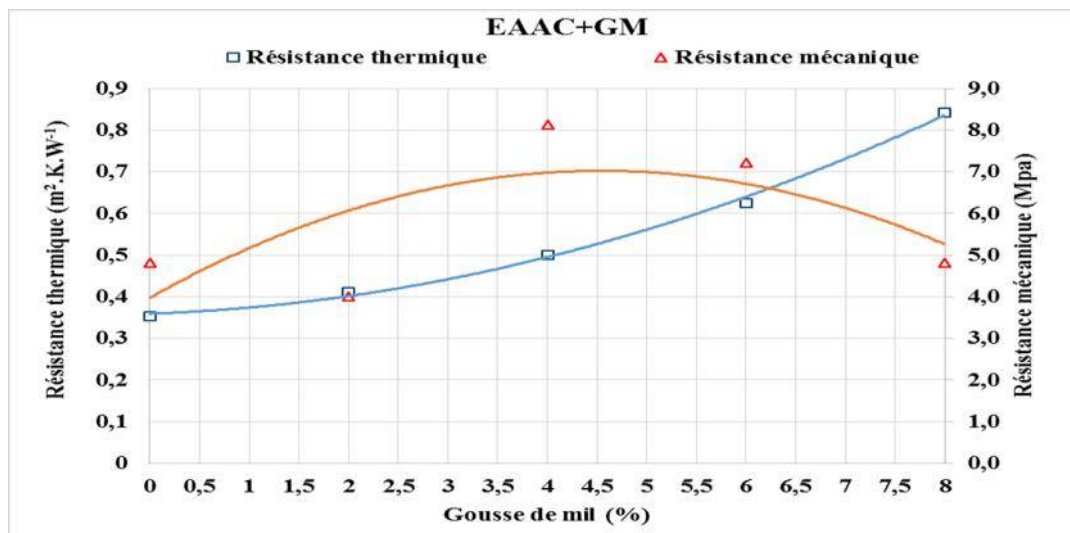


Fig.111 : Variation de la résistance thermique et mécanique en fonction de l'ajout de la GM

Après la cuisson de l'échantillon EAA+GM, on remarque sur la figure 111, que la résistance thermique augmente avec la teneur en gousse de mil tandis que la résistance mécanique évolue jusqu'à 4% du mélange avant de faire une régression.

➤ Récapitulatif des résultats et choix des matériaux

La caractérisation thermomécanique nous permet de choisir les meilleures formulations c'est-à-dire les échantillons qui concilient en même temps les meilleures résistances mécaniques et thermiques.

Tableau 36 : Echantillons avec BV présentant des résistances mécaniques élevées

Références échantillons	Formulation (%) BV	Résistance thermique ($\text{m}^2\text{K.W}^{-1}$)	Résistance mécanique (MPa)
EAA	8	0,502	2,62
EAN	8	0,53	2,18
EAS	8	0,55	1,51
EAAC	8	0,625	7,77

Tableau 37 : Echantillons avec GM présentant des résistances thermiques élevées

Références échantillons	Formulation (%) GM	Résistance thermique ($\text{m}^2\text{K.W}^{-1}$)	Résistance mécanique (MPa)
EAA	8	0,72	1,32
EAN	8	0,63	1,5
EAS	8	0,77	0,81
EAAC	8	0,843	4,81

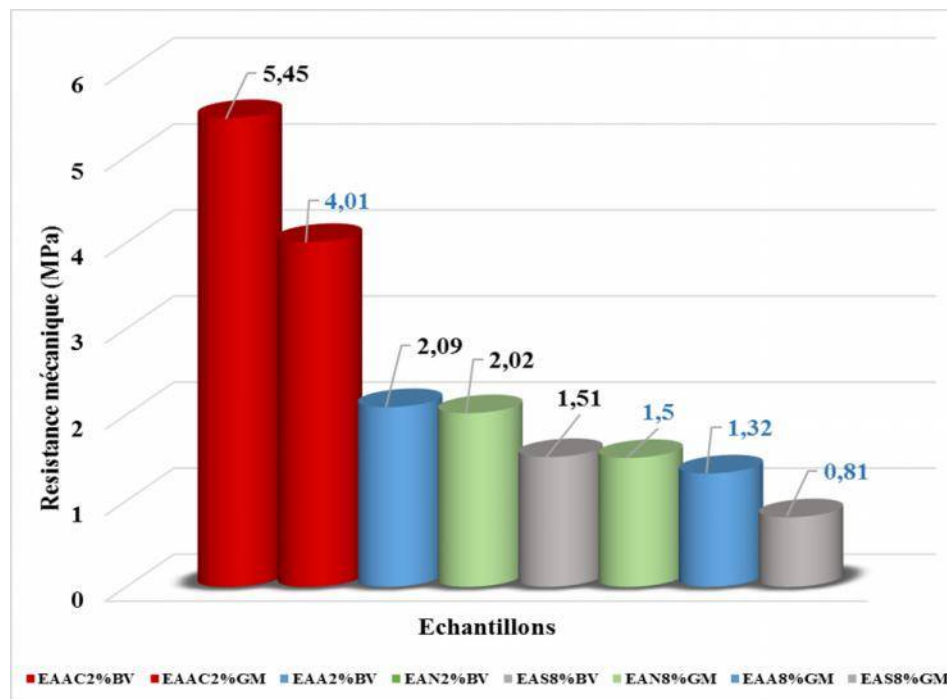


Fig.112 : Cas défavorables en résistance mécanique

On note que l'échantillon de Sarh mélangé à 8% de la gousse du mil présente la faible résistance mécanique (0,81MPa). En voulant construire un mur de remplissage de 3 mètres de hauteur avec cet échantillon de masse 0,731kg, la brique inférieure qui supportera la charges des briques au-dessus d'elle, doit avoir au minimum une résistance de 0,047 MPa.

Après analyse des données, On remarque que tous les matériaux utilisés dans ces travaux peuvent être utilisés pour le remplissage des murs de 3 mètres de hauteur, car ils possèdent tous une résistance mécanique largement supérieure à 0,047MPa. Par ailleurs, les matériaux avec les résistances mécaniques supérieures à 2MPa peuvent être utilisés comme matériaux porteurs dans les constructions des logements à charge modérée (bâtiment avec rez-de-chaussée seulement) ou pour les maisons individuelles.

Le facteur de choix restant est la résistance thermique des matériaux. Ainsi, nous avons listé les échantillons qui présentent par ordre de priorité les meilleurs isolants thermiques sur la figure 113 :

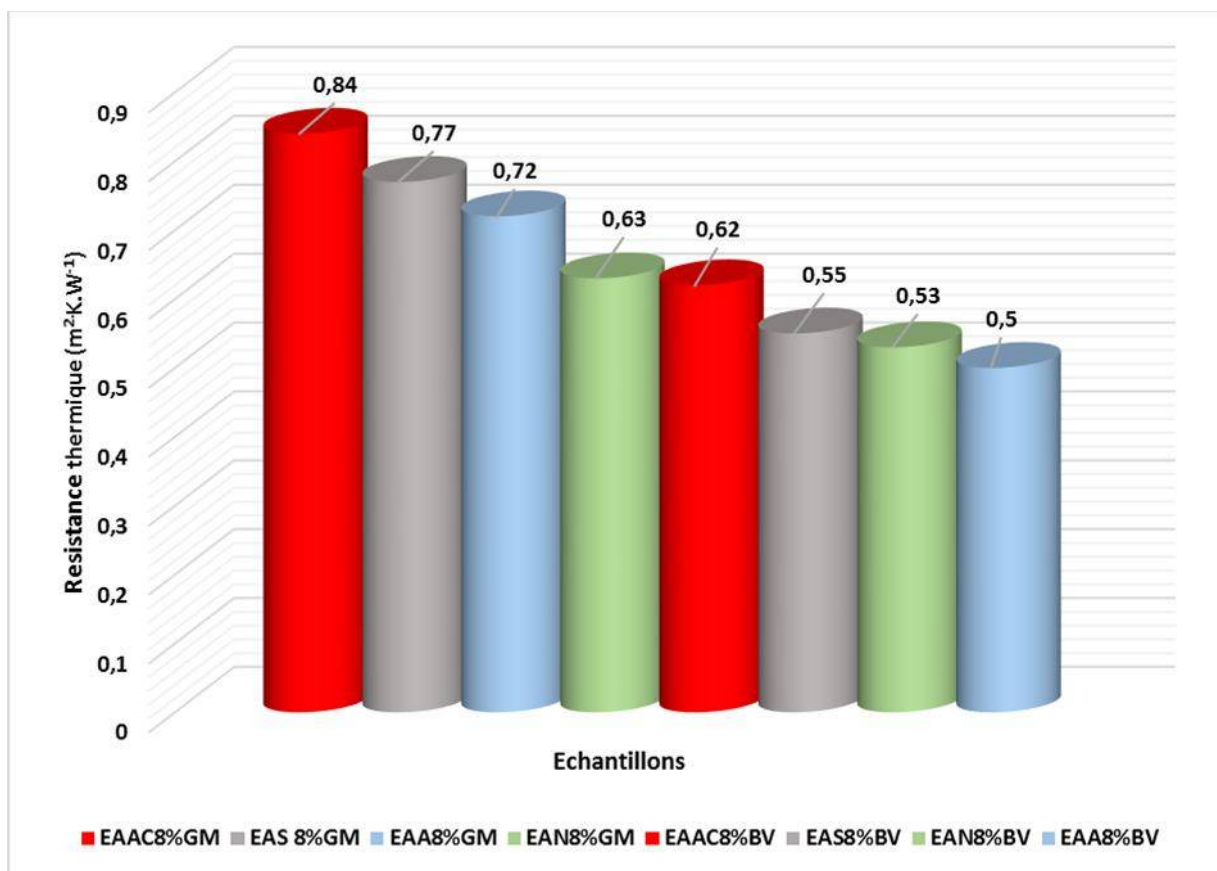


Fig.113 : Résistances thermiques des échantillons avec 8% d'adjuvant

Conclusion

Le chapitre 5 a permis de présenter des résultats positifs que nous avons obtenus. Les matériaux locaux mélangés avec les déchets agricoles que nous avons confectionnés présentent des meilleures caractéristiques thermiques pouvant améliorer le confort thermique dans les constructions. Les résultats mécaniques obtenus sont très encourageants car ces matériaux pouvaient être utilisés pour le remplissage des cloisons des murs ou des briques porteurs (EAAC) dans les constructions des bâtiments à charge modérée.

En plus des caractères thermiques et mécaniques, un matériau doit aussi répondre au problème énergétique et environnemental. La gestion de l'énergie est un facteur non négligeable dans la protection de l'environnement pendant la construction, l'exploitation et la démolition des bâtiments. La conception des éco-matériaux est un défi planétaire majeur.

La gestion et l'économie d'énergie pour la production de froid servant au confort dans les pays chauds est un objectif essentiel. Connaissant les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés, une étude comparative sur le gain d'énergie sera un atout important dans le choix de ces matériaux de construction.

Chapitre 6 : Simulation thermique d'un bâtiment

Introduction

RETScreen est un logiciel d'analyse des projets d'énergies propres, développé en collaboration avec de nombreux experts de l'industrie, du gouvernement canadien et du milieu académique. Offert gratuitement en ligne, il intègre à la fois les paramètres géographiques du site du bâtiment, les données météorologiques et les caractéristiques géométriques et thermophysiques du bâtiment.

Cet outil logiciel intègre les données climatiques satellitaires de la NASA en temps réel sur toute l'étendue du globe terrestre, bien adapté pour le développement des projets techniques et scientifiques dans le pays comme le Tchad.

Ce logiciel est plus souvent utilisé pour évaluer les différentes mesures d'efficacité énergétique associées à l'enveloppe du bâtiment, à la ventilation, à l'éclairage, aux équipements électriques, à l'eau chaude, aux pompes, aux ventilateurs, à la récupération de chaleur, aux réseaux d'air comprimé, à la réfrigération et plus encore.

Grâce à cet outil, nous allons pouvoir faire la simulation de gains d'énergie pour la production de froid dans un logement construit avec nos matériaux par rapport à un logement s'il était construit avec le ciment qui est un matériau de référence.

Dans ce chapitre, nous allons faire la simulation thermique d'un bâtiment construit avec les matériaux présentant les meilleures performances thermiques. Les résultats des gains d'énergie des matériaux avec 8% des adjuvants de la ville d'Abéché, N'Djamena et de Sarh par rapport à un matériau de référence sont donnés dans cette partie.

6.1 Réalisation de la simulation thermique

La simulation dans ces travaux consiste à faire les bilans thermiques de deux bâtiments, l'un construit avec nos matériaux à base d'argile et l'autre construit avec un matériau de référence. Nous avons choisi comme matériau de référence, le parpaing de ciment.

La simulation thermique se fait en plusieurs étapes : le choix du prototype, la définition du projet, la récupération des données climatiques du site du projet, les paramétrages thermiques des matériaux utilisés dans les parois et enfin les calculs des gains d'énergie.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de caractériser des matériaux venant des trois grandes villes du Tchad à savoir Abéché à l'Est, N'Djamena au Centre et Sarh au Sud. L'outil RETScreen nous donne la possibilité de faire la simulation des chaque échantillon sur son propre site de prélèvement grâce à sa puissante base de données sur les informations climatiques.

6.1.1 Choix d'un prototype de bâtiment

Pour la simulation nous avons choisi un type de bâtiment constitué de trois pièces couramment rencontré dans l'habitat au Tchad. Un logement accessible à une famille à revenu moyen. Ce bâtiment est composé de trois chambres (figure 114, 115).

Pour le cas de référence, les parois du bâtiment sont constituées avec des briques creuses en ciment. Les parois du bâtiment des cas proposés sont constituées des briques pleines en argiles ou en argiles mélangées avec les adjuvants (d'épaisseur 20 cm).

Dans ces travaux nous avons opté pour les mêmes types des matériaux en ce qui concerne les portes, les fenêtres et les toits.

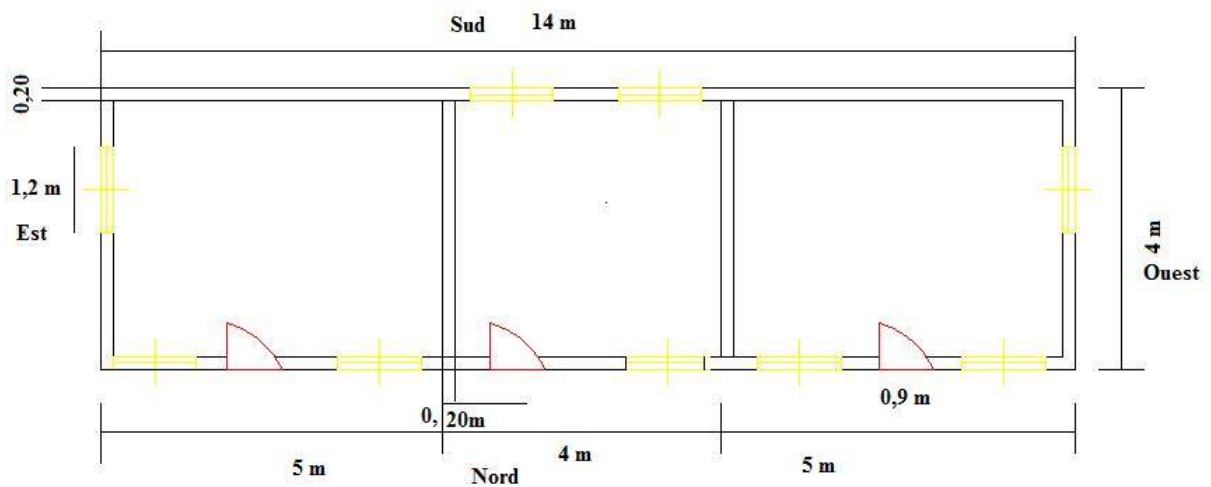


Fig.114 : Plan cellule d'étude

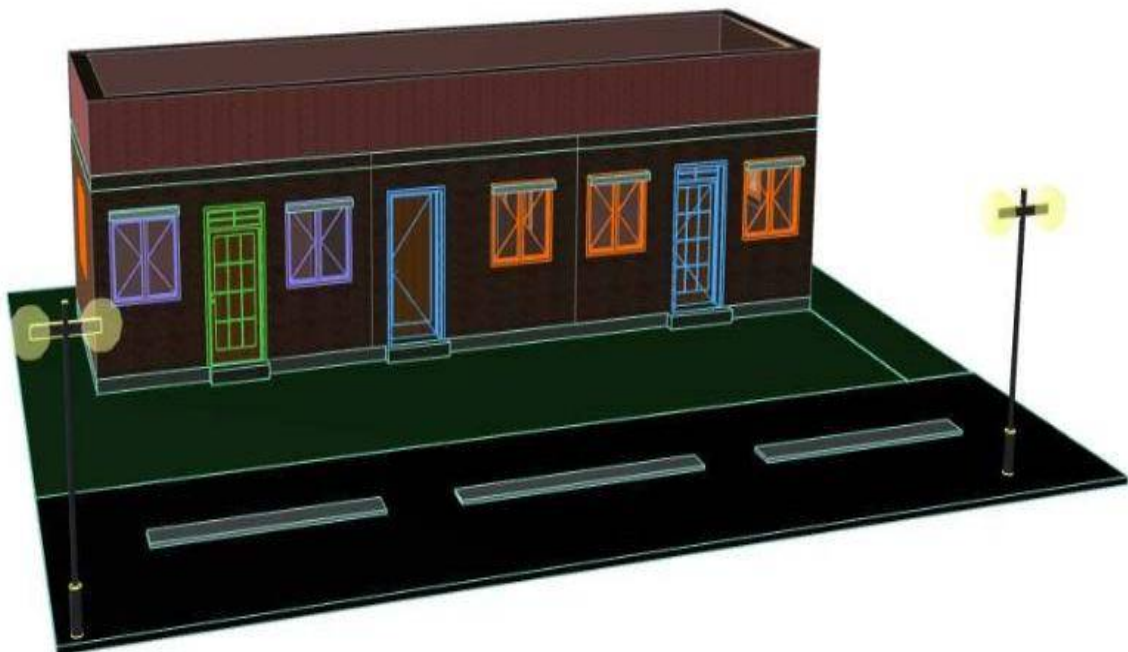


Fig.115 : Cellule d'étude dessin en 3D

6.1.2 Définition du projet

Le logiciel nous suggère de faire un projet de simulation en définissant un cadre prenant en compte le lieu et la nature de l'étude.

Information sur le projet

[Voir la Base de données de projets](#)

Nom du projet	logement social, argile + déchets agricoles
Lieu du projet	Abéché
Préparé pour	Recherche
Préparé par	Abdallah DADI
Type de projet	Mesures d'efficacité énergétique
Type d'établissement	Résidentiel
Type d'analyse	Méthode 1
Pouvoir calorifique de référence	Pouvoir calorifique inférieur (PCI)
Afficher paramètres	<input checked="" type="checkbox"/>
Langue - Language	French - Français
Manuel de l'utilisateur	French - Français
Devise	Tchad
Unités	Unités métriques


Fig.116 : Information sur le projet

En remplissant les informations ci-dessus, on situe le contexte du projet. Après cette étape de définition du projet, on procède à la récupération des données climatiques.

6.1.3 Données climatiques du site choisi

Après sa mise à jour, le logiciel RETScreen a la possibilité de donner à temps réel les informations climatiques satellitaires de la base des données de la NASA ou des stations météo au sol des grandes agglomérations. La figure suivante présente en guise d'exemple les données climatiques de la ville d'Abéché.

RETScreen



Pays - région: Tchad
 Province / État: n/a
 Lieu des données climatiques: Abéché

Latitude: °N 13,8
 Longitude: °E 20,8
 Élévation: m 474
 Température extérieure de calcul de chauffage: °C 18,1
 Température extérieure de calcul de climatisation: °C 37,4
 Amplitude des températures du sol: °C 18,8

Source: NASA
 Source: NASA
 Source: NASA
 Source: NASA

	Température de l'air	Humidité relative	Rayonnement solaire quotidien - horizontal	Pression atmosphérique	Vitesse du vent	Température du sol	Degrés-jours de chauffage	Degrés-jours de climatisation
	°C	%	kWh/m²/j	kPa	m/s	°C	°C-j	°C-j
Janv	24,2	18,0%	5,52	95,4	4,6	27,1	0	439
Févr	26,2	14,7%	6,32	95,3	4,6	29,6	0	454
Mars	29,6	16,1%	6,86	95,1	4,2	33,3	0	606
Avr	31,5	25,3%	7,07	94,9	4,0	35,3	0	645
Mai	30,7	39,6%	6,83	95,1	3,8	34,1	0	642
Juin	29,1	51,2%	6,60	95,2	4,2	32,0	0	574
Juill	26,2	68,7%	5,96	95,3	3,9	27,8	0	502
Août	25,6	70,2%	5,86	95,3	3,7	26,9	0	484
Sept	27,4	55,3%	5,96	95,3	3,4	29,3	0	523
Oct	29,4	30,1%	5,91	95,2	3,3	32,2	0	602
Nov	27,7	19,9%	5,59	95,3	3,6	30,5	0	530
Déc	25,0	19,7%	5,20	95,4	4,1	27,5	0	464
Annuel	27,7	35,9%	6,14	95,2	4,0	30,5	0	6 464
Source	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

Mesuré à: m 10

0










Fig.117 : Données climatiques de la ville d'Abéché

6.1.4 Paramétrage des parois du bâtiment.

Dans cette partie, il est question de définir les surfaces exposées et les paramètres thermiques des différentes parois du bâtiment. La figure suivante nous donne un exemple d'insertion des paramètres géométrique et thermique du bâtiment considéré.

Dans un bâtiment, la plus grande part des apports thermiques s'effectue à travers les parois, les murs, les fenêtres, les portes et le toit.

Enveloppe du bâtiment

1 2 3 4 5

Description

EAAC8%GM

	Cas de référence				Cas proposé				
Norc du bâtiment	0				0				<input checked="" type="checkbox"/> Cas de référence = cas proposé
Horaire	Horaire 1				Horaire 1				
Description	24/7				24/7				

Enveloppe du bâtiment	Cas de référence				Cas proposé				Surcoûts à l'investissement	
	Nord	Est	Sud	Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest		
Murs	<input type="checkbox"/> Cas de référence = cas proposé									
Surface	m ²	30,6	10,8	39,6	10,8	30,6	10,8	39,6	10,8	
Valeur R	m ² · °C/W	0,17	0,17	0,17	0,17	0,84	0,84	0,84	0,84	XAF
<input checked="" type="checkbox"/> Fenêtre	<input type="checkbox"/> Cas de référence = cas proposé									
Surface	m ²	6	1,2	2,4	1,2	6	1,2	2,4	1,2	
Valeur U	(W/m ²)/°C	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	XAF
Coefficient d'apport de rayonnement solaire		0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
<input type="checkbox"/> Ombrage - période d'utilisation										
<input checked="" type="checkbox"/> Portes	<input checked="" type="checkbox"/> Cas de référence = cas proposé									
Surface	m ²	5,4				5,4	0	0	0	
Valeur U	(W/m ²)/°C	0,5				0,5	0	0	0	XAF
<input checked="" type="checkbox"/> Toit	<input checked="" type="checkbox"/> Cas de référence = cas proposé									
Surface	m ²	56			56					
Valeur R	m ² · °C/W	0,7			0,7					XAF
<input type="checkbox"/> Plancher										
<input type="checkbox"/> Mur - sous le niveau du sol										
<input type="checkbox"/> Dalle de fondation										

Suivant

Suivant

Fig.118 : Données géométriques et thermiques de l'enveloppe du bâtiment avec EAAC8%GM

Ces informations permettront de calculer les charges énergétiques pour le cas de référence et le cas proposé du projet.

6.1.5 Calculs des gains d'énergie

Pour les calculs des gains d'énergies, cette étape permet de définir les infiltrations naturelles d'air et le choix du système de production avant de donner les résultats de la simulation.

RETScreen
X

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAAC8%GM

		Cas de référence	Cas proposé		Surcoûts à l'investissement
Infiltrations naturelles d'air					
Méthode		Calculé		\$	
Murs		Étanche	Étanche		
Fenêtre		Moyen	Moyen		
Portes		Moyen	Moyen		
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6		
Surcoûts à l'investissement	XAF		0		
Économies d'exploitation et entretien	XAF				
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1		
Choix du système		Froid	Froid		
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1		
Description du système de production de froid					
Froid	MWh	114	51	55,2%	

[Précédent](#)
[Précédent](#)

Fig.119 : Résultat des gains d'énergie cas de EAAC8%GM

Dans ce projet, il ressort que l'énergie nécessaire pour la production du froid est de 114MWh pour le matériau de référence et 51MWh pour le cas proposé. D'après ce résultat, l'échantillon d'agile d'Abéché cuite mélangée à 8% de la Gousse de mil (EAAC8%GM) présente un gain d'énergies d'environ 55,2% par rapport à l'utilisation du matériau en ciment.

6.2 Résultats de simulation avec RETScreen

Tableau 38 : Matériaux avec mélange de la bouse de vache

Références échantillons	Pourcentages BV (%)	Résistance thermique : cas proposé	Résistance thermique : cas référence	Cas référence (MWh)	Cas proposé (MWh)	Gain d'énergie (%)
EAAC8%BV	8	0,63	0,17	114	57	50,2
EAA8%BV	8	0,5	0,17	114	62	45,6
EAS8%BV	8	0,55	0,17	117	62	46,8
EAN8%BV	8	0,53	0,17	117	63	46,2

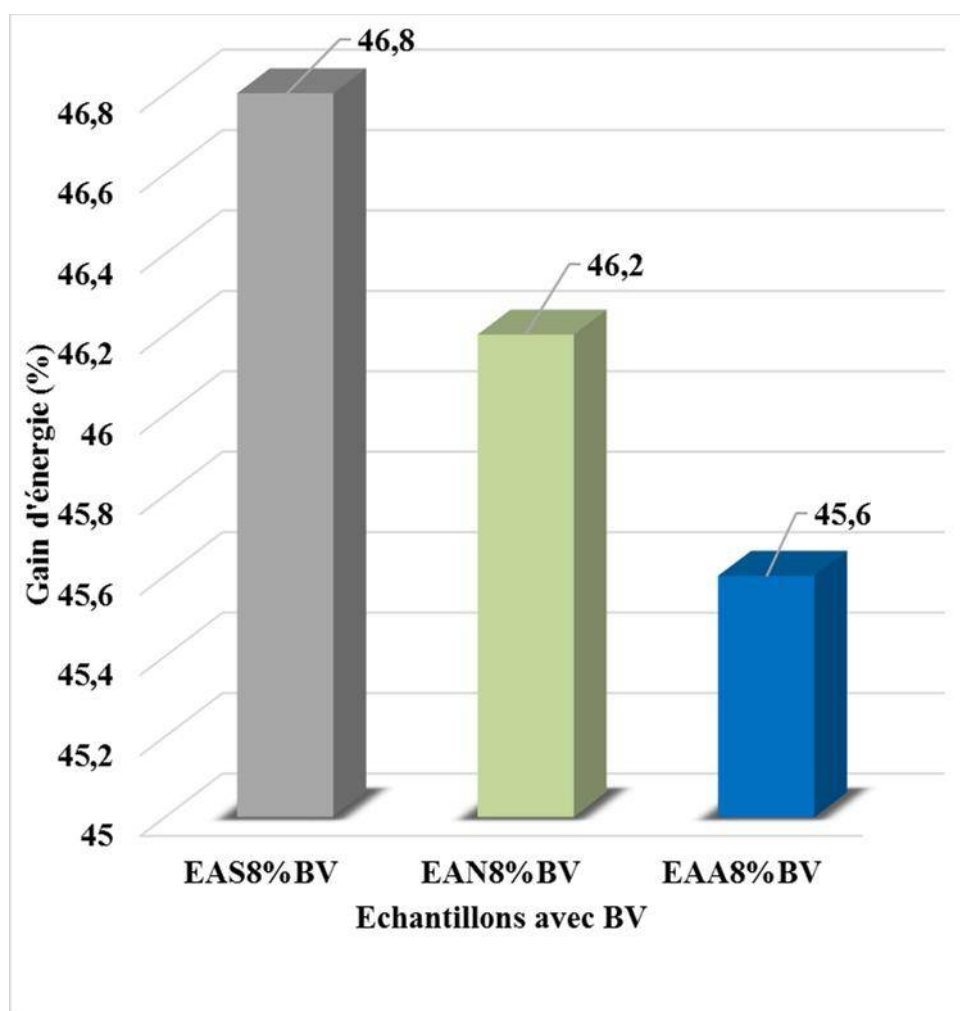


Fig.120 : Gains d'énergie pour la production de froid des matériaux mélangés avec la BV

Tableau 39 : Matériaux avec mélange de gousse de mil

Références échantillons	Pourcentages GM (%)	Résistance thermique : cas proposé	Résistance thermique : cas référence	Cas référence (MWh)	Cas proposé (MWh)	Gain d'énergie (%)
EAAC8%GM	8	0,84	0,17	114	51	55,2
EAA8%GM	8	0,72	0,17	114	54	52,8
EAS8%GM	8	0,77	0,17	117	55	52,8
EAN8%GM	8	0,63	0,17	117	59	49,7

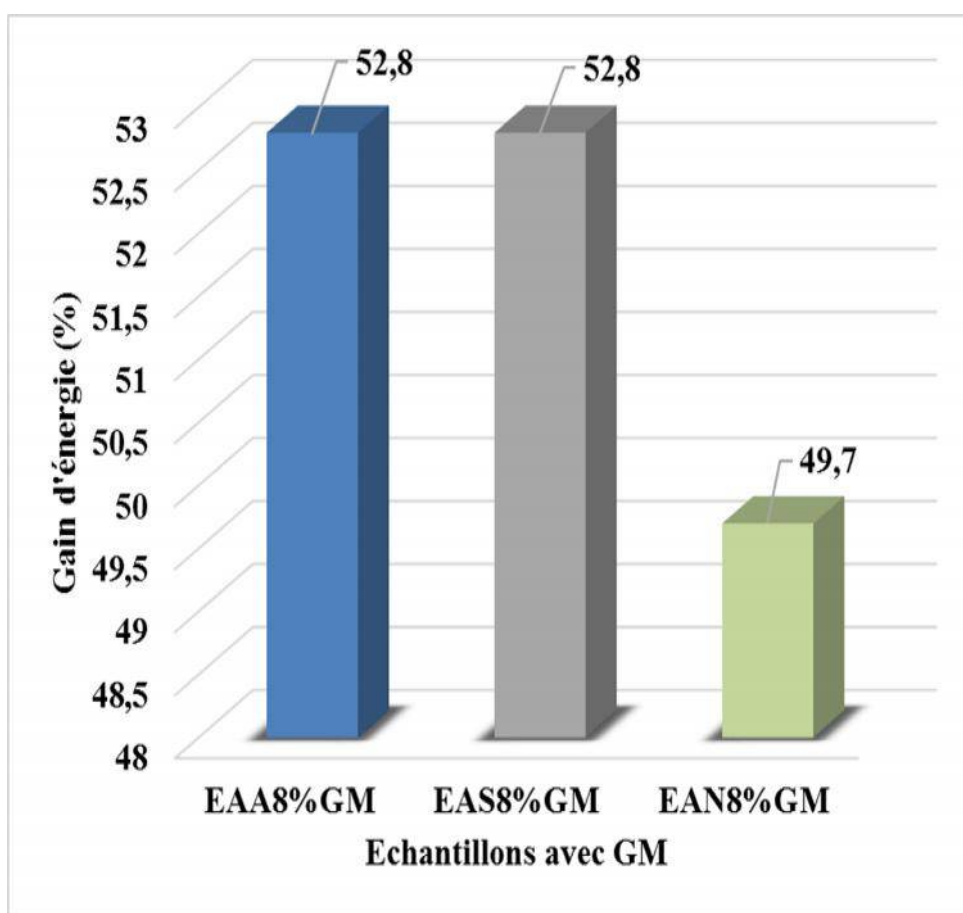


Fig.121 : Gains d'énergie pour la production de froid des matériaux mélangés avec la GM

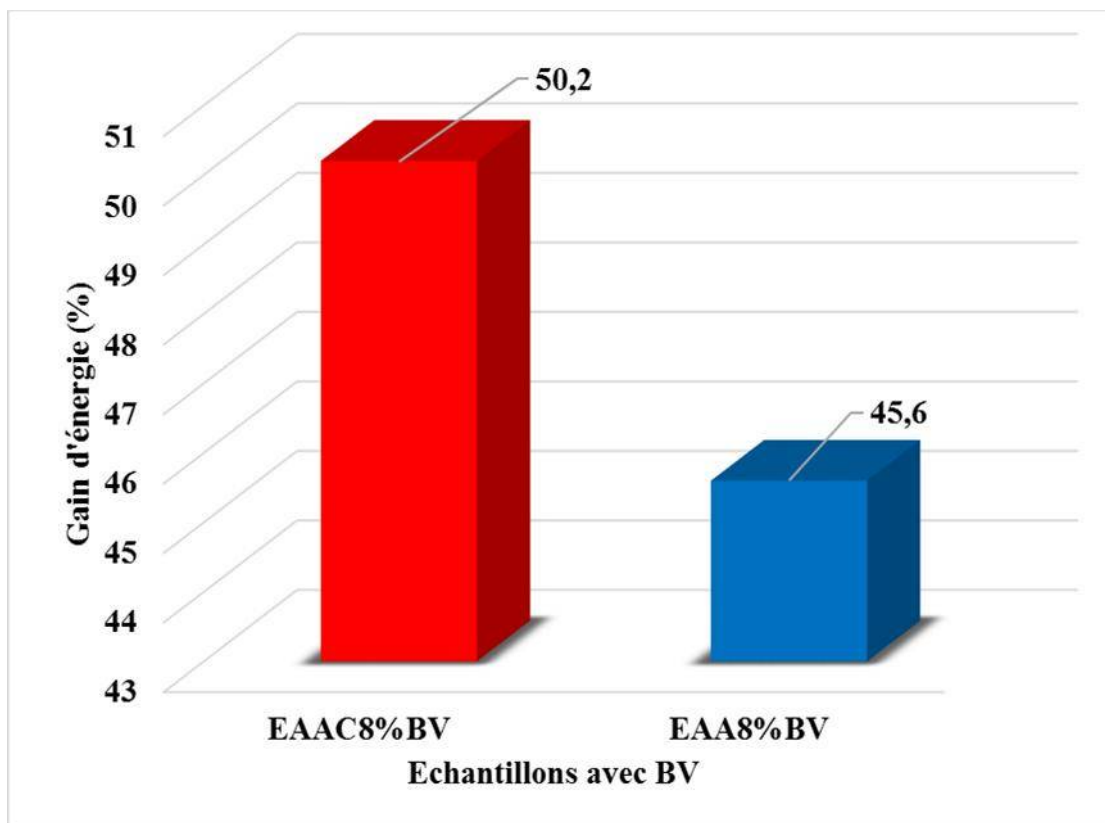


Fig.122 : Gains d'énergie pour la production de froid cas de EAAC8%BV et EAA8%BV

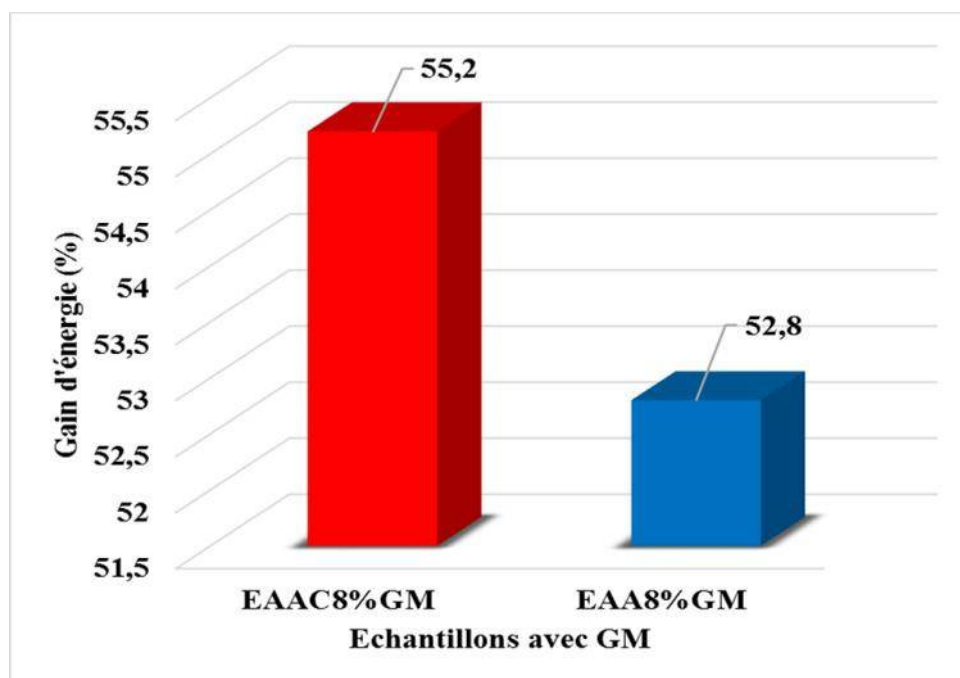


Fig.123 : Gains d'énergie pour la production de froid cas de EAAC8%GM et EAA8%GM

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les différents gains d'énergie pour la production du froid dans un bâtiment. D'après les résultats de la simulation, les matériaux que nous avons utilisés présentent des gains d'énergies importants par rapport à l'utilisation du ciment. Ces matériaux contribuent donc à l'économie d'énergie pour améliorer le confort thermique par rapport au matériau de référence à base de ciment plus utilisé dans la construction au Tchad.

L'outil RETScreen est bien adapté pour la gestion des projets des consommations de l'énergie dans le secteur de bâtiment en plein expansion à travers les pays en voie de développement et tout particulièrement le Tchad qui ne dispose pas assez des centres de traitement des données climatiques sur son territoire.

Conclusion Générale

Les matériaux locaux utilisés dans la construction des habitations traditionnels sont favorables pour l'amélioration du confort thermique. C'est pourquoi, la promotion de ces matériaux locaux de construction tels que la brique de terre doit être une préoccupation majeure pour les pays en de développement qui connaissent des crises énergétiques.

Le travail que nous venons de présenter est une étude comparative basée sur une approche expérimentale des propriétés mécaniques et thermiques de différents matériaux locaux de construction à base de terre avec incorporation des déchets agricoles de trois grandes villes du Tchad.

L'objectif est d'identifier les propriétés mécaniques et thermiques de ces matériaux locaux en argile mélangée avec la bouse de vache ou la gousse de mil et de faire une étude comparative. Dans cette thèse, nous avons mis en évidence les valeurs et les variations des résistances mécaniques, des conductivités thermiques, des résistances thermiques et des diffusivités thermiques des éprouvettes fabriquées avec ces matériaux avant d'effectuer une étude de variation des caractéristiques thermiques en fonction des masses volumiques et des teneurs en eau de ces matériaux .

Connaissant les caractéristiques mécaniques et thermiques, une étude thermomécanique a été effectuée pour présenter les matériaux qui concilient le mieux en même temps ces propriétés.

Pour une bonne évaluation de la consommation énergétique de ces matériaux, nous avons effectué des simulations de gains d'énergie pour la production du froid dans un bâtiment par rapport à un matériau de référence avec le logiciel RETScreen.

Les résultats obtenus sont très intéressants :

- L'incorporation la bouse de vache a permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux ;
- L'incorporation de la gousse de mil a permis aussi d'améliorer les caractéristiques thermiques de matériaux, mais par contre l'ajout de cet adjuvant est moins favorable pour les caractéristiques mécaniques ;
- Les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux 's'améliorent après la cuisson du matériau ;
- L'influence de la teneur en eau sur les propriétés thermiques est néfaste pour la résistance thermique car celle-ci diminue en présence d'humidité ;

- La simulation thermique a permis de montrer que l'utilisation des matériaux à base de la terre présente un gain d'énergie assez important par rapport à l'utilisation d'un matériau de référence tel que le ciment.

Ces matériaux locaux présentent des résistances mécaniques suffisantes leur permettant d'être utilisés comme matériaux de remplissage des murs et aussi certains (briques cuites) comme de matériaux porteurs dans les constructions des maisons à charge modérée fréquemment rencontrées dans l'habitat au Tchad.

Contrairement au ciment, au béton ou à l'acier, la terre avec incorporation des déchets agricoles à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction pratiquement avec une faible consommation d'énergie, elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels.

Dans le cadre de l'habitat social, l'utilisation de ces matériaux devrait permettre une réduction significative du coût de construction et ainsi que la facture énergétique pour une population à revenu faible comme celle du Tchad.

Vu les performances thermiques et mécaniques de ces matériaux à faible impact économique et environnemental, nous pouvons envisager leurs utilisations dans l'habitat social au Tchad.

Ces travaux ouvrent des nombreuses perspectives :

- Une étude acoustique de ces matériaux.
- Etude de contrôle et de l'influence de la température de cuisson sur les matériaux.
- Etude sur l'évaluation des indices de confort thermique dans une maison non climatisé construite à base de terre.
- Etude de Caractérisations thermophysiques et mécaniques des briques creuse à base de ces matériaux.

References Bibliographiques

- [1] A. Charfadine, « Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux locaux du Tchad. Application au confort thermique de l'habitat » Thèse Université Claude Bernard de Lyon 1, 06 mars 2002.
- [2] S. Gaye. « Caractérisation des propriétés mécaniques, acoustiques et thermiques des matériaux locaux de construction ». Thèse de Doctorat d'état. UCAD, Dakar. 02 Mars 2001.
- [3] D. Whisler F and all « The numerical analysis of infiltration into heterogenoLls porou: » Media. Soil Sci Soe Amer. Proc.. 1972. Vol.36 .
- [4] S, Nassima « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation ». Thèse Université Mentouri- Constantine 2010.
- [5] D. Samri, « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique » ; Thèse de Doctorat, L'institut National des sciences appliquées de Lyon octobre 2008.
- [6] V. Cerezo "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique," Thèse de Doctorat, L'institut National des sciences appliquées de Lyon, 16 juin 2005.
- [7] R. Peczalski, M. Laurent « Transfert dans les aliments solides modèles physiques et mathématiques » ; Techniques de l'Ingénieur, traité Agro-alimentaire F 2000.
- [8] M. Moubarak Yousif, « Contribution à l'évaluation énergétique des bâtiments au nord du Maroc : Cas de la ville de Tanger » ; Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaadi Tanger, Septembre 2014.

- [9] A. Cherki, B. Rémy, A. Khabbazi and D. Baillis, 2013. « Granular cork content dependence of thermal diffusivity and heat capacity of the composite material/granular cork bound with plaster ». *Energie. Procedia.*, 42: 83-92.
- [10] P.B Chauvasia and all, « Effective thermal of two-phase system ». *Ind.J. Pur Physique.* vol. 16. N°11, 1978.
- [11] T. Renaud « Mesure et modélisation de la conductivité et de la diffusivité thermiques des produits alimentaires congelés et non congelés ». Thèse de doctorat Université Claude Barnard Lyon 1, 1990.
- [12] H. Bal : « Modélisation et mesure de propriétés thermiques d'un milieu poreux humide : brique de latérite avec gousse de mil ». Thèse de Doctorat, UCAD, Dakar, juillet 2011.
- [13] M. R. J. Willye and A. R. South\wick. *J. Petrol. TechnoJ.* Vol. 6.
- [14] O. Krischer et K. Kra « Technique de séchage. Centre Technique des Industries Aérauliques et Techniques (CE.T.LA.T.) ». Traduction : Springer - Verlag. Berlin , 1963.
- [15] A. Kemajou T. seuyep et N. Egbewatt., « Le confort thermique en climat tropical humide vers un réaménagement des normes ergonomiques » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°3 , Septembre 2012.
- [16] A. Ould- Hennia « choix climatiques et construction, zones arides : la maison à cour de Boussaada » Thèse de doctorat, école polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2003.
- [17] P. Meukam « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique des bâtiments », Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pantoise, 2004.
- [18] H. Ayissi OKELE. « Brique de terre stabilisée : contribution à l'étude des stabilisants d'origine organique et minérale ». Mémoire de fin d'études d'élèves ingénieurs Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Yaoundé 1993.

- [19] D. Sow, « Caractérisation thermomécanique des mélanges de paille de riz et de matériaux à base d'argile en vue de leur utilisation dans l'habitat social », Thèse de Doctorat, UCAD ,Dakar 2014.
- [20] S. Gaye, « Contribution à l'étude confort thermique en climat tropical : influence de mouillure cutanée » Thèse de Docteur Ingénieur, UCAD, Dakar 1998.
- [21] R. Fauconnier, P. Guilenard et A. Grêlât Algorithmes des simulateurs du comportement thermique des bâtiments BILGA et BILBO-Présentation des logiciel BILGA et BILBO annales de l'ITBTP n°458-octobre 1987.
- [22] P. Meukam, Y. Jannot, A. Noumowe, T. Koffane , « Thermo physical characteristics of economical building materials. Construction and Building Materials » Vol 18, 2004.
- [23] S. Zegadi, « Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans des milieux granulaires », Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, 1997.
- [24] S. Gaye et G. Menguy, « Energie et environnement », Presse Universitaire de Dakar, édition 2008.
- [25] N. Laaroussi,, A. Cherki, M. Garoum, A. Khabbazi and A. Feiz,. « Thermal properties of a sample prepared using mixtures of clay bricks ». Energie. Procedia, 2013.
- [26] Y. Jannot, « Transfert et échangeurs de chaleur ». Cours LEPT- ENSAM, 2003.
- [27] D. Maillet ., A.André, J-C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, « Thermal quadrupoles », John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [28] B. Lahcen., R. Mir, M. Kourchi, A. Bendou, « Caractérisation thermophysique du mortier à base du ciment et de sable. mai 2016.

- [29] G Menguy, M. Laurent, Société weber Broutin, Moutarda, A. Leveau, J. « Cellule de mesure des caractéristiques thermophysiques des matériaux EI 700 » bulletin technique : Deltalab, 1986.
- [30] B. Lahcen « Caractérisation thermophysique des matériaux et modélisation des transferts couple de chaleur à travers un bâtiment » Thèse, Université Ibn Zohr Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir 2008.
- [31] O. Krischer, Die wissenschaftlichen Grundlagen des Trocknungstechnik, 1st ed., Springer-Verlag, Heidelberg, 1956.
- [32] A. Chekri, B. Rémy, A. Khabbazi, Y. Jannot and D. Baillis, 2014. « Experimental thermal properties characterization of insulating cork- gypsum composite ». Construct. Build. Mater., 54: 202-209.
- [33] A. Degiovanni, « Transmission de l'énergie thermique », Techniques de l'Ingénieur, BE 8200, 1999
- [34] Y. Jannot, Z. Acem, A. Kanmogne, « Transient hot plate method with two temperatures measurements for thermal characterization of metals ». Measurement Science and Technology, vol. 17, pp. 69-74, 2006.
- [35] R. Coquard, D. Baillis, D. Quenard, « Experimental and theoretical study of hot-wire method applied to low-density thermal insulators ». International Journal of Heat and Mass Transfer 48 pp. 4511-4524, 2006.
- [36] H. Ezbakhe, S. Boussad, A. El Bakkour, T. Ajzoul, A. El Boudari, « Etude thermique de terre stabilisée au ciment utilisée en construction au nord du Maroc ». Revue Energies Renouvelables., pp. 69-72, 2001.

- [37] P.S Ngohe-Ekam, P. Meukam, G. Menguy, P. Girard, « Thermophysique charaterisation of tropical wood used as Building Matériel : With respect to the basal density » ; construction and Building Materials, vol 20, 2006.
- [38] M. Tyouri, A. El Boudari, A. Manal, A. Homari, H. T. Ezbakhe, Ajzoul, « Propriétés thermophysiques de la sable émulsion margineux utilisé dans les réalisations des pistes agricoles ». 13èmes Journées Internationales de Thermique d'Albi, France, 2007.
- [39] A. El Bakkourri, S. Boussaid, H. Ezbakhe, T. Ajzoul, A. El Bouari, « Méthode générale d'identification paramétrique : Application à l'étude thermophysique de quelques matériaux locaux utilisés dans la construction au Maroc (plâtre – liège – brique creuse) ».Can. J. Civ. Eng., vol. 27, 2000.
- [40] A. Dadi, al, « Thermo-Physical Characterization of Clay Bricks Mixed with Agricultural Waste : Case Millet's Pod », IJETAE, janvier 2016.
- [41] Y. El-Rhaffari, al « Carte thermique et analyse porosimétrique des matériaux calcaires poreux », Rapport Matériaux , Nantes, France , 2010.
- [42] A. Dadi, al « Effect of cow's dung on thermophysical characteristics of building materiels based on clay » RJASET, juin 2015.

Annexes

A1 : situation géographique du Tchad



A1 : Carte du Tchad

A2 Données climatiques du Tchad

RETScreen

Paye région: Tchad
 Province / État: n/a
 Lieu des données climatiques: Ndjamena (Civ/Mil)

Latitude: 12,1 °N
 Longitude: 15,0 °E
 Élévation: 295 m
 Température extérieure de calcul de chauffage: 14,5 °C
 Température extérieure de calcul de climatisation: 41,9 °C
 Amplitude des températures du sol: 19,3 °C

Source: Sol

	Température de l'air °C	Humidité relative %	Rayonnement solaire quotidien - horizontal kWh/m²/j	Pression atmosphérique kPa	Vitesse du vent m/s	Température du sol °C	Degrés-jours de chauffage °C j	Degrés-jours de climatisation °C j
Janv	23,1	25,1%	5,25	97,8	3,7	26,3	0	408
Févr	26,5	20,5%	5,02	97,7	4,1	28,4	0	462
Mars	30,9	17,1%	6,67	97,4	4,2	33,0	0	648
Avr	33,9	25,9%	6,73	97,2	3,4	35,4	0	717
Mai	33,3	41,5%	6,54	97,4	3,3	34,2	0	722
Juin	31,2	50,1%	6,19	97,0	3,0	31,5	0	630
Juill	28,2	72,9%	5,54	97,7	3,1	27,6	0	564
Août	26,6	82,7%	5,31	97,7	2,7	27,0	0	515
Sept	27,7	77,7%	5,54	97,6	2,6	28,9	0	531
Oct	29,1	54,9%	5,52	97,0	2,6	31,0	0	592
Nov	27,2	27,7%	5,24	97,6	3,6	30,0	0	516
Déc	23,9	27,1%	4,87	97,8	3,5	26,9	0	431
Annuel	28,5	44,3%	5,77	97,6	3,4	30,1	0	6 740
Source	Sol	Sol	NASA	NASA	Sol	NASA	Sol	Sol

Mesuré à: m

A2-1 Données climatique de la ville de N'Djamena

RETScreen

Paye région: Tchad
 Province / État: n/a
 Lieu des données climatiques: Sarh

Latitude: 9,2 °N
 Longitude: 18,4 °E
 Élévation: 355 m
 Température extérieure de calcul de chauffage: 20,7 °C
 Température extérieure de calcul de climatisation: 37,0 °C
 Amplitude des températures du sol: 15,7 °C

Source: NASA

	Température de l'air °C	Humidité relative %	Rayonnement solaire quotidien - horizontal kWh/m²/j	Pression atmosphérique kPa	Vitesse du vent m/s	Température du sol °C	Degrés-jours de chauffage °C-j	Degrés-jours de climatisation °C-j
Janv	28,7	17,8%	6,30	96,7	4,1	31,2	0	580
Févr	30,4	18,0%	6,76	96,6	4,0	33,6	0	570
Mars	31,4	32,9%	6,73	96,4	4,3	34,8	0	664
Avr	30,3	52,4%	6,33	96,4	4,4	32,9	0	606
Mai	28,9	61,1%	5,80	96,6	4,0	30,6	0	584
Juin	27,1	68,0%	5,32	96,8	3,4	28,1	0	512
Juill	25,3	75,9%	4,77	96,9	3,1	26,0	0	473
Aug	25,1	76,2%	4,79	96,9	2,9	25,8	0	468
Sept	25,9	70,1%	5,15	96,8	2,7	26,6	0	476
Oct	27,7	52,1%	5,52	96,7	3,1	28,9	0	549
Nov	29,3	26,5%	6,07	96,6	3,7	31,0	0	579
Déc	28,7	21,6%	6,11	96,7	4,3	30,6	0	580
Annuel	28,2	48,0%	5,80	96,7	3,7	30,0	0	6 643
Source	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

Mesuré à: m

A2-2 Données climatique de la ville de Sarh

A3 : Résultats des simulations

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1 2 3 4 5

Description

EAA8%GM

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Infiltrations naturelles d'air		Calculé		
Méthode		Étanche	Étanche	\$
Murs		Moyen	Moyen	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes				
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	XAF		0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	114	54	52,8%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-1 : Resultats simulation thermique cas de EAA8%GM

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1 2 3 4 5

Description

EAA8%BV

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Infiltrations naturelles d'air		Calculé		
Méthode		Étanche	Étanche	\$
Murs		Moyen	Moyen	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes				
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	XAF		0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	114	62	45,6%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-1 : Résultats simulation thermique cas de EAA8%BV

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAS8%GM

Infiltrations naturelles d'air

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Méthode		Calculé		\$ <div style="border: 1px solid gray; width: 80px; height: 20px;"></div>
Murs		Étanche	Étanche	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes		Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	XAF		0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	117	55	52,8%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-2 : Résultats simulation thermique cas de EAS8%GM

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAS8%BV

Infiltrations naturelles d'air

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Méthode		Calculé		\$ <div style="border: 1px solid gray; width: 80px; height: 20px;"></div>
Murs		Étanche	Étanche	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes		Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	XAF		0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	117	62	46,8%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-3 : Resultats simulation thermique cas de EAS8%BV

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAN8%GM

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Infiltrations naturelles d'air		Calculé		
Méthode				\$ <div style="border: 1px solid gray; width: 50px; height: 20px; display: inline-block;"></div>
Murs		Étanche	Étanche	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes		Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	\$		0	
Économies d'exploitation et entretien	\$			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	117	59	49,7%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-4 : Resultats simulation thermique cas de EAN8%GM

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAN8%BV

		Cas de référence	Cas proposé	Surcoûts à l'investissement
Infiltrations naturelles d'air		Calculé		
Méthode				\$ <div style="border: 1px solid gray; width: 50px; height: 20px; display: inline-block;"></div>
Murs		Étanche	Étanche	
Fenêtre		Moyen	Moyen	
Portes		Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6	
Surcoûts à l'investissement	\$		0	
Économies d'exploitation et entretien	\$			
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe		1	1	
Choix du système		Froid	Froid	
Système de production de froid		Système de production de froid 1	Système de production de froid 1	
Description du système de production de froid				
Froid	MWh	117	63	46,2%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-5 : Resultats simulation thermique cas de EAN8%BV

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAAC8%BV

Infiltrations naturelles d'air

Cas de référence **Cas proposé**

Surcoûts à l'investissement

\$

Méthode	Calculé		
Murs	Étanche	Étanche	
Fenêtre	Moyen	Moyen	
Portes	Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6
Surcoûts à l'investissement	XAF	0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF		
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe	1	1	
Choix du système	Froid	Froid	
Système de production de froid	Système de production de froid 1		
Description du système de production de froid			
Froid	MWh	114	57
			50,2%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

A3-6 : Resultats simulation thermique cas de EAAC8%BV

X

RETScreen

Enveloppe du bâtiment

1

2

3

4

5

Description

EAA8%BV

Infiltrations naturelles d'air

Cas de référence **Cas proposé**

Surcoûts à l'investissement

\$

Méthode	Calculé		
Murs	Étanche	Étanche	
Fenêtre	Moyen	Moyen	
Portes	Moyen	Moyen	
Infiltrations naturelles d'air	L/s	34,6	34,6
Surcoûts à l'investissement	XAF	0	
Économies d'exploitation et entretien	XAF		
Nbre de bâtiments ayant la même enveloppe	1	1	
Choix du système	Froid	Froid	
Système de production de froid	Système de production de froid 1		
Description du système de production de froid			
Froid	MWh	114	62
			45,6%

[Précédent](#)
[Précédent](#)

Resultats simulation thermique cas de A3-7 : Résultats simulation thermique cas de EAA8%BV

Liste des publications

- 1 **Abdallah DADI Mahamat**, Oumar IDRIS Hamid, Malloum Soultan, **Publié**
 Mahamoud Youssouf KHAYAL, Yassine Elhamdouni, Mohammed
 GAROUM, Salif GAYE ; « Effect of cow's dung on thermophysical
 characteristics of building materials based on clay » RJASET, 2015

- 2 **Abdallah DADI Mahamat**, Mahamoud Youssouf Khayal, Macodou **Publié**
 Thiam, Azibert Oumar Abdelakh, Gilbert Menguy, Salif GAYE, « Thermo-
 Physical Characterization of Clay Bricks Mixed with Agricultural Waste:
 Case Millet's Pod », International Journal of Emerging Technology and
 Advanced Engineering Website: www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO
 9001:2008 Certified Journal, Volume 6, Issue 1, January 2016).

- 3 **Abdallah DADI Mahamat**, Mahmoud Youssouf Khayal, Ahmat **Publié**
 Charfadine, Malloum Soultan, . Gilbert Menguy, Salif Gaye « Improvement
 of thermal parameters of building materials based on clay » REDEC 2016
 Lyban, IEE

- 4 Oumar IDRIS Hamid, Nadjitonon NGARMAIM, Mahamoud Youssouf **Publié**
 Khayal, **Abdallah DADI Mahamat** « Thermophysical characterization of
 an environmentally construction material made by clay and wheat »
 International Journal of Engineering Sciences & Research Technology
 (IJESRT) [[Idriss, 4\(12\) : Décembre, 2015](#)]

- 5 Yassine Elhamdounia, *, Abdelhamid Khabbazia, Chaimaa Benayada, **Publié**
Abdallah Dadi, « Effect of fiber alfa on thermophysical characteristics of a
 material based on clay », Energy Procedia 74 (2015) 718 – 727

THEME :

**Etude comparative des caractéristiques thermophysiques et
mécaniques de matériaux locaux de construction utilisés dans
l'habitat social au Tchad**

DOCTORANT :

ABDALLAH DADI MAHAMAT

DIRECTEURS DE

- Pr. Salif GAYE ; Pr. Mahamoud Youssouf KHAYAL

THESE :

Résumé

Le coût d'investissement et la consommation de l'énergie dans le secteur du bâtiment pèsent lourdement sur l'économie et l'environnement. C'est pour cela que plusieurs études ont été effectuées au niveau du bâtiment et des équipements afin de contribuer au choix de matériaux adéquats pour l'enveloppe et à la maîtrise de l'énergie.

Le présent travail qui porte sur l'étude comparative des caractéristiques thermophysiques et mécaniques de matériaux de construction locaux à base d'argile avec incorporation des déchets agricoles en provenance de trois grandes agglomérations du Tchad (les régions d'Abéché, de N'Djamena et de Sarh), rentre dans ce cadre.

L'objectif visé est l'obtention de matériaux allégés présentant de bonnes performances thermomécaniques et pouvant contribuer à améliorer le confort thermique dans l'habitat social au Tchad tout en réduisant le coût d'investissement.

Dans ce sens, plusieurs échantillons ont été confectionnés avec des pourcentages massiques de déchets agricoles (bouse de vache ou gousse de mil) variant de 0% à 8%. Chaque échantillon a fait l'objet d'une caractérisation mécanique et thermique. Pour cela, nous avons utilisé des méthodes expérimentales appropriées pour les matériaux poreux (la presse hydraulique pour les essais mécaniques et la méthode des boîtes pour les essais thermiques).

La résistance à la compression, la conductivité thermique et la diffusivité thermique de chaque échantillon ont ainsi été déterminées grâce aux données expérimentales obtenues à partir de ces méthodes.

La simulation thermique effectuée avec ces résultats expérimentaux a permis de constater des gains d'énergie importants ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique.

Cette thèse a ainsi permis de montrer que les déchets agricoles peuvent être valorisés grâce à leur intégration dans les matériaux de construction.

Mots clés : Matériaux de construction, caractéristiques mécaniques, caractéristiques thermiques, bouse de vache, gousse de mil, argile, valorisation déchets, économie d'énergie, confort thermique.

Abstract

The capital cost and the consumption of energy in the sector of the building weigh heavily on the economy and the environment. It is for that several studies were carried out on the level of the building and the equipment in order to contribute to the choice of adequate materials for the envelope and to the control of energy.

This work, which relates to the comparative study of the thermophysical and mechanical local building material characteristics based on clay with incorporation of agricultural waste coming from three great agglomerations of Chad (areas of Abéché, Djamena and Sarh), returns within this framework.

The had aim is obtaining materials reduced presenting good thermomechanical performances and being able to contribute to improve thermal comfort in the social habitat in Chad while reducing the capital cost.

In this direction, several samples were made with mass percentages of agricultural waste (dung of cow or pod of millet) varying from 0% to 8%. Each sample was the subject of a mechanical and thermal characterization. For that, we used experimental methods adapted (the hydraulic press for the mechanical tests and the method of limp for the thermal tests) for porous materials.

The compressive strength, thermal conductivity and the thermal diffusivity of each sample were thus given thanks to the experimental data obtained starting from these methods.

The thermal simulation carried out with these experimental results made it possible to note significant profits of energy as well as an improvement of the energy.

This thesis thus made it possible to show that agricultural waste can be developed thanks to their integration in building materials.

Key words : Building materials, mechanical characteristics, thermal characteristic, dung of cow, pod of millet, clay, valorization waste, energy saving, thermal comfort.