

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Architecture
Ref :.....



جامعة محمد خيضر - بسكرة -
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de

Doctorat en sciences en : Architecture
Option : Architecture

Intitulé :
**Simulation et expérimentation d'un prototype
d'architecture en milieux arides et semi-arides**

Présenté(e) par :
LAOUNI Iynes
Soutenue publiquement le :

Devant le jury composé de :

Pr.BENABBASSE.M	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. MAZOUZ. S	Professeur	Rapporteur	Université d'Oum- Bouaghi
Dr.AHRIZ.A	MCA	Examineur	Université de Tebessa
Dr.BERKOUK.DJ	MCA	Examineur	Université de Biskra

Dédicaces

Louange à Dieu le tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu...

*Je dédie cette thèse de Doctorat en Science à mes chers parents : les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance, à mon cher père Saïd et à ma chère mère Zakina dont l'amour, la patience et le sacrifice s'inscrivent à chaque page de ce document, et aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de leur juste valeur, de leur amour inconditionnel et des efforts qu'ils ont fournis pour moi.
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

A toute ma famille, mes frères et ma sœur adorée Chahinez, mes belles-sœurs et mon beau-frère.

*Vous m'avez apporté toujours soutien et réconfort, vos encouragements m'ont donné la force et le courage pour persévérer.
Que dieu le tout puissant vous garde et vous procure
Santé et bonheur*

*A mon mari : Walid, mon soutien et ma source de puissance.
Que dieu te garde pour moi.*

A mes adorables enfants : Taha, Djana et Anes, vous êtes mon rayon de soleil que dieu vous protège.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce modeste travail, je vous dis à tous « Merci »

Laouni Iynes

Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier **Allah** de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la force d'accomplir ce modeste travail.*

En préambule à cette thèse, je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, ainsi qu'à la réussite de mon cursus universitaire.

*Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le professeur **Mazouz Said** qui a toujours été attentif et disponible tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que pour l'aide, les orientations et le temps qu'il a bien voulu me consacrer ; sans son appui cette thèse n'aurait jamais vue le jour.*

Mes vifs remerciements s'adressent également au Directeur de l'APMC pour m'avoir accueillie au sein de l'agence de production des matériaux de construction, et avoir mis à ma disposition le matériel nécessaire support de ce travail.

*Mes remerciements et ma gratitude s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner, évaluer, et discuter ce modeste travail, le professeur **Benabbasse Mossadek**, Docteur **Ahriz Atef**, et Docteur **Berkouk Djihad**.*

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon cursus.

Laouni Iynes

Résumé

L'objectif de cette recherche est de développer un matériau qui améliorera le confort intérieur en éliminant l'effet des parois chaudes pendant l'été et réduire la quantité d'énergie consommée par la climatisation. Il vise également à favoriser une autonomie thermique suffisante pour maintenir le confort thermique dans les zones chaudes et arides, comme le climat de Biskra dans le sud-est algérien, et pour fournir aux concepteurs un matériau sain, durable, solide et peu coûteux. Les propriétés thermiques de ce matériau, y compris la combinaison proposée et le procédé de fabrication de ces briques de terre comprimée et stabilisée, seront démontrées. Le prototype de l'étude sera décrit.

Ce matériau : BTSC (brique de terre stabilisée et compressée) est un matériau à base de terre qui se rapproche dans les qualités thermiques au BTC et qui a la résistance du BTS. Ce matériau été testé avec deux méthodes : l'utilisation de l'expérimentation (prototype réduit), et la simulation par (TRYNSIS-17). L'expérimentation comprend l'élaboration du matériau de construction, et la prise des mesures des températures ambiantes, et surfaciques.

Cette étude expérimentale est effectuée à travers la réalisation de deux prototypes à une échelle réduite, qui a permis de tester la température surfacique externe, température ambiante, température surfacique internes. Ces prototypes ont donné la possibilité de déterminer les impacts réels des propriétés thermiques du BTSC. Les résultats obtenus démontrent que ce matériau à un impact positif sur le fonctionnement thermique des murs et par conséquent le confort thermique interne, la réduction de la température surfacique atteint les 7°C, cette diminution influe sur la chaleur stockée et le flux de chaleur transféré vers l'intérieur ce qui minimise la température interne jusqu'à 6°C. Par conséquent une réduction de la température ambiante de l'ordre de 5°C.

Trois modèles en été simulé pour optimiser l'utilisation de ce matériau. La simulation numérique effectuée sur les prototypes pour optimiser l'impact des mêmes paramètres : facteur d'absorption et transfert de chaleur et besoins énergétiques. Un model numérique a été élaboré avec une combinaison de trois types de murs ; les résultats ont montré que la maîtrise des éléments de construction tel que le matériau de construction se répercute directement sur l'efficacité thermique et énergétique de la construction.

Mots clés :

Climat chaud et aride, Matériau à base de terre, BTSC, Température ambiante, prototype, Expérimentation, Simulation.

ملخص

الهدف من هذا البحث هو تطوير مادة من شأنها تحسين الراحة الداخلية من خلال القضاء على تأثير الجدران الساخنة خلال فصل الصيف وتقليل كمية الطاقة التي يستهلكها تكييف الهواء. كما يهدف إلى تعزيز الاستقلالية الحرارية الكافية للحفاظ على الراحة الحرارية في المناطق الحارة والجافة، مثل مناخ بسكرة في جنوب شرق الجزائر، وتزويد المصممين بمواد صحية ومتينة وصلبة وغير مكلفة. سيتم توضيح الخصائص الحرارية لهذه المادة، بما في ذلك التركيبة المقترحة وعملية التصنيع لهذه الطوب الترابي المضغوط والمثبت. سيتم وصف النموذج الأولي للدراسة.

هاته المادة (لبنة أرضية مثبتة ومضغوطة) هي مادة مستخلصة من التراب يقترب من القوالب الترابية المضغوطة من ناحية الصفات الحرارية ومن القوالب الترابية المثبتة. تم اختبار هذه المادة بطريقتين: استخدام التجربة (النموذج الأولي المصغر) والمحاكاة تتضمن التجربة تطوير مواد البناء وقياس درجات الحرارة المحيطة والسطحية (بواسطة 17-TRYNSIS)

حيث تم إجراء هذه الدراسة التجريبية من خلال تحقيق نموذجين أوليين على نطاق صغير، مما جعل من الممكن اختبار درجة حرارة السطح الخارجي ودرجة الحرارة المحيطة ودرجة حرارة السطح الداخلية. أعطت هذه النماذج الأولية إمكانية تحديد للخصائص الحرارية الحقيقية لـ التأثيرات المدروسة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هذه المادة لها تأثير إيجابي على الأداء الحراري للجدران وبالتالي الراحة الحرارية الداخلية، وانخفاض درجة حرارة السطح يصل إلى 7 درجات مئوية، وهذا الانخفاض يؤثر على الحرارة المخزنة وتدفق الحرارة المنقولة داخلها. يقلل درجة الحرارة الداخلية إلى 6 درجات مئوية. وبالتالي انخفاض درجة الحرارة المحيطة بمقدار 5 درجات مئوية

تمت محاكاة ثلاثة نماذج في الصيف لتحسين استخدام هذه المواد. تم إجراء محاكاة عديدة على النماذج الأولية لتحسين تأثير نفس المعاملات: عامل الامتصاص ونقل الحرارة واحتياجات الطاقة. تم تطوير نموذج رقمي بمزيج من ثلاثة أنواع من الجدران؛ أظهرت النتائج أن التحكم في عناصر البناء مثل مواد البناء يؤثر بشكل مباشر على الكفاءة الحرارية والطاقة للبناء

الكلمات المفتاحية:

المناخ الحار والجاف، المواد المستخلصة من التربة، درجة الحرارة المحيطة، النموذج، التجربة، المحاكاة، BTSC -

Abstract

The objective of this research is to develop a material that enhances the interior comfort by eliminating the effect of hot walls during the summer and reducing the amount of energy consumed by air conditioning. It also aims to promote sufficient thermal autonomy to maintain thermal comfort in hot and arid areas, such as the climate of Biskra in southeastern Algeria, and to provide designers with a healthy, durable, solid and inexpensive material. The thermal properties of this material, including the proposed combination and manufacturing process of these compressed and stabilized earth bricks, were established. The prototype used in this study was explicitly described.

This material: CSEB (stabilized and compressed earth brick) is an earth-based material, which is similar in terms of thermal qualities to BTC, and possesses the resistance of BTS. This material was tested using two methods (i) an experimental method based on the usage of a reduced prototype, and (ii) numerical simulation using (TRYNSIS-17). The experiment includes development of the construction material, measurement of ambient and surface temperatures.

The experimental study was carried out through the realization of two prototypes on a reduced scale, which made it possible to test the external surface temperature, ambient temperature and internal surface temperature. These prototypes gave the possibility to determine the real impacts of the BTSC thermal properties. The obtained results demonstrate that this material has a positive impact on the thermal functioning of the walls and consequently the internal thermal comfort, the reduction in the surface temperature reaches 7°C; this reduction influences the stored heat and the transferred heat flow inside which the internal temperature decreases to 6°C. Consequently, a reduction in the ambient temperature of the order of 5°C can be attained.

Three models were simulated in summer season to optimize the use of this material. Numerical simulation carried out on the prototypes to optimize the impact of the same parameters: absorption factor, heat transfer and energy needs. A digital model was developed with a combination of three types of walls. The results showed that the control of the construction elements such as the construction material directly affects the thermal and energy efficiency of the construction.

Keywords:

Hot and Arid Climate, CSEB, Earth Based Material, Ambient Temperature, Experimentation, Simulation.

Tables des matières

Dédicaces	ii
Remercîments	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Table des matières.....	vii
Liste des figures	xv
Liste des tableaux.....	xviii
Nomenclature	xix

Introduction générale

1 Introduction.....	1
2 problématique.....	3
2-1 question de la de recherche.....	5
3 Hypothèse de recherche	5
4 Objectifs de recherche	5
5 Méthodologie de recherche.....	6
6.1 Méthode expérimentale :	7
6.2 Méthodes numériques :.....	7
7 Structure de la thèse	7

Partie 01 :

Introduction de la partie théorique	02
--	-----------

Ch.1 Climat, Conception architecturale, performance énergétique et isolation thermique

1 Introduction	14
2 Climat et caractéristiques climatiques	14
2.1 Le Climat.....	14
2.2 Climats chauds et arides	15
2.2.1 Indice de Sécheresse :.....	15
2.2.2 La formule de Martonne :.....	16
2.2.3 La formule de koppen.....	17
3 Caractéristiques des paramètres climatiques : (dans les climats chauds et secs) :	18

3.1	Soleil et rayonnement solaire :	18
3.1.1	Soleil :	18
3.1.2	Le rayonnement solaire	18
3.2	Température de l'air :	20
3.3	Vent :	21
3.4	L'humidité :	22
3.5	Précipitations :	23
4	Conception des bâtiments et performance énergétique	24
4.1	Relation architecture et climat :	24
4.2	Orientation et forme	25
4.3	Impact de la forme du bâti sur ses performances thermiques.....	25
5	La masse thermique.....	26
5.1	Avantage :	26
5.2	Caractéristiques de la masse thermique :	27
6	Masse thermique et climat chaud	27
7	Isolation thermique.....	28
7.1.1	Caractéristique.....	28
7.1.1.1	Isolants thermiques.....	28
7.1.1.2	Type d'isolation	29
7.1.1.3	Propriétés d'isolation	29
7.2	Isolation thermique et Climat chaud.....	30
7.2.1	Isolation transparente :	30
8	L'inertie thermique.....	30
8.1	Exemples d'application de l'inertie thermique dans la construction	31
9	Conclusion.....	34

Ch. 2 : Passage en revue des techniques de construction en terre

1	Introduction.....	37
2	Techniques de construction en matériaux naturels.....	37
2.1	La technologie moderne.....	37
2.2	Terre stabilisée compactée	37
2.2.1	Terre moulée	37
2.2.2	Terre allégée.....	38
3	La brique de terre stabilisée crue et compressée BTC.....	39
4	Techniques de construction en terre	39

4.1.1	Adobe :.....	39
4.1.2	Pisé :	40
4.1.3	Terre-Paille :	40
4.1.4	Torchis :	41
4.1.5	Terre façonnée :	41
4.1.6	Terre extrudée :.....	42
4.1.7	Bauge :.....	43
4.1.8	Terre comprimée :.....	44
4.2	Blocs de terre comprimée (BTC).....	44
4.2.1	Diversité des produits de terres compactées.....	46
4.2.2	Construction en blocs de terre comprimée dans le monde.....	47
5	Actualité de l'architecture de terre en Algérie.....	48
6	La classification des matériaux utilisés en Algérie actuellement et choix de matériau d'étude ..	49
6.1	Présentation du prototype de comparaison pour le choix du matériau.....	49
6.2	Classification.....	50
6.3	Comparaison entre caractéristiques des matériaux sans isolation.....	52
6.3.1	Résultat de la comparaison :	53
6.3.1.1	Béton cellulaire.....	53
6.3.1.2	BTS cru et compressé	54
6.4	Simulation de la température heure par heure du 21 juillet	55
6.4.1	Le béton cellulaire	55
6.4.2	Le BTS	57
6.5	Sélection des prototypes d'étude	60
7	Conclusion	61

Ch. 3 : la terre un matériau de construction (Techniques et fabrication)

1	Introduction.....	65
2	Construction en terre	67
2.1	Histoire et évolution de l'architecture en terre	67
2.2	Quelques repères chronologiques des constructions en terre	67
3	Normes, standards, directives et lignes directrices de la construction en terre	71
4	Composition du matériau :.....	73
4.1	Définition.....	73

4.2	Adhésion.....	73
4.3	Rappel sur l'argile.....	74
4.3.1	Définition.....	74
4.3.2	Structure.....	74
4.3.3	Classification des argiles.....	75
4.3.4	Principaux types d'argile.....	76
4.3.4.1	La Kaolinite.....	76
4.3.4.2	Montmorillonite.....	76
4.3.4.3	L'illite.....	77
5	Caractéristiques de base de la stabilité de la terre.....	77
6	Texture ou granularité.....	77
7	Plasticité.....	78
8	Compressibilité.....	78
9	Cohésion.....	79
10	Stabilisation.....	79
10.1	Définition.....	79
10.2	Objectifs de la stabilisation.....	79
10.3	Procédés de la stabilisation des sols.....	80
10.3.1	Stabilisation mécanique :.....	80
10.3.2	Stabilisation physique :.....	80
10.3.3	Stabilisation chimique :.....	80
10.4	Moyens de stabilisation.....	80
10.5	Densification du sol par compression.....	81
10.5.1	Méthode de compression.....	82
10.5.2	Effet de la teneur en eau sur la masse volumique.....	82
10.5.3	Effet de l'énergie de compactage.....	83
10.5.4	Effets de la taille des particules de sol.....	83
10.6	Densification hiérarchique.....	83
10.7	Stabilisation au ciment.....	84
10.7.1	Aperçu.....	84
10.8	Stabilisation à la chaux.....	85
10.8.1	Aperçu.....	85
10.8.2	Mécanismes.....	86
10.9	Stabilisation mixte chaux-ciment.....	86
11	Conclusion.....	87

Conclusion de la partie 01	88
---	----

Partie 02 :

Introduction de la partie pratique	95
---	----

Chapitre 04 : positionnement épistémologique et choix de méthode

1	Introduction.....	97
2	Méthode de sélection	97
3	Méthodes d'analyse des données	98
3.1	Évaluation quantitative	99
3.1.1	Méthode numérique	99
3.1.1.1	Simulation.....	99
3.1.2	Méthode expérimentale.....	100
3.1.2.1	Programme expérimental	101
3.1.2.2	Structure théorique de l'expérience	101
4	Quelques exemples d'application de la méthode expérimentale.....	102
4.1	- Avec de vrais modèles.....	102
4.2	- Avec maquette	102
5	Quelques exemples d'application de méthodes numériques :.....	105
6	Choix de l'orientation méthodologique et épistémologique	106
7	Conclusion	108

Chapitre 5 : l'expérimentation

1	Introduction.....	110
2	L'utilisation de cellules tests dans le domaine de l'architecture.....	112
3	Données climatiques utilisées dans le travail expérimental :	120
3.1	Données du mois d'août :	120
3.1.1	Température : d'après Weatherspark, 2017	120

3.1.2	Couverture nuageuse (nébulosité) :.....	122
3.1.3	Précipitations.....	122
3.1.4	La pluie	123
3.1.5	Humidité.....	124
3.1.6	Les Vents.....	124
3.1.7	Rayonnement solaire.....	125
3.2	Données du 1er août.....	126
3.2.1	Soleil	127
3.2.2	Rayonnement solaire à ondes courtes	128
3.3	Données du 11 août	129
3.3.1	Soleil	129
3.3.2	Humidité.....	130
3.3.3	Rayonnement solaire à ondes courtes	131
3.4	Données du 21 août	131
3.4.1	Soleil	132
3.4.2	Rayonnement solaire à ondes courtes	132
3.5	Données au 31 août	133
3.5.1	Le Soleil.....	134
3.5.2	Rayonnement solaire.....	135
4	Développement des matériaux BTSC :	136
4.1	Matériaux utilisés	136
4.1.1	Terre	136
4.1.1.1	La source du sol	136
4.1.1.2	Propriétés physiques du sol	136
4.1.1.3	Les masses volumiques du sol.....	137
4.1.1.4	Limite d'Aterberg.....	137
4.1.1.5	Classement géotechnique	138
4.1.1.6	Analyse chimique et minéralogique.....	138
4.1.1.7	Matière organique.....	139
4.1.2	Analyse physique et chimique.....	139
4.1.2.1	Mesure du pH.....	139
4.1.3	Sable concassé.....	140
4.1.4	Ciment	140
4.1.5	L'eau	141
4.1.6	Paille d'orge non coupée pour l'isolation	141
4.2	Confection des briques.....	141

4.2.1	Équipement spécifique.....	141
4.3	Mélanges	142
4.3.1	Compactage du mélange.....	143
4.3.2	Traitement des blocs	144
5	L'Expérience	145
5.1	Analyse de la présentation du prototype.....	145
5.2	Prendre la température corporelle	146
5.2.1	Situation expérimentale :.....	147
6	Résultat de l'expérience et de la prise de mesure	147
6.1	Résultats de la prise de mesure du 1 ^{er} août :.....	147
6.2	Résultats de la prise de mesure du 11 août :.....	150
6.3	Résultats de la prise de mesure du 21 août :.....	152
6.4	Résultats de la prise de mesure du 31 août :.....	154
7	Interprétation des résultats d'expérimentation	157
8	Conclusion	160

Chapitre 6 : la simulation

1	Introduction.....	161
2	Simulation numérique :.....	162
2.1	Introduction aux logiciels de modélisation	162
2-2	Présentation des logiciels utilisés avec les logiciels de simulation	162
3	Résultats des simulations	170
3.1	Le prototype 01	172
3.2	Prototype 02 :.....	173
3.3	Prototype 03 :.....	174
4	Confrontation et discussion des résultats expérimentaux et de simulation	174
5	Conclusion	177

Conclusion de la partie 02.....178

Conclusion générale.....185

Limite de recherche189

Bibliographie199
Annexe.....

Listes des figures

Figure 1-ch1 classification des climats de Rosali Mignon	16
Figure 2-ch1 Cliff Palace.....	31
Figure 3-ch1 maison troglodytique de Matmata Tunis.....	32
Figure 1-ch2 mur en adobe.....	39
Figure 2-ch2 mur en pisé.....	40
Figure 3-ch2 construction de mur terre-paille	40
Figure 4-ch2 mur en torchis	41
Figure 5-ch2 mur en terre façonnée.....	42
Figure 6-ch2 deux modèles de brique extrudée.....	42
Figure 7-ch2 mur en bauge.....	43
Figure 8-ch2 technique de construction de mur en bauge	43
Figure 9-ch2 compression de terre comprimée	44
Figure 11-ch2 Schéma des différentes techniques de construction en terre	45
Figure 12-ch2 Différents produits de blocs de terre comprimée.	47
Figure 13-ch2 intérieur et extérieur d Auroville, Inde.....	48
Figure 14-ch2 diagramme polaire et critères de classification	50
Figure 15-ch2 montrant la création du Béton cellulaire comme un nouveau matériau dans la bibliothèque du logiciel Ecotect avec ces propriétés physique..	54
Figure 16-ch2 montrant la création du BTS comme un nouveau matériau dans la bibliothèque du logiciel Ecotect avec ces propriétés physique.	54
Figure 17-ch2 Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (béton- cellulaire).	55
Figure 1-ch3 Tchoga zambil (Iran).....	67
Figure 2-ch3 Mari en Syrie.....	68
Figure 3-ch3 Shibam au Yémen	68
Figure 4-ch3 La grande mosquée de Djenné.....	69
Figure 5-ch3 Effet du compactage sur les vides des sols).....	80
Figure 6-ch3 les résistances mécaniques :effet de la teneur en sable en Compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa	83
Figure 1-ch4 les quatre cellules teste réalisées par Khadraoui	102
Figure 2-ch4 Etude expérimentale sur l'optimisation de l'enveloppe par interaction des matériaux à changement de phase.....	103
Figure 3-ch4 Etude expérimentale du fonctionnement thermique d'une paroi de brique massive	105
Figure 4-ch4 Application d'un model numérique par Trynsis.	106
Figure 5-ch4 Schéma de synthèse de l'étude numérique	108
Figure 1-ch5 la température moyenne du mois d'août diurne.....	121
Figure 2-ch5 la température moyenne du mois d'août nocturne	121
Figure 3-ch5 la couverture nuageuse du mois d'août.....	122
Figure 4-5 Probabilité de précipitation du mois d'août.....	123
Figure 5-5 Pluviométrie du mois d'août.....	123

Figure 6-ch5 Niveaux du confort selon l'humidité du mois d'août	124
Figure 7-ch5 la température moyenne du mois d'août	125
Figure 8-ch5 la direction des vents du mois d'août.....	125
Figure 9-ch5 le rayonnement solaire du mois d'août	126
Figure 10-ch5 la température moyenne du 1er août	126
Figure 11-5 Bandes de sensation de chaleur du 1 er août	127
Figure 12-ch5 Elévation solaire du 1 er août.....	127
Figure 13-ch5 niveau du confort du 1 er août	128
Figure 14-ch5 Rayonnement solaire du 1er août.....	128
Figure 15-ch5 la température moyenne du 11 août	129
Figure 16-ch5 élévation solaire août	130
Figure 17-ch5 rayonnement solaire 11 août	130
Figure 18-ch5 la température moyenne du 21 août	131
Figure 19-ch5 bandés de température 21 août.....	132
Figure 20-ch5 élévation solaire 21 août	132
Figure 21-ch5 rayonnement solaire 21 août	133
Figure 22-ch5 la température moyenne du 31 août	134
Figure 23-ch5 bandes de sensation de chaleur 31 août	134
Figure 24-ch5 élévation solaire le 31 août	135
Figure 25-ch5 rayonnement solaire du 31 août	135
Figure 26-ch5 courbe granulométrique du sol.....	137
Figure 27-28-29-ch5 Appareillages utilisé pour la confection des briques.....	142
Figure 28-ch5 Malaxeur de sol.....	143
Figure 29-ch5 Malaxeur de sol.....	144
Figure 30-ch5 Le moulage des briques	144
Figure 31-ch5 séchage à l'ombre des briques	145
Figure 32-32-ch5 Le prototype B	146
Figure 33-ch5 Le prototype A	146
Figure 34-ch5 l'appareil de mesure	146
Figure 35-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation	147
Figure 36-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation	148
Figure 37-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation	149
Figure 38-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation.....	149
Figure 39-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation	150
Figure 40-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation	151
Figure 41-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation	152
Figure 42-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation	152
Figure 43-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation	153
Figure 44-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation.....	153

Figure 45-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation	154
Figure 46-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation	155
Figure 47-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation	155
Figure 48-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation (source : Auteur)	156
Figure 49-ch5 la température moyenne des 04 jours représentatifs du prototype avec isolation	157
Figure 50-ch5 la température moyenne des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation (.....	158
Figure 51-ch5 la température surfacique intérieure des 04 jours représentatifs du prototype avec isolation	158
Figure 52-ch5 la température surfacique intérieure des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation	159
Figure 53-ch5 la température surfacique extérieure des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation	159
Figure 54-ch5 regroupement de toutes les températures mesurées	160
Figure 1-ch6 la création du modèle géométrique	162
Figure 2-ch6 Les développeurs de l’outil de simulation TRNSYS 17	163
Figure 3-ch6 Les types de connexions utilisés pour la simulation numérique	163
Figure 4-ch6 Les facteurs thermiques influençant le nœud d’air	164
Figure 5-ch6 Équation du flux de chaleur convectif dans le nœud d’air calculé par Trnsys	165
Figure 6-6 Les inputs du type mono-zone	165
Figure 7-ch6 Le comportement thermique des éléments du bâtiment selon le type	166
Figure 8-ch6 Le logiciel exploité pour générer le fichier climatique (Meteonorm & CSTB).....	167
Figure 9-ch6 Outputs et Inputs exploités du TRNSYS	167
Figure 10-ch6 Introduction des inputs : Orientation	168
Figure 11-ch6 Introduction des inputs : données météorologiques du Tm2	169
Figure 12-ch6 Introduction des inputs : détermination des paramètres à calculer	169
Figure 13-ch6 Introduction des inputs : données des proies et différentes combinaisons.....	170
Figure 14-ch6 les trois prototypes à simuler	171
Figure 15-ch6 Résultat de simulation du prototype 1.....	173
Figure 16-ch6 Résultat de simulation du prototype 2.....	173
Figure 17-ch6 Résultat de simulation du prototype 3.....	174
Figure 18-ch6 Histogramme montrant la différence entre la moyenne des températures entre expérimentation et simulation	175
Figure 19-ch6 Les besoins énergétiques des trois prototypes	176
Figure 20-ch6 Les températures ambiantes des trois prototypes.....	176

Liste des tableaux

Tableau 1-ch1 classification des climats	16
Tableau 2-ch1 indice d'aridité de Koppen.....	17
Tableau 1-ch2 Les opérations de construction en Terre en Algérie (CNERIB, 1993).....	48
Tableau 2-ch2 les différentes variables de chaque pôle fait par auteur.....	49
Tableau 3-ch2 les différentes variables de chaque pôle fait par auteur.....	50
Tableau 4-ch2 résultat de la Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (béton-cellulaire).....	55
Tableau 5-ch2 résultat de la Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (BTS).....	57
Tableau 6-ch2 comparaison des résultats de la Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (Béton Cellulaire) et (BTS),	59
Tableau 1-ch3 Classification des phyllosilicates (Georges Pédro, 1967).....	74
Tableau 1-ch5 Exemples de cellules tests réalisés à une échelle réelle (Khadraoui, 2019).....	111
Tableau 2-ch5: Exemples de cellules tests réalisés à une échelle réduite (Khadraoui, 2019)	115
Tableau 3-5 la masse volumique du sol utilisée, fait par auteur.....	136
Tableau 4-ch5 analyse minéralogique du sol utilisé (source : Auteur)	137
Tableau 5-ch5 composition granulaire du sol utilisé (source : Auteur)	139
Tableau 6-ch5 analyse chimique du ciment (source : Auteur).....	139
Tableau 7-ch5 La composition chimique du clinker (%). (Source : Auteur)	139
Tableau 8-ch5 La composition minéralogique du clinker (%). (Source : Auteur).....	140
Tableau 9-ch5 caractéristiques de la paille utilisée (source : Auteur)	140

Nomenclature (abréviations/indices/symboles)

IM : Indice d'aridité = $P / T + 10$

P : Pluviométrie annuelle ou mensuelle.

T : Température moyenne annuelle ou mensuelle.

r : la résistance thermique surfacique Le coefficient mesure la résistance du matériau à la conduction d'un flux de chaleur

LL : limite de liquidité

LP : limite de plasticité

IP : l'indice de plasticité

MVapp : Masse volumique apparente ;

MVabs : Masse volumique absolue ;

Mf : Module de finesse ;

ES : Equivalent de sable

Trs : Température résultante sèche

SI : sans isolation

AS : avec isolation

Ta : La température ambiante de l'air

Tp : la température des parois

TM : température moyenne (Météonorme fichier tm2)

TMex : température extérieure mesurée

TA i : température ambiante avec isolation (prototype B)

TAsi : température ambiante sans isolation (prototype A)

TSex i : température surfacique extérieure avec isolation (prototype B) façade sud

TSin i : température surfacique intérieure avec isolation (prototype B) façade sud

TSex si : température surfacique extérieure sans isolation (prototype A) façade sud

TSin si : température surfacique extérieure sans isolation (prototype A) façade sud

CNERIB : le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrées du Bâtiment ()

BTS : brique de terre stabilisé

BTC : bloc de terre comprimée

BTSC : brique de terre stabilisée et compressée

UNHCR: United Nation High Commission for Refugees

APMC : Agence de production des matériaux de construction

UBC : Uniform Building Code

PNUD : le Programme des Nations Unies pour le Développement

RILEM : La Réunion International des Laboratoires. D'Essais et de recherche sur les Matériaux et les constructions.

CIB : le Conseil International du Bâtiment pour la Recherche l'Etude et la documentation

AIPEA : Association Internationale Pour l'Etude des Argiles

TEO : la teneur en eau optimale

L'alite (**C3S**), la bélite (**C2S**), l'aluminate tricalcique (**C3A**), l'aluminoferrite tetracalcique (**C4AF**) et la périclase (**MgO**). Des phases mineures sont également trouvées : la chaux libre (**CaO**), les sulfates de sodium et de potassium (**Na₂SO₄** et **K₂SO₄**), la porlandite (**CH**) et le silicate de calcium hydraté (**C-S-H**), silicates de calcium (**C3S** et **C2S**).

INTRODUCTION
GENERALE

1 Introduction

L'énergie est un facteur décisif pour la survie de la société, ainsi que pour répondre aux besoins quotidiens, car presque toutes les activités humaines utilisent l'énergie pour assurer le développement économique et social. En effet, cette source d'énergie repose principalement sur les combustibles fossiles (gaz naturel, pétrole et charbon), qui ne sont pas renouvelables et dont on s'attend à ce qu'ils s'épuisent à moyen terme. Ainsi, les gaz émis par ces énergies fossiles contribuent à l'augmentation de l'effet de serre et au changement climatique, qui est sans doute le plus grand défi auquel l'humanité est confrontée.

Parce que notre planète a connu de nombreux problèmes environnementaux et climatiques, la température moyenne de la terre a augmenté de 0,6° au 20ème siècle, et le taux de pollution atmosphérique est passé de 1,5 en 1900 à 6 en 2002. Ces problèmes sont principalement causés par la surexploitation des ressources fossiles qui ont connu une croissance continue de la demande en énergie primaire au cours des 40 dernières années, passant de 5 000 Mtep en 1970 à 12 000 Mtep en 2010 alors que l'on sait que ces sources d'énergie diminuent rapidement et deviennent de plus en plus difficiles et coûteuses à exploiter.

De ce fait, nous allons nous focaliser sur le problème énergétique qui prend une importante place. Cette situation préoccupante est née de l'organisation de plusieurs sommets, le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, visant à : stabiliser la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère grâce à une gestion rationnelle des ressources naturelles. Suivront le sommet de Berlin en 1995, le sommet de Genève en 1996, jusqu'au protocole de Kyoto en 1996 qui se dote d'un mandat plus opérationnel de réduction de la consommation d'énergie et d'une conférence internationale dans le même but : Buenos Aires (1998), La Haye (2000), Montréal, la nouvelle conférence « Rio+10 » à Johannesburg en 2002 et le sommet de Copenhague en 2009, et le sommet de Rio en 2022.

En effet, le secteur du bâtiment occupe une part importante de la consommation d'énergie, atteignant 41 % de la consommation totale d'énergie et contribuant à 19 % des émissions de gaz à effet de serre.

Sachant que l'Algérie ne fait pas exception, car les secteurs résidentiels et tertiaires en Algérie consomment plus de 40% de l'énergie totale selon les dernières recherches de l'APRUE.

Avec l'intérêt croissant pour la durabilité et la lutte contre le changement climatique et les défis énergétiques, il est nécessaire de cibler les secteurs résidentiels, neufs et existants, car ils véhiculent un réel potentiel d'amélioration dans le secteur de l'énergie.

Cela nous amène à intervenir sur la performance énergétique des bâtiments pour la réduction de la consommation d'énergie par l'introduction de démarches d'efficacité énergétique dans le processus de conception où l'existence de telles démarches permet de réduire la consommation d'énergie en se concentrant sur les solutions adaptées au climat local et sur celles permettant de faire fonctionner une technologie qui ne nécessite pas d'énergie au service du secteur résidentiel.

Le parc de logements existants atteint 6 298 309 unités, dont la plupart constituent des surconsommations énergétiques supérieures à 40 % de la consommation finale. Cela est principalement dû à l'évolution de la démographie après l'indépendance du pays (de 12 millions d'habitants en 1966 à 39,5 millions en 2014), qui a imposé une urbanisation rapide, ou tout est mis sur la satisfaction de la demande quantitative de logements. Ces schémas ne sont pas adaptés à l'environnement régional en raison de la négligence des facteurs climatiques lors de la construction.

Les nouveaux modèles de construction algériens, qualifiés "d'architectures modernes" au cours des dernières décennies, ignorent les facteurs climatiques, consomment beaucoup d'énergie et sont souvent inadaptés aux occupants en termes de confort. Pour surmonter ce problème d'inconfort, nous avons souvent recours à des factures supplémentaires de chauffage et de climatisation.

Le regain d'intérêt pour l'architecture de terre a permis de redécouvrir un éventail de techniques plus raffinées et variées que ne le laissait supposer la rusticité des matériaux. Les connaissances et les compétences des populations de ces régions constituent une ressource précieuse pour gérer des environnements difficiles par rapport aux technologies introduites, dont beaucoup ont échoué en termes de confort (thermique ou physiologique), de stabilité et surtout de durabilité.

2 Problématique

Dans les climats arides et semi-arides, comme à Biskra dans le sud-est de l'Algérie, le principal problème qui contribue à l'inconfort de la chaleur estivale est la surchauffe. Par conséquent, le refroidissement des locaux est le facteur le plus souhaité et le plus préoccupant pour les occupants. Ainsi, les équipements électriques de refroidissement durent plus longtemps que les équipements de chauffage, menant à la forte consommation d'électricité et des coûts élevés pour les utilisateurs occasionnant un impact significatif sur la pollution de l'environnement et le réchauffement climatique.

Trouver d'autres possibilités de rafraîchissement des espaces permettant aux utilisateurs de bénéficier d'un confort thermique acceptable est essentiel et doit se faire de manière peu coûteuse, non polluante et durable. Cela a été démontré dans l'architecture vernaculaire du monde entier.

Dans l'architecture vernaculaire du Sud algérien, plusieurs exemples d'architecture traditionnelle ont répondu à cette question. La plupart des bâtiments construits en Algérie aujourd'hui sont relativement peu isolés, ce qui signifie que ces bâtiments ont des pertes de chaleur élevées et consomment en fait beaucoup plus d'énergie. De plus, ceux-ci sont chauffés à l'aide de combustibles fossiles et consomment donc de grandes quantités de gaz à effet de serre, responsables en partie du changement climatique.

L'Algérie ne fait pas exception en matière de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre. Cette situation confronte le monde de l'énergie à une incertitude sans précédent quant à la manière dont le monde répondra au double défi du changement climatique et de la sécurité énergétique. Cependant, il convient de noter que les bâtiments et leur utilisation peuvent présenter quelques inconvénients, notamment en ce qui concerne l'environnement. Le secteur de la construction (y compris le résidentiel et le tertiaire) est l'un des principaux consommateurs d'énergie et émetteurs mondiaux de gaz à effet de serre (GES).

À cet égard, le secteur de la construction apparaît comme l'un des acteurs majeurs de l'intégration du développement durable et dispose d'un très fort potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique. Nous espérons que concevoir des bâtiments adaptés au mode de vie ne fera pas du secteur du bâtiment un consommateur

déraisonnable de ressources naturelles. Aujourd'hui, c'est à la fois un grand consommateur de ressources naturelles et d'énergie et une source majeure de la plupart des émissions de déchets non recyclables. L'augmentation du volume est la diversité des matières premières et des processus à risque utilisés par l'industrie de la construction pour fabriquer nos matériaux de construction.

La transformation de matières premières en matériaux de construction est souvent source de pollution, consomme de l'énergie et a un impact souvent irréversible sur l'environnement. Aujourd'hui, l'industrie de la construction fait face à un défi majeur pour parvenir à une véritable pratique du développement durable : elle doit s'appuyer sur la nature plutôt que de l'exiler pour devenir un véritable écosystème.

Face à ces problèmes, nous nous intéressons à de nouveaux modèles plus adaptés à leur environnement en valorisant les gisements naturels, l'énergie et les matériaux locaux. Bien que ces objectifs soient assez globaux, nous devons trouver des solutions locales spécifiques à chaque région qui offrent des opportunités qui doivent être reconnues, valorisées et exploitées. Par exemple ; dans un quartier à Adrar, l'originalité de son architecture réside dans les matériaux utilisés, en passant par la terre crue de la technique du « thob », qui non seulement répond aux exigences du développement durable, mais permet aussi de protéger le local en difficulté et le savoir-faire ancestral.

Face à l'influence des nouvelles techniques de construction et des nouveaux matériaux et éléments constructifs, tels que l'acier, le béton, les blocs de béton et les briques en terre cuite, etc., on assiste à l'abandon des techniques anciennes, des techniques locales et des matériaux locaux souvent respectueux de l'environnement. À ces phénomènes s'ajoutent des modèles architecturaux souvent méconnus de la région et donc totalement inadaptés au contexte climatique, culturel et social.

2.1 Les questions de la recherche

Sur la base des observations présentées, on se demanderait pourquoi nous n'avons pas considéré les matériaux de construction et leurs combinaisons comme le font les concepteurs pour résoudre le problème de la surchauffe à l'intérieur de l'espace pour créer un espace de vie agréable.

Pour cela, les questions à se poser sont :

Quels sont les prototypes architecturaux les plus performants pour les régions arides et semi-arides qui offrent une température ambiante intérieure confortable et agréable ?

Les matériaux à base de terre sont-ils les meilleurs dans ces conditions ? Si oui, quel matériau améliorerait le mieux le confort, en supprimant l'effet de paroi chaud l'été ?

3 Hypothèse de recherche

Dans les régions arides et semi-arides, l'utilisation de matériaux à base de terre thermiquement efficaces peut permettre d'obtenir des espaces intérieurs confortables et des températures ambiantes acceptables.

De meilleurs résultats ne peuvent être obtenus qu'avec des matériaux performants associés à une isolation thermique.

4 Objectifs de recherche

Cette recherche a pour objectif le développement d'un modèle ou un prototype qui peut répondre aux questions sur la conception globale de l'enveloppe et l'intégration des éléments physiques de l'environnement dans le processus conceptuel du projet. Et proposer aux designers le choix idéal des matériaux selon des critères clairs. Pour y parvenir, il faut :

- Améliorer le confort en éliminant les effets de parois froides en hiver et de parois chaudes en été.
- Réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et/ou la climatisation.
- Rendre les bâtiments plus écologiques en réduisant la pollution associée aux émissions de résidus de carburant dans l'air.
- Favoriser une autonomie thermique suffisante pour maintenir le confort thermique malgré le degré de surchauffe.
- Assurer la qualité énergétique de tout projet de construction.

La conception d'un prototype thermique ne repose pas seulement sur une stratégie conceptuelle solide, mais aussi sur la recherche de la meilleure combinaison de matériaux.

5 Méthodologie de recherche

La recherche consiste en un examen de toutes les recherches, techniques et/ou informations pertinentes. Plusieurs études et travaux ont été réalisés sur les bâtiments économes en énergie. Ces derniers suscitent actuellement un grand intérêt en jouant un rôle important d'une part, ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en réduisant la demande énergétique, et d'autre part, ils garantissent le bien-être des occupants (notamment le confort thermique). L'isolation thermique, complexe et très diversifiée, dépend du choix des matériaux utilisés, des pièces à isoler et de la stratégie de conception. Les matériaux d'isolation remplissent trois fonctions principales dans la maison. Le premier est d'augmenter le confort en éliminant les effets de parois froides en hiver et de parois chaudes en été, le second est de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et/ou la climatisation, la deuxième fonction déclenche la troisième, qui est de rendre le bâtiment plus écologique en réduisant la pollution liée aux résidus de carburant émis dans l'air.

La classification des types de matériaux basée sur le diagramme polaire nous donne 02 catégories différentes, parmi lesquelles nous sélectionnons un matériau en fonction de critères bien définis. Ces matériaux sont testés pour sélectionner les matériaux les plus performants pour l'expérimentation. Le logiciel de simulation « Ecotect » est utilisé pour cette classification, car il intègre les éléments physiques de l'environnement dans le processus conceptuel du projet. Il a une gamme assez large de fonctionnalités et peut répondre à la plupart des questions de classification préliminaires. Il s'appuie sur des méthodes de calcul bien définies pour déterminer les températures internes et les charges thermiques. Il s'agit d'une méthode flexible qui n'est pas limitée par la forme de la structure ou le nombre de points chauds pouvant être analysés simultanément. En considérant les ombres et les surfaces ombrées, il fournit une gamme d'informations très utiles pour analyser les propriétés thermiques et la possibilité de sélectionner un matériau approprié en comparant les résultats des

différents matériaux sélectionnés. Le logiciel *TRYNSIS-17* simulera les prototypes les plus performants pour une plus grande précision.

Nos recherches reposent principalement sur des méthodes analytiques :

Cette approche permet de décrire la fonction thermique d'un bâtiment en utilisant les principes de la physique du bâtiment (Hall ; 2010)

- Étude expérimentale
- Recherche numérique

5.1 Méthode expérimentale :

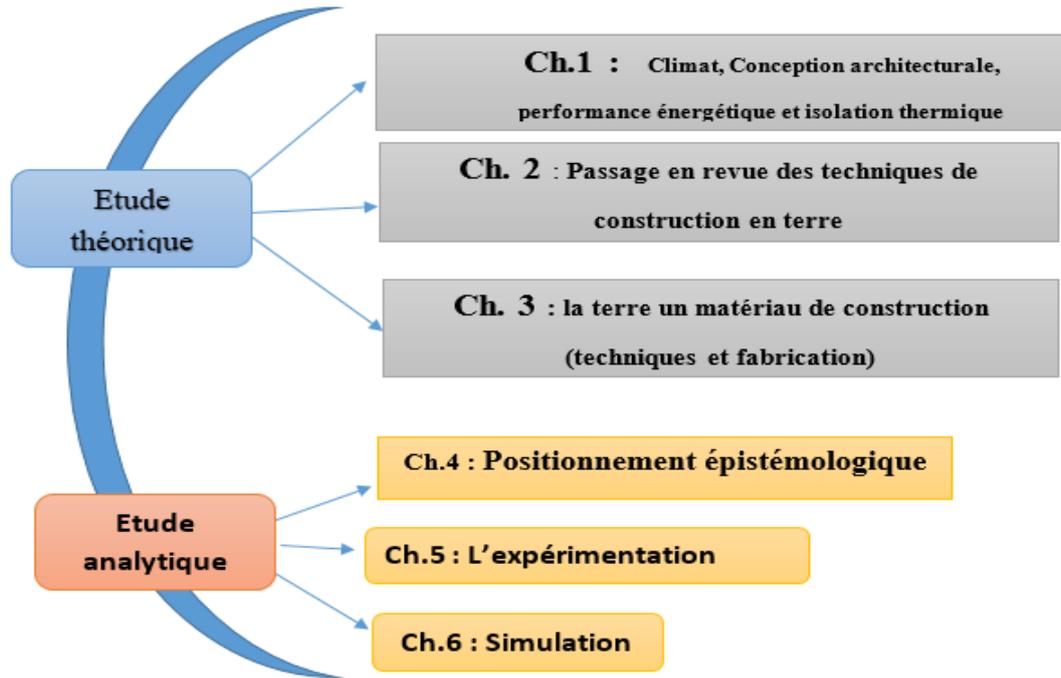
La recherche expérimentale est l'une des méthodes les plus couramment utilisées par les chercheurs du monde entier, permettant de tester différents éléments ou phénomènes (variables) dans des conditions naturelles (réelles) ou contrôlées (laboratoire). Cette recherche peut être effectuée sur des modèles réels ou simplifiés.

5.2 Méthodes numériques :

La méthode numérique est réalisée en utilisant différents logiciels de simulation. Il s'agit d'une technique largement acceptée dans le milieu de la recherche. L'utilisation de logiciels de simulation dynamique s'est fortement développée en raison de ses avantages à évaluer des bâtiments dans différentes conditions et dans un laps de temps très réduit.

6 Structure de la thèse

La structure de l'article est liée aux concepts selon une hiérarchie homogène et organisée comme suit :



- **Introduction générale** : comprend les éléments de la problématique, à savoir : la question de recherche, les hypothèses, les objectifs et les méthodes à ajuster.
- **La première partie théorique** (Études bibliographiques) se compose de trois chapitres :
 - ✓ **Le chapitre 01** passe en revue le climat, la conception architecturale, la performance énergétique ainsi que l'isolation thermique
 - ✓
 - ✓ **Le chapitre 02** décrit les différentes techniques de construction en terre.
 - ✓ **Le chapitre 03** est un essai de caractérisation du matériau terre dans la construction (techniques et fabrication)
- **La deuxième partie, analytique**, est composée de trois chapitres
 - ✓ **Le chapitre 04** représente le positionnement épistémologique de la recherche
 - ✓ **Chapitre 05** : l'expérimentation : L'expérience a été divisée en deux phases.
 - Phase 1 : Développement des matériaux de construction.
 - Phase 2 : Mesure de la température ambiante et de surface.

- ✓ **Chapitre 06** : la simulation : également divisée en deux étapes, la première étape est la vérification du prototype expérimental, et la deuxième étape est la simulation de différentes combinaisons.

- **La conclusion générale** fait une synthèse globale de l'étude avec une comparaison des résultats expérimentaux et de simulation

PARTIE 01

Introduction de la première partie

Cette première partie de l'étude présente le cadre conceptuel et théorique de la recherche, elle se compose de trois chapitres traitant des 03 concepts inclus dans l'hypothèse.

Le premier chapitre traite le concept « climat », et la conception avec ce dernier, ainsi que la performance énergétique et l'isolation thermique. Ainsi nous montrerons la relation entre le climat et le type du matériau utilisé. Ce chapitre présente également les paramètres spécifiques au climat et les facteurs qui peuvent améliorer le confort interne. Ensuite, nous aborderons les aspects de l'isolation thermique, les caractéristiques des matériaux d'isolation et les différents types d'isolation ainsi que la masse thermique avec les composants de l'inertie thermique. Nous allons montrer quelques exemples d'architectures basées sur ce dernier.

Le deuxième chapitre traite le deuxième concept, les matériaux en terre et certaines technologies modernes, en passant en revue des techniques de construction basées sur des matériaux naturels anciens, leurs propriétés et leurs qualités environnementales. Nous aborderons également la diversité des matériaux à base de terre tels que l'adobe, les techniques de fabrication et les produits à base de terre utilisés dans la construction. À la fin de ce chapitre, il est nécessaire de catégoriser les matériaux afin de choisir le type de matériau que nous étudierons par la suite.

Le chapitre 3 présente de différentes techniques, ainsi que des moyens de consolider les briques de terre compressée et stabilisée, et de les rendre plus efficaces grâce à la stabilisation finale. Enfin, nous montrerons différentes techniques pour fabriquer des matériaux à base de terre avec des masses thermiques similaires au BTC et une résistance mécanique proches de celle du BTS.

CHAPITRE 01 :

*Climat, Conception architecturale,
performance énergétique et isolation
thermique*

1 Introduction

Le confort thermique est l'état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il représente cet équilibre entre l'échange de chaleur et le corps avec l'environnement, ce qui incite l'être humain à se protéger des climats rigoureux en créant des conditions relativement confortables au sein de son habitat.

Les adaptations de l'habitat au rayonnement solaire et aux facteurs climatiques se font généralement de manière naturelle ; les visiteurs des villes sahariennes et méditerranéennes et des villages chinois submergés sont souvent émerveillés par leur fraîcheur.

L'idée primaire est de doter le bâtiment de l'orientation et de la forme les plus adaptées pour qu'il puisse bénéficier des variations saisonnières, de la position et de l'intensité du soleil, et ainsi répondre aux besoins de chauffage ou de climatisation en laissant entrer le soleil dans la pièce pour stocker la chaleur et augmenter la température ambiante intérieure.

Ce chapitre montre la relation entre l'architecture et le climat. Nous commencerons par une introduction au climat et à ses paramètres, puis nous aborderons les performances énergétiques de la conception des bâtiments et les facteurs qui peuvent les améliorer. Ensuite, nous aborderons les aspects d'isolation, les caractéristiques des matériaux d'isolation et les différents types d'isolation ainsi que la masse thermique et les composants de l'inertie thermique. Nous allons montrer quelques exemples d'architectures basées sur ce dernier.

2 Climat et caractéristiques climatiques

2.1 Le Climat

le climat est généralement défini comme «la succession des circonstances atmosphériques et météorologiques, propre à une région du globe » (Gaillard, 2021). Ainsi,« Le climat est un facteur majeur dans la forme des bâtiments et des systèmes urbains »(Duplay & Duplay, 1982). De nombreux chercheurs ont étudié la relation entre l'architecture et le climat (Colombert, Salagnac, Morand, & Diab, 2012; Mandoul, 2012; Rodriguez, 2013) et l'intégration des données climatiques dans le processus de conception architecturale (Mazouz, 2004). La plupart de ces recherches parlent de systèmes passifs ou d'éléments de construction, ou de l'interaction entre le climat et la forme globale du bâtiment. Il faut noter que les caractéristiques climatiques déterminent généralement : les emplacements, les formes, les matériaux les plus favorables...Etc., des éléments de construction, généralement dans des

zones à climat rigoureux (chaud ou froid). Dans ce cas. Le succès d'un projet dépend de la capacité du concepteur à interpréter les facteurs climatiques et à créer en conséquence des bâtiments adaptés à la géographie (Mazouz, 2004).

Ainsi, il est nécessaire de comprendre le climat, d'en étudier l'ensemble de paramètres ainsi que le bilan thermique des bâtiments afin de pouvoir contrôler le climat, de l'exploiter et de se protéger et de l'utiliser dans de meilleures conditions.

Dans le même temps, il est important de minimiser l'utilisation des systèmes de chauffage ou de climatisation, pour réduire les factures lourdes à payer. Cette approche peut avoir d'autres impacts sur l'environnement, comme la réduction des émissions des gaz à effet de serre (par le dioxyde de carbone des installations de chauffage) et les émissions de carbone.

2.2 Climats chauds et arides

Ces climats se caractérisent par des conditions climatiques avec peu de précipitations. Ces dernières sont faibles (moins de 200 mm/an) et très irrégulières, parfois nulles (les années sèches). Ces climats existent sous les latitudes tropicales et s'étendent sur les continents (Floret & Pontanier, 1984). L'ensoleillement est exceptionnel (plus de 4000 heures par an, alors que les parties les plus ensoleillées de la région méditerranéenne atteignent à peine 2000 heures). Insupportablement chaud le jour, frais et même froid la nuit. La période sèche dure au moins huit à neuf mois. Certaines régions sont caractérisées par la sécheresse tout au long de l'année (Cornet, 1988). Ces zones sont connues par :

- Des températures élevées pendant la journée et des températures basses la nuit.
- Un ciel clair.
- Une intensité de rayonnement très élevée.
- Une humidité très faible.
- Les tempêtes de poussière aggravent la sécheresse.

Les géographes et les climatologues tentent d'exprimer le concept de sécheresse qui découle de la complexité des phénomènes atmosphériques et géographiques, exprimés en termes numériques exponentiels, appelés :

2.2.1 Indice de Sécheresse :

L'indicateur mathématique représentant un résultat numérique d'un type de climat.

2.2.2 La formule de Martonne :

L'indice de sécheresse (De Martonne, 1923) est défini par l'équation suivante :

- le rapport de la hauteur moyenne des précipitations annuelles à la température moyenne annuelle (Wail, 2020) :

$$\text{IM : Indice d'aridité} = P / T + 10$$

P : Pluviométrie annuelle ou mensuelle.

T : Température moyenne annuelle ou mensuelle.

Les régions aux climats très arides ont un indice de sécheresse inférieur à 5. Ces zones correspondent à des déserts absolus (Atacama, Tanezruft). Les précipitations annuelles dans ces zones sont moins de 50 mm par an. Dans les régions ultra-arides, elles sont inhabituelles (10 à 50 mm par an en moyenne) et très inégalement réparties (Khadraoui, 2019; Pellicone, Caloiero, & Guagliardi, 2019).

Les zones à climat aride sont celles dont l'indice de sécheresse se situe entre 5 et 10. Ces zones contenant la majeure partie du désert du Sahara, les déserts d'Arizona et du Sonora, les déserts d'Iran (Despair) ou les déserts d'Inde (Thar). Dans ces zones, la pluviométrie annuelle totale est inférieure à 250 mm. En Europe, la seule zone désertique, le petit désert d'Almeria, compte moins de 130 mm d'eau par an. Les précipitations dans les zones sèches sont très faibles (moyenne annuelle, 50 à 150 mm sous les tropiques), regroupées par saison, très irrégulières d'une année sur l'autre (Khadraoui, 2019). Le débit dans le Talweg est intermittent, se divisant en crues isolées après de rares averses de courte durée et de forte intensité. Les zones à climat semi-aride sont celles dont les valeurs d'indice sont comprises entre 10 et 20. Ces zones sont essentiellement le Sahel, le Kalahari, le Chaco, l'Argentine, le nord-est du Brésil (Cornet, 1988). Ces zones reçoivent jusqu'à 500 mm d'eau par an. Dans les régions semi-arides, les précipitations sont suffisantes pendant plusieurs mois de l'année pour assurer un rythme saisonnier de végétation et d'écoulement des eaux ; à l'exception des cours d'eau non indigènes, l'écoulement des eaux se produit par crues isolées, parfois brutales et violentes (Latreche, 2019).

Classification de Rosali Mignon	Classification de Koppen
1. Climat polaire	1. Climats tropicaux humides.
2. Climat continental	2. Climats secs.
3. Climat continental sec	3. Climats tempérés humides chauds.
4. climat océanique	4. Climats tempérés humides froids.
5. climat méditerranéen.	5. Climats polaires
6. Climat aride chaud.	
7. Climat tropical.	
8. Climat équatorial	

Tableau 1-ch1 classification des climats (Zeroual, 2006)

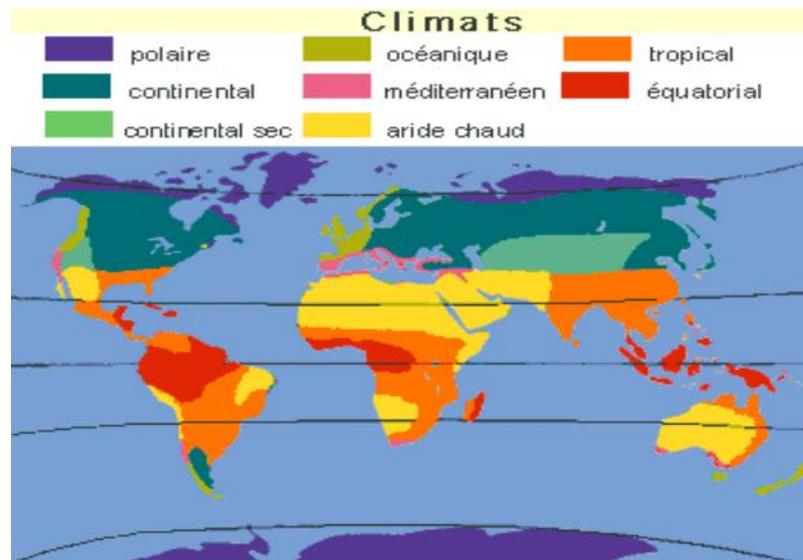


Figure 1-ch1 classification des climats de Rosali Mignon :Carte du monde LES CLIMATS(Bousri, Fouial, Merabet, & Bouketta, 2017)

2.2.3 La formule de koppen

Il s'agit d'une relation entre la température en degrés Celsius et les précipitations cm/an ou mois pour définir le type de climat selon le tableau ci-dessous(Hufty, 2001).

Type de climat / Les pluies	Non aride	Semi-aride	Aride
Pluies en toutes saisons	$P > 2 (T + 7)$	$P < 2 (T + 7)$ $P > (T + 7)$	$P < (T + 7)$
Pluies d'été	$P > 2 (T + 14)$	$P < 2 (T + 14)$ $P > (T + 14)$	$P < (T + 14)$
Pluies d'hiver	$P > 2 T$	$P < 2 T$ $P > T$	$P < T$

Tableau 2-ch1 indice d'aridité de Koppen(Hufty, 2001)

3 Caractéristiques des paramètres climatiques : (dans les climats chauds et secs) :

Grâce à la technologie et la nouvelle instrumentation d'observation météorologique, les géographes, les urbanistes, et les architectes peuvent désormais accéder aux données des stations météorologiques plus facilement.

Les principaux paramètres climatiques à prendre en compte dans la conception architecturale ou urbaine sont :

la température de l'air, l'humidité, le vent, la pluie et le rayonnement solaire (Amraoui, 2021; Davtian, 1998; Khadraoui, 2019). Nous tenterons de les définir et de rappeler leurs caractéristiques générales.

3.1 Soleil et rayonnement solaire :

3.1.1 Soleil :

Le soleil est une étoile, située, à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Il se présente sous la forme d'un disque assez uniforme et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré vu de la planète Terre (Bessemoulin & Oliviéri, 2000).

L'énergie émise par le soleil apparaît d'abord sous forme de rayonnement électromagnétique, qui forme tout le rayonnement solaire, qui est la seule source d'énergie externe importante pour l'atmosphère.

3.1.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé :

- **Réfléchi** : par la surface de la Terre; ce qui veut dire retour dans la direction privilégiée (dite spéculaire) ou diffus. Au lieu de cela, le sol diffuse et réfléchit le rayonnement de manière anisotrope.

- **Diffusé** : renvoyer dans toutes les directions. Les phénomènes de diffusion se produisent dans les milieux contenant des particules fines ou des molécules et dépendent largement de la granulométrie considérée. Par exemple, les molécules sont plus fortement affectées par les courtes longueurs d'onde (bleu) que par les longues longueurs d'onde (rouge) en raison de la loi de diffusion de Rayleigh à λ^{-4} , où λ est la longueur de l'onde. C'est pourquoi le ciel est généralement bleu et le coucher du soleil est rouge (la lumière violette et bleue s'est propagée).

- **Absorbé** : par les composantes gazeuses de l'atmosphère. Cette absorption nommée sélective, puisqu'elle se produit à des valeurs de longueur d'onde bien précises. Cela est principalement dû à la vapeur d'eau, à l'ozone, au dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, à l'oxygène.

Le rayonnement solaire direct est un rayonnement qui atteint le sol sans être diffusé. Le spectre du rayonnement solaire direct reçu à la surface de la Terre est illustré à la figure 1b. Il s'écarte sensiblement du rayonnement atteignant la limite atmosphérique supérieure, notamment en raison de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Dans certaines longueurs d'onde, le rayonnement est atténué voire annulé. Les principales bandes d'absorption sont dues à l'ozone entre 0,2 et 0,3 μm (dans le domaine UV), au dioxyde de carbone autour de 2,75 μm et 4,25 μm , surtout à la vapeur d'eau, dont l'absorption domine (surtout autour de 0,9 μm et 1,1 μm , 1,4 μm , 1,9 μm , 2,4 à 2,9 μm et 3 à 4 μm), qui modulent principalement la forme du spectre solaire reçu par le sol (Bessemoulin & Oliiviéri, 2000).

L'intensité du rayonnement solaire, ou la quantité de rayonnement atteignant la surface de la Terre, est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'atmosphère. Cette dernière dépend :

- * Le processus de l'orbite de la terre autour du soleil
- * La rotation quotidienne de la terre
- * Changements saisonniers

Par conséquent, l'intensité du rayonnement solaire à midi est supérieure à celle du matin ou de l'après-midi, et est supérieure en été qu'en hiver. Par conséquent, l'intensité du

rayonnement solaire dépend de l'heure, de la date, de l'année et de l'altitude. Habituellement, cela dépend de l'angle d'incidence des rayons du soleil (Pidwirny, 2006).

Dans les régions chaudes et arides, le rayonnement solaire est le facteur le plus important, qui affecte le confort thermique et donc l'architecture et l'urbanisme de ces régions.

- Le rayonnement solaire direct est très intense, dépassant 1000 W/m^2 sur les surfaces horizontales.
- Le rayonnement solaire réfléchi par la lumière dans les environnements arides augmente la sévérité de ce paramètre.
- La clarté du ciel favorise l'influence du rayonnement solaire direct - Dans des conditions de ciel nuageux, 20% du rayonnement total est diffusé.
- Ces zones ont de longues heures d'ensoleillement, d'une durée de 10 à 14 heures.

3.2 Température de l'air :

La température de l'air a un effet important sur la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir une température intérieure plus confortable qu'à l'extérieur en chauffant ou en refroidissant.

La température est la propriété thermodynamique de l'air, déterminée par le taux de chauffage et de refroidissement de la surface de la Terre, elle dépend donc du rayonnement solaire qui chauffe la Terre pendant la journée et du rayonnement nocturne qui refroidit la Terre pendant la journée et la nuit.

On peut dire que :

- Les températures de surface peuvent atteindre 70 C° en raison du rayonnement solaire qui intercepte le sol et réchauffe l'environnement.
- L'amplitude journalière en période chaude est d'environ $15,25 \text{ C}^\circ$
- La cause de la chute rapide de la chaleur nocturne est le rayonnement nocturne de la Terre vers le ciel.

Souvent, les températures ne sont données que sous forme de moyennes, ce qui n'est pas très utile lors de l'utilisation d'outils d'évaluation du confort thermique et du développement de solutions de construction. Afin d'obtenir une indication de la variabilité diurne et nocturne, il faut obtenir la température de l'air, minimale, moyenne et maximale (Mazouz, 2004) La couche d'air est en contact direct avec le sol chaud et est chauffée par conduction, et cette

chaleur est transférée à la couche supérieure principalement par convection et turbulence de l'air (Baruch Givoni & Izard, 1978).

La température de l'air dépend de la température et des propriétés thermiques des surfaces adjacentes et de l'altitude, ce qui entraîne une pression agissant sur l'air en le chauffant ou en le refroidissant.

Le taux de réchauffement et de refroidissement de la surface de la Terre est un facteur majeur dans la détermination de la température de l'air avec lequel elle entre en contact. L'air est transparent à presque tout le rayonnement solaire, il n'a donc qu'un effet indirect sur la température de l'air.

La température ambiante de l'air a un grand impact sur le niveau du confort thermique (objectif et subjectif) des habitants (Berkouk & Mazouz, 2017).

3.3 Vent :

Le vent est un facteur climatique non négligeable qui est déterminé par plusieurs facteurs (globaux et locaux) tels que la pression atmosphérique, la rotation de la Terre, les variations quotidiennes de température et la topographie. Ses caractéristiques sont :

- Une direction (majeure ou mineure).
- Une vitesse en m/s ou km/h.
- Une fréquence journalière, mensuelle ou annuelle.

Dans la littérature climatique existante, les vents dans une zone donnée sont souvent représentés par ce qu'on appelle des roses des vents, spécifiant la direction, la fréquence et la force du vent. La connaissance de ces éléments permet aux architectes de préconiser des solutions adaptées en cas d'avantages préjudiciables des éléments éoliens. Fait intéressant, dans la plupart des cas, cette opération a un impact direct sur la forme architecturale. (Mazouz, 2004). C'est aussi un facteur climatique négligeable dans certaines régions.

Donc, l'importance d'un vent donné c'est sa direction et sa vitesse, qui dépendent de sa fréquence et de temps où il se produit.

La détermination de ses caractéristiques d'une zone implique plusieurs facteurs, principalement :

- La répartition globale de la pression saisonnière;
- La rotation de la Terre;

- Les changements quotidiens du réchauffement et du refroidissement des terres et des océans;
- la topographie de la zone considérée et environnante (B Givoni, 1978).

L'effet thermique du vent est produit par l'échange de température entre le corps humain et l'environnement extérieur.

La différence de pression provoque une ventilation à l'intérieur du bâtiment, car elle peut modifier le débit de ce dernier, il est donc nécessaire que les concepteurs décident de se protéger du vent ou d'en profiter. La caractéristique principale des régions arides est le mouvement de l'air continental qui est sec, chaud et non perturbé par les précipitations. Le vent local souffle la plupart des temps du sud-ouest au nord-ouest.

Le but de la ventilation est de fournir de l'air pur, de permettre l'extraction de l'air pollué (malodorant et vicié), de maintenir un climat intérieur sans poussière avec une température et une humidité appropriées et d'assurer la circulation de l'air dans tous les espaces occupés est propice à la santé et au confort des occupants (Khadraoui, 2019).

La ventilation naturelle est causée par des différences de pression au niveau de diverses ouvertures dans le travail de la structure, dues au mouvement du vent sur et autour de l'enveloppe et à la différence entre les températures intérieures et extérieures. Le niveau de ventilation dépend de l'ampleur de la différence de pression, de la taille et de la nature de l'ouverture.

Dans les régions arides, la ventilation pendant la journée doit être minimisée ; la nuit, le mouvement de l'air est nécessaire pour abaisser les températures intérieures. L'analyse approfondie des phénomènes de vent par l'architecte lui permet de définir et de mieux gérer les conceptions. La réponse aux influences du vent permet à l'architecte de mieux organiser son plan d'étage.

3.4 L'humidité :

L'humidité relative s'avère souvent la plus utile pour la conception des bâtiments. Connaître la combinaison température-humidité relative peut donner un aperçu du degré d'éloignement du confort et des solutions architecturales préconisées par certaines approches systémiques pour atteindre la zone de confort (Mazouz, 2004). L'humidité de l'air est liée à la teneur en vapeur d'eau de l'air. La capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau augmente progressivement avec sa température (Baruch Givoni & Izard, 1978).

La teneur en humidité de l'atmosphère peut être exprimée en plusieurs termes, tels que l'humidité absolue, l'humidité spécifique, la pression de vapeur d'eau et l'humidité relative. La pression de vapeur d'eau de l'air est le moyen le plus pratique d'exprimer les conditions d'humidité, car le taux d'évaporation du corps est proportionnel à la différence de pression de vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant. D'autre part, l'humidité relative affecte les propriétés de nombreux matériaux de construction et la rapidité avec laquelle ils se détériorent.

L'humidité atmosphérique c'est la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère ; elle est le résultat de l'évaporation des surfaces océaniques, de tout type de surfaces humides.

Deux types d'humidité doivent être mentionnés :

- **Humidité absolue de l'air** : c'est le nombre de grammes de vapeur d'eau dans l'air, exprimé en g/m³, qui a un effet significatif sur l'humidité de l'air du bâtiment. Si l'air est trop sec, la poussière et les décharges statiques peuvent provoquer une gêne, et si l'air est trop humide, la condensation peut provoquer des dégâts (moisissure, pourriture).
- **Humidité relative de l'air** : C'est le rapport entre l'humidité absolue et la quantité maximale que l'air peut contenir, exprimé en pourcentage (%). Elle peut être calculée ou lue sur une carte psychrométrique, mais l'humidité relative est un indicateur très utile aux concepteurs pour définir les conditions de confort thermique à travers la température ambiante. Sur l'image ci-dessous, on voit que si la température corporelle est de 15°C, la chauffer à 27°C est suffisant pour les conditions souhaitées.

3.5 Précipitations :

Les précipitations se produisent lorsque l'air de la haute atmosphère se condense en formant des nuages, constitués de gouttelettes d'eau ou même de cristaux de glace. Au fur et à mesure que l'air monte, les gouttelettes d'eau prennent du poids, provoquant de la pluie ou de la neige. Ce dernier est fortement influencé par les différences de température et le mouvement du vent. Dans les régions chaudes, ce paramètre est beaucoup plus faible.

Les précipitations sont les différentes formes (pluie, neige, grêle) de l'eau solide ou liquide contenue dans l'atmosphère déposée à la surface de la Terre. Ils sont généralement donnés par les stations météorologiques en nombre de jours de pluie ou de neige. Là, des

solutions générant des configurations architecturales peuvent également être recommandées par les architectes, tout comme des solutions existent dans l'architecture vernaculaire (Mazouz, 2004). Les précipitations varient d'une région à l'autre et dépendent du mouvement des vents et des masses d'air humide. Quelle que soit leur nature (pluie, neige, grêle), leur quantité se mesure en millimètres d'eau.

4 Conception des bâtiments et performance énergétique

4.1 Relation architecture et climat :

Les hommes essaient d'utiliser le climat pour gagner en confort et économiser de l'énergie à la maison. Aujourd'hui, des règles adaptées à l'environnement, à l'architecture et au climat permettent d'allier traditions millénaires et technologies de pointe.

Les exigences semblent ignorer la capacité du bâtiment à s'adapter au climat et à maîtriser les environnements intérieurs et extérieurs. Ils commandent la technologie pour créer des environnements artificiels. Partout dans le monde, les concepteurs doivent tenir compte du climat. Plusieurs ouvrages expliquent que l'aspect climatique n'était pas une variable importante dans le processus de conception au cours du siècle dernier. D'autres, en revanche, ont pris en compte les effets du climat avec intérêt, mais sans une compréhension approfondie du processus.

On constate aujourd'hui, surtout en Algérie, que l'on construit les mêmes ouvrages à Alger, Biskra, Sétif ou Tamanrasset. Dans tout projet, les aspects physiques de l'environnement doivent être soigneusement analysés. À Biskra, il y a plus de 12 heures d'ensoleillement, soit 9 mois sur 12 en fait. Dans ce cas particulier, le concepteur doit réserver l'essentiel de l'analyse à cette variable. Les architectes qui maîtrisent cela peuvent obtenir des résultats utiles. On doit alors, créer un microclimat confortable par l'enveloppe de la construction (forme, matériaux, répartition des ouvertures). L'architecture doit être étudiée en fonction du climat et adaptée à son environnement le plus proche, en utilisant des matériaux locaux et recyclés qui améliorent le confort thermique et l'environnement. Aujourd'hui, il est nécessaire de réorganiser la relation entre la construction et son environnement. En d'autres termes, le bâtiment doit s'adapter au climat et au mode de vie de ses futurs occupants, car un mauvais choix peut coûter très cher en énergie à long terme.

4.2 Orientation et forme

Le concept « forme » est souvent mal défini. Il est largement utilisé dans diverses disciplines telles que la linguistique, la logique, l'art, la sémiotique et les sciences humaines. Le concept est lié à la fois à des phénomènes saisis dans le monde sensible, tels que les formes perceptives, spatiales, sonores ou naturelles, et à des phénomènes liés à d'autres domaines, tels que les formes du discours, du raisonnement, de la sensation, de la pensée ou de l'esprit. Formes pures articulées, comme les théories scientifiques (Granger, 1994).

Elle peut être défini par plusieurs critères, tels que : la texture, la matière, la couleur, les effets d'ombre et de lumière...etc. Spatialement, la forme peut être soit la structure interne de l'œuvre, soit le contour extérieur représenté par l'œuvre, soit le principe d'unité d'ensemble. Il fait référence à un volume qui n'est pas seulement défini par sa configuration géométrique (composition de figures de base : cubes, pyramides, sphères, etc.), mais aussi par des propriétés visuelles telles que la couleur, l'échelle, la texture, le rapport à l'environnement et au climat.

4.3 Impact de la forme du bâti sur ses performances thermiques

L'impact de la forme sur ses performances thermiques dépend largement du degré d'exposition de l'enveloppe aux températures extérieures et à la ventilation. La forme considérée comme composition volumique a également un impact sur son exposition et ses pertes de chaleur. Les plans inclinés et les formes multi-volumes ont tendance à augmenter la surface de la construction. En matière d'énergie, l'emplacement de l'isolation est critique.

La forme et la géométrie des éléments architecturaux influencent également l'exposition à la lumière du jour en affectant les façades individuelles, les espaces extérieurs et les bâtiments voisins. Les géométries complexes et les ailes saillantes ont tendance à créer une surprotection contre le soleil (Latreche, 2019). Cependant, la relation entre la forme du bâtiment et la transmission de la chaleur solaire n'est pas importante, car il existe de nombreuses stratégies pour contrôler l'impact négatif de la forme sur la conception de l'enveloppe du bâtiment (Khadraoui, 2019). La forme du bâtiment a un impact beaucoup plus important sur la direction du vent et du flux d'air et sur la possibilité d'utiliser la lumière naturelle (Mazouz, 2004).

Du coup, La localisation du bâtiment doit garantir sa consommation énergétique, et minimiser l'éclairage artificiel ou la climatisation et contrôler l'accès au soleil pour un éclairage naturel, de réduire et contrôler aussi le rayonnement solaire incident, améliorer la

ventilation naturelle et le refroidissement passif, minimiser les surfaces extérieures des bâtiments, et minimiser les surfaces exposées à l'ouest, fournir un éclairage naturel et une protection solaire et enfin éviter de recevoir trop d'énergie solaire pendant les périodes chaudes.

Si un bâti a une surface d'enveloppe plus importante, il sera naturellement plus affecté par les conditions extérieures. D'une manière générale, le rapport surface extérieure/volume des petits bâtiments est supérieur à celui des grands bâtiments. Les bâtiments avec des enveloppes plus petites sont principalement déterminés par leurs charges internes telles que les occupants, les équipements, l'éclairage, etc. Comme le coût du terrain dans les centres urbains est beaucoup plus élevé qu'en banlieue, les immeubles de grande hauteur sont le choix principal afin d'optimiser son utilisation. Ici, le mur-rideau est essentiellement en verre, ce qui facilite la pénétration de la lumière naturelle. De plus, le mur-rideau agit comme une enceinte hermétique, ce qui rend le bâtiment plus dépendant du système de climatisation.

Les conclusions de base d'Olgay sur la modélisation architecturale sont (Auliciems & Szokolay, 1997) :

1. Un bâtiment carré n'a jamais la meilleure forme.
2. Toutes les formes élancées le long de l'axe nord-sud fonctionnent en hiver et en été et sont moins éco énergétiques que les bâtiments carrés.
3. d'une façon générale, la meilleure forme est une forme allongée dans la direction adaptée au climat.

5 La masse thermique

5.1 Avantage :

La masse thermique à un impact significatif sur le confort, la consommation d'énergie et la climatisation, elle peut avoir plusieurs rôles :

- Elle peut stocker la chaleur ou agir comme dissipateur de chaleur,
- Elle agit comme régulateur thermique en supprimant les variations thermiques et en améliorant les conditions de confort,
- Elle réduit les changements de température en stockant directement la chaleur des taches solaires ou de l'air,

- La chaleur stockée peut être dissipée la nuit ou par ventilation nocturne (Pépin, 2018).

5.2 Caractéristiques de la masse thermique :

La masse thermique décrit la capacité d'un matériau de construction à conserver la chaleur ; c'est la propriété d'absorber la chaleur par un matériau, de la stocker puis de la restituer. L'ajout de masse thermique à l'intérieur de l'enveloppe isolante aide à réduire les températures extrêmes à l'intérieur du bâtiment, se traduisant par une température intérieure moyenne plus douce toute l'année et un environnement intérieur plus confortable. Les matériaux de construction les plus lourds peuvent stocker beaucoup de chaleur et sont connus pour avoir une grande masse thermique, les matériaux légers quant à eux, emmagasinent très peu de chaleur et on dit qu'ils ont une faible masse thermique. L'utilisation de matériaux de construction lourds à masse thermique élevée peut réduire les besoins de chauffage et de refroidissement de 25 % par rapport aux maisons construites avec des matériaux légers.

La masse thermique est particulièrement importante pour le confort, elle agit comme un accumulateur de chaleur. En été, il peut absorber une partie de la chaleur, améliorant ainsi le confort, tandis qu'en hiver, il peut également stocker la chaleur générée par les systèmes solaires ou de chauffage pendant la journée pour la restituer la nuit. Dans les climats où les températures estivales sont plus fraîches, le rôle de la masse thermique est moins important, mais toujours positif. Cependant, dans des conditions d'exposition limitée au soleil, la masse thermique peut augmenter les besoins de chauffage en hiver.

6 Masse thermique et climat chaud

Dans ces climats, le chauffage en hiver et le refroidissement en été sont très importants. Une construction robuste combinée à des systèmes de chauffage et de refroidissement passifs est le moyen le plus efficace et le plus économique de maintenir des conditions intérieures confortables toute l'année. Les variations diurnes de température sont souvent importantes et peuvent devenir extrêmes. Dans ces conditions, les grandes structures avec une bonne isolation sont idéales (MEDJELEKH & Abdou, 2010).

Lorsqu'un chauffage ou un refroidissement supplémentaire est nécessaire, la masse thermique doit être aussi proche que possible de la lumière directe du soleil pour le chauffage ou d'un flux d'air frais provenant d'un système d'évaporation pour le refroidissement. La

masse thermique amortira les changements de température, réduisant ainsi la durée pendant laquelle l'équipement de conditionnement auxiliaire est nécessaire à l'amélioration des conditions de confort. Les maisons souterraines, troglodytiques ou recouvertes de terre sont bien protégées de la lumière du soleil et fournissent beaucoup de masse thermique par couplage direct au sol, stabilisant les températures intérieures.

7 Isolation thermique

L'isolation réduit les pertes de chaleur en se transmettant à travers les murs du bâti. Elle peut être utilisée à la fois pour les nouvelles constructions et la restauration, et est généralement une technique peu coûteuse. L'ajout d'isolant présente plusieurs avantages :

- ✓ Économies financières et énergétiques :
 - Pour la réduction de la taille du système de chauffage,
 - Pour la réduction de la consommation annuelle d'énergie (et la pollution de l'environnement).
- ✓ Santé, et sécurité :
 - Par la réduction des risques de condensation et de moisissure.
- ✓ Confort thermique :
 - réduire le temps qu'il faut pour chauffer la pièce,
 - Contrôler efficacement la température et affecte directement ou indirectement le transfert d'humidité.
 - L'isolation peut également réduire les effets des températures extérieures élevées en été (bien que cela dépende également de l'apport solaire).

7.1.1 Caractéristique

7.1.1.1 Isolants thermiques

La fonction principale de l'isolant est de limiter la conduction thermique et parfois le rayonnement thermique.

Un bon isolant est évidemment un mauvais conducteur de chaleur.

De manière générale, les matériaux plus légers sont de meilleurs isolants. Plus le matériau est dense, plus les atomes sont proches les uns des autres, ce qui signifie qu'il est plus facile

de transférer de l'énergie d'un atome à un autre. Par conséquent, les gaz sont de meilleurs isolants que les liquides, qui sont meilleurs que les solides (de Ponte, 2002).

Il convient de noter qu'un mauvais conducteur d'électricité est également un mauvais conducteur de chaleur ; le bois est un meilleur isolant que le cuivre. La raison en est que les métaux sont de bons conducteurs d'électricité, car ils ont des électrons libres qui s'entrecroisent, ce qui facilite également le transfert d'énergie d'un point à un autre dans le métal (Khadraoui, 2019). Les matériaux qui n'ont pas cette propriété, comme le bois, ne conduisent pas bien la chaleur. Le mécanisme de base est :

- Conduction réduite (faible densité, y compris les gaz),
- Empêcher la convection (cavité pleine),
- Protection contre les radiations (surface brillante, revêtement low-e).

7.1.1.2 Type d'isolation

- Blocs rigides préfabriqués (blocs de béton léger, dalles diverses...),
- Matériaux souples (fibre de verre.),
- Matériaux granuleux (polystyrène expansé..),
- Matériau moulé sur place (mousse de polyuréthane...).

7.1.1.3 Propriétés d'isolation

Le choix dépend de nombreux facteurs :

- le niveau d'isolation procuré par le matériau,
- exigences de rigidité ou de résistance mécanique,
- Résistance à l'humidité,
- Résistance au feu,
- Anti-moisissure et insectes,
- Compatibilité avec d'autres matériaux,
- sans danger pour l'homme et l'environnement (l'amiante était utilisé comme isolant jusqu'à ce que ses effets nocifs soient identifiés).

Le coefficient $*r*$: mesure la résistance d'un matériau à la conduction du flux thermique, et donc sa capacité à isoler. Il est utilisé de manière normative pour qualifier les isolateurs, plus la valeur est élevée, meilleure est l'isolation.

Définition :

La résistance thermique de surface $*r*$ est l'inverse du débit conduit par mètre carré de surface, avec une différence d'un degré entre les deux faces du matériau. Elle est exprimée en $m^2.k/w$ en unités SI.

7.2 Isolation thermique et Climat chaud

7.2.1 Isolation transparente :

L'isolation traditionnelle est conçue pour réduire les pertes de chaleur dans les bâtiments. L'isolation transparente est basée sur le principe de compensation des pertes de chaleur par conduction par apport solaire et d'utilisation de ces apports solaires pour le chauffage. Le matériau utilisé pour l'isolation transparente combine deux propriétés très importantes du bilan thermique d'un bâtiment :

- isolation thermique très efficace (faible conductivité thermique),
- Très bon transfert du rayonnement solaire (coefficient solaire g_h élevé).

Les systèmes d'isolation transparents disponibles aujourd'hui, tels que le polycarbonate ou le plexiglas, ont une structure en nid d'abeille ou tubulaire perpendiculaire au mur. Cependant, malgré leurs excellentes propriétés thermiques, ils présentent également certains inconvénients. Le procédé de fabrication utilisé (extrusion) conduit à des maillons faibles dans la structure du matériau isolant, ce qui dégrade également les performances optiques. Le processus de production est très complexe et peu flexible en termes d'utilisation de différents matériaux ou d'optimisation géométrique de la microstructure du matériau.

8 L'inertie thermique

Partons des définitions qui sont données de l'inertie, concept dont l'origine se situe dans le domaine de la mécanique :

- INERTIE : "Propriété qu'ont les corps de ne pouvoir d'eux-mêmes changer l'état de repos ou de mouvement où ils se trouvent" (Petit Robert).
- FORCE D'INERTIE : "Résistance que les corps, en raison de leur masse, opposent au mouvement" (Petit Larousse).

Appliqué à la thermique, quelle définition peut-on donner de l'inertie thermique ? En se basant sur la littérature consacrée au sujet (en particulier Pierre Lavigne), on peut en essayer une :

- INERTIE THERMIQUE : "Propriété d'un bâtiment à s'opposer aux variations de température"(Amraoui, 2021)

L'inertie thermique est essentielle pour le stockage de l'énergie reçue par le bâtiment et sa restitution quand cela est nécessaire : elle permet effectivement d'emmagasiner les apports gratuits. La notion d'inertie thermique n'est pas facile à appréhender. Elle est définie comme la vitesse de réaction d'un bâtiment au stockage et au transfert de la chaleur. La réponse d'un bâtiment est largement déterminée par les propriétés thermiques des matériaux qui le composent (Chahwane, 2011).

Les bâtiments réagissent différemment selon leur capacité à stocker et à transférer la chaleur, il existe donc une forte relation entre la conductivité et la capacité calorifique, une masse thermique élevée retarde les températures diurnes maximales, réduisant ainsi considérablement les systèmes de refroidissement.

8.1 Exemples d'application de l'inertie thermique dans la construction

Les habitations traditionnelles ont des qualités architecturales qui répondent positivement à la rigueur du climat par des moyens simples, mais efficaces. Lors des canicules, la forte inertie du matériau permet d'atténuer les variations de température en emmagasinant l'excédent de chaleur estivale pour le restituer la nuit. L'inertie thermique crée une circulation naturelle de l'air à travers les ouvertures, évitant la surchauffe pendant la journée et rejetant de la masse dans l'air la nuit. En hiver, ce véritable piège solaire permet également de stocker de précieuses calories pour les journées et nuits froides (Amraoui, 2021).

Partout dans le monde, la tradition de l'architecture vernaculaire exprime une adaptation thermique particulièrement complexe : les constructions d'hommes des cavernes géants et les constructions d'igloos sont un exemple de cette construction traditionnelle et de l'utilisation de l'énergie thermique pour s'adapter aux climats rigoureux.

L'inertie thermique de l'enveloppe extérieure augmente considérablement, la variation journalière de température disparaît, et seul le cycle annuel exerce une pression sur l'atmosphère intérieure. D'autres mesures montrent que près de la surface, la température

fluctue quotidiennement autour de la température diurne moyenne, mais avec la profondeur, la période d'intégration de la température moyenne augmente à une certaine profondeur, et la magnitude finit par jouer lorsqu'elle dépasse finalement cette profondeur, avec la température extérieure moyenne annuelle à prédominant dans des conditions de régime permanent(Izard & Millet, 1993).

Dans ce type d'architecture, une attention particulière est également portée à l'orientation par rapport au point cardinal, au vent et au soleil. L'orientation, combinée à l'inertie thermique de la Terre, peut fournir l'énergie et l'économie de cette dernière. Pour ces raisons, les anciens bâtisseurs en ont profité pour installer des villes et des villages entiers sous terre. Des villes comme Matmata en Tunisie, Tripoli en Libye, Aptia en Italie, et en Espagne, la ceinture du Laos en Chine, Kemakli en Turquie, Derincho et Ozconak, et les gorges du Rufi en Algérie. Tous ces exemples sont uniques.

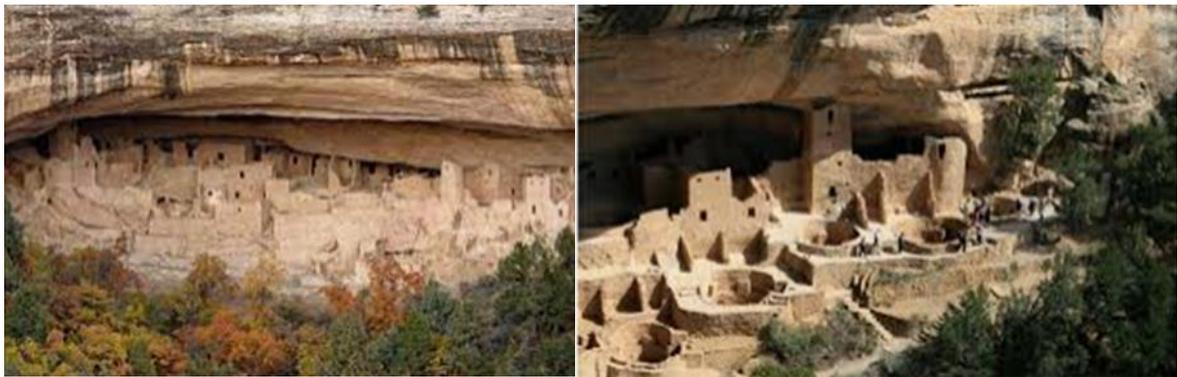


Figure 2-ch1Cliff Palace("cliff palace,"

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Mesa_Verde_National_Park_Cliff_Palace_Right_Part_2006_09_12.jpg 14h36)

Des exemples de Cliff Palaces (Cliff Palaces) sont 220 habitations troglodytes construites et habitées par les peuples Anasazi (Amérindiens) au cours de ce siècle. L'emplacement idéal est dans l'abri où ils construisent leur habitation, ils sont toujours au niveau de la falaise à l'abri de l'été rayonnement solaire et accueillent le plein soleil des Landers d'hiver. Les habitants s'abritent des vents froids, profitant de l'inertie thermique de la Terre et de l'amortissement et des écarts de température des falaises.

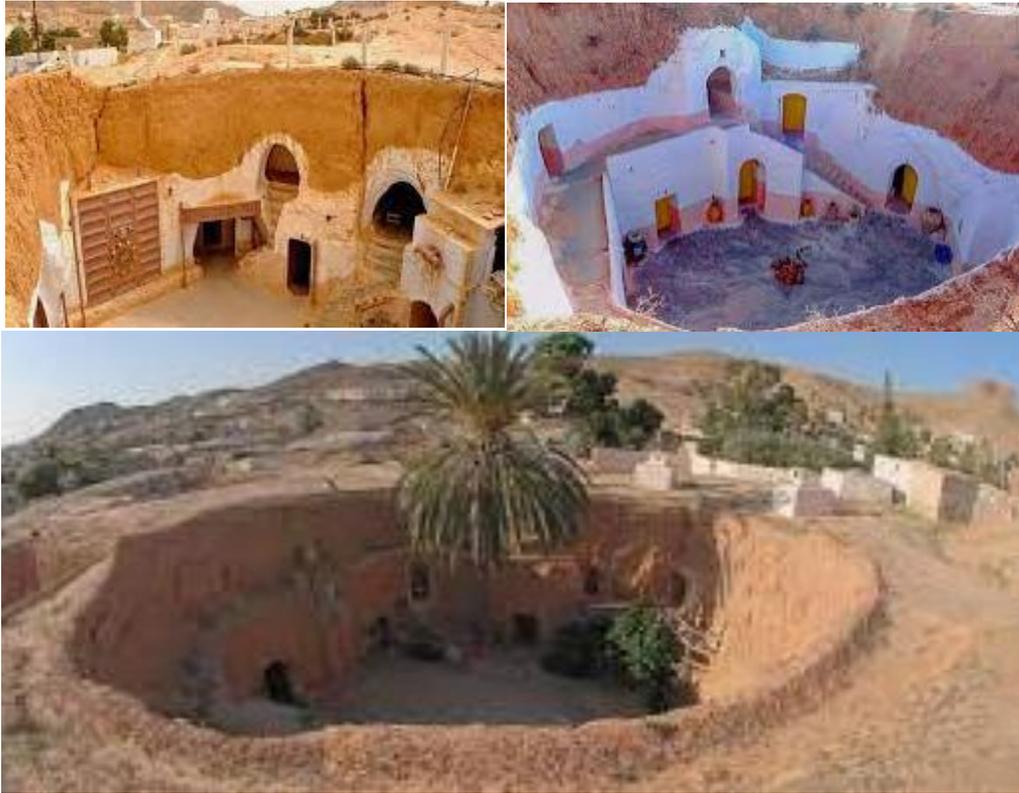


Figure 3-ch1 maison troglodytique de Matmata Tunis ("maison troglodytiques de Matmata Tunis ", https://www.google.com/search?q=matmata+tunis&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwispZjLz9r3AhUOi_OHHUVrBVQQ_AUoAXoECAIQAw) 20/03/2022 à 14h10)

Un autre exemple est le Matmata en Tunisie enterrée à 6 à 8 mètres du sol. Malgré l'ampleur du climat aride, son architecture d'homme des cavernes assure une température confortable à ses habitants grâce à l'inertie de la terre.

Le bâtiment massif assure une stabilité de température entre le jour et la nuit et entre l'été et l'hiver, facteur important de confort thermique. Ceci est obtenu naturellement grâce à l'utilisation d'éléments structurels lourds. Les vieilles maisons aux murs épais apportent de la fraîcheur en été et isolent du froid en hiver.

Les maisons en Iran et les maisons au Yemen sont des exemples d'une telle architecture monumentale dans les climats chauds, la pierre et la terre crue lors de l'utilisation de matériaux locaux dans les climats tempérés à froids.

9 Conclusion

En tout temps, l'homme essaie d'exploiter le climat pour son confort et les économies d'énergie dans sa maison. De nos jours, les règles d'adaptation à l'environnement, à l'architecture et au climat permettent d'allier traditions millénaires et technologies de pointe, avec des exigences de confort toujours croissantes.

Les concepteurs semblent négliger cette adaptation du climat en fonction de l'environnement. Ils utilisent la technologie pour créer des environnements artificiels. Il faut donc réorganiser cette relation pour les générations futures. En d'autres termes, la construction doit s'adapter au climat et au mode de vie des futurs habitants, car un mauvais choix peut coûter très cher en matière d'énergie à long et à court terme.

Ce chapitre a expliqué cette relation entre l'architecture et le climat et son impact sur la forme architecturale. Cependant, l'aspect climatique a été particulièrement négligé dans les années 60 en raison de l'influence de la modernité. Mais, depuis la crise énergétique de 1972 et la conférence de Rio la même année ensuite celle de Stockholm de 1992, grâce aux efforts des Nations unies, le climat est devenu l'un des principaux thèmes de la recherche architecturale. Dans cette optique, une attention particulière est portée à l'étude de l'impact des paramètres climatiques (notamment la température de l'air) sur les bâtiments en climats chauds et arides pour limiter les apports thermiques estivaux et minimiser les consommations énergétiques liées à la climatisation.

Le climat est un ensemble de phénomènes météorologiques terrestres qui caractérisent une région sur des décennies. Ses recherches reposent sur l'analyse quantitative à long terme des valeurs moyennes des paramètres nécessaires à la caractérisation de l'état de l'atmosphère, principalement la température de l'air, la couche d'eau des précipitations, la durée d'ensoleillement, la direction et la vitesse du vent. Par conséquent, le climat représente le "temps moyen" à un endroit donné. La climatologie est proche de la géographie physique, l'étude de la composition et de la variation du climat de surface de la Terre. Le climat quantifie les aspects du temps et diffère donc du temps en durée. En fait, le climat est une série de types de temps aux caractéristiques relativement constantes, qui sont mesurés sur une période de 30 ans (normale).

La climatologie s'intéresse davantage aux facteurs géographiques (répartition des terres et des mers, topographie, etc.) pour expliquer les irrégularités et définir les différents types de climats.

Nous avons ensuite constaté que la conception des bâtiments est étroitement liée à la performance énergétique et a un impact direct. La forme des bâtiments change constamment à mesure que les gens passent de climats froids à des climats chauds et arides. Des études de carrés, de divers types de rectangles et d'orientations de bâtiments dans la plupart des climats montrent qu'il existe des formes standard qui minimisent le transfert de chaleur. Ces formes sont un équilibre entre les saisons froides où les apports solaires peuvent être utiles et les saisons chaudes où ils doivent être évités.

Le choix du matériau de construction et les propriétés du matériau isolant ainsi que les différents types d'isolation sont très importants. Les choix de murs représentent 60 à 70 % de la masse thermique du bâtiment, et les choix de planchers représentent 30 à 40 %. C'est pourquoi nous voulons nous concentrer sur les murs et leur donner plus d'importance.

Généralement, plus la masse thermique n'est élevée, mieux c'est. Les maisons conçues avec des murs à double brique ou maçonnerie sur dalle de béton, pour plus de confort et d'économies d'énergie, sont préconisées. Cependant, le coût des matériaux lourds peut entraver les avantages des économies d'énergie. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser autant de masse thermique que possible pour obtenir des conditions intérieures confortables. Dans la plupart des cas, les dalles de béton (beaucoup moins chères que les murs de briques) sont à privilégier, complétées par des murs en matériaux résistants si le budget du bâtiment le permet.

La grande inertie du matériau est capable d'atténuer les changements de température en stockant l'excédent de chaleur estivale et en le restituant la nuit. L'inertie thermique de l'enveloppe extérieure augmente considérablement, la variation journalière de température disparaît, et seul le cycle annuel exerce une pression sur l'atmosphère intérieure. L'exemple montre que lorsque la température de surface du mur extérieur la dépasse, la température intérieure peut rester stable autour de 30°C.

Les humains essaient d'utiliser le climat pour gagner en confort et économiser de l'énergie à la maison. Aujourd'hui, des règles adaptées à l'environnement, à l'architecture et au climat permettent d'allier traditions millénaires et technologies de pointe. Les maisons en terre et en briques d'argile ont généralement des murs épais (environ 300 mm) et une grande masse thermique. La forte inertie de ces matériaux réduit les échanges thermiques à l'intérieur lorsque la température extérieure fluctue dans des conditions confortables, et fonctionne particulièrement bien en été.

Des exemples de grands bâtiments offrent une stabilité de la température intérieure entre le jour et la nuit et entre l'été et l'hiver. Ceci est obtenu naturellement grâce à l'utilisation d'éléments structurels lourds. Les vieilles maisons aux murs épais apportent de la fraîcheur en été et isolent du froid en hiver.

CHAPITRE 02 :

*Passage en revue des techniques de
construction en terre*

1 Introduction

La construction de tout type de projet nécessite une étude préalable, de la conception jusqu'à la livraison, et le choix des matériaux à utiliser est l'un des points principaux de cette étude. Par exemple, les différentes manières de construire une éco-maison sont : le choix de matériaux naturels et les stratégies passives. De la charpente à la toiture, en passant par les murs et l'isolation, les matériaux naturels sont disponibles à chaque étape d'un chantier.

Dans ce chapitre, nous verrons quelques techniques modernes, basées sur des techniques de construction anciennes, utilisant des matériaux naturels, notamment des matériaux à base de terre, leurs propriétés et leurs qualités environnementales. Nous discuterons également de ces matériaux à base de sol, tels que l'adobe, des techniques de fabrication et de la variété des produits à base de terre utilisés dans la construction. À la fin de ce chapitre, il est nécessaire de catégoriser les matériaux afin de choisir le type de matériau que nous étudierons.

2 Techniques de construction en matériaux naturels

Les matériaux naturels ont généralement une énergie, ou une toxicité intrinsèque, très faible, inférieure à celles des matériaux fabriqués en industrie par l'homme. Ils nécessitent certainement moins de traitement et ont moins d'impact sur l'environnement. Beaucoup d'entre eux, comme le bambou, les fibres naturelles, la terre, le bois, sont théoriquement renouvelables. Lorsqu'on incorpore ces matériaux naturels dans des produits de construction, ces produits deviennent alors plus "durables".

2.1 La technologie moderne

2.2 Terre stabilisée compactée

Ces dernières années, la technologie en terre compactée stabilisée a été optimisée grâce au développement de nouvelles techniques et appareillages qui peuvent accélérer le processus de construction. On obtient une construction en terre lourde avec des besoins d'entretien très limités.

2.2.1 Terre moulée

Les matériaux de construction à base de terre et de gypse peuvent remplacer les structures en bois ou en acier pour les maisons individuelles et les petits sites commerciaux, ce qui entraîne des avantages environnementaux et énergétiques. Cela est traduit comme étant un arrêt technologique, offrant un nouveau produit avec toutes les caractéristiques des structures en terre traditionnelles, renforcées par une esthétique supérieure, une rapidité de construction et un coût abordable.

Le sol moulé n'est pas compacté mécaniquement à l'aide de briques, de blocs ou par des moyens mécaniques ou pneumatiques. Au lieu de cela, il s'agit de couler l'ensemble du bâtiment en place en enlevant le coffrage peu de temps après le coulage. Ceci est dû à la prise rapide du gypse, qui permet d'atteindre très rapidement une résistance suffisante pour supporter le mur à des concentrations étonnamment faibles. Le gypse calciné à 15 % à une résistance étonnante immédiatement après la mise en place sans l'utilisation de barres d'armature.

Dans un nouveau développement, pas encore complètement mis en pratique, mais ayant été testé à petite échelle fin 2003, le mélange a été traité après moulage pour réduire le temps de prise normal d'une heure ou deux à quelques minutes. L'accélération de cette configuration pourrait encore accélérer la construction et ouvrir de nouvelles possibilités pour développer de nouvelles formes esthétiques.

2.2.2 Terre allégée

Fabriqué à la main à partir de briques de boue et séché au soleil, l'adobe contient un mélange de boue sèche auquel la paille est souvent ajoutée. Un mélange de sol sec comprimé dans un coffrage pour former un mur brut résistant à la charge. "Cob" est le mot anglais pour la terre complète. Un mélange assez sec, contenant généralement de la paille, piétiné pour former un mur en un seul bloc, qui est ensuite ébréché.

"Wattle" et "Daub" sont des termes anglais pour les mélanges de terre humides utilisés pour remplir un cadre en bois préinstallé, généralement avec une petite grille auxiliaire pour contenir le mélange. Paille ou autre renfort pour contrôler le retrait. Cette technique est très courante là où il y a beaucoup de bois. Le sol léger est plus proche de cette dernière technique, car il ne s'agit en réalité que d'un remplissage qui repose sur une structure en bois, ce qui lui donne de la stabilité. Cependant, il s'agit également d'une structure moulée associée

à un sol comprimé. Par contre, la terre utilisée ici est très humide et collante, Il peut également être conditionné en blocs fabriqués à la main ou à la machine et ensuite utilisés comme n'importe quel autre bloc.

3 La brique de terre stabilisée crue et compressée BTC

Depuis les temps les plus reculés, le sol brut a été utilisé pour construire des bâtiments, comme en témoignent les habitats traditionnels dans de nombreux endroits de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, notamment le béton et l'acier, à nos jours, elle représente plus de bénéfices et d'avantages dans les pays en développement et industrialisés. Souvent décrié pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, le matériau sous sa forme actuelle présente de nombreux atouts pour construire des habitations durables, confortables et économiques(H Houben, Rigassi, & Garnier, 1996).

4 Techniques de construction en terre

À travers le patrimoine mondial des traditions primitives de construction en terre, on trouve de nombreuses techniques de construction aux variations infinies, adaptées à la qualité de la terre et à la sophistication technique, reflétant les particularités du lieu et de la culture. Douze technologies de sols pour la construction sont présentées dans une charte établie par le Groupe CRATERRE en 1986(H Houben & Guillaud, 2006). Parmi celles-ci, huit sont couramment utilisées et constituent des techniques majeures (Rigassi, 1995).

4.1.1 Adobe :

Une sorte de terre à l'état de boue, généralement relookée avec de la paille ou d'autres fibres, séchée au soleil et façonnée en briques.



Figure 1-ch2 mur en adobe("mur en adobe," [www.google.com/url?sa=i&url= 10/maj/2022 15h15](http://www.google.com/url?sa=i&url=10/maj/2022%2015h15))

4.1.2 Pisé :

À l'aide d'un pilon, compacter le sol couche par couche dans le coffrage, coffrage par coffrage.

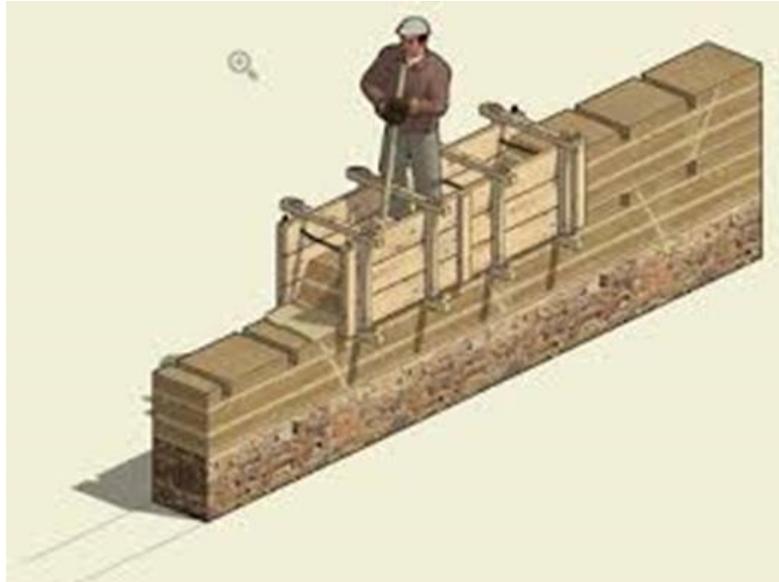


Figure 2-ch2 mur en pisé("mur en pisé ",
[www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F23/mai/2022 à 10h34](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F23/mai/2022%20à%2010h34))

4.1.3 Terre-Paille :

Disperser la terre dans l'eau jusqu'à obtention d'un liquide épais et homogène, puis mélanger avec la paille pour former un film sur chaque corde. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et se referme pour ériger les murs monolithiques qui doivent supporter la structure.



Figure 3-ch2 construction de mur terre-paille("mur terre-paille,"
www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ffaisons-le-mur.com%2Fterre-paille 24/mai/2022.10h03)

4.1.4 Torchis :

Argile modifiée avec de la paille ou d'autres fibres, recouverte d'une ou plusieurs couches de grillage, utilisée pour le crépissage des structures à pans de bois.



Figure 4-ch2 mur en torchis ("mur en torchis," [www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F22/mai/2022 14h15](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F22/mai/2022%2014h15))

4.1.5 Terre façonnée :

La terre, généralement riche en paille ou autres fibres, est façonnée en murs de la même manière que les techniques de poterie, sans outils.

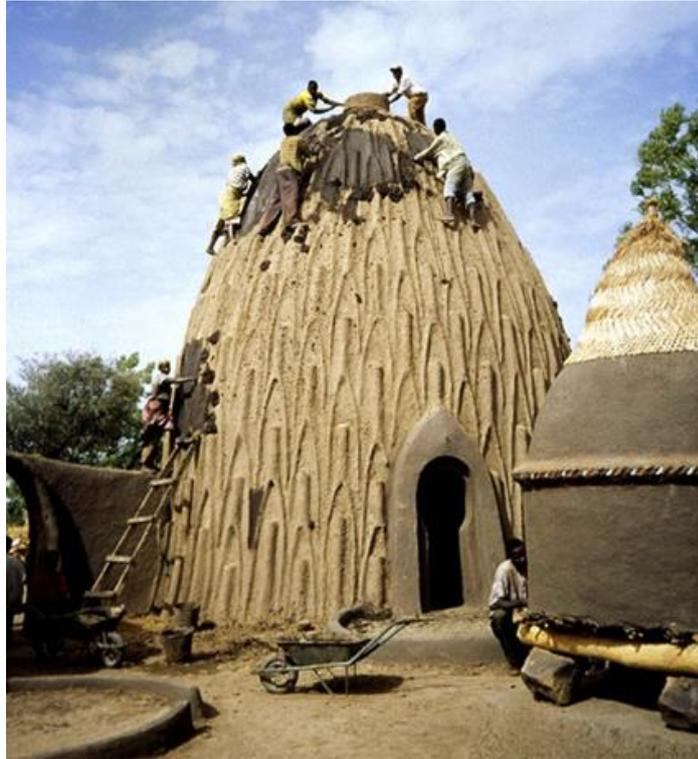


Figure 5-ch2 mur en terre façonnée("construction en terre façonnée,"
www.google.com/search?q=Terre+fa%C3%A7onn%C3%A9e+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjnmI62nd33AhWUZfEDHSoKDn0Q2-cCegQIABAA&oq=Terre+fa%C3%A7onn%C3%A9e+ 25avril2022à 14h10)

4.1.6 Terre extrudée :

La terre est extrudée par une machine puissante à proximité ou dérivée d'un équipement utilisé pour fabriquer des produits destinés à la cuisson.



Figure 6-ch2 deux modèles de brique extrudée("brique extrudée,"
https://www.google.com/search?q=Terre+extrud%C3%A9e+&tbm=isch&ved=2ahUKEwi9gK_Km933AhWpXvEDHWbuDIoQ2-cCegQIABAA&oq= 23/avril2022à 15h04)

4.1.7 Bauge :

La terre, généralement garnie de paille ou d'autres fibres, est façonnée en boules rugueuses qui sont empilées les unes sur les autres et doucement empilées manuellement ou par l'utilisation des pieds, jusqu'à ce qu'un mur monolithique formé soit érigé. Dans d'autres



Figure 7-ch2 mur en bauge ("mur en bauge," <http://totem-terre-couleurs.fr/maconnerie-terre/mur-de-bauge.html> 23/avril/2022 à 15h05)

cas, le torchis est intégré à la structure en bois.



Figure 8-ch2 technique de construction de mur en bauge("mur en bauge," <http://totem-terre-couleurs.fr/maconnerie-terre/mur-de-bauge.html> 23/avril/2022 à 15h05)

4.1.8 Terre comprimée :

La terre est comprimée en mottes dans le moule. Auparavant, le sol était compacté dans le moule avec un petit pilon, ou en pliant avec force des couvercles très lourds dans le moule. Aujourd'hui, une grande variété de presses est utilisée.



Figure 9-ch2 compression de terre comprimée(" terre comprimé 1," <https://www.google.com/search?q=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e> 23/avril/2022 à 14h23)



Figure 10-ch2 bloc de terre comprimée après séchage("terre comprimée 2," [https://www.google.com/search?q=brique+de+terre+comprim%C3%A9e&source=lnms&tbm=isch&sa=23/avril/2022 à 15h10](https://www.google.com/search?q=brique+de+terre+comprim%C3%A9e&source=lnms&tbm=isch&sa=23/avril/2022+à+15h10))

4.2 Blocs de terre comprimée (BTC)

La technologie des blocs de terre comprimée (BTC) est une technologie récente par rapport à l'histoire de la construction civile. Elle a connu un développement dans les années

1950 dans le cadre du programme colombien de recherche sur le logement rural. Cette technique est une évolution moderne des mottes moulées, communément appelées blocs d'adobe. Plutôt que d'être façonnés à la main dans des caches en bois, les blocs sont obtenus en comprimant de la terre légèrement humide dans une presse en métal. Comparé aux blocs formés à la main, le BTC est de forme et de taille moins régulières, est plus dense et a une meilleure résistance à la compression et à l'eau (H Houben et al., 1996; Hugo Houben, Verney, Olivier, Mesbah, & Michel, 1987).

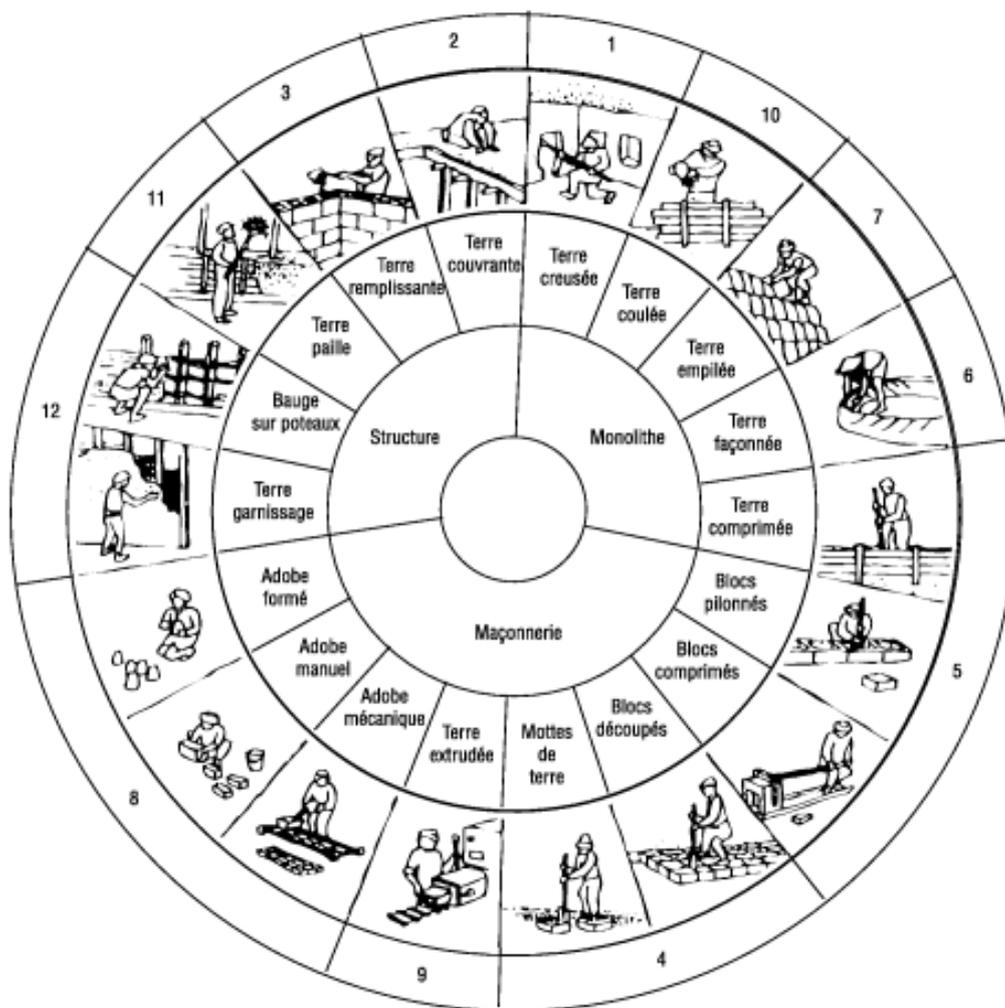


Figure 11-ch2 Schéma des différentes techniques de construction en terre, établi par le groupe CRATERRE (Hugo Houben et al., 1987)

Cependant, l'idée de compacter le sol pour améliorer la qualité et la résistance des mottes moulées était dépassée, et à l'aide d'un pilon en bois, les premières mottes compactées ont été réalisées. Ce procédé est encore utilisé dans le monde entier. Les premières machines à

comprimer la terre peuvent être imaginées au 18e siècle. Mais ce n'est qu'au début du XXe siècle que les premières presses mécaniques ont été conçues, qui utilisaient de lourds couvercles pressés dans des moules. Des presses à imprimer de ce type ont même été motorisées. L'industrie de la brique cuite utilise alors des presses à compression statique pour comprimer le sol entre deux plateaux. Ce n'est qu'en 1952, lors de l'invention de la célèbre petite presse "CINVARAM" au Centre CINVA de Bogota, en Colombie, que l'utilisation de la presse et un développement majeur dans l'utilisation constructive et architecturale des blocs de terre comprimée ont finalement commencée, ce qui a été développé par Raul La Raul Ramirez imagine.

Il est utilisé partout dans le monde. Une génération de pressoirs manuels, mécaniques et électriques est apparue dans les années 1970 et 1980, et aujourd'hui le marché réel de la production et de l'utilisation des mottes compactées s'est considérablement développé(Rigassi, 1995).

4.2.1 Diversité des produits de terres compactées

Actuellement, il y a plusieurs produits de terre comprimée disponibles sur le marché

a) Blocs pleins

Leur forme est principalement prismatique (parallélépipède, cube, hexagones multiples, etc.). Leurs utilisations sont très diverses.

b) bloc creux

On observe typiquement que 15% sont creux et 30% sont des processus complexes. Les rainures formées dans les blocs améliorent l'adhérence du mortier et réduisent le poids des blocs.

Certains blocs creux permettent la liaison (modèles manquants).

c) Blocs alvéolaires

Ils ont l'avantage d'être légers, mais nécessitent des moules assez complexes et des pressions de compression supérieures à la normale.

d) Blocs à emboitements

Ils peuvent fonctionner sans mortier, mais nécessitent des moules assez complexes et souvent des pressions de compression plus ou moins élevées.



Figure 13-ch2 intérieur et extérieur d Auroville, Inde("Auroville,Inde,"
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.nathaliesbackyard.com%2Fdeux-semaines-en-inde-experience-dauroville> 24/avril/2022 à 11h03)



Figure 14-ch2 Domaine de la terre, L'Isle-d'Abeau, France("L'Isle d'Abeau, France,"
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.les-caue-occitanie.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Ffichiers%2Fressource%2Ffield_fichiers%2F82_construire_terre_crue.pdf&psig=AOvVaw3RBayXU0- 24/avril2022 à 22h03)

5 Actualité de l'architecture de terre en Algérie.

Aujourd'hui, Les mentalités ont changé malgré l'opération ratée de Mustafa bin Brahim. En effet, le BTS est un matériau officiellement reconnu et le Centre National de Recherche et de Recherche intégrée au Bâtiment (CNERIB) étudie le sujet depuis plus de deux décennies. Comme le montre le tableau ci-dessous, plusieurs projets peuvent voir le jour.

Années	Réalisations
1969	La réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhliet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales 30.
1973	300 logements du village de Moustefa Ben Brahim en pisé
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante.

1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Thoub.
1980	120 logements du village agricole de de Madher à Bousaada sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype fut réalisé au CNERIB en blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en blocs de terre comprimée
1986	10 logements sont réalisés à Reggane en blocs de terre comprimée
1994	24 logements sont réalisés par l'office de promotion et de gestion immobilière de Tamenrasset en blocs de terre comprimée.
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamenrasset en blocs de terre comprimée.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB
2006	Un projet intitulé réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne

Tableau 1-ch2 Les opérations de construction en Terre en Algérie (CNERIB, 1993)

Selon le rapport du CNERIB, il existe différents procédés de production en Algérie. Jusqu'à présent, nous n'avons pas fait de recherche spécifique sur la technologie employée en Algérie.

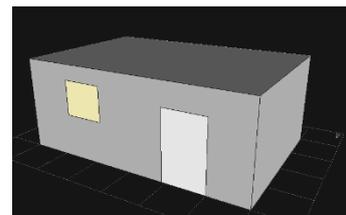
6 La classification des matériaux utilisés en Algérie actuellement et choix de matériau d'étude

La classification polaire des types de matériaux nous donne deux catégories très différentes, dans chacune nous sélectionnons un matériau selon des critères bien définis. Ces matériaux sont testés pour sélectionner les matériaux les plus performants pour l'expérimentation.

6.1 Présentation du prototype de comparaison pour le choix du matériau

Nous avons choisi le cas le plus défavorable, un espace clos, exposé au soleil toute la journée, avec une fenêtre et une porte.

figure16 -ch2 le prototype de simulation (interface Ecotect).



6.2 Classification

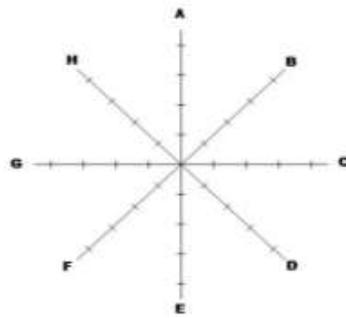
Il est nécessaire de faire un classement préalable basé sur des paramètres de performances thermiques, de qualité écologique et de mise en œuvre des matériaux, ainsi que plusieurs autres variables telles que la masse thermique et la capacité thermique, l'étude de tous ces paramètres et variables donnera des types très différents. Les combinaisons que les matériaux peuvent fournir sont comparées.

Cette classification se fait via des diagrammes polaires.

Nous avons identifié les matériaux disponibles en Algérie et sommes parvenus à les sélectionner :

- Briques en terre cuite
- Blocs de béton
- RC
- Béton poreux
- Béton armé
- Adobe stabilisé (cuit)
- Adobe stabilisé brut et compressé

Les matériaux seront classés selon ces paramètres



- **Pôle A** : nature de matériaux
- **Pôle B** : Aspect environnemental
- **Pôle C** : Sensibilité à l'eau
- **Pôle D** : cout
- **Pôle E** : Disponibilité des matières localement
- **Pôle F** : destination aux projets neufs ou rénovation
- **Pôle G** : isolation
- **Pôle H** : Performance

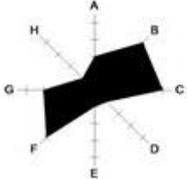
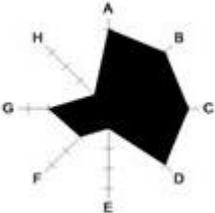
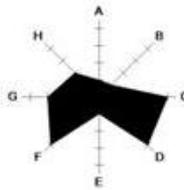
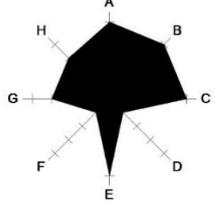
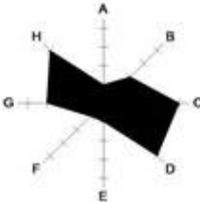
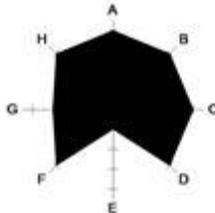
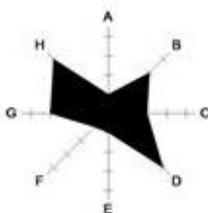
Figure 14-ch2 diagramme polaire et critères de classification fait par auteur

Les matériaux sont divisés en deux catégories différentes en fonction de la similitude du tableau. À ce stade, nous choisirons le matériau le plus représentatif de son genre, en choisissant entre le béton en nid d'abeille et le BTS.

Tableau 2-ch2 les différentes variables de chaque pôle fait par auteur.

pôle	Critères de classification			
	1	2	3	4
<u>Pôle A</u> nature de matériaux	Naturel			Artificiel
<u>Pôle B</u> Aspect environnemental	Durable	recyclable	sain	Sans
<u>Pôle C</u> Sensibilité à l'eau	Très sensible	Sensib le à moyen terme	Peu sensible	Pas sensible
<u>Pôle D</u> coût	cher			Pas cher
<u>Pôle E</u> Disponibilité des matières locales	Disponible			Pas disponible
<u>Pôle F</u> destination aux projets neufs ou rénovation	Projets neufs			Rénovation
<u>Pôle G</u> isolation	Isolation intérieure	Sans Isolation intérieure	Isolation extérieure	Sans Isolation extérieure
<u>Pôle H</u> Performance thermique	Très faible capacité thermique	Faible	moyenne	Grande capacité thermique

Tableau 3-ch2 les différentes variables de chaque pôle fait par auteur.

Classe 01		Classe 02	
Le matériau	Le diagramme polaire	Le matériau	Le diagramme polaire
Le parpaing		Le béton armé	
La brique de terre cuite		Le béton blindé	
La brique de terre stabilisée (cuite)		Le béton cellulaire	
La brique de terre stabilisée crue et compressée			

6.3 Comparaison entre caractéristiques des matériaux sans isolation

Afin de réduire le temps de calcul nécessaire pour simuler différentes combinaisons, le logiciel de simulation « Ecotect » a été utilisé pour intégrer les éléments physiques de

l'environnement dans le processus conceptuel du projet. Il possède un large éventail de fonctionnalités et peut répondre à la majorité des questions de recherche. Il s'appuie sur des méthodes de calcul bien définies pour déterminer les températures internes et les charges thermiques. Il s'agit d'une méthode flexible qui n'est pas limitée par la forme du bâtiment ou le nombre de zones thermiques pouvant être analysées en même temps. En considérant les ombres et les surfaces ombrées, il donne une multitude d'informations pour analyser les propriétés thermiques et la possibilité de sélectionner un matériau approprié en comparant les résultats des différents matériaux sélectionnés.

6.3.1 Résultat de la comparaison :

6.3.1.1 Béton cellulaire

Le béton poreux est un matériau de construction minéral et solide. Ses propriétés physiques (léger et résistant, isolation thermique et acoustique, ininflammabilité) en font un matériau d'exception. Béton en nid d'abeille. Composé d'eau, de gypse, de poudre d'aluminium, de chaux, de sable et de ciment, c'est l'un des bétons les plus écologiques, éliminant le besoin d'isolation extérieure et économisant de l'énergie grâce à sa capacité thermique (Leila, 2017).

Grâce à sa structure contenant des millions de pores, il présente une faible densité tout en assurant une robustesse optimale, ce qui en fait un matériau simple pouvant être utilisé dans de nombreuses applications (résidentielles et industrielles)(Belouettar, Klepaczko, & Abadlia, 2002). (Voir annexe A)

6.3.1.2 BTS cru et compressé

Data		No Highlight ▶
U-Value (W/m2.K):	0.210	
Admittance (W/m2.K):	0.160	
Solar Absorption (0-1):	0	
Transparency (0-1):	0	
Thermal Decrement (0-1):	0	
Thermal Lag (hrs):	9.7	
[SBEM] CM 1:	0	
[SBEM] CM 2:	0	
Thickness (mm):	162.0	
Weight (kg):	600.000	
Reflectance ▶	Internal	External
Colour:		
Emissivity:	0.24	0.24
Specularity:	0	0
Roughness:	0	0
Set as Default		Undo Changes
Apply Changes		Close

Figure 15-ch2 montrant la création du Béton cellulaire comme un nouveau matériau dans la bibliothèque du logiciel Ecotect avec ces propriétés physique. Fait par auteur.

U-Value (W/m2.K):	5.618	
Admittance (W/m2.K):	10.000	
Solar Absorption (0-1):	0.001	
Transparency (0-1):	0.999	
Thermal Decrement (0-1):	1	
Thermal Lag (hrs):	0	
[SBEM] CM 1:	0	
[SBEM] CM 2:	0	
Thickness (mm):	0.0	
Weight (kg):	0.000	
Reflectance ▶	Internal	External
Colour:		
Emissivity:	0.86	0.86
Specularity:	0.13	0.13
Roughness:	0	0

Figure 16-ch2 montrant la création du BTS comme un nouveau matériau dans la bibliothèque du logiciel Ecotect avec ces propriétés physique. Fait par auteur

6.4 Simulation de la température heure par heure du 21 juillet

6.4.1 Le béton cellulaire

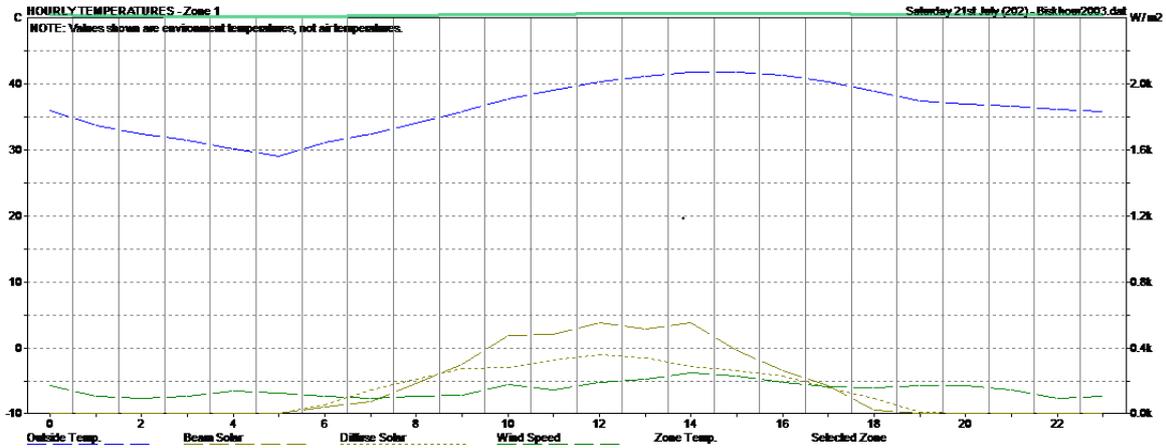


Figure 17-ch2 Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (béton- cellulaire). Fait par auteur

HOUR	BEAM ABSORBED (W/m2)	DIFFUSE ABSORBED (W/m2)	SUN TRANSMITTED (W/m2)	SOLAR TRANSMITTED (%)	REFLECT ANGLE (W/m2)	INCIDENT SHADE (W)	INCIDENT (W/m2)
------	----------------------	-------------------------	------------------------	-----------------------	----------------------	--------------------	-----------------

0600	43	65	69.79	56%	0	20	1912	3	334	0	0
0700	122	144	68.57	56%	0	61	5876	10	995	0	0
0800	369	151	68.65	61%	0	160	15454	20	1895	0	0
0900	455	205	68.49	51%	0	196	19006	21	2074	0	0
1000	468	296	67.51	53%	0	197	19080	19	1831	0	0

1100	583	315	68.13	54%	0	216	20882	17	1601	0	
0											
1200	485	368	69.54	56%	0	170	16511	13	1306	0	
0											
1300	471	349	70.73	56%	0	171	16590	19	1813	0	
0											
1400	364	365	72.13	55%	0	143	13858	21	2021	0	
0											
1500	301	309	73.51	55%	0	118	11439	20	1942	0	
0											
1600	237	245	74.92	66%	0	89	8653	18	1752	0	
1700	168	155	75.10	66%	0	60	5784	14	1344	0	

TOTALS						0	1600	155045	195		
18908	0										

Tableau 4-ch2 résultat de la Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (béton- cellulaire). Fait par auteur.

6.4.2 Le BTS

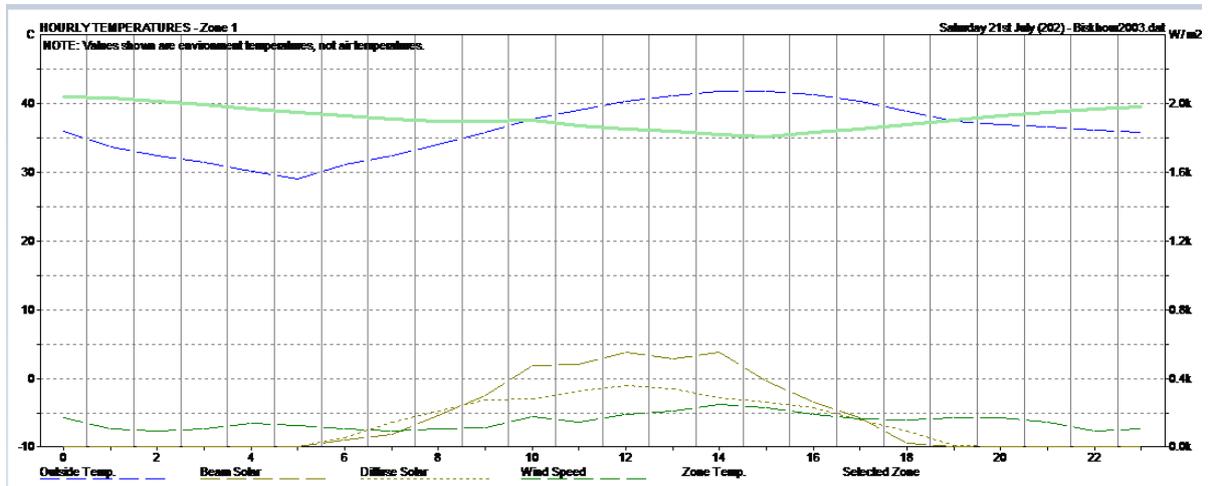


Figure 18-ch2 Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (BTS) fait par auteur

HOUR	BEAM SOLAR ABSORBED (W/m2)	DIFFUSE SOLAR TRANSMITTED (W/m2)	SUN SOLAR (W/m2)	REFLECT ANGLE (W/m2)	INCIDENT SHADE (W/m2)	Zone Temp.
0600	39	55	78.70	40%	0	5
0700	76	146	74.43	40%	0	12
0800	185	211	71.63	41%	0	35
0900	297	275	68.03	40%	0	67
1000	472	278	65.45	40%	0	118

1100	481	329	64.62	40%	0	124	23279	18	3400	0
0										
1200	554	357	65.14	41%	0	139	26061	20	3807	0
0										
1300	514	340	65.48	41%	0	127	23871	19	3487	0
0										
1400	552	286	66.94	41%	0	129	24198	19	3534	0
0										
1500	386	262	70.15	41%	0	78	14667	11	2142	0
0										
1600	260	229	73.29	41%	0	44	8366	6	1222	0
1700	172	159	76.83	41%	0	23	4385	3	640	0

TOTALS						0	899	169178	131	
24711	0									

Tableau 5-ch2résultat de la Simulation de la température heure par heure du 21 juillet (BTS). Fait par auteur

Béton cellulaire				Le BTS			
OUR	NSI DE	UTSI DE	TE MP.DIF	OUR H	INSID E	OUTSIDE	TEMP.DIF
0	0.3	5.9	14.4	00	40.9	35.9	5.0
1	0.2	3.6	16.6	01	40.7	33.6	7.1
2	0.2	2.4	17.8	02	40.3	32.4	7.9
3	0.1	1.3	18.8	03	39.8	31.3	8.5
4	0.1	0.1	20.0	04	39.2	30.1	9.1
5	0.0	9.0	21.0	05	38.7	29.0	9.7
6	0.1	1.0	19.1	06	38.2	31.0	7.2
7	0.2	2.3	17.9	07	37.7	32.3	5.4
8	0.3	4.0	16.3	08	37.3	34.0	3.3
9	0.3	5.8	14.5	09	37.4	35.8	1.6
0	0.4	7.6	12.8	10	37.5	37.6	-0.1
1	0.5	9.0	11.5	11	36.7	39.0	-2.3
2	0.5	0.3	10.2	12	36.3	40.3	-4.0
3	0.6	1.1	9.5	13	35.9	41.1	-5.2
4	0.6	1.7	8.9	14	35.5	41.7	-6.2
5	0.6	1.7	8.9	15	35.1	41.7	-6.6
6	0.6	1.2	9.4	16	35.8	41.2	-5.4
7	0.5	0.2	10.3	17	36.2	40.2	-4.0
8	0.5	8.8	11.7	18	36.8	38.8	-2.0
9	0.4	7.3	13.1	19	37.5	37.3	0.2
0	0.4	6.9	13.5	20	38.1	36.9	1.2
1	0.4	6.5	13.9	21	38.6	36.5	2.1
2	.3	6.1	14.2	22	39.1	36.1	3.0
3	0.3	5.7	14.6	23	39.4	35.7	3.7

6.5 Sélection des prototypes d'étude

Pour le béton cellulaire, les acteurs du projet ont des avantages :

- Pour les architectes :
 - Innovation architecturale.
 - Matériaux adaptés aux différentes conceptions de bâtiments.
- Pour les parrains :
 - Vitesse d'exécution du projet.
 - Innovation par rapport à la concurrence.
 - Évaluer les offres techniques et commerciales.
 - Faible investissement dans les équipements de climatisation et de chauffage.
 - Compte tenu de la légèreté du produit, la structure et la fondation en béton peuvent être épargnées.
- Pour les entrepreneurs :
 - Éliminer l'installation d'isolant.
 - Taux de production d'œufs élevé.
 - Réduction significative des déchets et de leurs coûts de gestion au niveau du site.
- Aux clients :
 - Sécurité de la construction (murs solides et ininflammables).
 - Architecture moderne.
 - Confort hiver comme été.
 - Économisez les factures d'électricité.

D'autre part, le BTS représente la réponse à notre question initiale liée au confort thermique, qui est directement liée aux aspects environnementaux.

- Sélection complète de systèmes : (murs en contact avec l'intérieur).
- Site à Faible Impact environnemental : Réutilisation sur site des terres excavées.
- Gestion de l'énergie - Mouvement d'air réduit grâce à la perméabilité à la vapeur d'eau et au formaldéhyde.
- Confort chaud et humide Ouvertures pour la diffusion de la vapeur d'eau dans les murs en terre. Moins de ventilation est nécessaire.
- Qualité de l'air (murs en contact avec l'intérieur).

7 Conclusion

Ces dernières années, la technologie des sols compactés stabilisés a été optimisée grâce au développement de nouvelles technologies et machines, qui peuvent accélérer le processus de construction.

La Terre a permis de construire des bâtiments solides dans le monde entier, qui existent encore aujourd'hui. Parce qu'elle permet de réaliser des structures très diverses en forme et en fonction. On voit que la terre est un anachronisme, c'est-à-dire que c'est ancien, voire millénaire, mais aussi moderne et créatif. C'est une architecture qui peut exister là où se trouve la terre.

Les matériaux naturels tels que la terre, le bois, l'argile et la paille sont des alternatives durables utilisées dans le monde entier depuis des milliers d'années. Ces matériaux de construction naturels sont utilisés aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Une gamme de matériaux à base de terre est présentée.

Les murs de terre crue (pisé) sont faits par battage en coffrage (généralement dans notre pays avec un pilon à main ou à air comprimé). Elles sont porteuses, emmagasinent la chaleur et leur structure irrégulière leur confère des propriétés particulières. Les morceaux de paille et de cellulose sont riches en paille, copeaux de bois, copeaux de bois ou sciure de bois. Ils sont utilisés pour l'isolation thermique et acoustique des murs extérieurs et intérieurs en ossature bois, ou comme mortiers isolants intérieurs pour les murs extérieurs, les colles et enduits à base de matériaux naturels comme la chaux, l'argile.

Il existe des isolants fabriqués à partir de matières premières renouvelables telles que le lin, le chanvre, la laine, le liège ou la cellulose, et des isolants fabriqués à partir de matériaux naturels tels que la fibre de bois, le liège, le chanvre...L'enduit d'argile paille est principalement utilisé pour la rénovation des murs de remplissage (maisons à pans de bois).

L'aspect naturel de la matière et sa plasticité permettent toute expression artistique et toute décoration. En plus d'être un régulateur d'humidité et un isolant phonique, la terre crue a des bienfaits environnementaux et économiques majeurs. Nous pouvons principalement localiser la qualité du sol brut avant et après la période de construction :

- En amont, les atteintes à la nature sont fortement réduites grâce à l'opération simple de séchage des briques d'argile au soleil.
- Des économies d'énergie (chauffage et la climatisation) grâce au confort thermique que nous procurent les matériaux en terre et aux propriétés thermiques de la terre.

Avantages des matériaux en terre.

Les matériaux de terre sont omniprésents et largement disponibles, dont on peut citer de nombreux avantages :

- Le sol est récolté et extrait sur place. À l'opposé d'autres matériaux, il ne consomme aucune énergie (non renouvelable et polluante).
- Une grande quantité de terrassement extraite des grands projets d'utilité publique comme les routes et les fondations des bâtiments peut être recyclée en matériaux de construction ;
- Les matériaux de la terre utilisent très peu d'eau, une ressource importante pour la vie humaine.
- Les blocs de terre comprimée coûtent 20 à 30 % moins cher que les blocs de ciment, la pierre ou même les briques d'argile.
- Lors du processus de fabrication, ce matériau ne génère aucune émission de déchets. Son utilisation garantit également l'absence d'effets nocifs dans la vie quotidienne, et son autre avantage est qu'il peut être presque entièrement recyclé après une première utilisation ;
- Les modèles et les outils nécessaires pour produire des matériaux de terre sont simples et accessibles.

- Il possède également des propriétés telles qu'une absorption d'eau élevée, une densité élevée, une bonne transmission de la vapeur, une bonne inertie thermique, une qualité sonore et une durée de vie éprouvée.

Inconvénients des matériaux du sol :

Malgré tous les avantages que peuvent offrir les géo matériaux, ils présentent également des inconvénients majeurs :

- S'érode et difficile à utiliser dans les zones à fortes précipitations ;
- Utilisé comme paillis, il absorbe l'eau, s'alourdit et provoque l'affaissement ;
- Ne colle pas au bois, ce qui peut provoquer une séparation autour des ouvertures ;
- Ne résiste pas à la flexion et à la traction ;
- Les liaisons entre particules de géo matériaux sont physiques et au contact de l'eau elles s'affaiblissent voire se neutralisent, détériorant ainsi le matériau et diminuant significativement ses propriétés mécaniques et sa durabilité dans le temps.

Ces inconvénients sont en grande partie liés à la solubilité dans l'eau du sol brut, qui peut entraîner des perturbations structurelles telles que la fissuration, qui peuvent varier selon le climat et peuvent être contrôlées par des mesures préventives.

CHAPITRE 03 :

*La terre un matériau de construction
(Techniques et fabrication)*

1 Introduction

Les sites archéologiques retrouvés en de nombreux endroits sur Terre attestent de la maîtrise des techniques de construction en terre depuis la première civilisation. Aujourd'hui, on estime qu'un tiers de l'habitat humain est encore souterrain. Alors que l'humanité a connu un développement technologique au cours des siècles derniers, ce qui a donné à l'homme moderne d'avoir une multitude de matériaux de construction, on assiste aujourd'hui à un retour à la construction en terre dans plusieurs pays, la recherche scientifique aide à développer une variété de technologies de production.

L'une des principales raisons de l'importance de la construction en terre est sa disponibilité et la proximité des chantiers de construction. La mise en œuvre est relativement facile et nécessite des outils limités souvent des outils d'agriculture. Pour cela, la construction en terre était destinée auparavant principalement aux habitations ruraux, notre objectif est de rendre ce matériau destiné aux en zones urbaines également.

Parmi les avantages de la terre crue, on peut également souligner la faible consommation d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et sa bonne inertie thermique, qui permettent d'avoir un habitat frais en été et retiennent la chaleur en hiver. Mais le problème des constructions en terre est qu'elles manquent de solidité, se fissurent systématiquement à cause du retrait, et souffrent de problèmes liés à leur sensibilité à l'eau.

Il y a plusieurs siècles, l'homme a cherché des moyens pour éviter les inconvénients des matériaux en terre, il a utilisé divers moyens de stabilisation pour améliorer leurs propriétés et leur sensibilité à l'eau, aboutissant à plusieurs produits en terre : pisé, terre battue, blocs de terre comprimée. (BTC) etc... La technologie des blocs de terre comprimée (BTC) est une nouvelle technologie par rapport à l'histoire de la construction civile, qui permet aux blocs d'avoir un format précis et peut être intégré dans des structures poteaux-poutres comme matériau de remplissage ou comme matériau principal pour murs porteurs. Afin d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques des briques de terre, de réduire sa porosité, son changement de volume (dilatation et contraction) et d'améliorer la résistance aux intempéries, plusieurs stabilisants peuvent être utilisés : tels que le ciment, la chaux, l'asphalte, la fibre, etc.

Du coup, ce que nous allons voir dans ce chapitre, c'est comment renforcer une brique de terre compressé et gagner en efficacité en la stabilisant ? Et comment peut-on produire un

matériau à base de terre avec des qualités thermiques proches du BTC (voir chapitre 2) et avec une résistance du BTS (voir chapitre 01) ?

2 Construction en terre

2.1 Histoire et évolution de l'architecture en terre

La terre représente la couche superficielle de la croûte terrestre, issue de la transformation des roches mères et riche en matière organique, sous l'action de phénomènes climatiques et d'organismes. La Terre est constituée de proportions plus ou moins différentes de particules et granulométries différentes(Delbecque, 2011):

- Argile : particules inférieures à 2 microns
- Boues : particules de 2 à 50 mm ;
- Sable : particules de 0,5 à 2 mm ;
- Gravier : particules de 2 à 10 mm

L'intérêt pour ce matériau est considéré comme ancien et banal, alors que l'intérêt porté à la pierre ou au bois est réputés plus précieux. Cependant, les découvertes archéologiques attestent de l'importance historique du matériau terre, qui a été adopté à un moment donné par presque toutes les civilisations : (La Terre est associée à la période décisive de la révolution urbaine et à la vie quotidienne et aux civilisations les plus brillantes de l'Antiquité). Des époques les plus lointaines à nos jours, elle apparaît comme le matériau préféré.

2.2 Quelques repères chronologiques des constructions en terre

- Il y a 11 000 ans : en Amérique du Sud se trouve les premières traces de constructions en terre ;
- 10 000 ans : des traces de construction et des terrassements à partir de terre façonnées à la main en Syrie ;
- Il y a 8500 ans : l'avènement des briques de terre crue turques ;
- Il y a 8000 ans : émergence de terres résidentielles en Europe occidentale (couvertes d'épines) ;



Figure 1-ch3 Tchoga zambil (Iran, <http://irandoostan.com/dostcont/uploads/2016/09/Chogha-Zanbil-1.jpg> 18-04-2022 14h10)

- Il y a 5000 ans : Les premières villes primitives construites en terre apparaissent en Mésopotamie (Delvoye, 1971).

Toutes ces cités découvertes dans l'ancienne Mésopotamie sont d'avant l'invention de l'écriture. La terre brute est un matériau qui se dégrade plus vite que la pierre, et il n'y a pas de vestiges visibles comme les pyramides égyptiennes, qui existent toujours mais sont moins connues : (Mari en Syrie, Shibam au Yémen Tchoga, Zambil en Iran).



Figure 2-ch3 Mari en Syrie(mari, <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/MariZimri-LimPalace.jpg/220px-MariZimri-LimPalace.jpg> 5-12-202118h05)



*Figure 3-ch3 Shibam au Yémen(Yémen,
<https://img.ev.mu/images/attractions/7744/960x640/435725.jpg> 8-12-202114h07)*

sur les vallées de Mésopotamie, d'Égypte, d'Inde et de Chine, les sols sont fertiles, d'où la provenance des pailles de céréales dans la construction, ce qui a permis le développement de différentes technologies de constructions en terre, et qui se sont ensuite généralisées avec les migrations et les conquêtes (Pignal, 2005). Sur le continent africain, une grande partie de l'habitat en milieu rural voire urbain est constitué de sites avec des techniques différentes, ce qui exprime aussi la diversité de ces techniques de construction et donc une compréhension très fine des possibilités offertes (Houben, 2011).

La première utilisation de limon en Afrique remonte à 8 000 ans (maisons en bois recouvertes de boue). Les civilisations anciennes ont maîtrisé l'utilisation de ce matériau, illustré par la pyramide de Saqqarah, qui a depuis été utilisée sur tout le continent, résultant en une diversité et une richesse architecturale extraordinaires. (Par exemple la mosquée du Mali à Tombouctou au XIII^e siècle, le tombeau des Askia Djenné dans l'empire Songhaï aux XIV^e au XVI^e siècle et le palais d'Abomey au Bénin au XVII^e siècle).

Selon les statistiques du Haut-Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR). Près de 30% de la population mondiale vit actuellement dans des constructions en terre, un matériau stable, écologique et peu coûteux. (On a observé que 60% des habitations au Pérou

sont construites en adobe ou en terre battue, à Kigali, 38% des habitations sont construites en terre, et un recensement de 1971 en Inde a prouvé que près de 72% des habitations étaient construites en terre). Près de 17% des bâtiments inscrits au patrimoine mondial sont en terre, suggérant que ce matériau de construction assure la longévité (Anger, Fontaine, Joffroy, & Ruiz, 2011).



Figure 4-ch3 La grande mosquée de Djenné(Djenné, <https://images.fineartamerica.com/images-medium-large-5/great-mosque-of-djenne-mali-africa-panoramic-images.jpg> 5-4-202117h15)

La crise énergétique a ravivé l'intérêt pour les matériaux terre et leur masse thermique et leur bonne adaptation avec l'environnement. Alors que la croissance démographique ralentit, on assiste à des critiques à l'encontre de la production industrielle ainsi que du marché de la réalisation des habitations et équipements qui s'orientent vers la réhabilitation de l'existant, alors qu'il se concentrait par le passé sur la construction neuve. Cela signifie que nous sommes passés d'une production purement quantitative à une approche qualitative visant à éliminer les habitats insalubres.

Face à des conditions de logement préoccupantes et à la crise énergétique, à l'indépendance, l'Algérie a lancé plusieurs plans de développement. Cependant, leurs politiques ont peu d'intérêt au confort des habitants, toutes les actions menées jusqu'à présent ont été associées à des produits modernes et à l'utilisation de matériaux coûteux importés et inappropriés aux différentes zones climatiques. Malheureusement, la majorité des villes n'ont pas été épargnées par tous ces plans d'action qui ont détérioré les conditions de l'habitat et ont montré des ensembles immobiliers dysfonctionnels et inconfortables qui, contrairement aux constructions précédemment développées par la population (Benmessaoud, 2004). De ce fait, les populations ont fini par accepter un nouveau cadre bâti et un mode de construction imposé au nom du « modernisme », au détriment de constructions adaptées à leurs besoins et moyens économiques et aux caractéristiques climatiques de la région donnée.

Ce constat est dû à plusieurs facteurs :

- Manque de science et de socio culturalisme de la part des décideurs politiques et des différents acteurs du secteur ;
- ils sont insensibles aux questions liées au patrimoine bâti ou à la préservation de l'environnement.
- Leur insouciance quant au cadre de vie et à la qualité de la construction.
- Désir de répondre le plus vite possible à la demande croissante de logements.

Ces actions politiques ne feront qu'aggraver les dégâts sur l'extraordinaire patrimoine architectural caché dans ces villes, puisque certains bâtiments en terre ont été démolis et remplacés par des bâtiments dits "modernes".

3 Normes, standards, directives et lignes directrices de la construction en terre

Actuellement, les seuls normes et codes complets spécialement pour la construction de blocs de terre comprimée (BTC) se trouvent en Allemagne et en Nouvelle-Zélande. (Site Internet <http://www.terra-ram.com/>.) Selon CRATerre, les codes des autres pays sont aujourd'hui largement obsolètes, tout comme en Afrique du Sud ou en Australie. La Nouvelle-Zélande a publié son code du bâtiment en terre en 1998 (Keddaoui & Boukadoum, 2016). Ce code spécifique est ajouté à la réglementation pour le BTP. Il comprend entre autres des normes de performance pour les constructions en terre en termes de résistance aux séismes.

Des recommandations ou prescriptions ont été élaborées dans d'autres pays, comme la Côte d'Ivoire et le Maroc, et sont constamment mises à jour. Le Pérou a ajouté des normes de résistance aux tremblements de terre dans le code national du bâtiment, et l'Inde a publié des lignes directrices pour améliorer la résistance aux tremblements de terre des bâtiments en maçonnerie non armée en 1994 (Lamouri-Hannani & Khedidja, 2014).

Aux États-Unis, les bâtiments en adobe sont inclus dans le National Building Code. Le Bureau national des normes a donné en 1940 plusieurs codes. Dans les années 1970, l'Uniform Building Code (UBC) a été publié à l'échelle nationale. Il a été modifié pour qu'il soit adapté dans différents états, et ses normes étaient liées aux briques d'argile "adobe" faites à la main. Actuellement, aux États-Unis, il n'y a pas de code spécifique pour BTC, le projet mis en œuvre utilise UBC conçu à l'origine pour adobe (<http://www.earthbuilding.com/nm-adobe-code.html>). Pour le Nouveau-

Mexique. [http:// www.earthbuilding.com/nm-adobe-code.html](http://www.earthbuilding.com/nm-adobe-code.html). www.earthbuilding.com/san-diego-adobe-code. Pour la Californie).

En France, il existe 03 textes officiels anciens sont relatifs à la construction de terrassement « Récif DTC 2001 Béton et sol stabilisé béton, 1945 », « Récif DTC 2101 Structure en béton en béton, 1945 » et « Récif DTC 2102 Liant hydraulique pour stabilisation du béton, 1945 » années » (Houben et H. Guillaud, 2006). En 1982, "Domaine de la terre de la ville nouvelle de l'isle d'Abeau", et à l'occasion du projet français la norme est établie. C'est une référence pour divers intervenants. Le Centre CRA Terre de Grenoble développe le code BTC pour le gouvernement français, basé sur le développement centralisé des 22 pays où il sera appliqué (Bisch & Calgaro, 2004).

Au niveau international, les Nations Unies ont développé des bonnes pratiques pour la construction de béton de sol stabilisé entre 1958 et 1964. Textes normatifs élaborés par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) lors de la mise en œuvre du projet en 1973 "Cissin" à Ouagadougou, Burkina Faso (Houben, Verney, Olivier, Mesbah, & Michel, 1987). Depuis 1987, la Conférence Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et les Structures (RILEM) et le Conseil International pour la Recherche, la Recherche et la Documentation dans le Bâtiment (CIB) ont mis en place un Comité Technique de Géo structure dont les recommandations et spécifications servent de normes (Houben & Guillaud, 1989).

De nombreux pays à travers le monde ont légalisé la pratique de la réalisation de travaux de construction sur leur territoire, tout en offrant davantage de garanties aux opérateurs et aux utilisateurs. Cela signifie que l'intérêt pour cette architecture a repris. Les actions des organisations internationales encouragent les pays à s'engager sur la voie de la revalorisation de la terre.

4 Composition du matériau :

4.1 Définition

La terre est la partie solide de la couche supérieure de la sphère terrestre. Elle est un matériau composé de particules à épaisseur variable qui supporte les êtres vivants, et c'est là où poussent les plantes. Elle est formée à partir de différentes transformations de roches mères par la dégradation très lentes et de migration de particules très complexes. Le résultat est une variété infinie de terres, avec des variations infinies dans ses caractéristiques. La terre végétale, ou terre

d'agriculture riche en matière organique et repose sur des roches mères plus ou moins altérées. (Houben, Rigassi, & Garnier, 1996).

4.2 Adhésion

La terre est constituée de quatre éléments mélangés en proportions variables :

- Gravier (5-20mm),
- Sable (0,08-5 mm),
- Limon (2 μm -0,08 mm)
- Argile (<2 μm).

Comme nous l'avons vu, la terre est composée de :

- Matières inertes (gravier, sable)
- Matières actives (limon, argile).

Le premier groupe de matières (gravier, sable) agit comme un squelette, et le second (limon, argile) agit comme un liant, comme le ciment. Par conséquent, la structure de la terre est comparable au béton avec différents liants (Houben et al., 1996). Les proportions des éléments constitutifs de la Terre détermineront leur comportement et leurs propriétés, quand ils sont soumis à des modifications dans l'humidité, certains changements de volume et d'autres non. Le premier est instable, le second est stable. Ce concept de stabilité, la capacité de résister à l'alternance d'humidité et de sécheresse sans modifier les propriétés, est fondamental pour les matériaux de construction (Doat, Hays, Houben, Matuk, & Vitoux, 1979).

Et comme les argiles sont très importantes dans la fabrication des matériaux à base de terre, et afin de pouvoir analyser les mécanismes de modification qui interviennent, il est nécessaire de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

4.3 Rappel sur l'argile

Ils sont des minéraux produits lors de la décomposition des roches. Ce sont aussi des matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macro, ils sont généralement apparentés à d'autres minéraux (quartz, feldspath, etc.). A l'échelle microscopique, ils ont une structure en feuille. Il est primordial de considérer les propriétés physico-chimiques des argiles, car leur comportement rhéologique est déterminé par l'interaction entre les couches d'argile. Dans cette section, afin de définir cette propriété physico-chimique, nous présentons les

caractéristiques minéralogiques des différents niveaux d'organisation qui composent l'argile (Guggenheim et al., 1997; Taallah, 2014)

4.3.1 Définition

Il y a plusieurs définitions du mot "argile". Certes, puisqu'il existe autant de disciplines qu'il y en a. Ils sont basés sur les propriétés physiques étudiées, telles que la plasticité, leur utilisation ou la structure cristalline.

À l'état naturel, rarement qu'on trouve les argiles composées d'un seul minéral. Il correspond donc généralement à un mélange de phyllosilicates ; la plupart des minéraux lui donnent alors son nom. On y trouve également de nombreux minéraux associés, tels que des carbonates (dolomie, diboronite, calcite, aragonite, etc.), de la silice (quartz, cristobalite, tridymite), de l'alumine et des hydroxydes (corindon, trihydrate) bauxite, diaspore), et même ferrifères minéraux (wirosite, maghémite...) Par conséquent, le terme argile désigne l'association d'autres minéraux (feldspath, quartz, etc.) et d'impuretés (oxyde de fer, titane, etc.) liés aux minéraux argileux. De plus, ce mélange se caractérise par une certaine plasticité et des grains de tailles inférieures à 2 μm (Michot, 2008).

4.3.2 Structure

Les silicates stratifiés sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de SiO_4 forment des feuillets infinis bidimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont agglomérés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport de 2:1 ou 1:1. Les silicates stratifiés sont également appelés silicates stratifiés plus simples (Mobuchon, 2008). Plusieurs séries de minéraux argileux se distinguent par la disposition de leurs couches tétraédriques et octaédriques. L'organisation structurale des silicates feuilletés repose sur une charpente d'ions O^{2-} et OH^- (Caillère, 1982).

4.3.3 Classification des argiles

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale pour l'Etude des Argiles, 1966-1972) et plus tard (G Pédro, 1994).

Il y'a plusieurs classifications d'argile, la plus connue est basée sur l'épaisseur et la structure de la feuille, il existe donc 4 groupes (Brindley & Pédro, 1970):

- Minéraux 7 Å : les lamelles sont composées de feuillets tétraédriques et octaédriques. appelé type T : O ou 1:1 ;

- Minéraux 10 Å : Les éclats sont constitués de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Connus sous le nom de type T : O : T ou 2:1 ;
- Minéraux 14 Å : les éclats sont constitués d'une alternance d'éclats T : O : T et de couches octaédriques interlobulaires ;
 - Minéraux intercalaires : L'épaisseur des couches est variable. Ces minéraux proviennent de mélanges réguliers ou irréguliers d'argiles

La valeur de charge permanente de la plaque est utilisée comme critère pour établir la classification 2:1 des silicates stratifiés (tableau 3.1). Cette classification est dérivée des travaux de (Mackenzie, 1975; Georges Pédro, 1967).

Nature du feuillet	Nature des cations interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 : 1	Pas de cations ou seulement de l'eau	Kaolinite	Dioctaédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 : 1	Pas de cations	Pyrophyllites	Dioctaédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Dioctaédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique
	Cations monovalents non-hydratés	Micas	Dioctaédrique	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Dioctaédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Dioctaédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Dioctaédrique	Sépiolite, Palygorskite

Tableau 1-ch3 Classification des phyllosilicates (Georges Pédro, 1967)

4.3.4 Principaux types d'argile

Comme le montre le tableau 1-ch3, il existe plusieurs groupes d'argiles qui regroupent plusieurs types. Cependant, les trois principaux types d'argile que l'on trouve le plus souvent dans les sols sont : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

4.3.4.1 La Kaolinite

La kaolinite est une argile double octaédrique de type 1: 1 (ou T-O) avec une épaisseur de lamelle d'environ 7,2 Å. Lorsque deux feuilles de kaolinite sont empilées, il y a O⁻ sur la surface supérieure et H⁺ sur la surface inférieure pour former une forte liaison hydrogène O-H

entre elles, garantissant que la liaison plus forte. Une grande stabilité à l'action d'un empilement de feuilles contre l'eau. Par conséquent, les particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par l'eau. Les cristallites (associations de plusieurs feuilles) produites par cet empilement (Chabi, Mezghiche, & Guettala, 2004; Tessier, 1984).

4.3.4.2 Montmorillonite

La feuille de base (type 2:1 ou T-O-T) est constituée de deux couches de silice tétraédriques et d'une couche d'alumine octaédrique. Le désordre de cette lamelle et la constitution des surfaces inférieure/supérieure de ces argiles ne permettent pas la formation de liaisons hydrogène entre les lamelles, ce qui facilite leur séparation et le nivellement des différentes molécules (cations, eau, molécules organiques). Par conséquent, la montmorillonite est très sensible à l'eau (Saiyouri, 1996).

4.3.4.3 L'illite

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite. La table isométrique des Illites est fixée à 9,6 Å. Cette propriété leur confère un potentiel de gonflement plus faible et une formation de granulométrie plus importante que la montmorillonite.

5 Caractéristiques de base de la stabilité de la terre

Leurs propriétés sont variables d'un sol à l'autre, elles dépendent de la nature et de la complexité du mélange et de la de traction granulaire qui les compose. C'est généralement la partie granulaire principale du sol, caractérisant ses propriétés de base et contrôlant son comportement.

il existe des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates, et de nombreuses propriétés physiques telles que la couleur, la stabilité structurelle, l'adhérence, la densité apparente, la teneur en eau, le taux de porosité ou taux de vide, l'adsorption, potentiel capillaire et diffusion, perméabilité, retrait linéaire, résistance à sec, etc. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques peut déterminer la qualité et le comportement des sols utilisés pour la construction (Rigassi, 1995). Il faut comprendre quatre propriétés fondamentales de la Terre, qui (Houben & Guillaud, 1994) sont :

- texture ou granulométrie ;
- plasticité ;

- compressibilité ;
- Cohésion.

6 Texture ou granularité

Cette caractéristique mesure la fraction grossière du sol (gravier, sable, limon) par granulométrie et la fraction argileuse fine par analyse métrologique des sédiments. Des éléments tels que le gravier et le sable sont les éléments résistants du matériau ; l'argile le maintien ensemble et contrôle la plasticité et l'effet de l'humidité sur la terre (Morel & Kouakou, 2009). De plus, réactions pouzzolaniques (réactions chimiques : entre l'argile et la chaux) produise de nouvelles matières qui augmentent efficacement la valeur de résistance du produit final (Bell, 1996; Khaoula, 2019)

Classification des fractions de grains utilisée par de nombreux laboratoires

Les normes de référence (A.S.T.M, AFNOR) sont les suivantes (Houben & Guillaud, 2006) :

Galets : 200 mm - 20 mm

Gravier : 20 mm - 2 mm

Sable grossier : 2 mm - 0,2 mm

Sable fin : 0,2 mm - 0,06 mm

Boue : 0,06 mm - 0,02 mm

Boues fines : 0,02 mm - 0,002 mm

Argile : 0,002 mm - 0 mm

7 Plasticité

C'est la capacité de la Terre à se déformer sans qu'elle soit élastique caractérisée par la fissuration ou l'éclatement. La plasticité du sol et les limites entre différents états de consistance de la terre sont déterminées par la mesure des limites d'Atterberg (Liquid Limit LL, Plastic Limit LP, Plasticity Index IP). La limite d'Atterberg est une caractéristique importante des sols fins et est utilisée pour la classification des sols et leurs identifications et. De plus, ils sont utilisés pour réguler la compression et le comportement des mélanges de sol (Burrough, 1989).

8 Compressibilité

Pour le compactage, on utilise une énergie de compression avec et un taux d'humidité (teneur en eau optimale ou TEO) donnés, la compressibilité d'un sol définit sa capacité à se laisser comprimer au maximum. Quand un certain volume de sol est soumis à une force, le matériau est comprimé et l'indice de vide diminue. Plus la densité du sol augmente, plus il aura de pores et moins l'eau s'infiltrera. Cette propriété est due au fait que les particules sont plus étroitement imbriquées, ce qui réduit le risque de perturber la structure sous l'action de l'eau (Taallah, 2014).

C'est le test le plus largement utilisé pour évaluer le compactage du sol est plus applicable aux sols en poudre.

9 Cohésion

La cohésion de la terre représente la capacité des particules à se tenir ensemble lorsqu'une contrainte de traction est appliquée à un matériau. La cohésion du sol dépend des propriétés cohésives ou cimentaires du mortier grossier (fraction granulaire avec $\Phi < 2$ mm) qui lie les particules inertes entre elles. Par conséquent, cette propriété dépend de la quantité et de la viscosité de l'argile. Les mortiers grossiers sont classés comme suit (Houben & Guillaud, 2006):

- le mortier,
- Mortier maigre,
- Mortier moyen,
- Mortier gras,
- Argile.

10 Stabilisation

10.1 Définition

La stabilisation des sols est la modification des propriétés du système Terre-eau-air, pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications spécifiques.(Ouedraogo, 2019). Mais la stabilité est une question complexe en raison des nombreux paramètres impliqués. Il existe un réel besoin de comprendre : les propriétés de la terre, les aménagements envisagés, l'économie du projet, la technologie de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet, et l'entretien du projet achevé (Houben & Guillaud, 2006).

10.2 Objectifs de la stabilisation

Les objectifs principaux de cette stabilisation des sols sont (Winterkorn, 1975) :

- Forte résistance à la compression, et à la traction et au cisaillement,
- réduction du retrait et du gonflement
- réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau.

10.3 Procédés de la stabilisation des sols

10.3.1 Stabilisation mécanique :

C'est un terme général désignant la stabilisation du sol par compactage. Ce processus modifie les propriétés de la Terre qui sont la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité, en intervenant dans la structure interne du sol.

10.3.2 Stabilisation physique :

Les caractéristiques du sol peuvent être améliorées en intervenant sur la texture : un contrôle de mélange précis par différenciation de particules (argile et sable).

10.3.3 Stabilisation chimique :

La stabilité de la terre ici est assurée par l'ajout de produits chimiques ou d'autres matériaux qui changent en mieux ses propriétés, soit par des réactions physico-chimiques entre les particules de terre et les produits ajoutés, soit par la création d'une réaction qui lie ou recouvre les particules. On peut citer notamment le ciment, la chaux, le bitume et les sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré souhaité d'amélioration de la qualité du sol (Taallah, 2014)

Il existe en fait deux façons pour les produits chimiques de traiter les matériaux de la Terre :

- Traitement de masse (introduction d'une quantité minimale de stabilisant dans la masse du sol).
- Préparation de surface (enduit, enduit, hydrofuge) pour protéger la surface par trempage des parties exposées (Abdelhamid Guettala, Houari, Mezghiche, & Chebili, 2002)

10.4 Moyens de stabilisation

Dans la littérature, différentes classifications peuvent être trouvées, selon : la nature, la forme, etc. Selon Rigassi (Rigassi, 1995) il existe six modes de stabilisation :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

On peut aussi combiner plusieurs processus de stabilisation : physique et chimique, par exemple pour un meilleur résultat.

10.5 Densification du sol par compression

Le compactage est une opération pour diminuer le volume des vides dans le sol (DeJong-Hughes et al., 2001), et donc avoir une densité plus sèche, donc plus élevée. Une relation très bien définie entre la densité sèche et la résistance mécanique a été observée pour tous les matériaux. Ceci est plus élevé en raison de la compacité du matériau (Austroads, 1998). Un avantage en plus de la densification est le taux réduit de pénétration de l'eau dans le matériau stabilisé et durci, ce qui a un effet positif sur la durabilité. Cependant, il faut veiller à maintenir suffisamment d'eau pendant le compactage pour permettre l'hydratation des minéraux du sol et

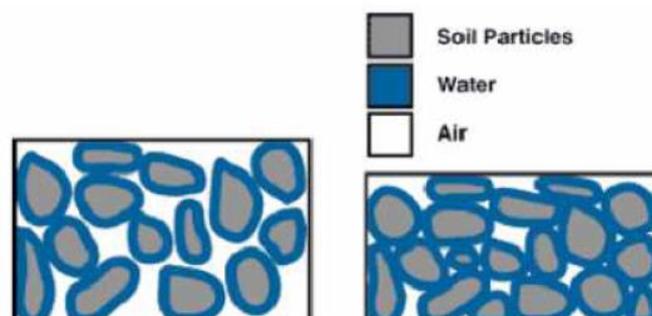


Figure 5-ch3 Effet du compactage sur les vides des sols (DeJong-Hughes, Moncrief, Voorhees, & Swan, 2001)

de la chaux ou du ciment (ajoutés comme stabilisateurs) dans des conditions normales (Winterkorn, 1975)

10.5.1 Méthode de compression

Cette méthode a pour objectif d'affecter fortement la résistance finale du matériau (Doat et al., 1979). Il y'a quatre principales méthodes de compression (Houben & Guillaud, 2006):

- statique ;
- dynamique des vibrations ;
- dynamique des chocs ;
- Compresser en pétrissant.

10.5.2 Effet de la teneur en eau sur la masse volumique

Cette caractéristique dépend de différentes variables physiques :

- densité des particules de sol,
- taille des particules,
- teneur en eau,
- méthode de compactage et contrainte de compactage.

Cependant, les propriétés des sols comprimés sont plus affectées par la teneur en eau que par tout autre paramètre (Burrough, 1989; Houben & Guillaud, 2006). Lorsque l'indice de vide du sol est le plus petit, la compacité maximale du sol est atteinte, c'est-à-dire que l'état de la teneur en eau du sol dite optimale est atteint. Un sol « trop sec » sera le siège de frottements importants entre les particules de sol. Les sols trop humides, en revanche, une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau et donc non transférée aux particules de sol.

La teneur en eau optimale « TEO » est effectuée en laboratoire. La recherche de TEO a été obtenue à l'aide de l'essai Proctor qui applique un compactage dynamique plus adapté aux sols pulvérulents. Cet essai est déconseillé pour l'argile car il peut conduire à une saturation locale de l'éprouvette au niveau du piston compacté. Il en résulte des échantillons hétérogènes en densité (P'Kla, 2002).

les recherches de Mesbah (Mesbah, Morel, & Olivier, 1999) suggèrent que le compactage statique est plus adapté aux argiles.

Il s'est avéré que le test Proctor n'était pas très utile et n'était pas représentatif des conditions de fabrication des briques compressées. En fait, il est presque impossible de fabriquer des spécimens avec des moules Proctor, mais surtout, il ne semble pas y avoir de relation entre "l'énergie Proctor" et le compactage statique utilisé pour fabriquer les blocs (Taallah, Guettala, Guettala, & Kriker, 2014).

10.5.3 Effet de l'énergie de compactage

Indépendamment du type de sol et de la méthode de compactage utilisée, une plus grande énergie de compactage réduit la teneur en eau optimale TEO et entraîne une plus grande densité sèche, comme indiqué (Winterkorn, 1975). Cependant, une énergie de compactage excessive peut produire des phénomènes supplémentaires qui sont préjudiciable à la qualité du matériau (Houben & Guillaud, 1989).

10.5.4 Effets de la taille des particules de sol

Une granulométrie étroite ne permet pas une compacité élevée : la courbe de compaction est aplatie et les maxima sont légèrement saillants (USAGE, 2000). D'autre part, la granulométrie de la dispersion (caractéristique du matériau dans lequel les particules ont des tailles différentes) donne une courbe de compaction avec un maximum proéminent : un meilleur compactage est obtenu (Doat et al., 1979).

10.6 Densification hiérarchique

Afin d'obtenir la meilleure résistance du sol aux contraintes mécaniques et à l'effet de l'eau, il est nécessaire de réduire la proportion de vides et d'augmenter le contact entre les particules (Houben & Guillaud, 2006). Les terres disponibles peuvent être améliorées par des corrections de raffinement. Pour corriger des conditions trop élevées ou trop basses de gravier, de sable ou de fines. Par conséquent, les sols à plasticité excessive peuvent être améliorés en ajoutant du sable, tandis que les sols à plasticité insuffisante peuvent être améliorés en ajoutant des fines.

Selon Guettala (Abdelhamid Guettala, Abibsi, & Houari, 2003), la résistance à la compression à l'état humide et sec augmente de 3nn avec l'augmentation de la concentration en sable. Par exemple, pour une teneur en sable de 30 %, les courbes montrent 24 % et 28 % à l'état sec et humide, respectivement.

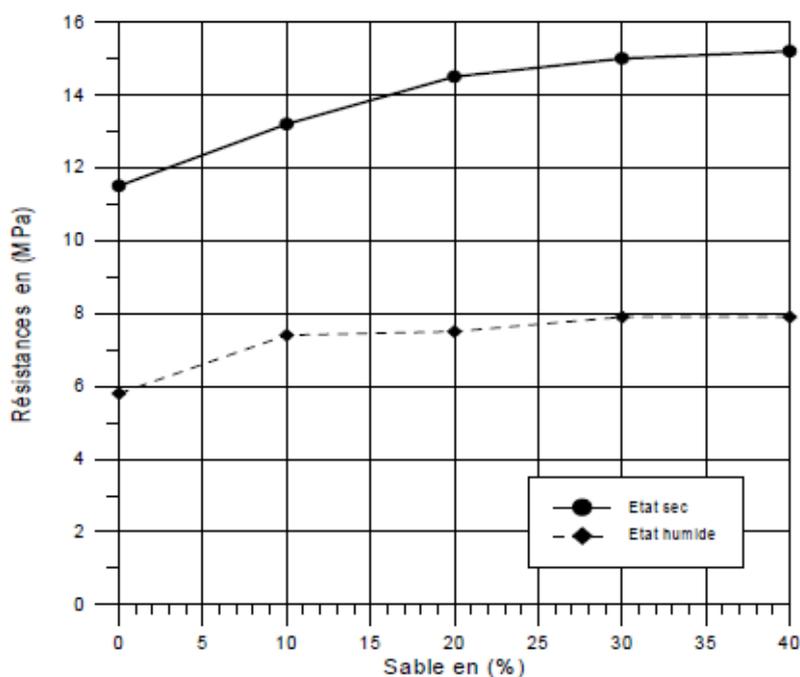


Figure 6-ch3 les résistances mécaniques :effet de la teneur en sable en Compression du béton de terre stabilisée, avec 5% de ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa (Abdelhamid Guettala et al., 2003)

10.7 Stabilisation au ciment

10.7.1 Aperçu

En 1915, les États-Unis ont essayé pour la première fois de stabiliser le ciment dans le secteur routier. La stabilisation au ciment, utilisée dans la construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne à partir de 1920. Aux États-Unis, à partir de 1935, le ciment du sol est de plus en plus utilisé : routes, pistes d'aéroport. Depuis lors, il y a eu de nombreuses applications de la stabilisation au ciment dans les travaux publics et la construction à travers le monde (A Guettala, Abibsi, & Houari, 2006).

L'ajout de ciment avant compression permet d'améliorer les propriétés du matériau, car, sans doute il est l'un des meilleurs stabilisants pour les sols compactés. Notamment sa résistance à l'eau. Le ciment agira sur le sable et le gravier. Par conséquent, utiliser des sols trop collants (> 30 %) n'est pas utile, voire nocif (Houben & Guillaud, 1989)

Un ciment est recommandé en fonction des propriétés du sol :

- Sols avec un certain pourcentage d'argile : utiliser un ciment riche en alite et bélite C3S

C2S produit une grande quantité de silicate Ca(OH)_2 lors de l'hydratation. Verdeyen suggère

Ciment pour sols à teneur en argile n'excédant pas 20 à 30% ($I_p < 25\%$)(Verdeyen, Roisin, & Nuyens, 1971).

10.8 Stabilisation à la chaux

10.8.1 Aperçu

Son utilisation remonte à très loin, elle est connue depuis l'Antiquité. Il a été utilisé comme stabilisateur de chaussée par les Romains et bien d'autres civilisations anciennes. Cette matière est une substance blanche pulvérulente obtenue par une décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium. il existe :

- La chaux vive (le produit direct du calcaire calciné), principalement de l'oxyde de calcium (CaO). $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (5) 1000°C
- La chaux aérienne (chaux hydratée) est obtenue en faisant réagir de la chaux vive avec de l'eau. Il est principalement composé d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). C'est ce qu'on appelle "l'air", Parce qu'il réagit avec le dioxyde de carbone dans l'air. $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{chaleur}$ (6)
- La chaux hydraulique contient également des silicates et des aluminates, car elle est dérivée du calcaire argileux. On l'appelle "hydraulique" car il durcit en contacte d'eau.

Tous ces types sont utilisés, mais il est préférable d'utiliser la chaux gazeuse au lieu de la chaux hydraulique(Doat et al., 1979).

La chaux est particulièrement recommandée pour les sols à 20% d'argile et les sols avec $IP > 17$ et $LL > 40$.

La chaux éteinte est préférée à la chaux vive car cette dernière présente deux inconvénients principaux :

- difficulté de stockage à l'abri de l'humidité avant utilisation
 - difficulté de manipulation lors du malaxage

Le Roux (Le Roux, 1969) a démontré que pour les sols qui contiennent beaucoup de kaolinite, la résistance (de 2 à 90 jours) augmentait avec la teneur en chaux, mais pour les sols

qui contiennent plus d'illite, la teneur en chaux la plus élevée La meilleure valeur est de 5 % dans le milieu à long terme.

10.8.2 Mécanismes

Lors de la stabilisation à la chaux, deux étapes peuvent se produire, associant quatre types de réactions (Choquette, 1988; Locat, Trembaly, & Leroueil, 1996) :

- Échange cationique,
- Flocculation et agglomération de l'argile,
- Carbonatation de la chaux,
- Réaction entre la chaux, et la silice et/ou la cendre volcanique d'alumine

les deux premières réactions augmentent la plasticité, la maniabilité et la résistance du sol, réduisant généralement l'indice de plasticité, et cette première étape est considérée comme la période de modification du sol.

La deuxième étape est l'étape de stabilisation, qui comprend les troisième et quatrième types de réactions. Cette période provoque la cimentation du produit, augmentant progressivement la résistance (cisaillement) et la durabilité du sol.

Il est reconnu que des températures inférieures à 13°C ralentissent le processus de stabilisation, tandis que des températures plus élevées l'accélèrent.

10.9 Stabilisation mixte chaux-ciment

Cette stabilisation se fait sur des sols trop humides et plastiques. Nous utilisons d'abord de faibles niveaux de chaux seule, puis du ciment. Ces deux stabilisants sont complémentaires et ne sont pas concurrents. En ajoutant la chaux en premier lieu. Ce qui rend le sol plus apte à être mélangé ultérieurement avec du ciment. Le ciment a une cinétique d'hydratation supérieure à celle de la chaux, ce qui permet d'obtenir une résistance mécanique dès le premier jour de traitement. A notre connaissance, il n'existe pas d'études sur les mécanismes qui contrôlent ce traitement. On peut considérer que le silicate Ca(OH)_2 libéré par le ciment en solution à le même rôle stabilisant que la chaux. Les hydrates formés à partir de la chaux libre et des silicates de ciment s'accumuleront avec les hydrates du ciment dissous (Abdelhamid Guettala et al., 2002).

11 Conclusion

L'art de l'architecture sur Terre suit des règles très strictes et nécessite un savoir-faire spécifique. Une mauvaise conception, la construction peut causer de graves problèmes, les principes de construction présentés ci-dessous utilisent les propriétés et les propriétés des matériaux du sol pour réduire, voire éliminer, le risque de fissuration,

Stabiliser le sol c'est modifier les propriétés des systèmes sol-eau-air. La stabilité est une question complexe en raison des nombreux paramètres impliqués. Il faut comprendre : les caractéristiques de la terre, les aménagements envisagés, l'économie du projet, la technologie.

L'objectif principal de la stabilisation des sols est de

- pour de meilleures propriétés géo mécaniques (résistance à la compression, à la traction et au cisaillement),
- Réduction de la porosité et du changement de volume (diminution du retrait et de l'expansion de l'eau),
- Améliore la résistance aux intempéries (réduit l'abrasion de la surface et la pénétration de l'eau).

Il existe trois processus de stabilisation :

- La stabilisation mécanique est un terme général désignant la stabilisation du sol par compactage. Ce processus modifie les propriétés de la Terre (densité, compressibilité, perméabilité et porosité) en intervenant dans la structure.
- La stabilité physique ou les propriétés du sol peuvent être altérées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de différentes fractions de particules (argile et sable).
- La stabilité chimique de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou produits chimiques qui altèrent ses propriétés, ou par des réactions physico-chimiques entre les particules de terre et les produits ajoutés, ou par la création d'une matrice qui lie ou recouvre les particules. et ciment, chaux, bitume et sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques ajoutés dépendront de la nature du sol et du degré souhaité d'amélioration de la qualité du sol.

Il existe en fait deux façons de traiter les matériaux terre avec des produits chimiques :

- Traitement en vrac (quantité minimale de stabilisant introduit dans le bloc de sol).
- Traitement de surface (enduit, stuc, hydrofuge) pour protéger la surface par trempage des parties exposées.

Dans ce chapitre, nous avons également vu l'effet stabilisateur de la chaux mélangée au ciment qui donne un meilleur résultat dans des sols argileux, donc ce type de traitement se fait sur des sols trop humides et plastiques. Nous utilisons d'abord de faibles niveaux de chaux seule, puis du ciment. Un traitement préalable à la chaux peut assécher un sol trop humide.

Conclusion de la première partie

En conclusion de la partie théorique, nous pouvons dire que le climat est un ensemble de phénomènes météorologiques terrestres qui caractérisent une région au fil des décennies. Sa détermination repose sur une analyse quantitative à long terme des valeurs moyennes des paramètres nécessaires pour caractériser l'état de l'atmosphère (principalement la température de l'air), le confort thermique est déterminé par un équilibre dynamique entre l'échange de chaleur, le corps et son environnement, qui motive l'homme à se protéger des climats rigoureux en créant des conditions relativement confortables au sein de son habitat.

D'une manière générale, l'adaptation des habitats au rayonnement solaire et aux facteurs climatiques s'effectue de manière naturelle, l'idée est de fournir l'orientation et la forme la plus appropriée pour le bâtiment, en le rendant propice aux changements saisonniers, à la position et à l'intensité du soleil, et donc, une capacité à répondre aux besoins de chauffage et/ou de climatisation. Par exemple, permettre au soleil d'entrer dans la pièce pour stocker la chaleur aide à augmenter la température ambiante intérieure. La meilleure utilisation de la lumière du soleil est obtenue en jouant avec les caractéristiques de la forme et les propriétés des matériaux utilisés.

Le premier chapitre a discuté la relation entre le climat et l'architecture. Nous avons présenté le climat et ses paramètres, puis on a défini la conception avec une performance énergétique efficace, ainsi que les facteurs qui peuvent améliorer le climat. Ensuite, nous avons aussi discuté les aspects de l'isolation, des caractéristiques des matériaux d'isolation et des différents types d'isolation, les effets de la masse thermique et de l'inertie thermique. En conséquence, les gens essaient d'utiliser le climat pour le confort et les économies d'énergie dans leurs constructions. Actuellement, les règles d'adaptation à l'architecture, à l'environnement et au climat permettent d'allier les traditions millénaires à la technologie moderne, et les exigences de confort sont très élevées, et les concepteurs semblent ignorer la fonction d'adaptation à l'environnement. Ils profitent de la technologie pour créer des environnements artificiels. Il faut tout faire pour adapter ces constructions au climat et aux modes de vie des futurs occupants, car un mauvais choix peut coûter très cher en énergie à long terme.

Ensuite, nous avons constaté que la conception des bâtiments est étroitement liée à la performance énergétique et a un impact direct. La forme du bâtiment change tout le temps. Certaines formes standard minimisent le transfert de chaleur. Ces formes sont un équilibre entre des saisons froides où les apports solaires peuvent être utiles et des saisons chaudes où ils doivent être évités.

Le choix du matériau de construction et les propriétés du matériau isolant ainsi que les différents types d'isolation sont très importants. Les murs sont choisis pour représenter 60 à 70 % de la masse thermique du bâtiment et les planchers pour représenter 30 à 40 %. C'est pourquoi nous voulons nous concentrer sur les murs et leur donner plus d'importance. Par conséquent, il est préférable d'avoir autant de masse thermique que possible pour obtenir des conditions intérieures adéquates et confortables. Dans la plupart des cas, les dalles de béton doivent être privilégiées et complétées par des murs en matériaux lourds.

La grande inertie du matériau permet d'atténuer les changements de température en emmagasinant l'excédent de chaleur estivale et en le restituant la nuit. L'inertie thermique de l'enveloppe et des murs extérieurs augmente considérablement, le changement de température du jour disparaît, et seul le cycle annuel exerce une pression sur l'atmosphère intérieure. Ces exemples montrent que lorsque la température de surface du mur extérieur la dépasse, la température intérieure peut rester stable autour de 30°C. Les maisons construites avec des matériaux à base de terre comme l'adobe ou n'importe quelles briques d'argile ont généralement des murs épais (environ 300 mm) et donc, une grande masse thermique. La forte inertie de ces matériaux réduit les échanges thermiques à l'intérieur lorsque la température extérieure fluctue dans des conditions confortables, et fonctionne particulièrement bien en été.

Parmi les différentes manières de construire une maison écologique est sans doute le choix des matériaux utilisés. Ce choix est l'un des axes principaux de cette étude. Par exemple, le choix du matériau naturel et le choix d'un chauffage écologique, la toiture, les murs et l'isolation, les matériaux naturels sont disponibles à chaque étape du chantier.

Dans le chapitre 2, nous avons vu quelques techniques modernes basées sur des techniques de construction anciennes, utilisant des matériaux naturels, leurs propriétés et leurs qualités environnementales sont montrées. Nous avons vu qu'il y'a une diversité de matériaux à base de terre tels que l'adobe, les techniques de fabrication et les produits à base de terre

utilisés dans la construction, une classification des matériaux par type pour choisir le matériau idéal.

La technologie des sols compactés stabilisés a été améliorée par l'entremise de nouvelles technologies et machines, ce qui peut accélérer le processus de construction. La Terre a permis de construire des structures solides partout dans le monde, qui existent encore aujourd'hui. Parce qu'il permet de réaliser des structures très diverses en forme et en fonction. On voit que la terre est un anachronisme, c'est-à-dire qu'il est ancien, voire millénaire, mais aussi moderne et créatif. C'est une architecture qui peut exister là où se trouve la terre.

Le chapitre deux présente aussi une gamme de matériaux à base de terre, tels que les briques perforées, le pisé, la terre façonnée, BTC....des blocs d'argile (adobe), des briques, ces briques sont porteuses. Elles sont utilisées dans les murs intérieurs pour le stockage de la chaleur et l'isolation phonique, ou comme enveloppes intérieures pour les structures à ossature de bois.

Les murs de terre crue (pisé) sont obtenus par battage de la terre en coffrage (généralement dans notre pays avec un pilon à main ou à air comprimé). Ils sont porteuses, stockant de la chaleur et leur structure peu irrégulière leur donne une esthétique et des propriétés particulières. Les morceaux de paille sont utilisés pour l'isolation acoustique et thermique des murs extérieurs et intérieurs en ossature bois, ou comme isolation intérieure des murs extérieurs, Mortier, colle et enduits à base de matériaux naturels tels que la chaux, l'argile.

L'isolant doit être fabriqué à partir de produits renouvelables tels que le lin, le seigle, les copeaux de bois, la laine, le chanvre, les fibres de bois, le liège ou la cellulose isolante fabriquée à partir de matériaux naturels tels que les fibres de bois, le liège, le chanvre, le roseau ou l'herbe des champs. Ces isolants sont utilisés pour la rénovation de murs de remplissage. L'aspect naturel du matériau et sa plasticité permettent toutes les expressions artistiques et tous les décors. Ils sont des régulateurs d'humidité et isolant phoniques, le sol cru à des aspects économiques et environnementaux. Grâce à l'action simple et pure de sécher l'adobe au soleil, les dommages à la nature sont fortement réduits, on peut principalement localiser la qualité du sol brut avant et après la phase de construction. Et grâce au confort thermique qui le matériau de la terre nous fournit ainsi que les propriétés thermiques de la terre produisent des économies d'énergie pour chauffage et la climatisation.

Le matériau du sol, visible partout, présente de nombreux avantages,

La terre est extraite sur place. Contrairement à d'autres matériaux, avec presque zéro consommation énergétique ou non renouvelable, non polluante. Une grande quantité de terrassement extraite de grands projets d'utilité publique tels que des routes et des projets de fondations de bâtiments peut être recyclée comme un matériau de construction ; ces matériaux en terre utilisent très peu d'eau (l'eau est une ressource importante pour la vie humaine). Les blocs de boue comprimée coûtent 20 à 30 % de moins que la maçonnerie trouvée dans les blocs de ciment, la pierre ou même les briques en terre cuite. Au cours du processus de production, il ne génère aucune émission de déchets. Son utilisation garantit la santé des utilisateurs, car il n'y a aucun effet nocif dans la vie de tous les jours, et il a l'avantage supplémentaire d'être presque entièrement recyclable après la première utilisation ; les modèles et les outils nécessaires à la production de matériaux en terre sont simples et accessibles à tous les usages. Il possède également des propriétés telles qu'une absorption d'eau élevée, une densité élevée, une bonne transmission de la vapeur, une bonne inertie thermique, une qualité sonore et une longévité approuvée.

Cependant, malgré tous ces avantages, il a également des inconvénients importants. Il s'érode facilement, ce qui le rend difficile à utiliser dans les zones à fortes précipitations ; il absorbe l'eau, devient lourd et provoque un affaissement ; n'adhère pas au bois, ce qui peut provoquer une séparation autour des ouvertures ; il ne résiste pas à la flexion et à l'arrachement ; les liaisons entre particules de matériau terreux sont de nature physique et elles s'affaiblissent, voire se neutralisent au contact de l'eau, ce qui peut dégrader le matériau et réduire considérablement ses propriétés mécaniques et sa durabilité dans le temps.

Ces inconvénients sont fortement liés à la solubilité dans l'eau, qui entraîne des désordres structuraux appelés conditions de vieillissement, qui varient selon le climat et peuvent être contrôlés par des mesures préventives.

Ainsi, dans le chapitre 3, nous recherchons des méthodes ou des techniques de fabrication permettant d'optimiser ces blocs de terre comprimée pour augmenter leur résistance mécanique et pallier leurs défauts.

Les matériaux de construction écologiques répondent à plusieurs exigences différentes : ne pas nuire à la santé des habitants, éviter les déperditions d'énergie, ne pas nécessiter beaucoup de transport ni trop d'énergie pour être produits. Ils sont recyclables et produisent peu ou pas de pollution. En les choisissant, nous faisons quelque chose pour la planète en améliorant la qualité de vie.

Alors que l'humanité a connu un développement technologique au cours des derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de posséder une variété sans précédent de matériaux de construction, on assistera aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre dans plusieurs pays, y compris les nations industrialisées, utilisant le soutien de la recherche scientifique pour développer une variété de technologies de production. L'une des raisons de l'importance du domaine de la construction est sa disponibilité et sa proximité avec les chantiers de construction de l'habitat. La mise en œuvre doit être relativement facile et nécessiter des outils limités, souvent de la part des agriculteurs. Pour ces raisons, les constructions en terre concernent principalement les constructions rurales, tout de même il existe de nombreux exemples de constructions en terre dans les zones urbaines.

Donc, parmi les principaux avantages de la terre crue, on peut citer la faible consommation d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et sa bonne inertie thermique, qui permet d'avoir un habitat frais en été et retient la chaleur en hiver. Néanmoins, le problème principal des constructions en terre demeure le manque de solidité provoquant des fissures systématiques dues au retrait et souffrant de problèmes de sensibilité à l'eau.

L'homme a toujours cherché à éviter les inconvénients des matériaux en terre, en utilisant divers moyens de stabilisation pour améliorer leurs propriétés et leur sensibilité à l'eau, aboutissant à plusieurs produits en terre : adobe, terre battue, épi de maïs, blocs de terre comprimée (BTC) etc. La technologie des blocs de terre comprimée (BTC) est une nouvelle technologie par rapport à l'histoire de la construction civile, qui permet aux blocs d'avoir un format très flexible en termes de maçonnerie qui peut être intégré dans des structures poteaux-poutres comme matériau de remblai et comme matériau principal pour murs porteurs. Afin d'améliorer les propriétés mécaniques du BTC, il est nécessaire de réduire sa porosité, son changement de volume (dilatation et contraction) et d'améliorer sa résistance aux intempéries (réduire l'usure de surface et la perméabilité des blocs), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés tels que le ciment, la chaux, l'asphalte, la fibre, etc.

Le BTC est stabilisé en utilisant un renfort en fibres, dont la paille est fréquemment utilisée dans le monde depuis l'Antiquité. Il existe de nombreux types de briques d'adobe stabilisées à la paille faites à la main, de la paille de boue, des épis de maïs, des blocs compactés et de la terre battue. (Dans le cas des fibres synthétiques, elles sont souvent utilisées pour renforcer le sol afin d'augmenter la résistance à la compression et au cisaillement).

Si elle est actuellement confirmée, la stabilité des liants et bitumes au BTC augmente leur résistance mécanique et leur insensibilité à l'eau. L'effet stabilisant de la fibre sur le BTC n'est pas partagé par tous les chercheurs.

Depuis les temps les plus reculés, le sol brut a été utilisé pour construire des bâtiments, comme en témoignent les habitats traditionnels dans de nombreux endroits dans le monde. Ce matériau est souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, mais dans sa forme actuelle, il présente de nombreux avantages pour construire des maisons durables, confortables et économiques. Par conséquent, le chapitre 03 répond à notre question sur la façon de renforcer le bloc de terre compressé. Et le rendre plus efficace en le stabilisant.

Nous voulions avoir un matériau à base de terre avec une masse thermique similaire au BTC et une résistance du BTS.

Stabiliser le sol c'est « modifier les propriétés des systèmes sol-eau-air », pour des propriétés permanentes compatibles avec des applications spécifiques. Mais la stabilité est une question complexe en raison des nombreux paramètres impliqués. Il faut comprendre : les caractéristiques de la terre, les aménagements envisagés, l'économie du projet, la technologie pour mettre en œuvre la terre choisie pour le projet, et l'entretien du projet. Les principaux objectifs de la stabilisation des sols sont les suivants : obtenir de meilleures propriétés mécaniques du sol (augmentation de la résistance à la compression, à la traction et au cisaillement), réduire la porosité et le changement de volume (réduire le retrait et l'expansion induits par l'eau), et enfin améliorer la résistance au vent et à la pluie (réduire usure de surface et perméabilité à l'eau).

Il existe trois méthodes de stabilisation :

- La stabilisation mécanique : en modifiant la densité, compressibilité, perméabilité et porosité (intervenant dans la structure).
- La stabilité physique : un mélange contrôlé de différentes fractions de grains (argile et sable).
- La stabilité chimique : par l'ajout d'autres matériaux ou produits chimiques qui altèrent ses propriétés (le ciment, la chaux, le bitume et les sous-produits industriels). Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques ajoutés dépendront de la nature du sol et du degré souhaité d'amélioration de la qualité du sol.

Le traitement des matériaux du sol par des produits chimiques s'effectue en réalité de deux manières, l'une est le traitement dans le sol (introduction d'une quantité minimale de stabilisants dans le sol) et l'autre est le traitement de surface (peinture, peinture, hydrofuge), pour protéger la surface en trempant les parties exposées.

Dans ce chapitre, nous avons également vu l'effet stabilisateur de la chaux mélangée au ciment. Ce type de traitement se fait sur des sols trop humides et plastiques. Nous utilisons d'abord de faibles niveaux de chaux seule, puis du ciment. Ces deux adhésifs ne sont pas concurrents, mais complémentaires.

PARTIE 02

Introduction de la deuxième partie

Cette partie composée de trois chapitres complémentaires représente la colonne vertébrale de l'étude. Le premier chapitre est considéré comme un élément d'interface et de passage entre les parties théoriques et pratiques. L'objectif est de réaliser une recherche de pointe pour optimiser les propriétés thermiques du matériau de construction et améliorer sa performance thermique et énergétique. Les méthodes de recherche donnent au chercheur la possibilité de situer sa question de recherche dans le cadre méthodologique approprié pour résoudre le problème, de choisir une stratégie à l'aide d'une méthode adéquate, et ainsi d'analyser l'objet de recherche en question, tout en garantissant la fiabilité et l'efficacité des résultats. L'état de l'art des recherches antérieures permettra d'acquérir une solide connaissance des travaux de recherche réalisés et des techniques et outils utilisés pour ces recherches.

Le chapitre 2 de cette partie est réservé à l'expérimentation et au développement du BTSC, ainsi qu'aux études à petite échelle de ce matériau par des cellules TEST. Ce chapitre décrit le travail expérimental réalisé pour évaluer l'effet de certains paramètres associés aux BTSC sur leur comportement thermique (température ambiante - température de surface) dans le climat caractéristique de la ville de Biskra.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation des prototypes, à leur validation et à leur optimisation, ainsi que les procédures de simulation numérique qui sont considérées comme de puissants outils d'aide à la décision car elles permettant aux chercheurs d'acquérir une compréhension globale du phénomène à l'étude. L'objet de cette partie se résume à l'étude de l'influence de certains paramètres propres à l'enveloppe du bâtiment, ainsi que les murs précis et leurs composants : propriétés de surface intérieures et extérieures et température ambiante, afin de pouvoir les optimiser ultérieurement. À cette fin, le comportement thermique et énergétique de la batterie prototype sera testé dans une série de simulations dans des conditions de données météorologiques de la ville de Biskra. Les simulations seront effectuées sur un modèle virtuel à l'aide du logiciel *TRNSYS*, qui servira de cas de base et de référence pour déterminer l'impact des paramètres BTSC sur la performance thermique et l'efficacité énergétique. Tout d'abord, les tests de simulation sont effectués séparément, puis la comparaison est effectuée pour former la situation optimale.

Chapitre 04 :

*Positionnement épistémologique et choix
de méthode*

1 Introduction

Ce chapitre est considéré comme un élément de cohésion et de transition entre la partie théorique et la partie pratique. Il est donc nécessaire que les chercheurs établissent un lien entre la théorie et le travail d'investigation. Les méthodes de recherche donnent au chercheur la possibilité de situer sa question de recherche dans un contexte approprié, de formuler une méthode adéquate pour résoudre le problème, de choisir une stratégie en se basant sur une méthode appropriée, et ainsi d'analyser l'objet de recherche en question, tout en gardant la fiabilité des résultats.

Par conséquent, on doit décrire en détail le cadre méthodologique développé pour aborder les thèmes investis dans cette étude. L'état de l'art des recherches antérieures permettra d'acquérir un solide bagage de résultats de recherches réalisées, des techniques et outils qui ont été utilisés pour ce type de recherche.

2 Méthode de sélection

La phase de sélection est critique pour les analystes. En effet, le point de départ d'une démarche est très important, notamment les décisions à prendre. Par conséquent, une compréhension claire du problème est requise afin de bien définir les objectifs et ainsi de proposer des solutions appropriées, matérialisées par des conditions de fonctionnement (sorties)(Paillé, 2022). Une identification inadéquate des problèmes peut conduire à des décisions inappropriées, entraînant une perte de temps, et d'argent, nécessitant ainsi une optimisation des paramètres de l'instrument, des conditions de fonctionnement, la mise en place de procédures opératoires normalisées, la sélection du développement de la validation externe(Aubin-Auger et al., 2008).

Lors du choix d'une méthode, des expériences complémentaires doivent être réalisées pour s'assurer de la validité de la méthode et de la capacité du laboratoire à la mettre en œuvre pour l'usage souhaité (Dubois, 2018)

3 Méthodes d'analyse des données

Les données sont analysées et transformées pour aboutir à des résultats définis. Cela dépend bien sûr des données et de la question de recherche, cela peut inclure une quantification des données. Alors que les études architecturales fournissent une suite de techniques pour recueillir des informations et les traiter, leur traitement, en revanche, se fera par le biais d'analyses quantitatives et qualitatives.

Pour rapprocher des propositions théoriques à la réalité, ou d'utiliser des observations pour affirmer ou non des hypothèses, les concepts doivent être opérationnalisés, ce qui veut dire l'élaboration d'une relation systématique entre les concepts et la réalité observée à travers des indicateurs. Les mesures peuvent être définies comme des signes, des comportements ou des réactions observés directement, favorisant ainsi l'identification des concepts à un niveau réaliste à travers lesquels les concepts peuvent être identifiés à un niveau réaliste (Amraoui, 2021).

D'autre part, mettre un concept en action revient à le corrélérer à un ou plusieurs indicateurs permettant de faire avec précision la différence entre les concepts et les évolutions observées de la réalité.

3.1 Évaluation quantitative

Cette approche consiste à décrire, expliquer, contrôler et prédire objectivement les faits et événements positifs ou négatifs observés par les chercheurs. Conçue pour collecter des données observables et quantifiables. La méthode débute généralement par une collecte des données à partir d'outils ou de techniques de recherche quantitative avec une fiabilité et validité garanties en principe. des tableaux et des graphiques sont produits afin de permettre une analyse descriptive, une analyse statistique pour rechercher des liens entre des variables ou des facteurs, une analyse de corrélation ou d'association, etc. (Huang & Zhai, 2020).

Concernant les méthodes utilisées dans la recherche axée sur les propriétés des matériaux. Les méthodes évoquées dans la littérature sont des méthodes analytiques sous forme de calculs mathématiques (classiques), des études empiriques de terrain, des modèles réels ou simplifiés, et des méthodes expérimentales de simulation numérique. Cette approche analytique permet de décrire la fonction thermique d'un bâtiment en utilisant les principes de la physique du bâtiment.

3.1.1 Méthode numérique

3.1.1.1 Simulation

La simulation thermique dynamique (STD) consiste en la représentation numérique (modélisation) d'un ou plusieurs bâtiments à l'aide d'un logiciel. Le but est de simuler le comportement thermique du bâtiment en fonction de nombreux paramètres et propriétés à l'aide d'un modèle numérique. Ainsi, le comportement de l'enveloppe thermique des bâtiments (murs, toitures, vitrages...) est étudié par simulation, ces paramètres suivants doivent être pris en charge :

- Contribution interne :(Occupation, déperditions thermiques des équipements électriques...).
- emplacement géographique, ensoleillement et exposition.
- Inertie thermique.
- Données climatiques.

Cette méthode a été élaborée pour remplacer les calculs simples (analyse numérique) utilisés auparavant dans l'industrie de la construction.(Picon, 2010)

Dans le but de répondre aux exigences environnementales et d'efficacité énergétique dans la conception architecturale, prendre en considération des critères physiques complexes et cibler un paramétrage précis, reste une étape primordiale.

En effet, certains effets physiques ne peuvent être ignorés, car les conceptions tendent vers une très faible consommation d'énergie et un contrôle très précis des bâtiments. De nouveaux outils de modélisation sont apparus pour prédire et évaluer l'effet des conditions climatiques sur les consommations énergétiques, et le confort des constructions, avec une analyse précise dans le temps et dans l'espace. Le logiciel est basé sur la programmation et/ou la modélisation des composantes de la construction comme les matériaux, vitrages, revêtements, etc. et le dessin de plans d'étage 3D, en tenant compte des données contextuelles (climat, orientation, etc.)(Berghout, Meerman, van den Broek, & Faaij, 2019).

3.1.2 Méthode expérimentale

Cette étape consiste en un test de validité d'hypothèses en créant et en reproduisant des phénomènes (souvent en laboratoire) et en modifiant des paramètres. Les paramètres

changeants sont implicites dans les hypothèses. Les résultats expérimentaux vérifient ou ne vérifient pas l'hypothèse. Des méthodes expérimentales sont appliquées à la biologie, la physique, la chimie, de la psychologie et même de l'archéologie et de l'architecture.

Lorsque des contextes ou quelques phénomènes naturels sont trop complexes ou très vastes, ou peut-être trop dangereux, ou même coûteux ou trop longs à reproduire expérimentalement, des dispositifs simplifiés sont utilisés comme les maquettes.

On peut avoir :

- Modèle simplifié (prototype).
- Modèles numériques (programmes de simulation informatique) ;
- Les modèles in vivo, comme la souris.

Dans ces cas-là :

- La validité du modèle peut être discutée.
- Le modèle doit représenter au mieux l'objet sur lequel repose l'hypothèse.

Par exemple, pour démontrer l'impact humain sur le réchauffement climatique, on utilise des modèles climatiques numériques. Les détracteurs de cette hypothèse remettent en question ces modèles, qui ne tiennent pas suffisamment compte des effets des nuages.

3.1.2.1 Programme expérimental

Le protocole expérimental comprend :

- Une description des conditions
- Un déroulement de l'expérience ou du test
- Le protocole à suivre

La description doit être très claire et bien expliquée pour que les expériences puissent être reproduites à l'identique.

3.1.2.2 Structure théorique de l'expérience

L'expérience se compose essentiellement de trois phases :

- Préparer ;
- expérience ;
- Évaluer.

L'expérience globale est généralement composée de sous-expériences partiellement personnalisables. Elle contient les mêmes trois pôles. Mais, dans l'expérience isolée, ces trois phases constituent autant de phases chronologiquement réglées, alors que dans l'expérience globale il s'agit de trois domaines qui interagissent en permanence.

Cependant, **l'évaluation** est liée aux paramètres pris dans l'étape de la préparation, les résultats remettent en cause la méthode d'échantillonnage ; selon les deux autres étapes, l'expérience peut être répétée dans le cas échéant.

La préparation s'articule autour d'un double objectif : le succès de l'expérience, et le cheminement vers un résultat positif, par rapport à l'objectif initial. Toute intention de motiver et d'organiser des expériences trouve des limites sous forme d'incertitude : l'incertitude fondamentale associée à la réalisation de l'expérience combinée à autant d'incertitude que les choix possibles de conditions initiales.

Par conséquent, la préparation est basée sur l'opinion et le fonctionnement attendu ; des calculs empiriques peuvent réduire l'incertitude de certains paramètres. Ainsi, une combinaison de facteurs conduisant à l'efficacité est préparée. Dans l'expérience globale, chaque étape n'est pas uniquement le résultat de la précédente, mais elle est aussi liée aux conditions initiales et les résultats sont influencés par la complexité, introduisant ainsi de nouvelles incertitudes. L'évaluation fait référence aux critères qui ont été identifiés pour déterminer les facteurs d'efficacité.

L'approche expérimentale avec des cellules d'essai de modules de test est une méthode choisie dans plusieurs recherches, comme les travaux de. (Castellet al, 2010 ; Revelet al, 2014, Alonzo et al, pisello, 2017, Khadhraoui, 2019).

4 Quelques exemples d'application de la méthode expérimentale

4.1 - Avec de vrais modèles

La recherche scientifique a profité de cette approche, car elle a l'avantage de permettre l'étude et l'analyse de phénomènes physiques complexes compte tenu de la ressemblance entre les cellules et les modèles réels(Lirola, Castaneda, Lauret, & Khayet, 2017).

4.2 - Avec maquette

Compte tenu de leurs atouts et de la fiabilité de ces résultats, les chercheurs utilisent le plus souvent des cellules tests à échelle réduite (Benhammane, 2019; Bouchra & Benatiallah, 2021; Khadraoui, 2019; Lirola et al., 2017).

Khadraoui (2019) a utilisé une approche empirique dans sa thèse de doctorat, combinant des lieux de mesure avec des questionnaires pour étudier la fonction thermique de bâtiments existants. Le travail expérimental a été réalisé en réalisant 4 cellules d'essais à échelle réduite, qui ont permis d'analyser différents types de façades dans de réelles conditions, et enfin une étude paramétrique avec le logiciel de simulation thermique dynamique Trynsys pour une étude et une optimisation de l'influence des paramètres en question. L'influence des éléments



Figure 1-ch4 les quatre cellules teste réalisées par Khadraoui, (Khadraoui, 2019)

de la façade sur l'énergie thermique et les niveaux d'énergie a été étudiée, notamment : les matériaux, les équipements, la composition des murs, le caractère des ouvertures et les propriétés de surface de la façade (Khadraoui, 2019).

Les propriétés thermiques des matériaux de construction sont directement liées au bien-être des occupants, et il n'existe pratiquement pas de matériau idéal ou de liste noire de matériaux (Sutcu, del Coz Díaz, Rabanal, Gencel, & Akkurt, 2014). Les bons matériaux ont été choisis de manière réfléchie en fonction de leurs propriétés et caractéristiques. De nombreuses recherches ont été menées sur les matériaux et leurs propriétés thermiques. C'est-à-dire la composition des murs et la nature des composantes eux-mêmes (matériaux : briques, isolants, enduits, etc.). Toutes ses recherches sont axées sur le climat de la région, L'environnement optimisé, les propriétés thermiques des matériaux ; en traitant leur comportement thermique, leur flux de chaleur, leur inertie thermique et leurs transitions de phase.

Selon Ferrara et al. EtBoquera 2015, les matériaux ont un impact très important sur l'efficacité thermique et énergétique des bâtiments. Il affirme que la bonne l'utilisation des matériaux, prenant en considération le climat de la région, assure le confort thermique et établit un équilibre entre stratégiesactives et passives (Boquera, Castro, Pisello, & Cabeza, 2021; Ferrara et al., 2018).



Figure 2-ch4 Etude expérimentale sur l'optimisation de l'enveloppe par interaction des matériaux à changement de phase (Faure, 2007)

Faure (2007), dans sa thèse de doctorat sur l'optimisation des enveloppes en évaluant l'effet des MCP (les matériaux à changement de phase). Ainsi que la ventilation de la cavité d'air de façade à la fonction thermique de l'enveloppe. Il mène des études expérimentales à l'aide de cellules tests, une à échelle réelle et d'autres à échelle réduite. Des études numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique TRYNSIS. Dans cette étude, en confirmant le rôle critique des matériaux à changement de phase sur la fonction thermique des bâtiments(Faure, 2007).

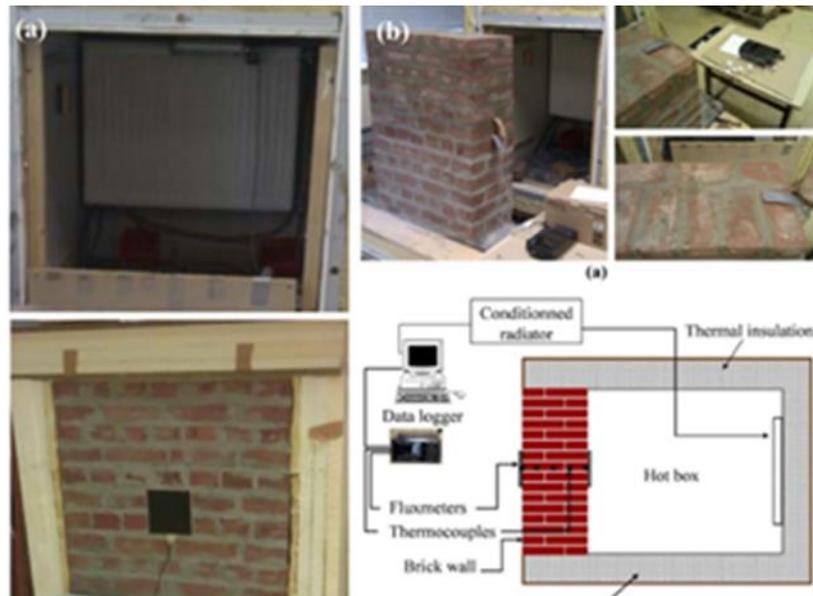


Figure 3-ch4 Etude expérimentale du fonctionnement thermique d'une paroi de brique massive (Sassine, Younsi, Cherif, & Antczak, 2017)

Sassine et al (2017) dans leur article intitulé "Evaluation of thermal performance of bulk brick walls under real weather conditions through a conduction transfer function" ont présenté une étude expérimentale avec un modèle réduit pour évaluer la performance des murs pleins. Ils ont pu évaluer les performances thermiques du mur sur la base d'une analyse fréquentielle afin de réaliser la configuration optimale (Sassine et al., 2017).

5 Quelques exemples d'application de méthodes numériques :

Les méthodes numériques via l'utilisation de différents logiciels de simulation sont des techniques largement utilisées dans le milieu de la recherche, comme les travaux (Brun & Camille, 2009; Favre-Brun, 2013; Rapone & Saro, 2012)

Selon plusieurs chercheurs, l'utilisation de logiciels de simulation dynamique s'est énormément développée compte tenu de la proposition d'évaluer les bâtiments dans

différentes conditions(Lirola et al., 2017).Voir Cette méthode simplifie les phénomènes complexes. À son tour, Spitz dans son article de 2012 "Analyse de la fiabilité des outils de simulation et de l'inconnu de la métrologie appliquée à l'efficacité énergétique", Spitz a mené une étude comparative approfondie des outils de simulation (Trynsys, EnergyPlus, Comfiepléiad, CoDyBa et SimSpark) et pouvant démontrer la fiabilité de ces outils de simulation, les plus utilisés dans le domaine de la recherche environnementale portant sur la thermique et l'énergie des bâtiments(Spitz, 2012).

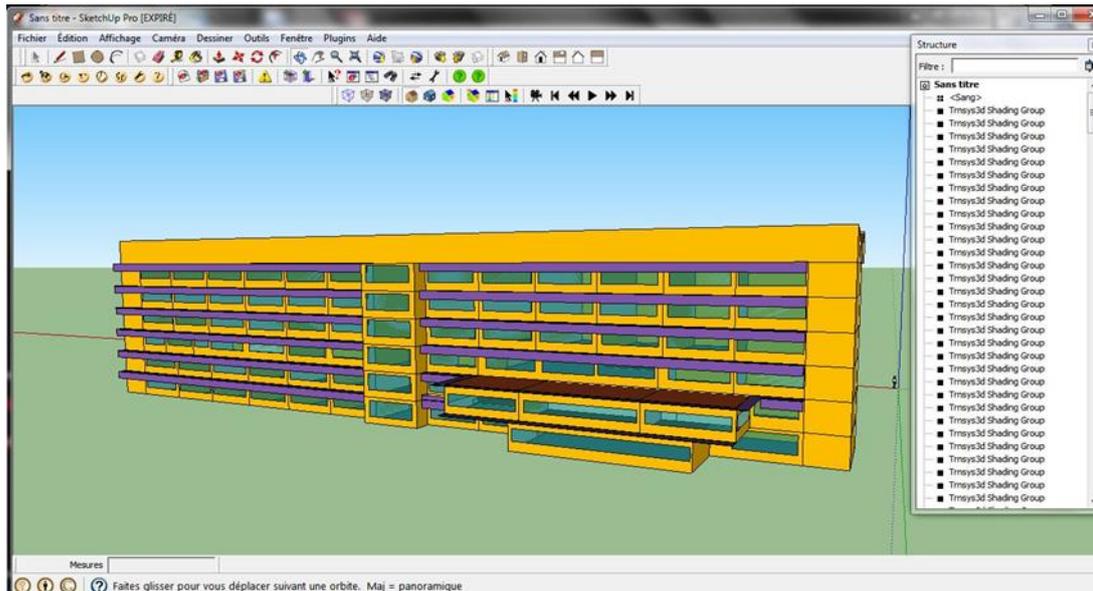


Figure 4-ch4 Application d'un model numérique par Trynsys.("Simulation-thermique-dynamique," 10 septembre 2018)

La recherche de Berkouk (2017) comprenait l'évaluation de l'impact des installations d'ombrage horizontal sur la performance thermique des logements collectifs promotionnels dans la ville de Biskra. Dans son étude, il propose plusieurs tailles de stores pour choisir la solution la plus adaptée afin de garantir un meilleur confort thermique dans ce type de maison. Dans le but d'évaluer objectivement le confort thermique intérieur des logements étudiés, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS. Une analyse comparative des résultats obtenus avec des scénarios d'ombrage montre que les maisons promotionnelles ne semblent pas adaptées aux climats désertiques, en revanche, l'analyse confirme l'efficacité des dispositifs d'ombrage horizontaux pour réduire les performances thermiques spatiales de l'air intérieur et de la température pendant l'été(Berkouk, 2017).

6 Choix de l'orientation méthodologique et épistémologique

Le programme le plus utilisé dans la plupart des études numériques sur la performance thermique des matériaux est associé au logiciel de simulation thermique dynamique du bâtiment TRNSYS. La simulation numérique est la méthode la plus utilisée en construction. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. La méthode analytique est une méthode classique, mais efficace dans ce type de recherche.

Le travail expérimental présente de grandes difficultés et des barrières de faisabilité (administration, assurance des conditions naturelles, temps et argent...). Par contre il a une bonne compréhension des phénomènes étudiés, en particulier les paramètres liés à l'utilisateur (confort, sensation et satisfaction des occupants), des études expérimentales à travers des modèles réels et des unités à échelle réelle. Malheureusement cette approche est très coûteuse, obligeant les chercheurs à se tourner vers des tests sur des cellules à plus petite échelle. Cette technique est actuellement la plus adaptée pour étudier les phénomènes physiques en conditions réelles, de plus, elle permet une bonne compréhension des paramètres étudiés et présente une plus grande fiabilité pour l'étude, nécessitant une combinaison de plusieurs méthodes pour la validation des résultats.

Donc, le choix approprié d'une méthode d'évaluation des performances thermiques d'une recherche dépend de certains facteurs tels que la nature du problème étudié, les phénomènes physiques mis en jeu, l'étendue des résultats requis, etc. Le choix de la méthode est également soumis à certaines contraintes d'impact, notamment la faisabilité de la mesure en termes de temps et de moyens (matériels, financiers). Ces contraintes peuvent être plus déterminantes dans le projet de conception réalisé. Dans la recherche universitaire, en revanche, les objectifs sont plus larges et des conclusions peuvent être tirées à travers des recommandations et des généralisations de cas similaires. Pour mieux comprendre les performances thermiques du matériau d'étude (BTSC) en climat chaud et aride, cette étude s'appuie donc sur une approche quantitative (utilisant des méthodes analytiques) :

- **L'expérience (prototype simplifié)**
- **La simulation numérique par (TRYNSIS-17)**

L'expérimentation se décompose en deux phases :

- **Phase 1 : Développement des matériaux de construction.**

- **Étape 2 : Mesure de la température ambiante et de surface.**

C'est le scénario adopté par la simulation

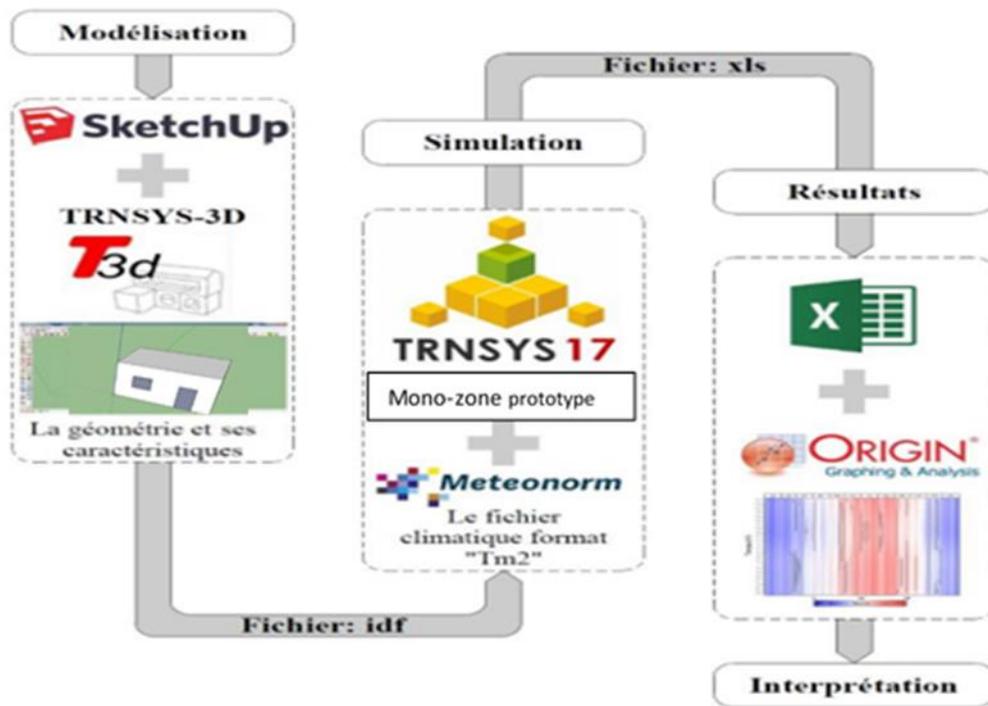


Figure 5-ch4 Schéma de synthèse de l'étude numérique (Khadraoui, 2019) modifié par auteur

7 Conclusion

Des méthodes sont évoquées dans la littérature : méthodes analytiques sous forme de calculs mathématiques (classiques), études empiriques de terrain, modèles réels ou simplifiés, méthodes expérimentales de simulations numériques. Cette méthode analytique permet de décrire la fonction thermique d'un bâtiment en utilisant les principes de la physique du bâtiment.

L'approche expérimentale consiste à tester la validité de l'hypothèse en reproduisant le phénomène et en modifiant les paramètres. Les paramètres changeants sont implicites dans les hypothèses. Les résultats expérimentaux vérifient ou pas l'hypothèse. Compte tenu de ses atouts et de la fiabilité de ces résultats, l'utilisation de cellules tests à échelle réduite est la méthode la plus couramment utilisée par les chercheurs.

Dans le but de mieux appréhender les performances thermiques du matériau d'étude (BTSC) en climats chauds et arides, cette étude utilise une approche quantitative (Analytique) basée sur l'utilisation d'expérimentations (prototypes simplifiés) et de simulations (TRYNSIS-17).

L'expérience a été divisée en deux phases. Phase 1 : Développement des matériaux de construction. Étape 2 : Mesure de la température ambiante et de surface.

La simulation est également divisée en deux étapes, la première étape est la vérification du prototype expérimental, et la deuxième étape est la simulation de différentes combinaisons.

Chapitre 05 :
L'Expérimentation

1 Introduction

L'enveloppe du bâtiment, plus précisément le matériau de construction, représente le paramètre décisif lié à sa performance thermique, et les propriétés des différents équipements et matériaux jouent un rôle très important dans la performance thermique et énergétique. Diverses méthodes expérimentales pour le développement expérimental de matériaux et de composants de la façade peuvent être réalisées en utilisant des modèles ou des cellules TESTS, à échelle réelle, ou à échelle réduite. La fiabilité des résultats obtenus expérimentalement fait de cette méthode la plus appréciée dans l'évaluation des éléments de façade et dans les études d'optimisation thermique et énergétique. Ce chapitre décrit des travaux expérimentaux menés pour évaluer l'effet de certains paramètres liés aux matériaux de construction sur leur comportement thermique dans les climats chauds et arides.

2 L'utilisation de cellules tests dans le domaine de l'architecture

Les caractéristiques et les composants de la façade sont choisis de manière adéquate, de sorte que le matériau est primordial, pour contrôler l'échange de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur et pour augmenter l'efficacité énergétique de la construction.

Plusieurs études ont fait partie d'une démarche dont le but est d'optimiser le rendement thermique de l'enceinte compte tenu de leur rôle important. Cette optimisation peut se faire à plusieurs niveaux grâce à différentes techniques (Federica Rosso, Peduzzi, Diana, Cascone, & Cecere, 2021; F Rosso et al., 2017), telles que des méthodes expérimentales (Garay, Uriarte, & Apraiz, 2014). Les stratégies passives sont vues comme de bonnes solutions pour optimiser les performances des constructions, en améliorant l'environnement thermique interne, à travers l'enveloppe (Boquera, Castro, Pisello, & Cabeza, 2021; F Rosso et al., 2017). Les chercheurs ont mené l'étude en utilisant différentes méthodes. Dans ces méthodes, des études expérimentales sont réalisées en développant des cellules tests à échelle réelle ((modules expérimentaux ou cellules tests)) ou réduites ((modèles réduits ou cellules réduites)) (Khadraoui, 2019; Khadraoui & Sriti, 2017).

Lirola et al ont publié une revue de 2017 intitulée "Review of Experimental Research Using Building Scale Models: Applications and Methods", dans laquelle ils ont découvert que les unités de test peuvent être mises à l'échelle jusqu'à l'échelle 1/12. De leur côté, en se basant sur une étude approfondie de l'océan des cellules de tests dans le secteur du bâtiment, ils ont

constaté que les cellules tests les plus couramment utilisées par les chercheurs sont à l'échelle 1/20

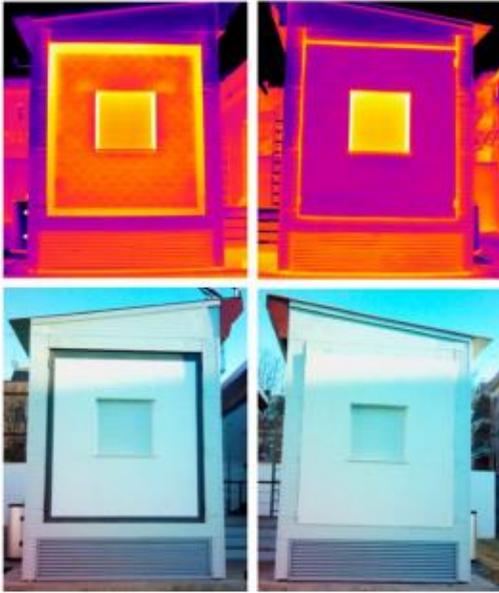
et 1/50(Lirola, Castaneda, Lauret, & Khayet, 2017).

Voici quelques exemples illustrés dans ce tableau

Tableau 1-ch5 Exemples de cellules tests réalisés à une échelle réelle (Khadraoui, 2019)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Castellón et al., 2007		L'utilisation des microcapsules de matériaux à changement de phase (MCP)
Castell et al., 2010		Étude de l'impact des matériaux à changement de phase (MCP)
Joudi et al., 2011		L'influence des revêtements réfléchissants
Alcamo et al., 2014		L'évaluation des performances thermo-physiques des composants de la façade

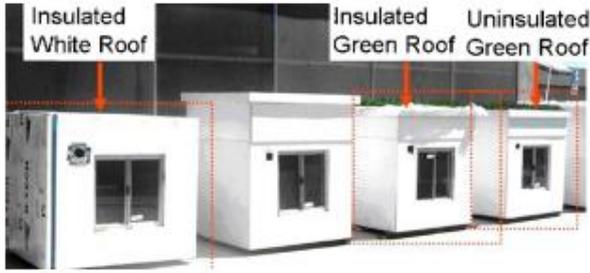
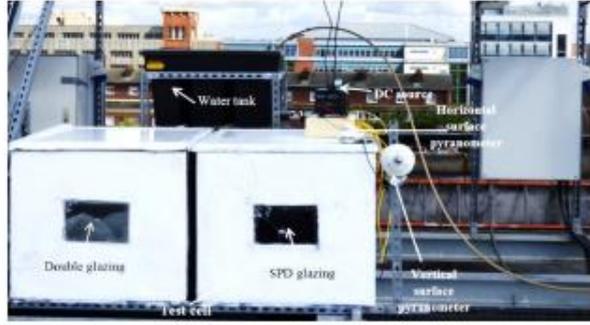
<p>Silva et al., 2015</p>		<p>Développement de volet de la fenêtre</p>
<p>Medjelekh, 2015</p>		<p>Caractérisation du fonctionnement thermo-hydrrique de l'enveloppe</p>
<p>Barreneche el al., 2016</p>		<p>L'influence des matériaux à changement de phase (MCP)</p>
<p>Albatayneh et al., 2016</p>		<p>Évaluation du confort thermique adaptatif dans les bâtiments</p>
<p>Alonso et al., 2017</p>		<p>Les effets de la surface de l'enveloppe et la façade ventilée</p>
<p>Serrano et al., 2017</p>		<p>Étude des matériaux et le comportement thermique</p>

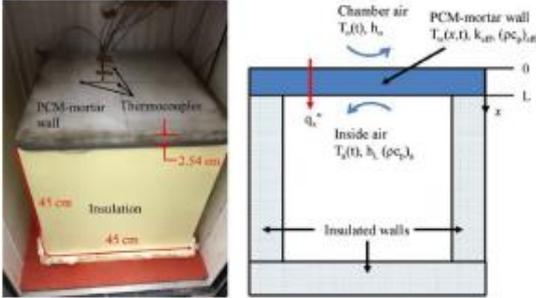
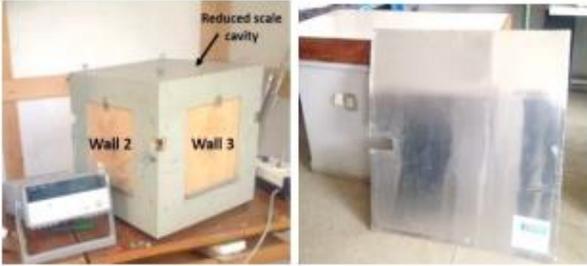
<p>Singh et al., 2017</p>		<p>Évaluation de la performance des panneaux de gypse en MCP</p>
<p>Magri et al., 2017</p>		<p>Évaluation des systèmes de vitrage</p>
<p>Yau et al., 2017</p>		<p>Étude du vitrage performant pour les bureaux</p>
<p>León-Rodríguez et al., 2017</p>		<p>Conception et performance des cellules de tests comme modèle d'évaluation énergétique</p>

<p>Casas et al., 2017</p>		<p>Étude et validation d'une façade double peau</p>
<p>Arranz et al., 2017</p>		<p>Évaluation de la performance d'un nouveau vitrage</p>
<p>Torres-Rivas et al., 2018</p>		<p>Optimisation multi-objectif des matériaux d'isolation thermique</p>
<p>Ibáñez-Puy et al., 2018</p>		<p>Analyse énergétique d'une enveloppe thermoélectrique active ventilée</p>

Tableau 2-ch5: Exemples de cellules tests réalisés à une échelle réduite (Khadraoui, 2019)

La référence	Illustration	L'élément étudié
Ahmad, 2004		L'impact des isolants et les matériaux à changement de phase (MCP)
Cheng et al., 2005		L'influence de la couleur de l'enveloppe sur la température intérieure
Levinson et al., 2007		L'impact de la couleur de la tuile
Doya et al., 2012		Cool façades et leurs impacts sur le micro climat urbain
Entrop et al., 2011		l'utilisation de matériaux à changement de phase micro encapsulés

<p>Elghawaby, 2013</p>		<p>Le mur respirant (inspiration de la nature ou biomimétisme)</p>
<p>Ibrahim, 2014</p>		<p>Les conduites de fluide dans la façade</p>
<p>La roche et al., 2014</p>		<p>Confort et économies d'énergie avec les toits verts actifs</p>
<p>Ghosh et al., 2016</p>		<p>Étude du comportement des vitrages (double et SPD)</p>
<p>Cornaro et al., 2017</p>		<p>Les matériaux à changement de phase (MCP)</p>

<p>Photo prise par l'auteur, 2017 (CSTB-Grenoble)</p>		<p>Les matériaux</p>
<p>Florentin et al., 2017</p>		<p>Étude des matériaux de construction bio-composite à base de chanvre-chaux</p>
<p>Young et al., 2018</p>		<p>Évaluation de l'enveloppe composite avec un matériau MCP</p>
<p>Gounni et al., 2018</p>		<p>Étude de l'emplacement optimal de la couche du MCP</p>
<p>Vox et al., 2018</p>		<p>Étude de l'impact de la façade végétalisée sur la température du bâtiment</p>

<p>Khadraoui, 2019</p>		<p>Etude de façades double- peau</p>
----------------------------	--	--

3 Données climatiques utilisées dans le travail expérimental :

Biskra est située dans la région sud-est de l'Algérie (+34,48°N, +5,73°E). Elle se caractérise par un climat chaud et sec en été. Les étés dans la région sont caractérisés par une très faible humidité avec ciel souvent clair, et des rayonnements très importants qui peuvent être directs ou diffus. La durée très longue le jour est et un ensoleillement atteint le solstice d'été, soit près de 16 heures.

3.1 Données du mois d'août :

3.1.1 Température : d'après Weatherspark, 2017

- La température maximale journalière a baissé de 3°C, passant de 40°C à 37°C, dépassant rarement les 44°C.
- La température maximale moyenne journalière la plus élevée le 3 août était de 40 °C. (Août 2018).
- Les températures minimales journalières ont baissé de 2°C, dépassant quelques fois les 32°C.
- La température minimale moyenne journalière maximale le 6 août est de 28 °C.
- Pour référence, le 1er août, le jour le plus chaud de cette année, la température moyenne à Biskra est 40°C.

Les caractéristiques et les composants de la façade sont choisis de manière adéquate, de sorte que le matériau est primordial pour contrôler l'échange de chaleur et augmenter l'efficacité énergétique.

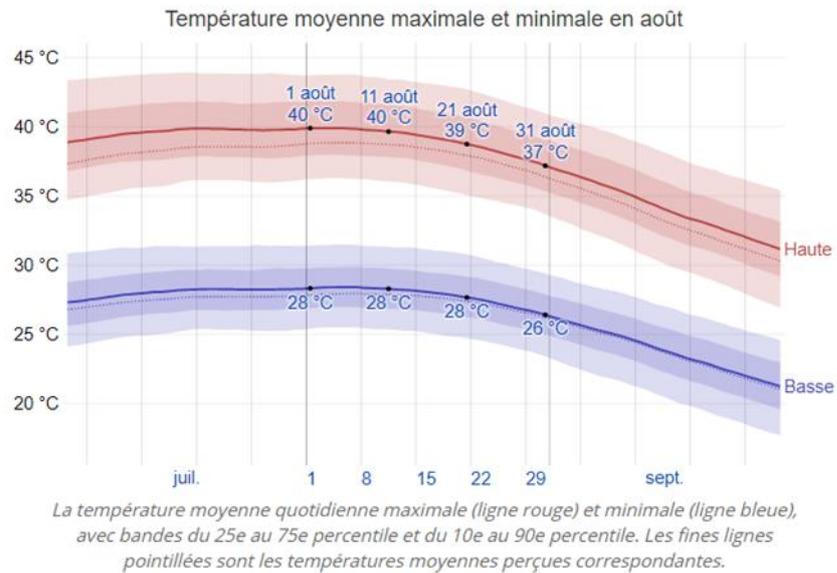


Figure 1-ch5 la température moyenne du mois d'août diurne(Weatherspark, 2017)

Le graphique ci-dessous montre la température horaire moyenne trimestrielle centrée sur le mois d'août. L'axe horizontal représente le jour, l'axe vertical représente l'heure de la journée et les couleurs représentent la température moyenne de la journée.

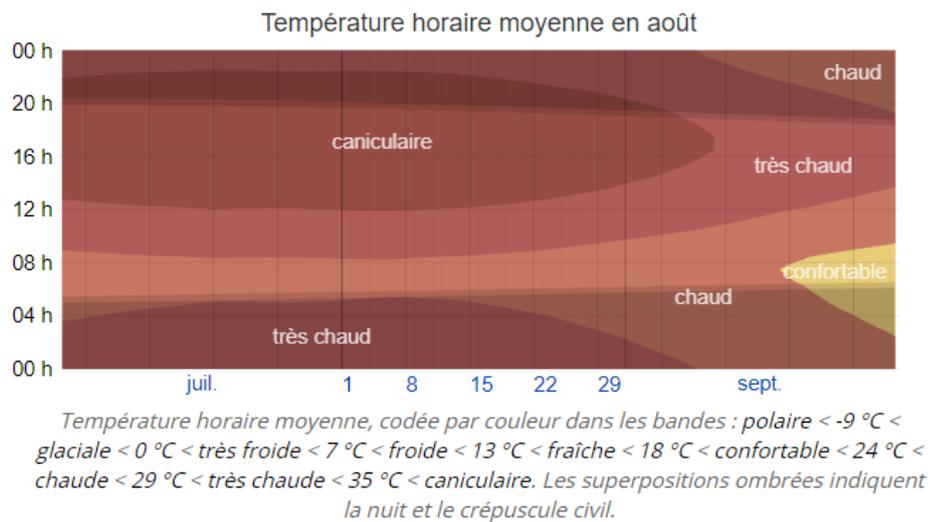


Figure 2-ch5 la température moyenne du mois d'août nocturne(Weatherspark, 2017)

3.1.2 Couverture nuageuse (nébulosité) :

La couverture nuageuse à Biskra augmente en août, le pourcentage de ciel couvert ou partiellement nuageux passant de 6 % à 17 %.

La journée la plus dégagée du mois d'août est le 1er. Le ciel est dégagé à 94 %.

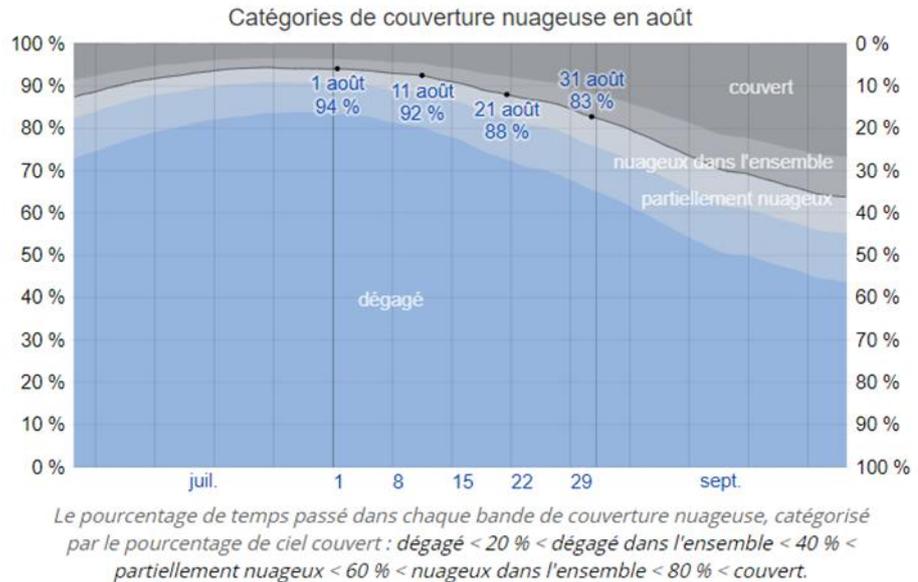


Figure 3-ch5 la couverture nuageuse du mois d'août(Weatherspark, 2017)

3.1.3 Précipitations

Un jour de précipitations est au moins 1 mm est mesuré dans l'eau. À Biskra, il est probable de précipitations en août augmente, atteignant 4 % au début du mois d'août et 8 % en fin de ce dernier.

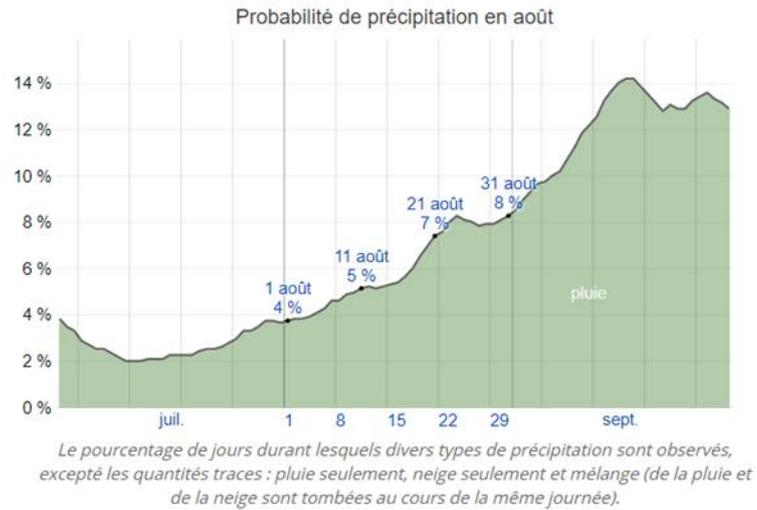


Figure 4-5 Probabilité de précipitation du mois d'août (Weatherspark, 2017)

3.1.4 La pluie

La pluviométrie moyenne (la période des 31 jours en août) à Biskra augmente très peu, commençant le mois à 5 mm et rarement supérieure à 13 mm, et terminant le mois à 13 millimètres et rarement supérieure à 28 millimètres ou inférieure à 5 millimètres.

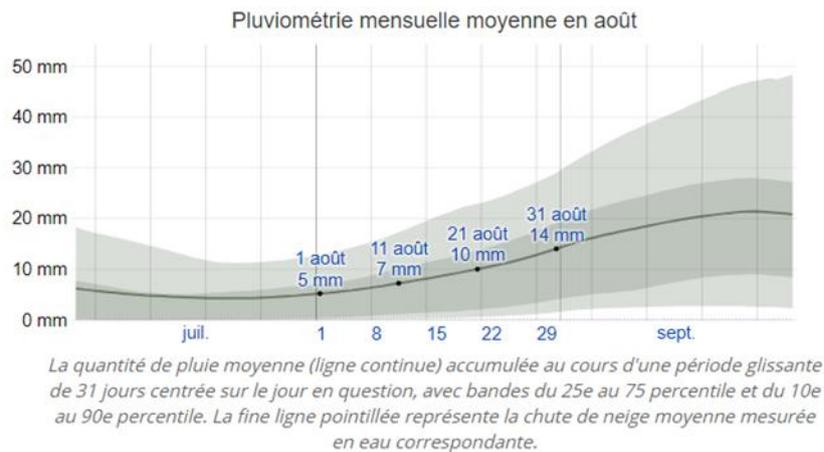


Figure 5-5 Pluviométrie du mois d'août (Weatherspark, 2017)

3.1.5 Humidité

Le confort est estimé en fonction de l'humidité au point de rosée, en déterminant l'évaporation de la sueur évaporée de la peau, ce qui refroidit le corps. Un point de rosée bas est un environnement plus sec et un point plus élevé est un environnement plus humide. Contrairement à la température, qui change beaucoup entre jour et nuit. Ainsi, les journées humides sont souvent suivies de nuits humides, bien que les températures nocturnes puissent chuter.

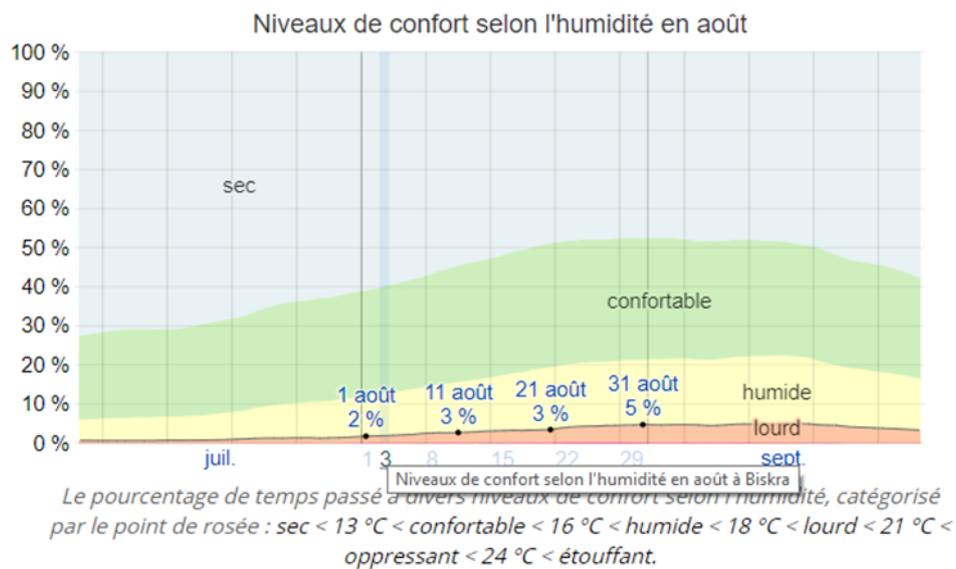


Figure 6-ch5 Niveaux du confort selon l'humidité du mois d'août (Weatherspark, 2017)

3.1.6 Les Vents

La vitesse horaire moyenne du vent à Biskra est restée essentiellement constante en août, à 0,2 mph de 18,6 mph.

La vitesse quotidienne moyenne du vent la plus basse en août était de 11,4 km/h le 29 août.

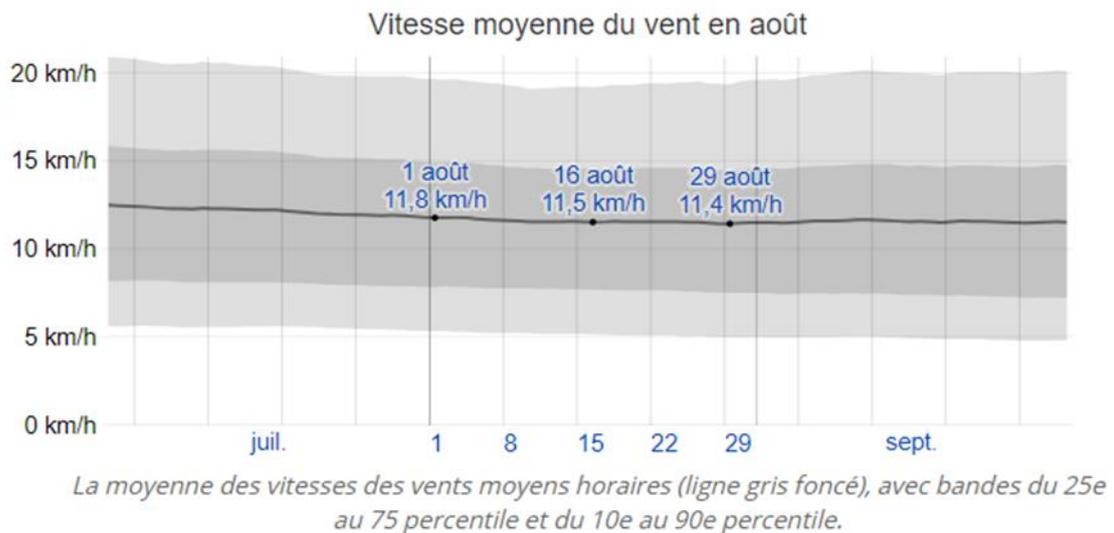


Figure 7-ch5 la température moyenne du mois d'août(Weatherspark, 2017)

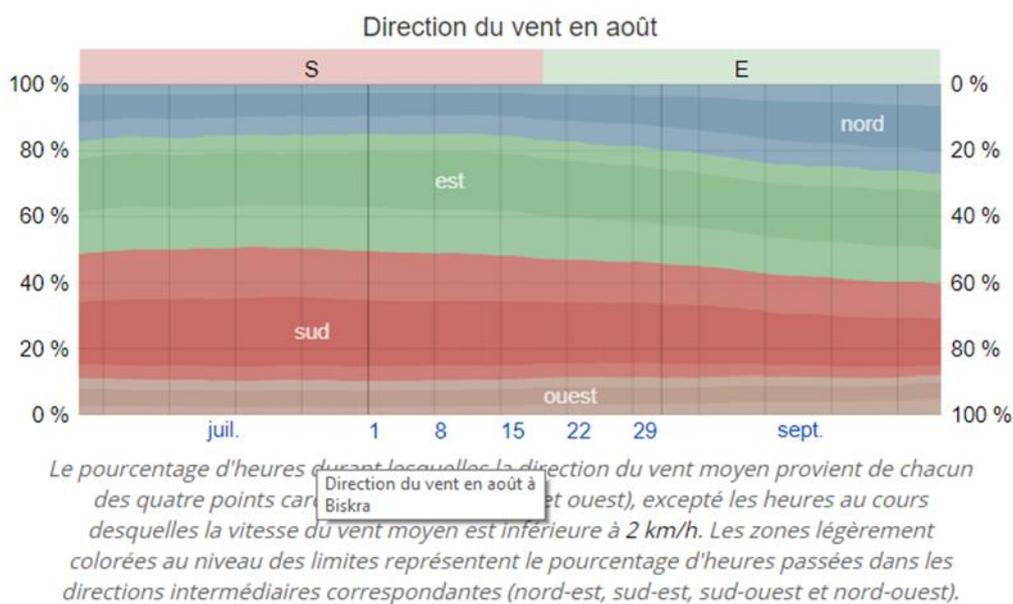


Figure 8-ch5 la direction des vents du mois d'août(Weatherspark, 2017)

3.1.7 Rayonnement solaire

À Biskra, le rayonnement solaire incident quotidien moyen en ondes courtes a diminué de 1,1 kWh en août, passant de 7,5 kWh à 6,5 kWh au cours du mois d'août.

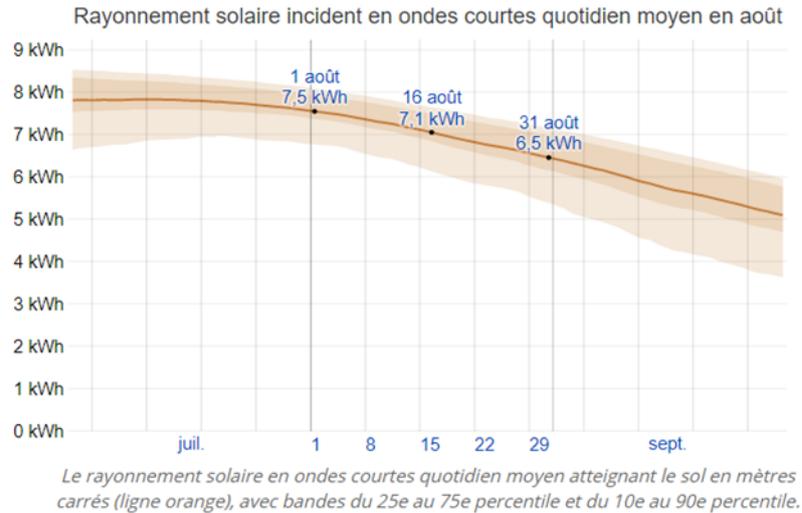
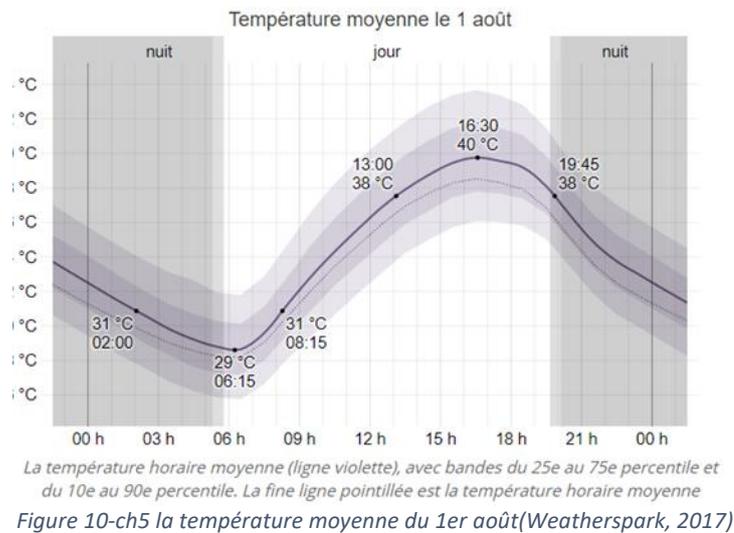


Figure 9-ch5 le rayonnement solaire du mois d'août(Weatherspark, 2017)

3.2 Données du 1er août



- Le 1er août, la température à Biskra varie généralement entre 29 °C et 40 °C, tombant rarement en dessous de 26 °C ou au-dessus de 44 °C.
- Le 1er août est la journée la plus chaude de l'année.
- L'heure où la température la plus basse de la journée est à 2h00.
- L'heure la plus chaude de la journée est de 13h00 à 19h45 et la température la plus chaude est de 16h30, avec trois jours sur quatre au-dessus de 38°C et neuf jours sur dix au-dessus de 36°C.

- Il atteint la moitié de la température maximale de la journée à 10h30 et redescend à 22h00.

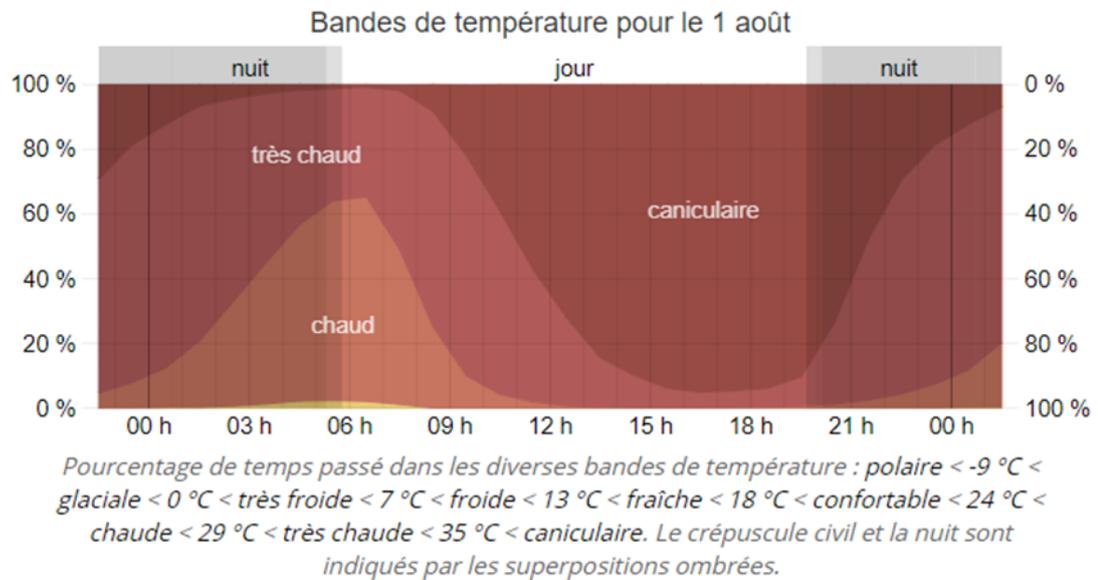


Figure 11-5 Bandes de sensation de chaleur du 1^{er} août(Weatherspark, 2017)

3.2.1 Soleil

À Biskra le 1^{er} août, le soleil se lève à 5h46 et se couche à 19h39. Le midi solaire est à 12h43.

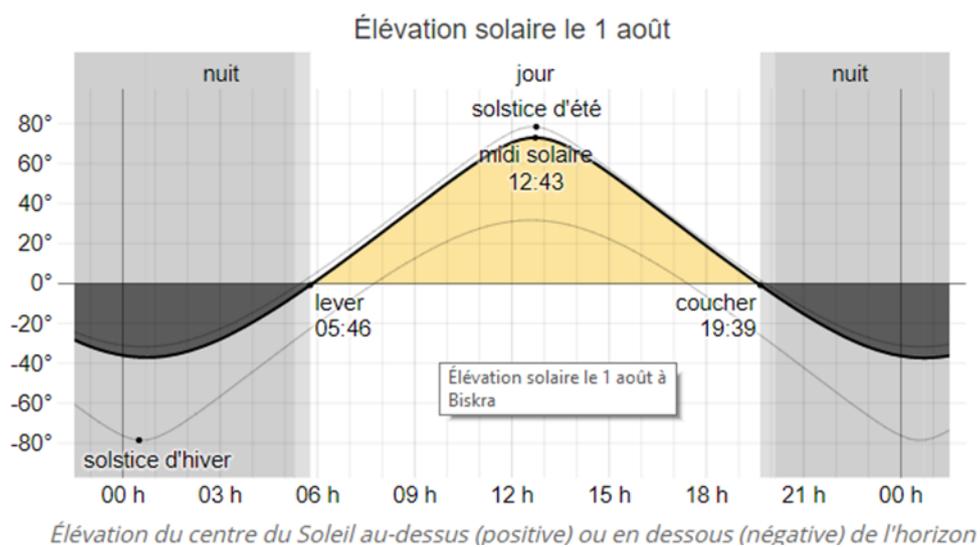


Figure 12-ch5 Élévation solaire du 1^{er} août(Weatherspark, 2017)

La probabilité de climat lourd à Biskra le 1er août ne varie pas beaucoup au cours de la journée, se maintenant à 2 %.

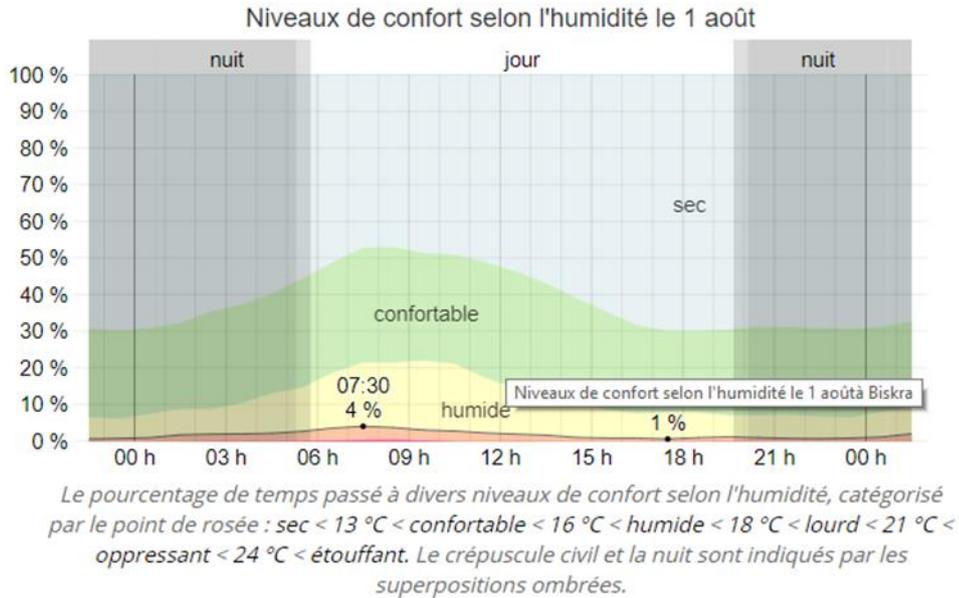


Figure 13-ch5 niveau du confort du 1er août(Weatherspark, 2017)

3.2.2 Rayonnement solaire à ondes courtes

Le rayonnement solaire incident maximal était de 0,94 kilowatt vers 12h45.

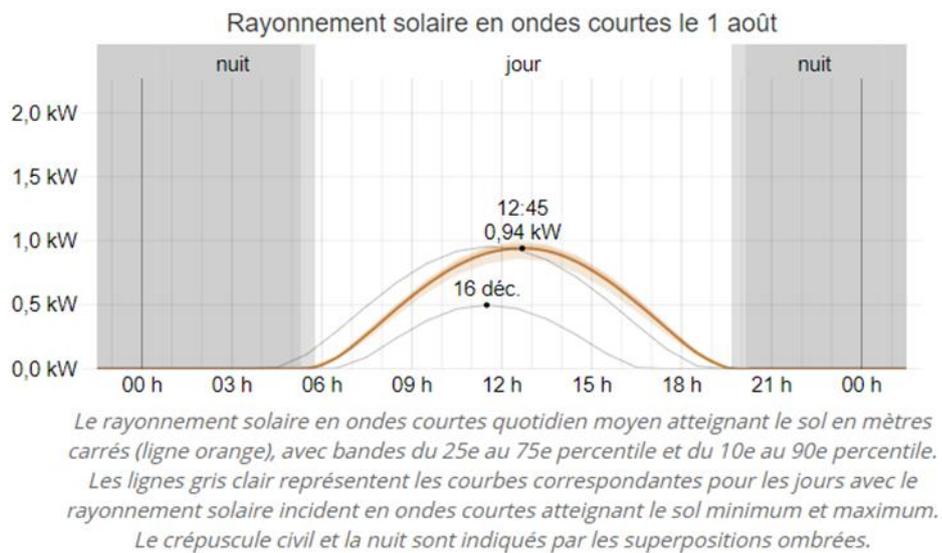


Figure 14-ch5 Rayonnement solaire du 1er août(Weatherspark, 2017)

3.3 Données du 11 août

- Le 11 août, les températures varient entre 29 °C et 40 °C, tombant rarement en dessous de 26 °C ou au-dessus de 43 °C.
- Les plus basses températures sont entre 2h15 et 8h15, la température la plus basse est à 6h15, trois jours sur quatre sont en dessous de 30°C et neuf jours sur dix sont en dessous de 32°C.
- Les plus hautes températures sont entre 13h00 à 19h45 et la température la plus chaude est de 16h30, avec trois jours sur quatre au-dessus de 38°C et neuf jours sur dix au-dessus de 36°C.
- À 10h30, elle atteint la moitié de la température maximale de la journée et redescend à 22h00.

Le graphique ci-dessous montre un profil concis de la plage de température du 11 août reflétant les données historiques. L'axe horizontal représente l'heure de la journée et les zones colorées représentent le pourcentage d'heures passées dans différentes plages de température.

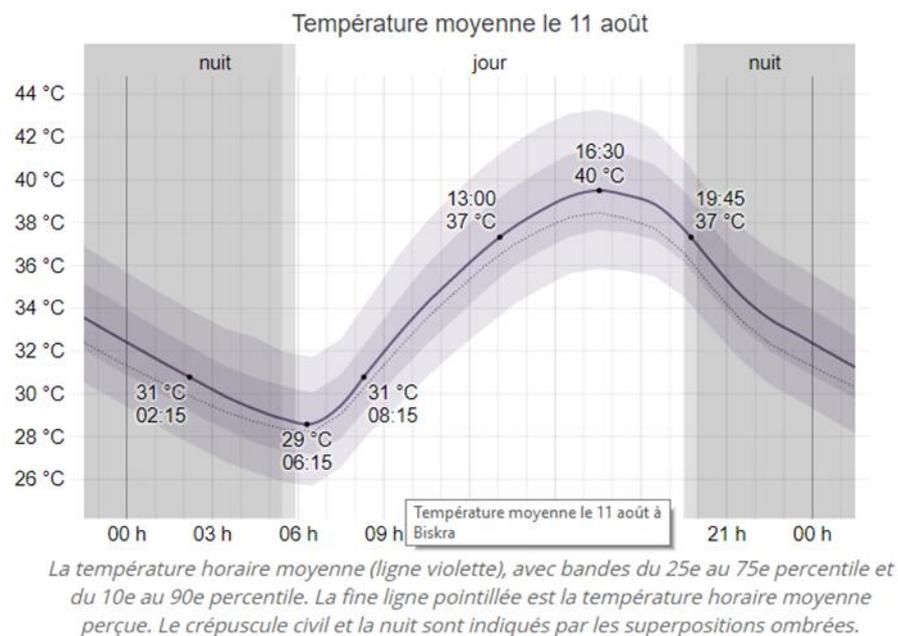


Figure 15-ch5 la température moyenne du 11 août(Weatherspark, 2017)

3.3.1 Soleil

À Biskra le 11 août, le soleil se lève à 5h54 et se couche 13 heures et 36 minutes plus tard à 19h29. Le midi solaire est à 12h42.

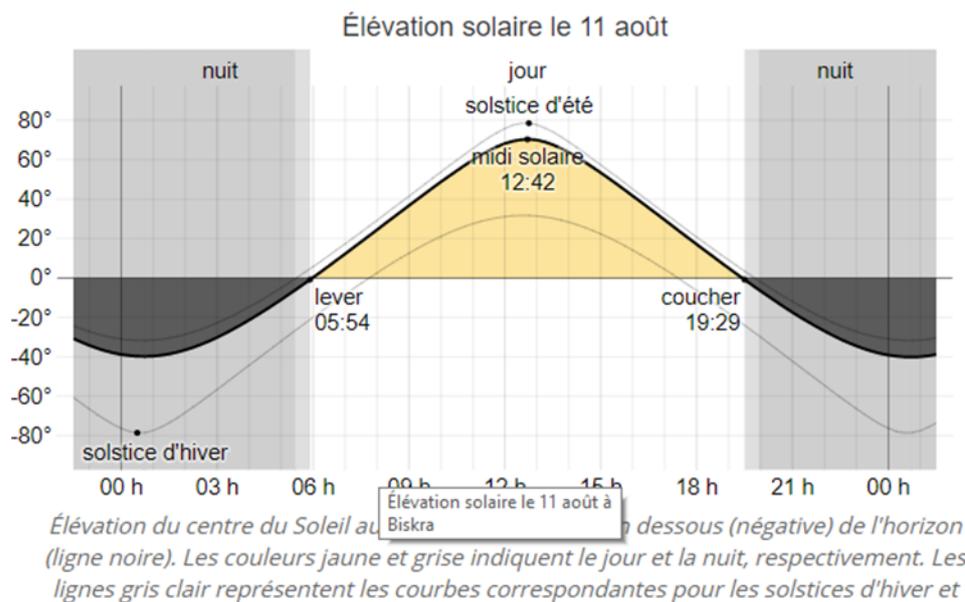


Figure 16-ch5 élévation solaire août(Weatherspark, 2017)

3.3.2 Humidité

Le 11 août à Biskra, la probabilité de temps lourd tout au long de la journée a peu changé, se maintenant à 3 %.

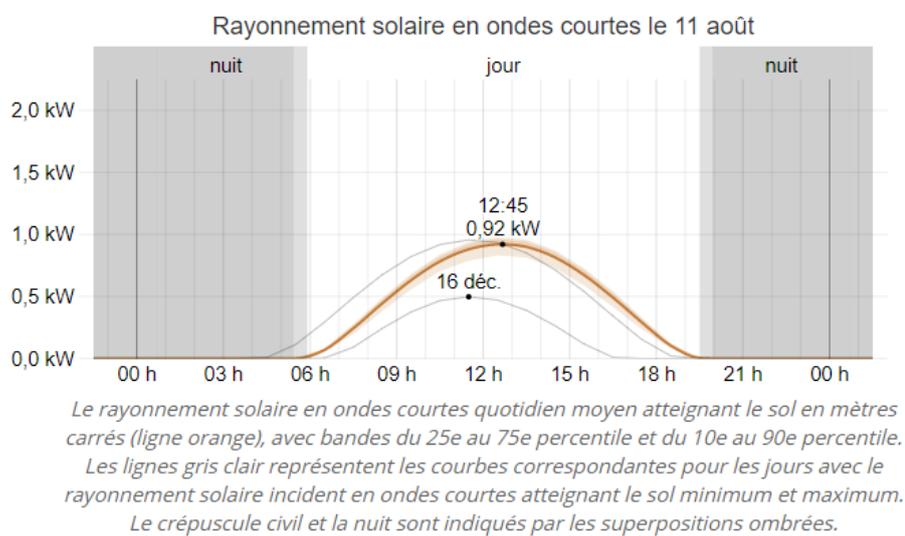


Figure 17-ch5 rayonnement solaire 11 août(Weatherspark, 2017)

3.3.3 Rayonnement solaire à ondes courtes

Le rayonnement solaire incident maximal à ondes courtes par mètre carré était de 0,92 kilowatt vers 12h45(Weatherspark, 2017).

3.4 Données du 21 août

- Le 21 août, les températures à Biskra sont entre 28 °C et 39 °C, tombant rarement en dessous de 25 °C ou au-dessus de 42 °C.
- La plus basse température est entre 2h15 à 8h15, l'heure la plus froide était de 6h15, trois jours sur quatre étaient en dessous de 30°C et neuf jours sur dix étaient en dessous de 31°C.
- La plus haute température est entre 13h00 à 19h30 et la température la plus chaude est 16h30, avec trois jours sur quatre au-dessus de 37°C et neuf jours sur dix au-dessus de 35°C.
- À 10h15, la moitié de la température maximale de la journée est atteinte,

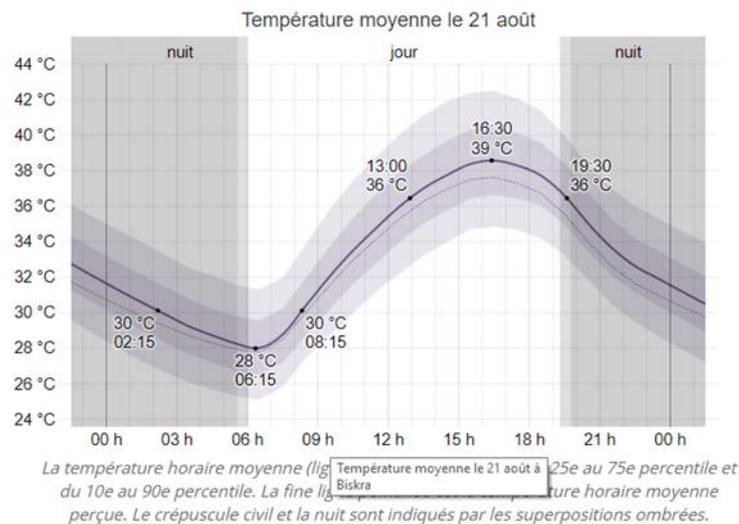


Figure 18-ch5 la température moyenne du 21 août(Weatherspark, 2017)

Le graphique ci-dessous montre un profil concis de la plage de température du 21 août reflétant les données historiques. L'axe horizontal représente l'heure de la journée et les zones colorées sont les heures passées dans différentes plages de température.

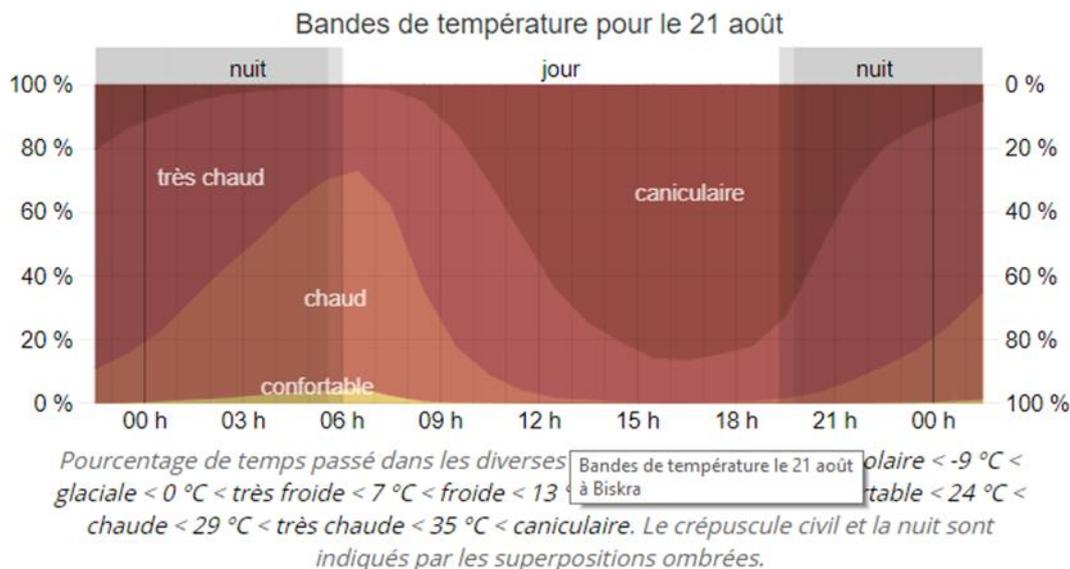


Figure 19-ch5 bandes de température 21 août(Weatherspark, 2017)

3.4.1 Soleil

Le 21 août à Biskra, le soleil s'est levé à 6h01 et s'est couché à 19h18 13 heures et 17 minutes plus tard. Le midi solaire est à 12h40.

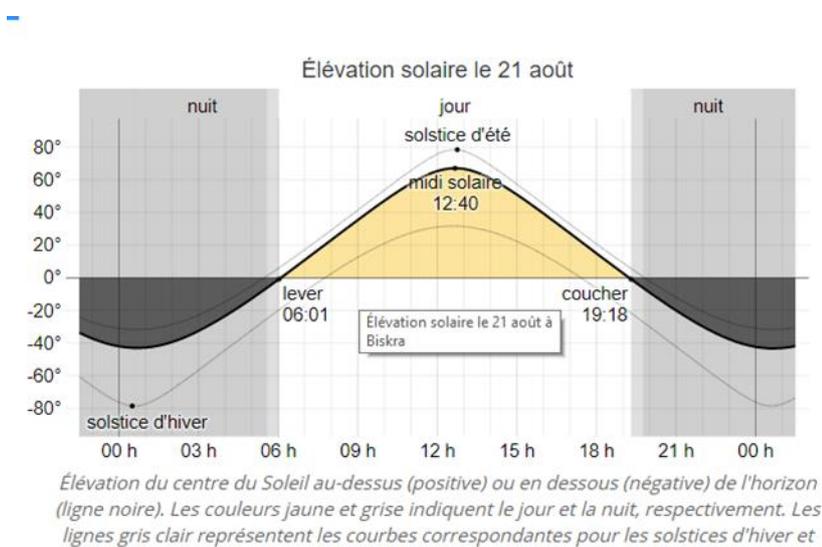


Figure 20-ch5 élévation solaire 21 août(Weatherspark, 2017)

3.4.2 Rayonnement solaire à ondes courtes

Le rayonnement solaire incident maximal était de 0,89 kilowatt vers 12h45.

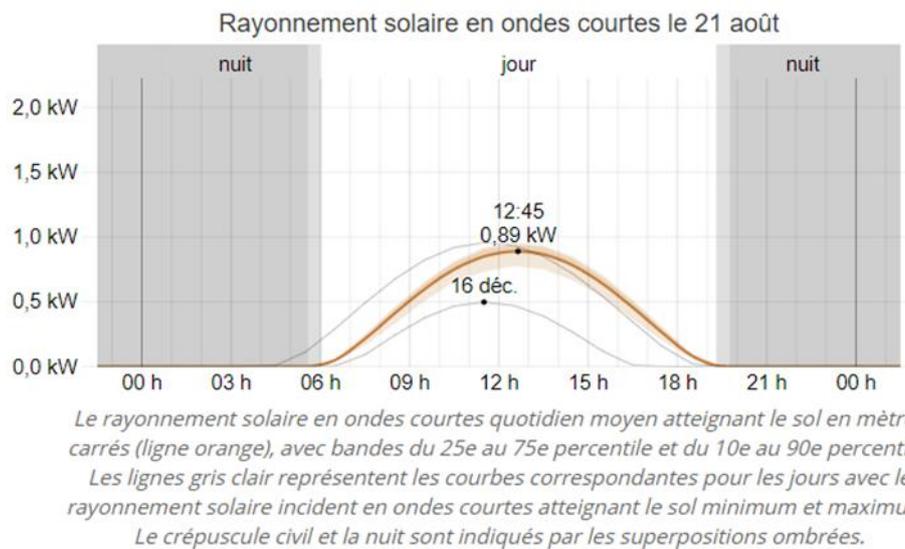


Figure 21-ch5 rayonnement solaire 21 août(Weatherspark, 2017)

3.5 Données au 31 août

Le 31 août, les températures à Biskra sont entre 27°C et 37°C, tombant rarement en dessous de 24°C ou au-dessus de 41°C.

La période la plus fraîche est de 2h15 à 8h15, la température la plus froide est de 6h30, trois jours sur quatre sont en dessous de 28°C et neuf jours sur dix sont en dessous de 30°C.

La période la plus chaude de la journée était de 12h45 à 19h30, l'heure la plus chaude était 16h15, trois jours sur quatre étaient au-dessus de 35°C et neuf jours sur dix étaient au-dessus de 33°C.

Il atteint la moitié de la température la plus élevée de la journée à 10h15 et redescend à 21h45.

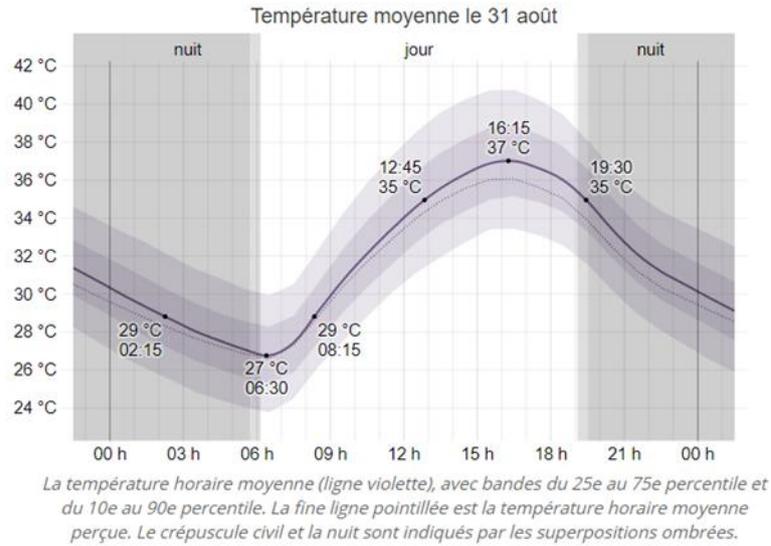


Figure 22-ch5 la température moyenne du 31 août (Weatherspark, 2017)

Le graphique ci-dessous montre un profil concis de la plage de température au 31 août reflétant les données historiques. L'axe horizontal représente l'heure de la journée et les zones colorées montrent le pourcentage des heures passées dans différentes plages de température.

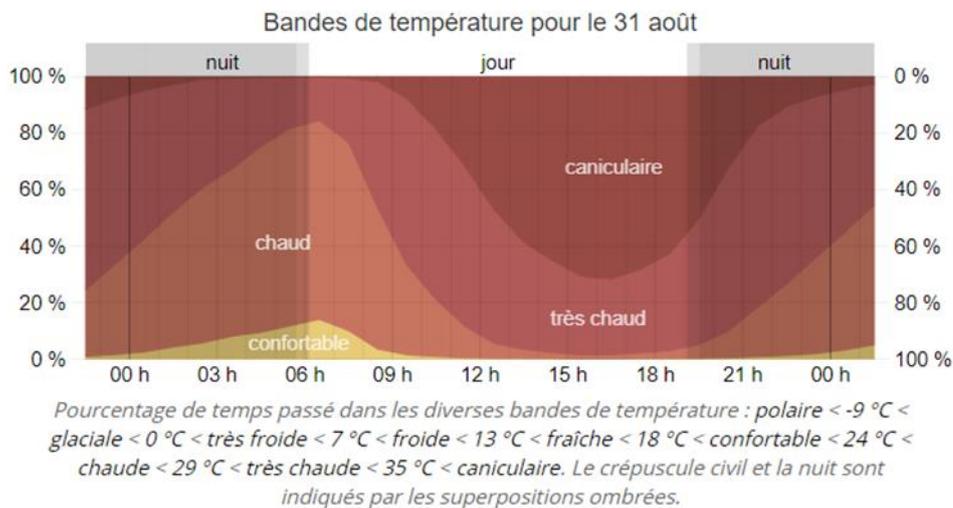


Figure 23-ch5 bandes de sensation de chaleur 31 août(Weatherspark, 2017)

3.5.1 Le Soleil

À Biskra le 31 août, le soleil se lève à 6h09 et se couche 12 heures et 56 minutes plus tard à 19h05. Le midi solaire est à 12h37.

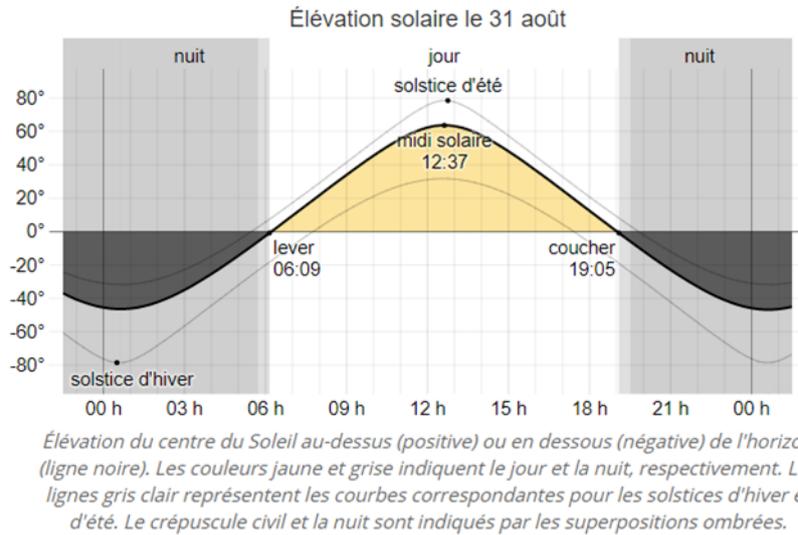


Figure 24-ch5 élévation solaire le 31 août(Weatherspark, 2017)

3.5.2 Rayonnement solaire

Vers 12h30, le rayonnement solaire incident maximal est de 0,86 kilowatt.

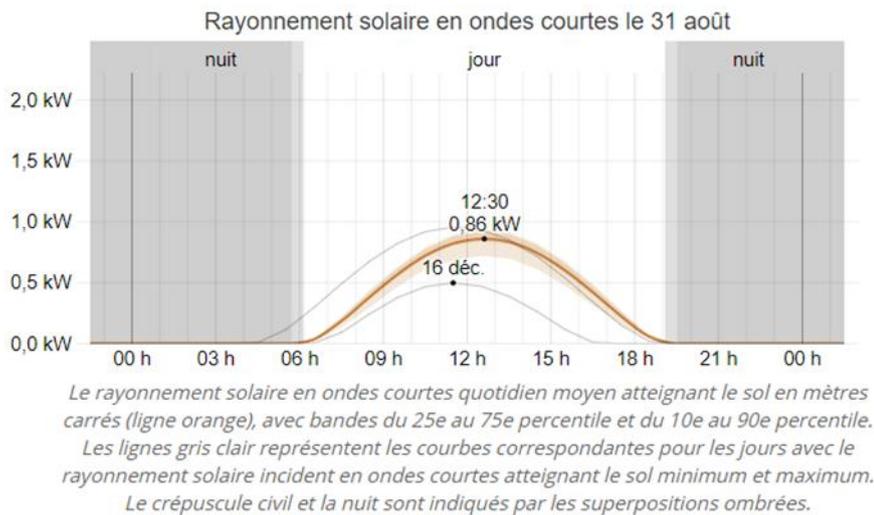


Figure 25-ch5 rayonnement solaire du 31 août(Weatherspark, 2017)

4 Développement des matériaux BTSC :

4.1 Matériaux utilisés

Cette technique est une évolution moderne des mottes moulées et plus souvent appelées blocs d'adobe. Au lieu de les façonner à la main dans le cache en bois, les briques sont obtenues en comprimant la terre, dans laquelle elle est légèrement humide

Presse en métal. Par rapport aux lingots coulés à la main, la forme du BTC est très régulière, Il est plus grand en taille, en densité et a une optimale résistance à la compression et à l'eau aussi(Houben, Verney, Olivier, Mesbah, & Michel, 1987). Les matériaux utilisés pour fabriquer le BTSC sont la terre, le sable concassé (dunes), le ciment, et de l'eau. Nous ne présenterons que les résultats d'études sur les propriétés de la composition du matériau, les doses et mélanges employés, les méthodes de moulage et les techniques de séchage.

4.1.1 Terre

4.1.1.1 La source du sol

Le sol est pris de la région de Biskra (Algérie), choisi pour sa disponibilité dans la région et son abondance.

4.1.1.2 Propriétés physiques du sol

Avant de tester le sol, il est écrêté à 2 mm et que les particules les plus fines ne devaient pas former de nodules supérieurs à 10 mm : (50 % de taille plus à 5 mm) (Houben & Guillaud, 1994)

La résistance à la compression peut être réduite de moitié bien dans les limites préconisées par la norme XP P 13-901 pour la compression des mottes selon la courbe granulométrique du sol. La norme recommande que le sol utilisé pour fabriquer le BTC ne soit pas trop visqueux sous peine de provoquer des fissures de retrait fragilisant le bloc ($\% 2\mu\text{m} < 30\%$) (Abbou, Semcha, & Kazi-Aoual, 2020).

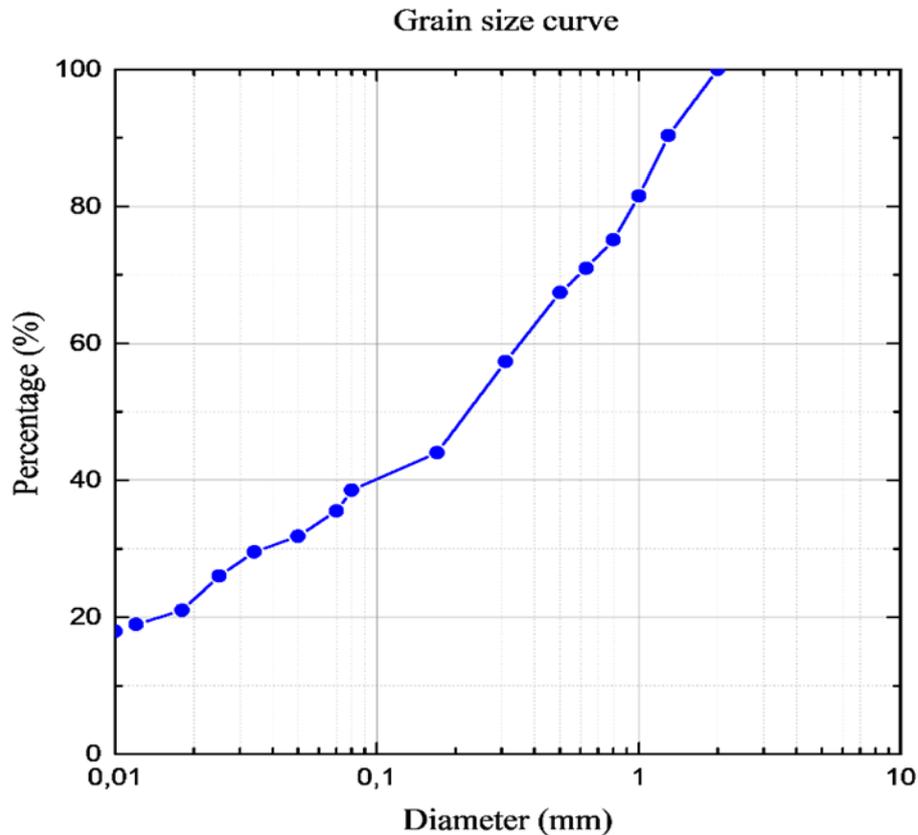


Figure 26-ch5 courbe granulométrique du sol fait par auteur.

4.1.1.3 Les masses volumiques du sol

<i>Masse volumique apparente (kg/m³)</i>	<i>Masse volumique absolue (kg/m³)</i>
1211	2580

Tableau 3-5 la masse volumique du sol utilisée, fait par auteur

Le tableau montre les masses volumiques apparentes et absolues du sol utilisé à Biskra.

4.1.1.4 Limite d'Atterberg

La limite d'Atterberg permet d'analyser la variation de la consistance d'un sol fin avec l'évolution de la teneur en eau. Quant à la granulométrie, des recherches ont été menées pour définir ces limites les plus adaptées aux sols et prédire rapidement les possibilités constructives du sol. Les essais définis sont réalisés sur mortier de sol ($d < 0,4$ mm) selon le mode opératoire de la norme NF P 94 051 (Mango-Itulamy, Collin, Pilate, Courtejoie, & Fagel, 2019).

Avec ce sol, nous avons obtenu une limite de plasticité qui se situe quasiment dans la limite la mieux adaptée à la compression des blocs de sol (norme XP P13-901). Cette norme préconise que le sol doit avoir une plasticité minimale pour assurer une homogénéité entre les particules du matériau au moment du compactage ($\% 2\mu\text{m} > 5\%$).

4.1.1.5 Classement géotechnique

D'après la classification INRA des "triangles texturés", on peut dire qu'il s'agit d'un loam sableux, qui se prête généralement très bien à la stabilisation des sols.

Le sol doit avoir une bonne cohésion naturelle après mise en forme, une teneur en argile élevée (supérieure à 10%). le grain qui assure l'efficacité du ciment (Taallah, 2014). Notre sol est un sol avec 71% de sable, 23% de limon et 16% d'argile, la valeur du bleu de méthylène est de 1,37, donc la nature du sol utilisé est un limon sableux

4.1.1.6 Analyse chimique et minéralogique.

Elle peut démontrer la teneur en particules nocives telles que les sulfates. Comme le sulfate de calcium. Malheureusement, sa présence est associée à des dommages aux constructions en terre.

Dans le cas des sols de compression et de stabilisation, le sulfate peut également nuire au ciment utilisé à l'intérieur du matériau déjà sec. Dans ce cas, des études particulières doivent être réalisées sur des sols dont la teneur en sulfate est supérieure à 2 à 3 % (Doat, Hays, Houben, Matuk, & Vitoux, 1979).

L'analyse minéralogique est également très importante pour distinguer les différents types d'argiles. Et effectuer des analyses de composition chimique et minérale.

Minéraux	quartz	Gypse	muscovite	kaolinite	calcite	Feldespat k	Minéraux ferrugineux +fond RX
Teneurs(%)	30	29.5	-----	6	30.06	4	0.9

Tableau 4-ch5 analyse minéralogique du sol utilisé (source : Auteur)

Cette analyse montre un pourcentage élevé de gypse (29,5 %), donc un pourcentage très élevé de trioxyde de soufre dans le sol.

Le sol a également de grandes quantités de quartz et de calcite, tandis que la kaolinite est faible.

4.1.1.7 Matière organique

Tout type de sols peut contenir des matières organiques (micro-organismes ...) et certains acides humiques qui sont néfastes à la stabilisation, :(car ils retardent ou pire encore annulent la prise des liants hydrauliques).

L'utilisation en grande quantité de la matière organique doit être évitée, car cela peut réduire considérablement la compressibilité voire l'instabilité du sol(Taallah, 2014).

En général, jusqu'à l'obtention de connaissances plus fiables, il est admis de ne pas utiliser de sols à plus de 2 % de matière organique, et l'utilisation de sols à 1 % de matière organique est considérée comme risquée. Matière organique (Doat et al., 1979). Un autre seuil a été proposé par Vénuat (Vénuat, 1980) : « Fixer le traitement du sol au maximum à la limite à 2 %, faute de mieux ». Cette limite correspond au contenu organique total. Kujala recommande de fixer un seuil d'humus d'environ 2 % pour le retard et de 3,5 % pour l'inhibition(Kujala, Mäkikyrö, & Lehto, 1996). Tremblay a déclaré que la limite de stabilité pour les matières organiques est de 3 % (H. Abdelhamid, 2019; Tremblay, Duchesne, Locat, & Leroueil, 2002). L'analyse de notre sol a montré un taux de matière organique de 1,02%, ce qui n'est pas supérieur à 2%, ce qui représente la limite suggérée par Doat.

4.1.2 Analyse physique et chimique

4.1.2.1 Mesure du pH

La mesure est effectuée par un pH-mètre (une suspension de 10 grammes de matière sèche) dans 100 mL d'eau distillée. Les mesures de pH peuvent donner des informations précieuses sur la dominance de la matière organique évoluée ou des carbonates(Taallah, Guettala, Guettala, & Kriker, 2014).

L'analyse du sol utilisé a montré un pH de 8,30. Selon Vilenkina et Guettala, pour qu'un sol soit apte à la stabilisation, son pH doit être plus de 6. Si le pH est moins à 6, le sol doit être prétraité(G. Abdelhamid & Mohamed, 1998; S. Guettala & Mezghiche, 2011).

De manière générale, les sols à pH élevé sont plus résistants, comme c'est le cas de notre sol d'étude.

4.1.3 Sable concassé

Le sable utilisé dans le mélange de briques et du sable concassé est d'une carrière de la région de Biskra (Algérie). Principalement utilisée pour la correction de la taille des particules au sol, la composition particulière du sable est indiquée dans le tableau ci-dessous

MV_{app} (Kg/m ³)	MV_{abs} (Kg/m ³)	Distribution de la taille des grains (%)			M_f	ES (%)	
		0.01- 0.08 mm	0.08- 1.25 mm	1.25- 5 mm		visuel	Au piston
1445	2600	3.25	52.83	43.92	3.08	66.2	62.5

Tableau 5-ch5 composition granulaire du sol utilisé (source : Auteur)

MV_{app} : Masse volumique apparente ;

MV_{abs} : Masse volumique absolue ;

M_f : Module de finesse ;

ES : Equivalent de sable

4.1.4 Ciment

Compte tenu de la forte teneur en sulfates des sols étudiés, pour assurer une bonne durabilité des briques, le ciment CPA-CEM I 42.5 ES a été utilisé,(à 95% de clinker et à 5% de composition de gypse). L'analyse chimique du clinker a montré la conformité à la NFP 15-301(Bogue, 1955).

C'est type de ciment résistant aux sulfates CRS

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	CT	K_2O	Na_2O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
22.17	4.53	5.04	64.55	1.02	1.34	0.00	0.42	0.21	1.09	0.94	0.8

Tableau 6-ch5 analyse chimique du ciment (source : Auteur)

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
51.20	21.16	3.10	12.42

Tableau 7-ch5 La composition chimique du clinker (%). (Source : Auteur)

désignation du ciment	Masse volumique apparente	Masse volumique absolue
CPA-CEM I 42.5 ES	1.144	3.232

Tableau 8-ch5 La composition minéralogique du clinker (%). (Source : Auteur)

4.1.5 L'eau

L'eau de l'expérience est :

- Peu sulfatée,
- À une température de $20 \pm 1^\circ\text{C}$,
- Une qualité répondant aux exigences de la norme NFP 18-404.

4.1.6 Paille d'orge non coupée pour l'isolation

La région de Biskra est riche en paille d'orge. Selon le marché, la longueur de la paille est mesurée entre 5 et 65 cm. Les plantes ont 5 à 6 nœuds à maturité.

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	Kg/m^3	215
Absorption d'eau	%	422
Diamètre	mm	1-4
Longueur	mm	10-40

Tableau 9-ch5 caractéristiques de la paille utilisée (source : Auteur)

4.2 Confection des briques

4.2.1 Équipement spécifique

Selon la méthode proposée par APMC. Pour la préparation du mélange, nous nous sommes également appuyés sur la recherche faite par Guettala et al (G. Abdelhamid & Mohamed, 1998), qui ont montré que les fortes doses de sable dans le matériau n'avaient pas d'effet important sur la résistance mécanique, les doses comprises entre 25% et 40% donnaient des rendements meilleurs.

Par conséquent, 30 % de sable concassé ont été ajoutés au mélange utilisé dans cette étude. Sachant que le poids du mélange sec global par bloc reste le même.

À toutes les étapes de cette étude, elle a été prise égale à 2 500 kg,

Pour la confection des briques, nous avons conçu un moule d'après le modèle, il est en acier trempé, 5 parties assemblées pour former le volume de 10x10x20 cm³. Ce moule est équipé de pistons pour assurer le transfert des efforts de compactage. Le schéma du moule dans la presse est illustré sur la photo, ce traitement est effectué sur un sol trop humide et plastique.

Nous utilisons :

- D'abord, les faibles niveaux de chaux, puis le ciment. Les deux stabilisateurs ne sont pas compétitifs, mais complémentaires.
- Un traitement préalable à la chaux permet le séchage
- Sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux la rend poudreuse et cassante, donc, le plus approprié pour un mélange ultérieur avec du ciment. Plus gros que la chaux pour gagner en résistance mécanique dès le départ et le nombre de jours de traitement. À notre connaissance, il n'existe actuellement aucune étude sur ce mécanisme.

De toute évidence, on peut considérer que :

- Le ciment a le même effet stabilisant que la chaux. hydrate formé
- Les silicates de chaux libre et de ciment s'accumuleront avec le calcium du ciment



Figure 27-28-29-ch5 Appareillages utilisé pour la confection des briques (source : Auteur)

4.3 Mélanges

Le mélange a été préparé selon la méthode proposée par APMC (Agence de production des matériaux de construction), appuyée sur l'étude de Guettala et al (A. Guettala, Abibsi, & Houari, 2006), qui stipule que le dosage en sable avait peu d'effet sur le rendement mécanique.

Alors qu'entre 25% et 40%, les dosages intermédiaires produiront les meilleurs résultats. Par conséquent, 30 % de sable concassé ont été ajoutés au mélange utilisé pour notre expérience.

Le poids sec du mélange total par brique a été maintenu le même pendant toutes les phases de l'étude et a été pris égal à 2 kg.



Figure 28-ch5 Malaxeur de sol

4.3.1 Compactage du mélange

Habituellement, le mélange est compacté par une presse hydraulique en mode statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse +matrice + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. Compacter jusqu'à ce que l'écran de lecture de la pression souhaitée s'affiche. Une contrainte de compactage de l'ordre de 5 à 10 MPa a été appliquée tout au long de l'étude. Mais les briques de cette étude ont été réalisés dans une presse dynamique qui pétrit et compacte le mélange à une contrainte de 10 MPa. (Nous avons changé les moules en moules parallélépipédiques. Parce que les moules d'origine sont des moules cylindriques). Et démouler immédiatement après compactage.



Figure 29-ch5 Malaxeur de sol

4.3.2 Traitement des blocs

Comme le béton, la résistance des liants du sol augmente avec l'âge. Tous les sols ne se comportent pas de la même manière, mais une période de cure de 10 jours est essentielle. Pendant cette période, le matériau sera conservé en atmosphère humide, à l'abri du soleil, et à l'abri du vent, ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions réelles de stockage, les blocs doivent être protégés par du plastique pendant quelques jours avant utilisation.



Figure 30-ch5 Le moulage des briques (source : Auteur)

Les blocs démoulés sont sortis à la main en prenant soin de ne pas toucher ou casser les bords, car les blocs sont très cassants au départ, puis recouverts d'un film plastique pour assurer leur étanchéité. Pour favoriser une hydratation maximale de l'adhésif, stocker ensuite les blocs

sans plastique, mais toujours à l'ombre pendant encore 10 jours, en les retournant tous les trois jours pour permettre aux blocs de sécher uniformément.

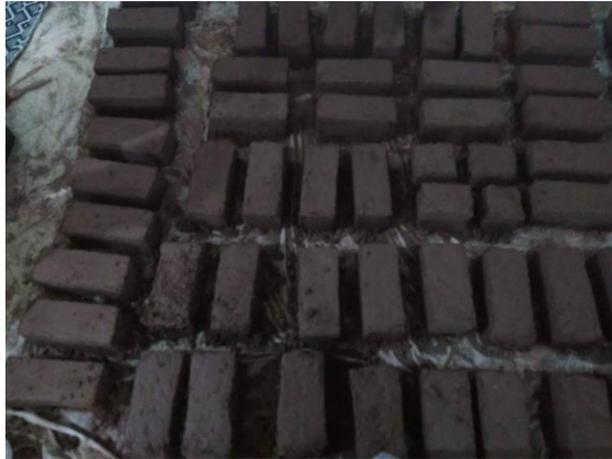


Figure 31-ch5 séchage à l'ombre des briques (source : Auteur)

Enfin, après la période de cure, et avant d'envoyer les BTSC en test, il faut les sécher une dernière fois jusqu'à ce que la masse soit constante.

5 L'Expérience

5.1 Analyse de la présentation du prototype

Le prototype expérimental appelé prototype (A) est un cube (1,00 X 0,70 X 1,00 m) avec des bords intérieurs). Planches et planchers, fortement isolés par une double couche de polystyrène rigide de 5 cm d'épaisseur soit 10 cm d'épaisseur. Orientée nord-sud, avec la façade principale orientée au sud). Surélever le sol de 50 cm à l'aide d'un support en métal, (voir photo32-33). Sur le mur latéral sud nous avons fait une ouverture pour les instruments de mesure coulissants (porte), 30/30 cm de largeur et de hauteur, la porte fait 42 cm de hauteur et 30 cm de largeur. Les deux prototypes sont suffisamment éloignés pour éviter de projeter des effets d'ombre. Nous mesurerons la température de surface intérieure du mur sud, car c'est le mur le moins favorable et il sera exposé au soleil toute la journée.

Le prototype A est une batterie non isolée (SI) en BTSC.

Le prototype B est une batterie en BTSC avec isolation (AS).



Figure 33-ch5 Le prototype A (source : Auteur)



Figure 32-32-ch5 Le prototype B (source : Auteur)



5.2 Prendre la température corporelle

Il faut également noter que le prototype est situé dans l'environnement urbain de la ville de Biskra, avec les deux unités dans les mêmes conditions climatiques, orientées au sud, la distance entre les unités a été conservée pour ne pas affecter la projection d'ombre. Les mesures ont été prises le 11/11/21/8/31 pendant une période de 4 jours. Les mesures sont prises toutes les 15 heures de 6h à 20h. (Tex dans l'ombre à 1,2 m de hauteur).

Un paramètre très important affectant le confort est la température de l'air ambiant (T_a), cette dernière également appelée température de fonctionnement ou température de séchage résultante.

Elle est calculée à partir de la moyenne de la température ambiante (T_a) et de la température de paroi (T_p) comme suit : $T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$. La température de paroi (T_p) est la température moyenne des parois intérieures. Ce paramètre affecte la température de fonctionnement.

Le matériel utilisé dans cette étude est le Testo 480. (Voir annexe pour plus de détails)



Figure 34-ch5 l'appareil de mesure

Testo 480 (source : Auteur)

5.2.1 Situation expérimentale :

Biskra est située dans la région sud-est de l'Algérie (+34,48°N, +5,73°E). Elle se caractérise par un climat chaud et sec en été. Les étés dans la région sont caractérisés par un ciel souvent clair et une humidité très faible. Les rayonnements direct et diffus sont très importants. La durée du jour est très longue et l'ensoleillement atteint le solstice d'été, soit près de 16 heures.

TM : température moyenne (Météonorme fichier tm2)

TMex : température extérieure mesurée

TA i : température ambiante avec isolation (prototype B)

TAsi : température ambiante sans isolation (prototype A)

TSex i : température surfacique extérieure avec isolation (prototype B) façade sud

TSin i : température surfacique intérieure avec isolation (prototype B) façade sud

TSex si : température surfacique extérieure sans isolation (prototype A) façade sud

TSin si : température surfacique extérieure sans isolation (prototype A) façade sud

6 Résultat de l'expérience et de la prise de mesure

6.1 Résultats de la prise de mesure du 1^{er} août :

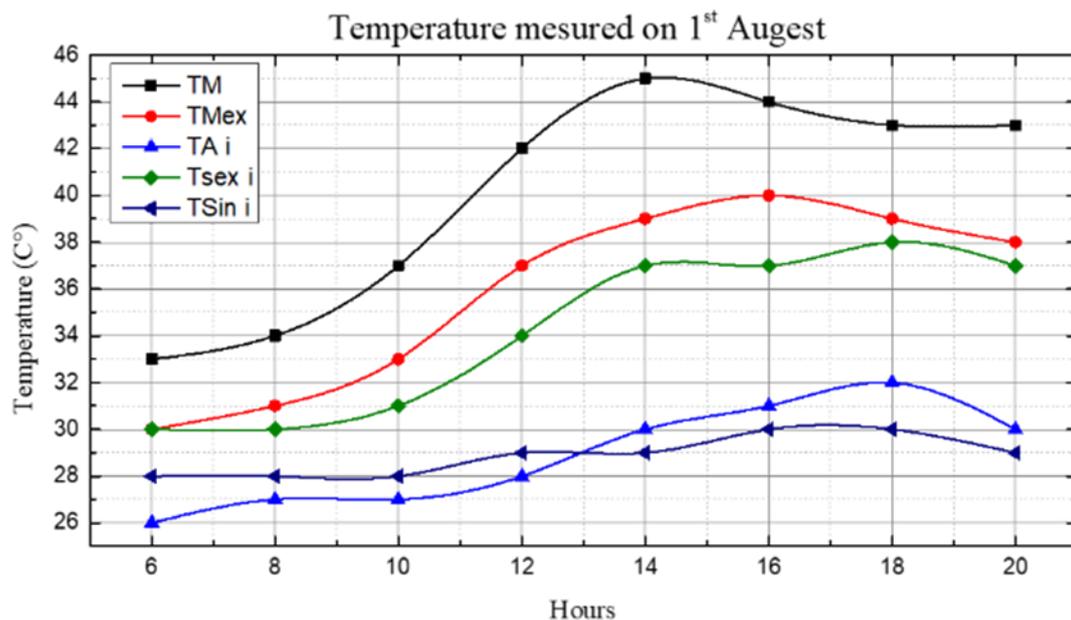


Figure 35-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation (source : Auteur)

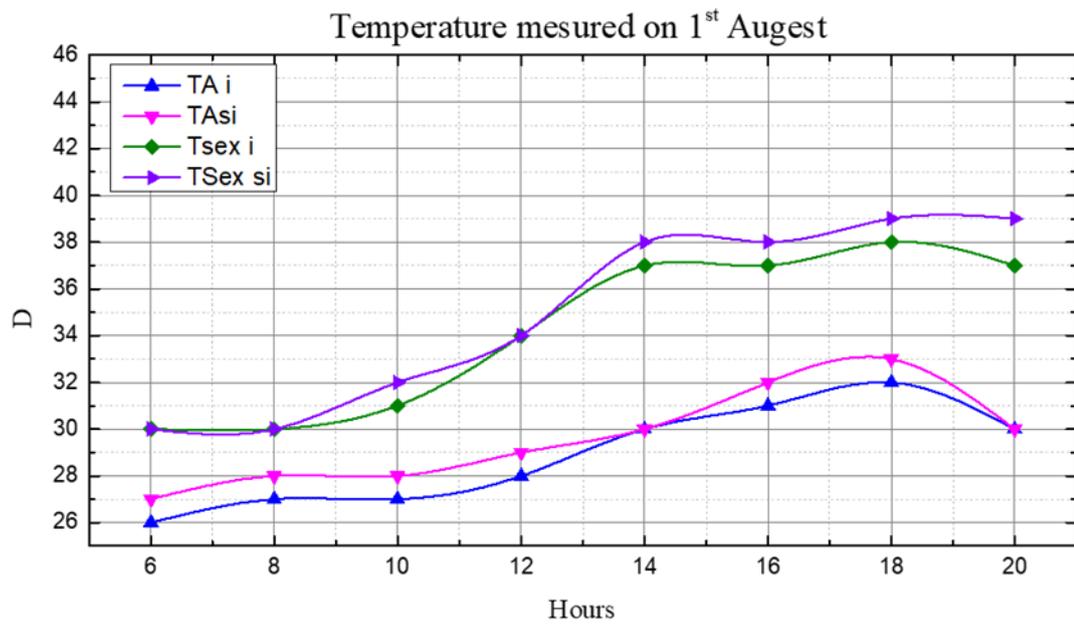


Figure 36-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation (source : Auteur)

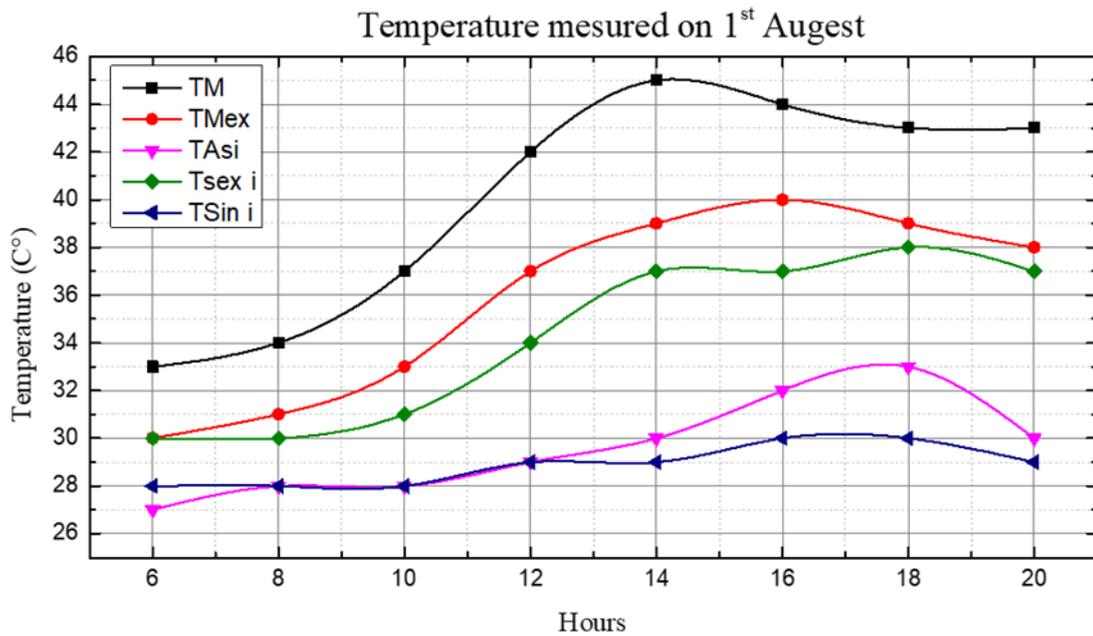


Figure 37-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation (source : Auteur)

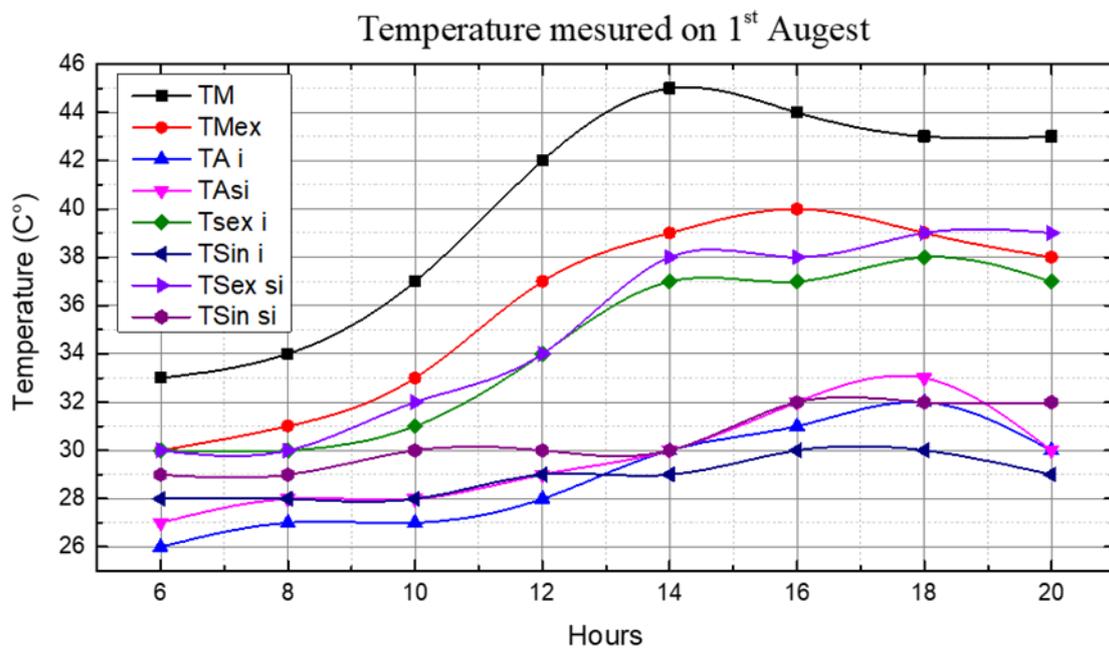


Figure 38-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation (source : Auteur)

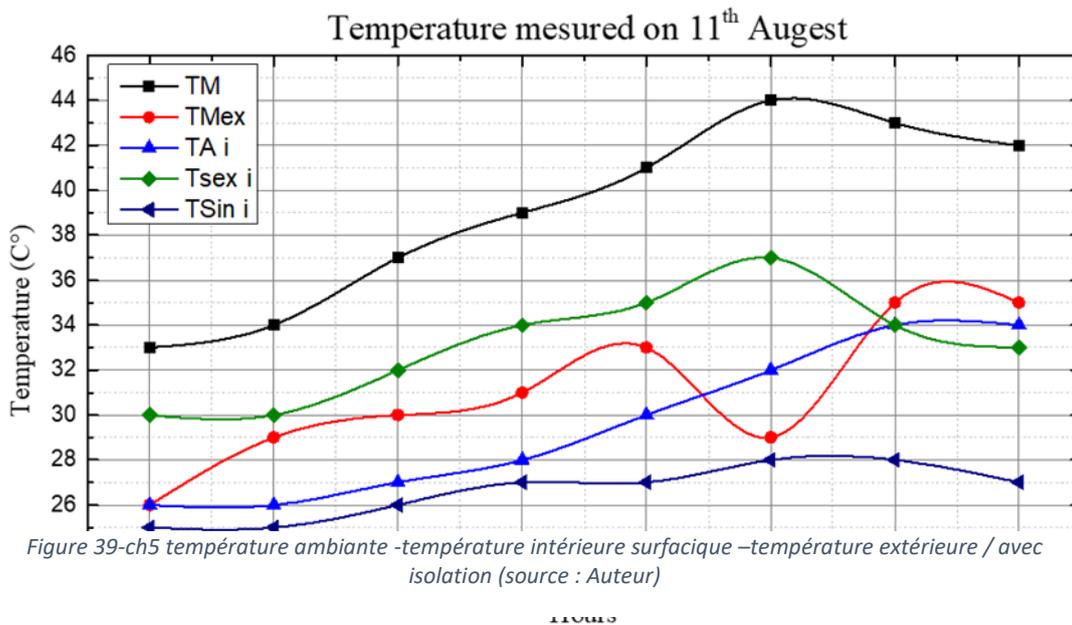
- Les températures ambiantes avec isolation (Ta i) et les températures surfaciques intérieures avec isolation (Tm ex) sont largement inférieures à la température moyenne extérieure dans le prototype B avec isolation

- Dans la matinée (8h à 12h), les températures ambiantes et surfaciques pour les deux prototypes sont identiques par contre le soir une augmentation de deux degrés est remarquée

- Les températures ambiantes du prototype avec isolation (prototype B) et sa température surfacique sont très proches, avec un écart de 1 degré, par contre, la température extérieure est très élevée (différence de 4°C à 6 °C).

- Les températures ambiantes et les températures surfaciques du prototype A sans isolation suivent la même courbe avec une différence de 1 degré le matin et de 3°C à 4 °C le soir.

6.2 Résultats de la prise de mesure du 11 août :



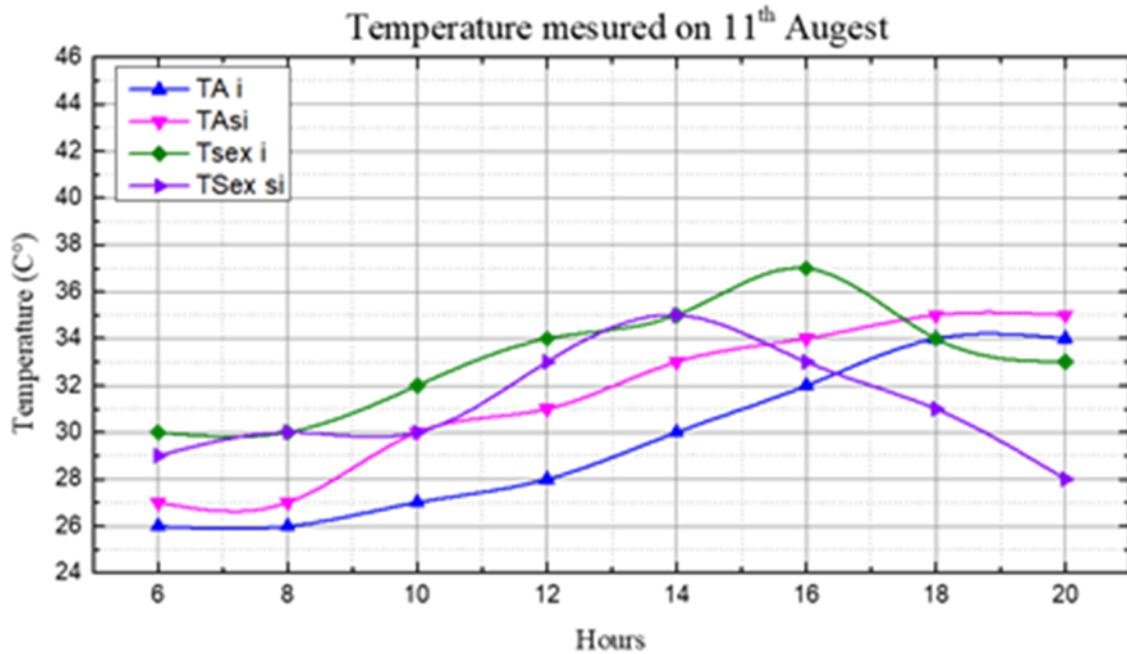


Figure 40-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation (source : Auteur)

- Les températures ambiantes ($T_{a i}$) et surfaciques ($T_{s i}$) du prototype B avec isolation suivent la même courbe le matin avec une différence de 1°C , par contre, l'après-midi, à partir de 12 h, les températures ambiantes augmentent toutes les deux heures de 2°C atteignant une différence de 5°C à 6°C aux environs de 17-19h.
- Les températures ambiantes sans isolation (prototype A) suivent la même courbe que celle des températures ambiantes du prototype B avec une augmentation de 1°C de (8---9h) et (18—20h) et de 2 à 3 degrés entre (10-19h)
- Les températures surfaciques du prototype A (sans isolation) atteint son maximum 37° à 16h et redescend à 33°C à 20h.
- Les températures surfaciques intérieures du prototype B, avec isolation, restent pratiquement constantes entre 24°C et 26°C tout au long de la journée.

6.3 Résultats de la prise de mesure du 21 août :

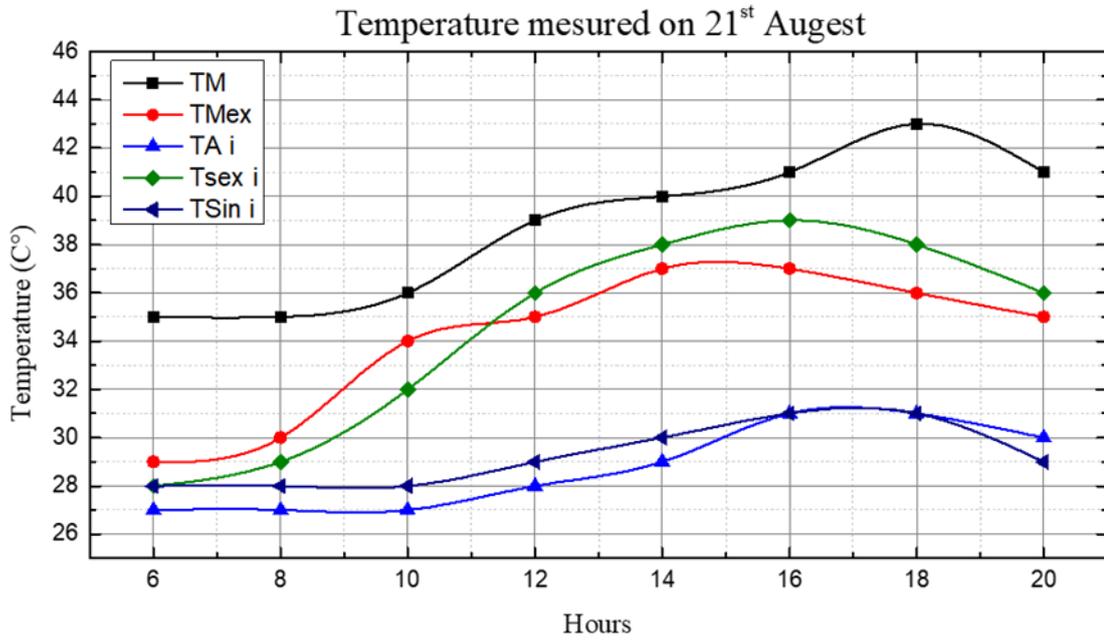


Figure 41-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation (source : Auteur)

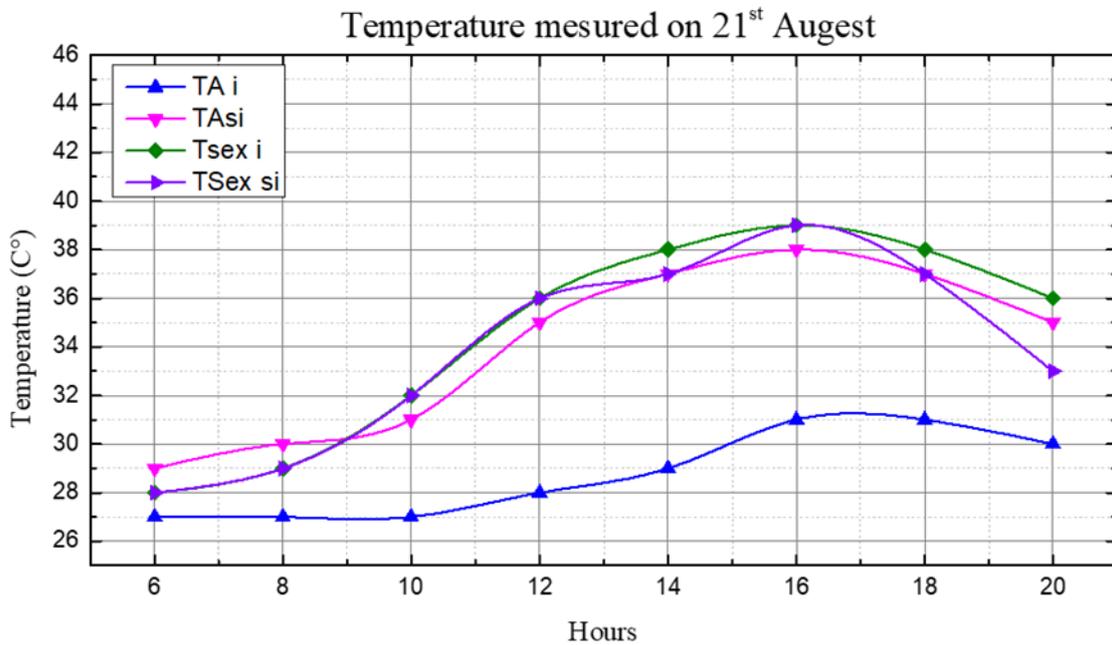


Figure 42-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation (source : Auteur)

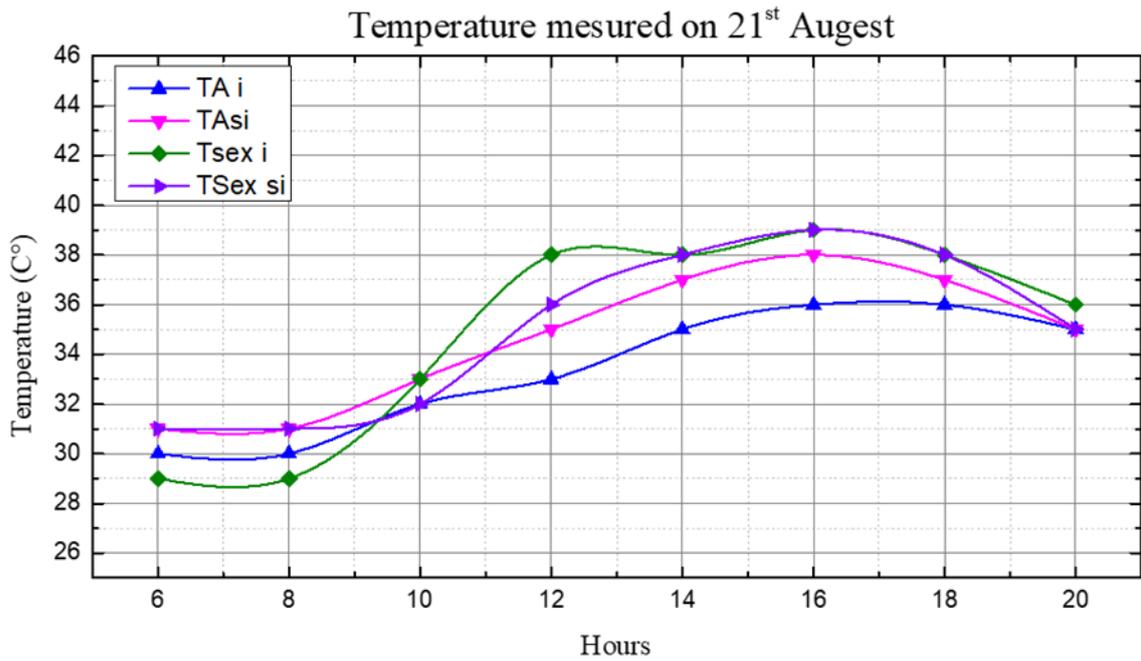


Figure 43-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation (source : Auteur)

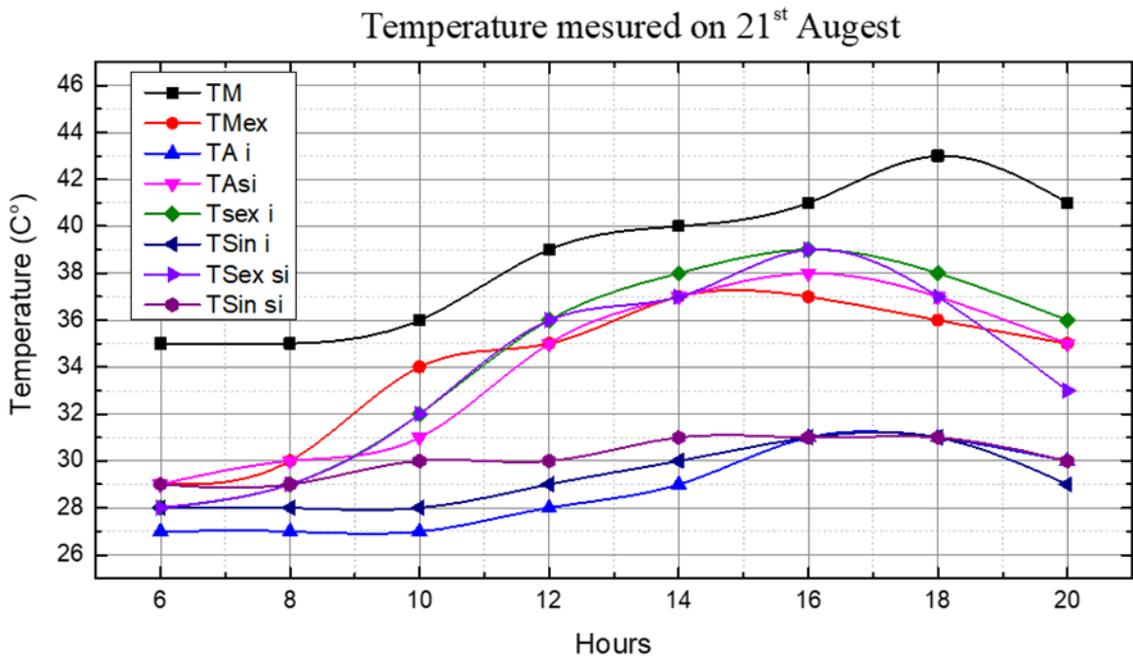


Figure 44-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation (source : Auteur)

- La température surfacique du prototype B (avec isolation) est de 28°; elle atteint son maximum (31°) à 16h. Elle est plus élevée d'un degré seulement de la température ambiante pendant toute la journée et se stabilise toutes les deux heures entre 17—19h à 30°. Il y a une diminution de 2° à 3° par rapport à la température ambiante du prototype B avec isolation et la température ambiante du prototype A (sans isolation).
- Les températures surfaciques des deux prototypes suivent la même courbe que la température surfacique avec isolation avec une diminution de 1° entre 12—14h et une diminution de 3° à 4° entre 18—20h.
- La température ambiante sans isolation (A) suit la courbe de la température surfacique avec ou sans isolation avec une baisse de 1° seulement alors qu' on remarque une baisse de 5° à 6° de la température ambiante avec isolation (B) qui atteint les 28° (minimale) et 29° (maximale) et une baisse de 3° à 4° de la température ambiante sans isolation (A) qui atteint les 27° (minimale) et 30° (maximale).

6.4 Résultats de la prise de mesure du 31 août :

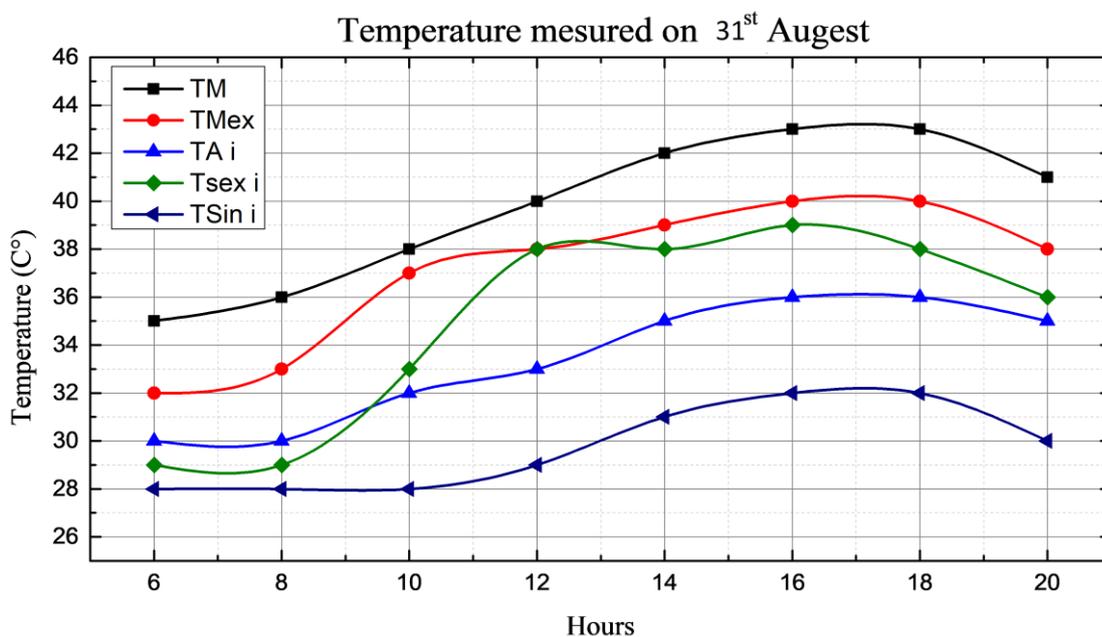


Figure 45-ch5 température ambiante -température intérieure surfacique –température extérieure / avec isolation (source : Auteur)

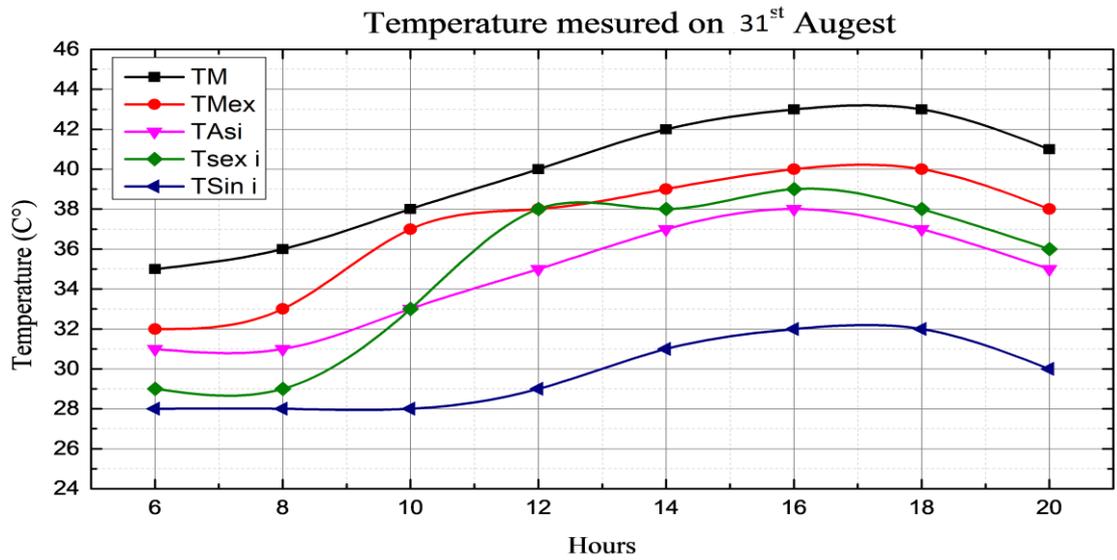


Figure 46-ch5 température ambiante avec et sans isolation – température surfacique avec et son isolation (source : Auteur)

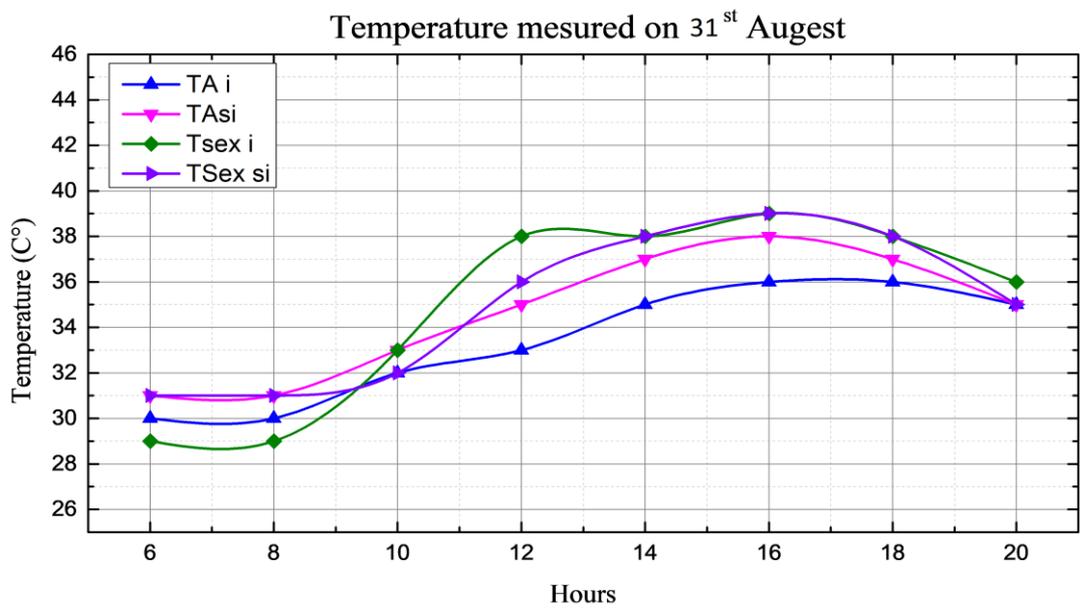


Figure 47-ch5 Température ambiante sans isolation –température surfacique avec et sans isolation (source : Auteur)

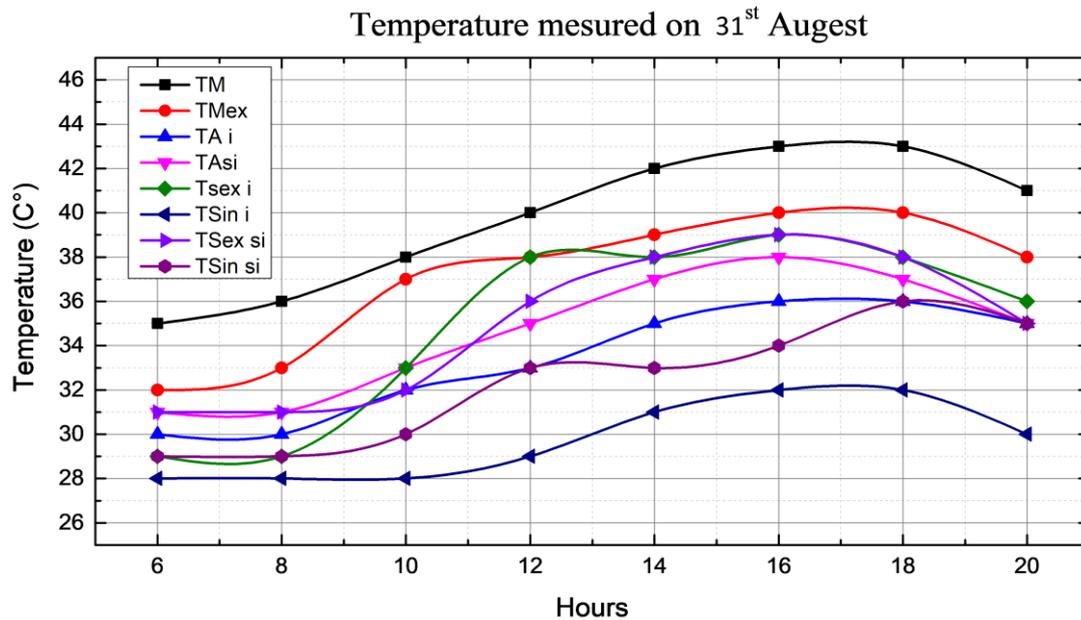


Figure 48-ch5 température ambiante avec et sans isolation –température extérieure surfacique avec et sans isolation – température surfacique intérieure avec et sans isolation (source : Auteur)

- Les températures ambiantes et surfaciques du prototype B (avec isolation) sont largement inférieures de 3° à 4° à celles de l'extérieur (température moyenne TM et température extérieure moyenne mesurée)
- Une différence remarquable dans cette journée contrairement aux autres c'est que la température surfacique intérieure (prototype B) est inférieure de 2° à la température ambiante (B).
- La température ambiante sans isolation (A) varie entre 30° et 38° et inférieure de 3° à 4° de celle mesurée à l'extérieur.
- On remarque aussi qu'il y a une différence de deux degrés entre la température ambiante (A) et (B) qui varie entre 30° et 32° (la minimale) et 36° à 38° (la maximale), alors qu'il n'y a pas de différence entre la courbe de température surfacique extérieure sans isolation et la température ambiante sans isolation.

7 Interprétation des résultats d'expérimentation

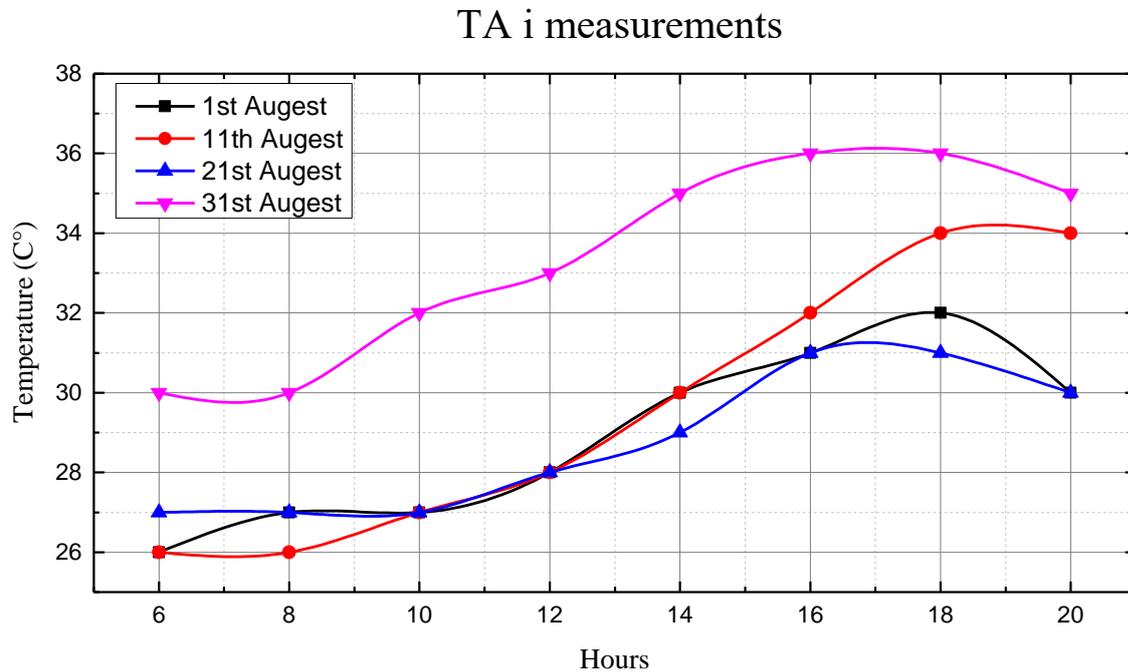


Figure 49-ch5 la température moyenne des 04 jours représentatifs du prototype avec isolation (Source : Auteur)

Les jours des 1, 11, 21, août sont clairement très proches et les températures varient entre 26°C à 6h et de 34°C à 18h

Les températures ambiantes du prototype B du 31 août et bien plus élevées de 4°C le matin et de 5°C l'après-midi.

On observe une disparité de courbe contrairement au paramètre précédent ou chaque jour à une courbe bien différente la plus basse et celle du 1^{er} août suivi du 11^e et puis le 21/31.

TA si measurements

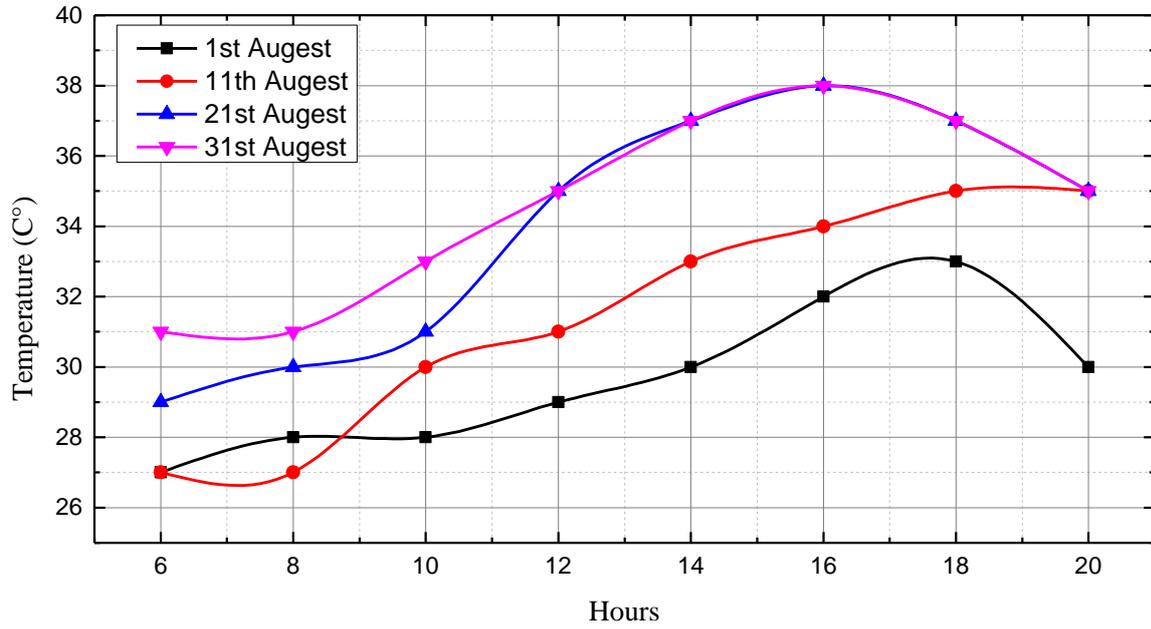


Figure 50-ch5 la température moyenne des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation (Source : Auteur)

TS in i measurements

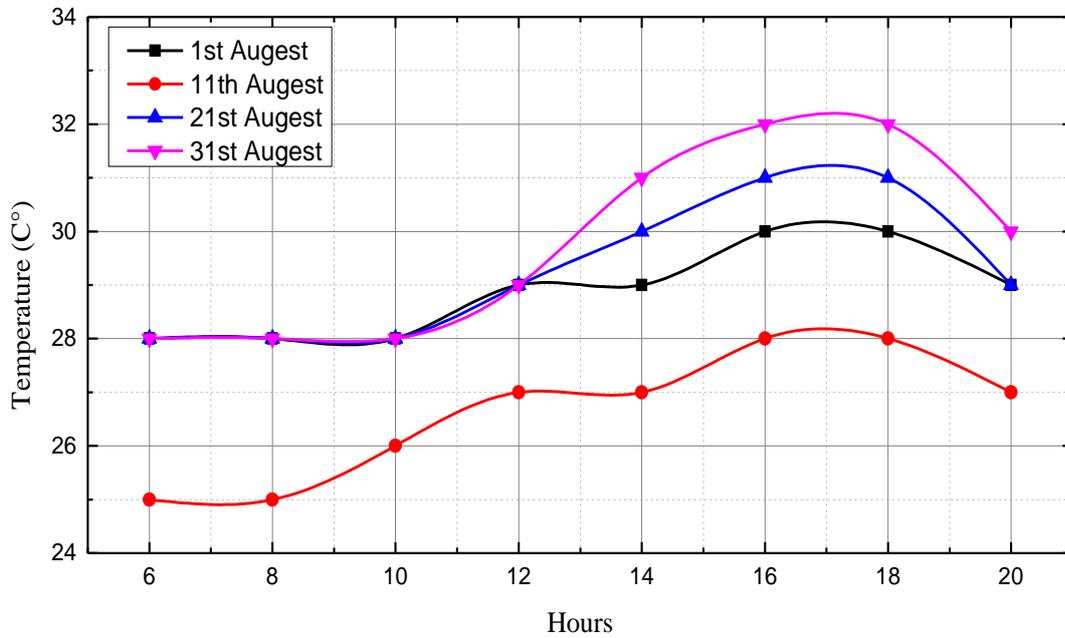


Figure 51-ch5 la température surfacique intérieure des 04 jours représentatifs du prototype avec isolation (Source : Auteur)

Les températures surfaciques intérieures du prototype B du 11 sont les plus basses et sont inférieure à celles des journées du 1, 21 et 31, avec une différence de 3°C, ces températures mesurées le 1/21/31 sont identiques la matinée, à partir de midi y'a une différence de 1°C. Pour celles du 1er août une baisse de 1°C aussi par rapport aux 11/21.

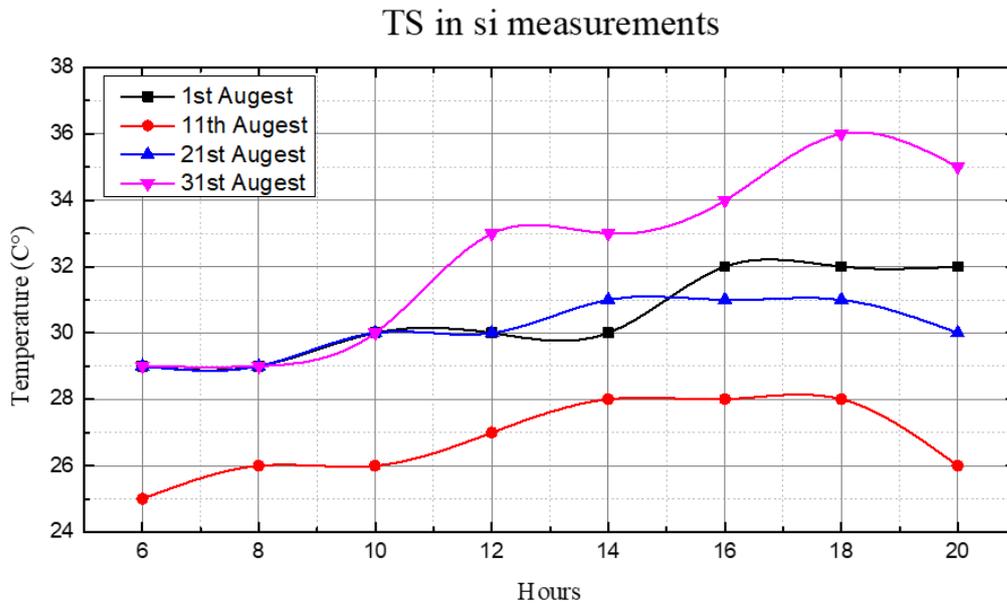


Figure 52-ch5 la température surfacique intérieure des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation (Source : Auteur)

Une grande différence a été constatée le 11 août. Et les autres jours (01/21/31) une différence de 3° à 4°. Le 31 est le jour où on a eu les plus hautes températures qui atteignent les 36°.

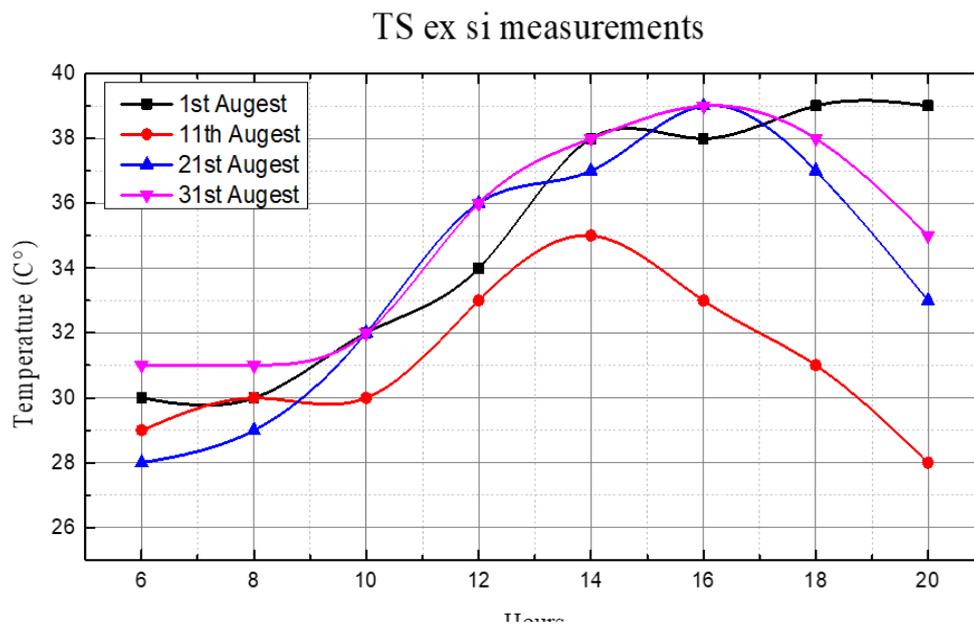


Figure 53-ch5 la température surfacique extérieure des 04 jours représentatifs du prototype sans isolation (Source : Auteur)

Durant la journée du 11 août, la température surfacique extérieure atteint la plus haute température à 14h et diminue jusqu'à 28° à 20h. Ceci s'explique par la pluviométrie constatée cette journée l'après-midi, contrairement aux autres jours, où l'on a constaté 39° comme valeur maximale entre 16 et 18h.

Toutes les températures suivent la même courbure sauf pour le 11 où l'on a remarqué une baisse de température de 3° par rapport aux autres jours. Le matin de 6 à 12h les températures surfaciques externes sur le prototype B sont pratiquement identiques avec une différence de 1°, mais l'après-midi (à partir de 12h) on remarque une nette différence la plus basse, celle du 11, et la plus haute, celle du 31.

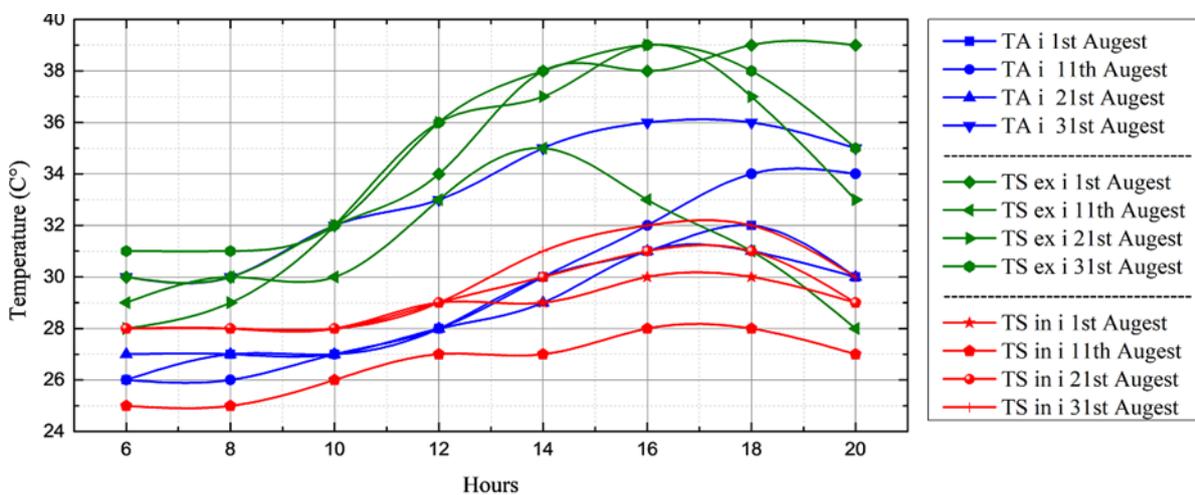


Figure 54-ch5 regroupement de toutes les températures mesurées (Source : Auteur)

Là, on remarque trois groupes de températures bien distincts: les températures surfaciques sont nettement plus basses que celle des températures ambiantes avec une différence qui varie entre 2°C à 5°C. Les températures ambiantes varient entre 2°C et 6°C des températures surfaciques externes.

8 Conclusion

Les propriétés du sol et des liants utilisés dans l'expérience comme stabilisateurs, et la contrainte de compactage sont toutes des paramètres importants affectant le comportement du BTSC.

L'étude expérimentale, à travers l'élaboration de deux prototypes à une échelle réduite, a permis de tester quelques paramètres (température surfacique externe, température ambiante, température surfacique internes) sur le rendement thermique du mur en brique de terre stabilisée et compressé BTSC.

Ces prototypes ont permis la détermination des impacts réels des propriétés thermiques du BTSC. Les résultats prouvent que ce matériau a un impact positif sur le fonctionnement thermique des murs et par conséquent le confort thermique interne. La réduction de la température surfacique atteint les 7°C, cette diminution influe forcément sur la chaleur stockée, et automatiquement sur le flux de chaleur transféré vers l'intérieur ce qui minimise la température intérieure surfacique de 6°C, et une réduction de la température ambiante de l'ordre de 5°C.

Chapitre 06 :
La simulation

1 Introduction

Les programmes de simulation numérique sont considérés comme de puissants outils d'aide à la décision qui permettent aux chercheurs d'acquérir une compréhension complète du phénomène ou de l'élément sujet d'étude. En architecture, les logiciels de simulation permettent d'étudier divers phénomènes physiques (température de l'air, ventilation, etc.) et énergétiques liés aux bâtiments et à leurs composants, notamment les enveloppes, les murs, etc. Ils peuvent également optimiser la conception d'un bâtiment en utilisant des calculs énergétiques détaillés pour fournir une approche réaliste du fonctionnement thermique du bâtiment. Ainsi, il offre la possibilité de simuler les phénomènes thermiques qui se produisent dans les bâtiments et de les appréhender à l'échelle globale durant toute une année. L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'influence de certains paramètres propres à l'enveloppe, ainsi que les composantes des parois : propriétés des surfaces intérieures et extérieures, afin de les optimiser ultérieurement.

À cette fin, le comportement thermique et énergétique de la batterie prototype sera testé dans une série de simulations dans des conditions de données météorologiques de la ville de Biskra. Les simulations seront effectuées sur un modèle virtuel à l'aide du logiciel *TRNSYS*, qui servira de cas de base et de référence pour déterminer l'impact des paramètres BTSC sur la performance thermique et l'efficacité énergétique. Tout d'abord, les tests de simulation sont effectués séparément, puis la comparaison est effectuée pour former la situation optimale.

2 Simulation numérique :

Les simulations numériques représentent la technique de recherche que les chercheurs utilisent le plus souvent en raison de leurs avantages à plusieurs niveaux ainsi qu'à la fiabilité et la précision des résultats.

2.1 Introduction aux logiciels de modélisation

La géométrie du modèle d'étude est créée à l'aide du logiciel plug-in *TRNSYS-3D* *Sketch-Up*, comme illustré à la Figure 6-1.

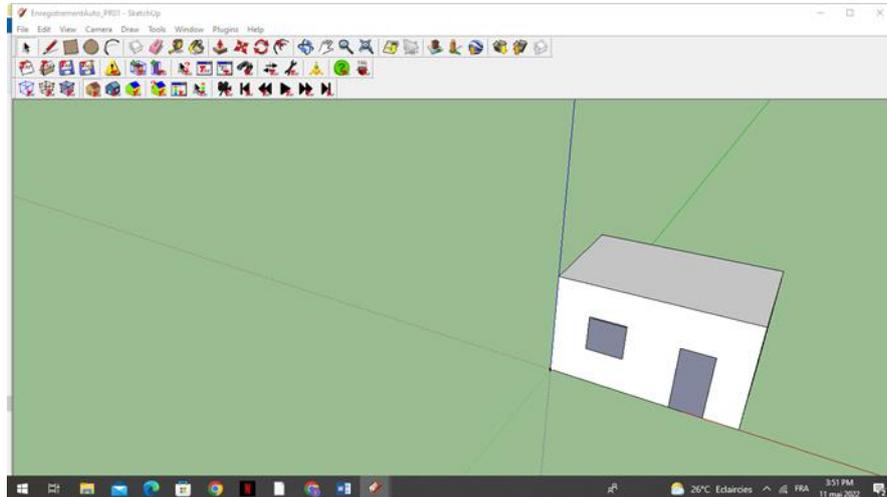


Figure 1-ch6 la création du modèle géométrique (Auteur, 2017)

Le plug-in TRNSYS-3D permet la création de modèles de construction sous *Sketch-Up* 2016 ainsi que l'export de fichiers vers le logiciel (TRNSYS) pour réaliser des modèles à partir de prototypes expérimentaux sous forme *idf* dans les mêmes conditions.

2-2 Présentation des logiciels utilisés avec les logiciels de simulation :

L'étude numérique a été développée à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS, Version 17, (TRANSIENT SYSTEM SIMULATION) développé par plusieurs laboratoires et centres de recherche spécialisés, voir Figure 6-2



Figure 2-ch6 Les développeurs de l'outil de simulation TRNSYS 17

Le logiciel TRNSYS est un environnement modulaire caractérisé par une interface graphique et une flexibilité des bibliothèques et des composants, développé par* WISCONSIN-MADISON * groupe allemand * TransSolar * centre français * CSTB * et société privée * Tess *. Ce logiciel de simulation thermique et dynamique est principalement utilisé par les acteurs du bâtiment et à des fins de recherche, compte tenu de ses avantages, il permet l'intégration de tous les paramètres et composants d'un bâtiment et des systèmes actifs pour étudier les phénomènes thermiques et énergétiques (Soufiane, Imane, Ikram, Fatah, & Belkacem, 2017). Les simulations sous TRNSYS sont effectuées en utilisant le type à zone unique.

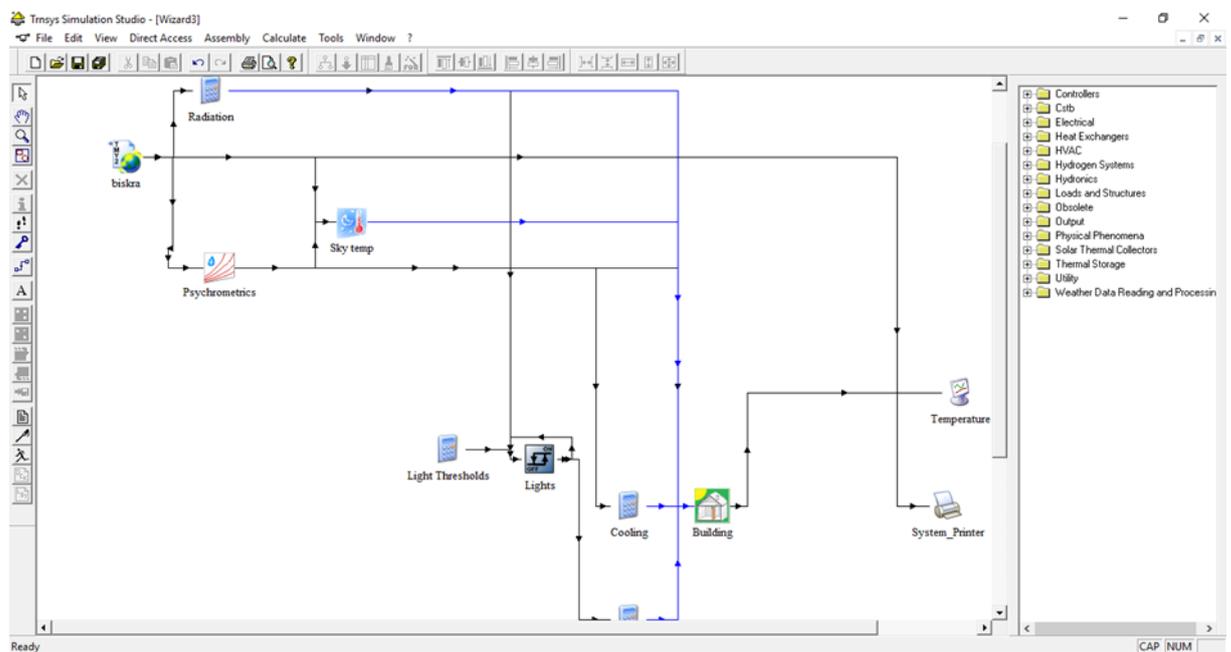


Figure 3-ch6 Les types de connexions utilisés pour la simulation numérique (Auteur, 2017)

Le type monotone est utilisé pour les simulations numériques, prenant en compte différents facteurs thermiques tels que les gains de convection et d'infiltration de surface, les gains de ventilation, les gains de convection interne, etc. Voir Figure 6-4

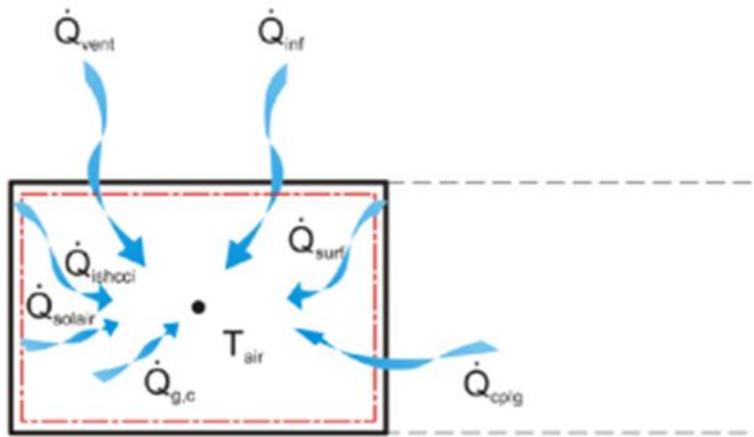


Figure 4-ch6 Les facteurs thermiques influençant le nœud d'air (Source TRNSYS-17)

Les détails du modèle mathématique du flux de chaleur convectif dans le nœud aérien sont définis dans le type monazol du logiciel TRNSYS comme suit :

$$Q_i = Q_{surf,i} + Q_{inf,i} + Q_{vent,i} + Q_{g,c,i} + Q_{cp\ lg,i} + Q_{solair,i} + Q_{ISHCCI,i}$$

Où :

$Q_{surf,i}$: Le gain convectif des surfaces ;

$Q_{inf,i}$: Les gains d'infiltration (flux d'air de l'extérieur uniquement) ;

$Q_{vent,i}$: Les gains de ventilation ;

$Q_{g,c,i}$: Les gains de convection internes (par les personnes, les équipements, l'éclairage, les radiateurs, etc.) ;

$Q_{cp\ lg,i}$: Les gains dus au flux d'air (de connexion) de l'Airnode (I) ou à la condition aux limites ;

$Q_{solair,i}$: La fraction du rayonnement solaire entrant dans un nœud d'air par des fenêtres extérieures ;

$Q_{ISHCCI,i}$: Le rayonnement solaire absorbé sur tous les dispositifs d'ombrage internes de la zone et transféré directement sous forme de gain de convection à l'air interne.

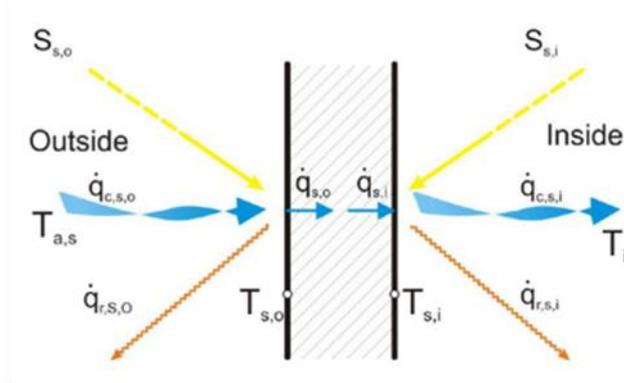
Figure 5-ch6 Équation du flux de chaleur convectif dans le nœud d'air calculé par Trnsys (source : Trnsys-17)

Cette fonctionnalité de type monozone repose sur plusieurs fichiers d'entrée, tels que les descriptions des bâtiments, la protection, l'ensoleillement, etc. Voir Figure 6-6.



Figure 6-6 Les inputs du type mono-zone (Source : TRNSYS17)

Comportement thermique de tous les éléments du bâtiment et température de surface du flux de chaleur et du type.



Où :

$S_{s,i}$: Flux de chaleur de rayonnement absorbé à la surface interne (gains solaires et radiatifs) ;

$S_{s,o}$: Flux de chaleur de rayonnement absorbé à la surface extérieure (gains solaires) ;

$q_{r,s,i}$: Transfert de chaleur radiatif net avec toutes les autres surfaces de la zone ;

$q_{r,s,o}$: Transfert de chaleur radiatif net avec toutes les surfaces en vue de la surface extérieure ;

$q_{s,i}$: Flux de chaleur par conduction du mur à la surface intérieure ;

$q_{s,o}$: Flux de chaleur par conduction dans le mur à la surface extérieure ;

$q_{c,s,i}$: Flux de chaleur de convection de la surface intérieure vers l'air ;

$q_{c,s,o}$: Flux de chaleur par convection vers la surface extérieure depuis la limite / ambiance ;

$T_{s,i}$: Température de surface intérieure ;

$T_{s,o}$: Température de surface extérieure.

Figure 7-ch6 Le comportement thermique des éléments du bâtiment selon le type. (Source : TRNSYS17)

Le fichier climat de la ville d'étude (Biskra) est généré par le logiciel METEONORM version 7.2 pour générer des données météo de type 15-2 au format Tm2, voir Figure 6-8

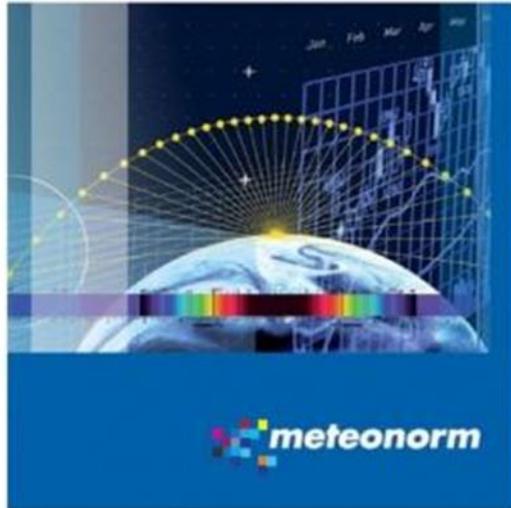


Figure 8-ch6 Le logiciel exploité pour générer le fichier climatique (Meteonorm & CSTB)

Le logiciel de simulation TRNSYS nécessite certains paramètres d'entrée (entrées) pour effectuer la simulation et les données de sortie (sorties) illustrées à la Figure 6-9.

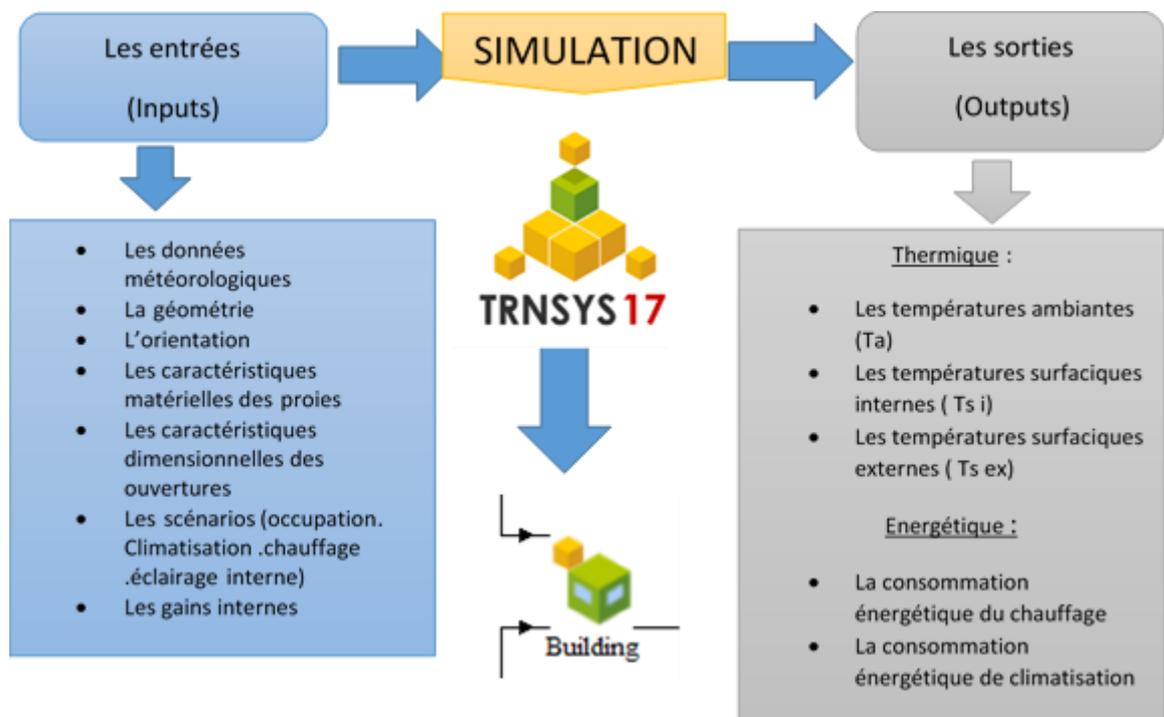


Figure 9-ch6 Outputs et Inputs exploités du TRNSYS (Auteur, 2017).

La figure montre les entrées et les sorties d'une simulation développée à l'aide du logiciel de type à région unique de TRNbuild.

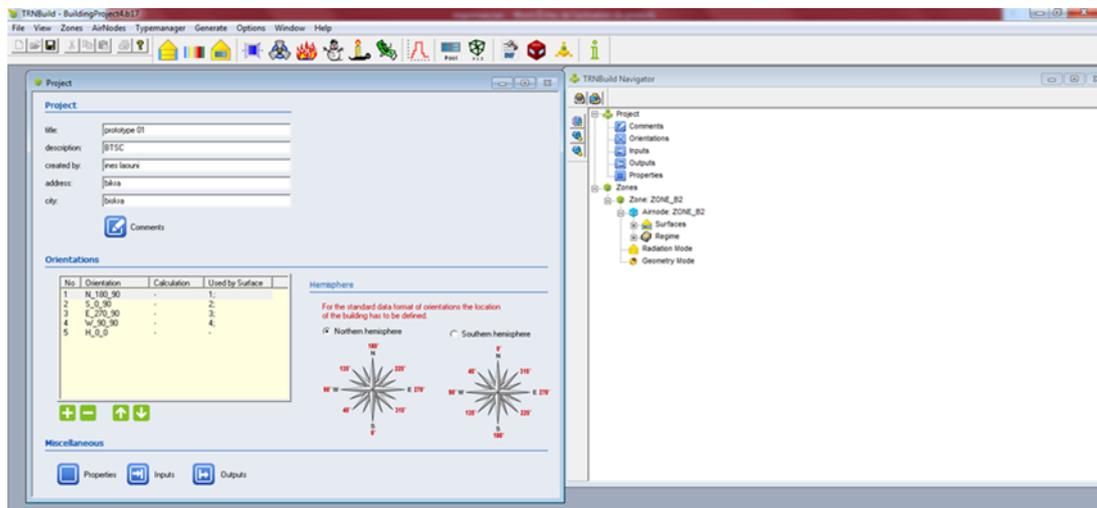


Figure 10-ch6 Introduction des inputs : Orientation (Auteur, 2017)

Concernant l'entrée, il est nécessaire de définir la géométrie, la forme, la taille et l'orientation du modèle à l'étude. Les données météorologiques de la ville concernée sont saisies au format Tm2, puis les détails relatifs au prototype sont saisis à l'aide de TRNbuild (voir Figure 10-11). Les propriétés des matériaux pour les murs (mur-plafond-sol) et les ouvertures peuvent être définies. Scénario à utiliser (occupation - pénétration - fonctionnement de l'éclairage artificiel de chauffage ou de climatisation). À propos de la sortie, dans notre cas, le logiciel offre la possibilité de simuler plusieurs paramètres de nature différente deux Aspects : propriétés thermiques étudiées (température ambiante - température de surface intérieure et température de surface extérieure).

Le second concerne les propriétés énergétiques (consommation d'énergie pour le chauffage et/ou la climatisation, bénéfices énergétiques), le tout pour assurer un environnement thermique confortable (voir détail en annexe).

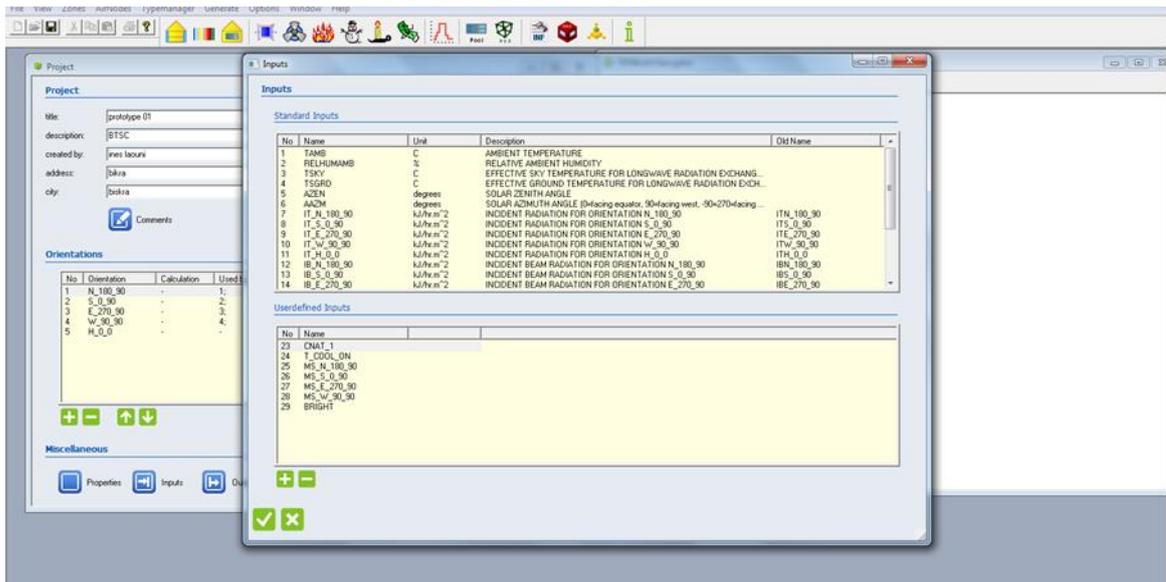


Figure 11-ch6 Introduction des inputs : données météorologiques du Tm2 (Auteur, 2017)

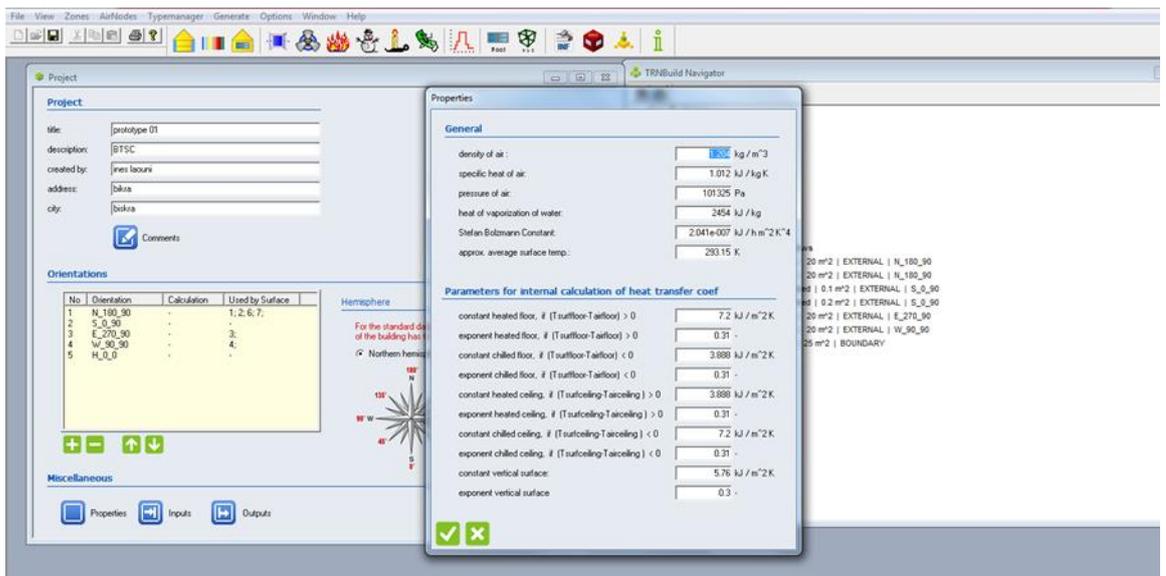


Figure 12-ch6 Introduction des inputs : détermination des paramètres à calculer (Auteur, 2017)

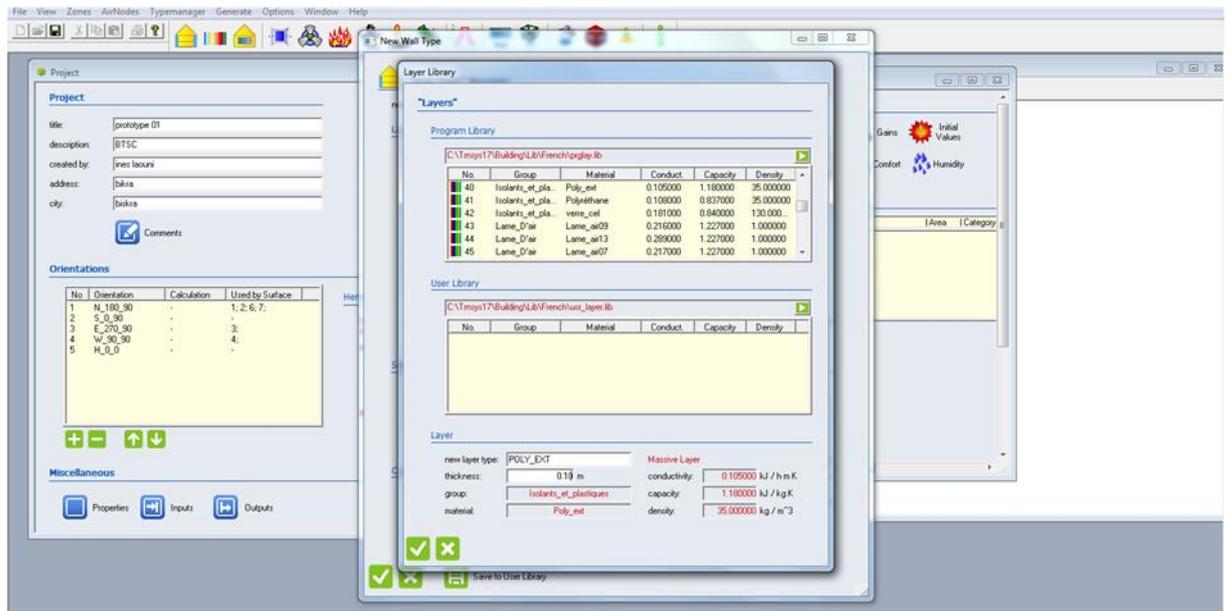
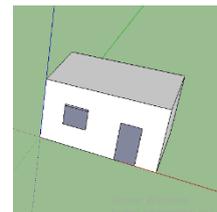


Figure 13-ch6 Introduction des inputs : données des proies et différentes combinaisons (Auteur, 2017)

3 Résultats des simulations

Trois modèles d'été ont été simulés pour optimiser l'utilisation de ce matériau selon le tableau suivant :



Prototype	Description	Composition
Prototype 1 (The prototype B of the experiment)	a wall made up of a single row of bricks (35/10/15 cm) with a 5 cm straw insulation layer and a 2 cm clay plaster	
Prototype 2	Double-wall glued without air gap. 2 cm cement plaster.	
Prototype 3	Double-wall with 5 cm air gap and 2 cm cement plaster.	

- 1: Clay plaster**
- 2: Straw insulation**
- 3: Row of CSEB**
- 4: Air gap**
- 5: Cement plaster**

Figure 14-ch6 les trois prototypes à simuler (Auteur, 2017)

Table 1-ch6 : Choix de composantes de fenêtres : interface de Trynsys (Auteur, 2017)

Pour les fenêtres, le choix était porté sur le modèle Mdv_bg, double vitrage, basse émissivité avec gaz $U=1.43W/m^3.k$ $n^{\circ}=4$ pour les prototypes (2/3)

No.	Used	WinID	Description	Design	U-Value	g-Value	T-sol	Rl-sol	T-vis
1	n	2001	Double	2.5/12.7/2.5	2.95	0.777	0.727	0.129	0.817
2	n	3001	Triple	2.5/12.7/2.5/12.7	2	0.7	0.624	0.168	0.744
3	n	4001	Double,Low-e	3/12.7/2.5	1.76	0.597	0.544	0.22	0.769
4	n	5001	Dble,Low-e,Air	3/12.7/2.5	1.43	0.596	0.544	0.22	0.769

No.	Layer	Thickness	Type
1	ENDUIT_PLATRE	0.020	massive
2	CORPS_CREUX	0.160	massive
3	DALLE_COMPR	0.040	massive
4	CHAPE	0.100	massive

Pour le plafond un seul type pour les 2 prototypes (2/3)

No.	Layer	Thickness	Type
1	CARRELAGE	0.020	massive
2	MORTIER_CIME	0.020	massive
3	DALLE_FLOAT	0.100	massive
4	HERISSONNAGE	0.300	massive

Pour le solun seul type pour les 2 prototypes (2/3)

For the windows, the choice is made on the model Mdv_bg double glazing low emissivity with gas $U = 1.43 W / m^3.k$ $n^{\circ} = 4$ for prototypes (2/3)

N°	Description	U-value	g- value
1	2001 Double	2.95	0.777
2	3001 Triple	2	0.7
3	4001 Double-low-e	1.76	0.544
4	5001 Double low.ar	1.43	0.544

For the ceiling only one type for the 2 prototypes (2/3)				For the slab only type for the 2 prototypes (2/3)			
N°	Layer	thickness	Type	N°	Layer	thickness	Type
1	plaster	0.020	massive	1	floor tile	0.020	massive
2	hollow body	0.160	massive	2	Cement Mortar	0.020	massive
3	Slab_composition	0.040	massive	3	Floating slab	0.100	massive
4	Screed	0.100	massive	4	Bristling	0.300	massive

Table 2-ch6 : Choix de composantes de fenêtres simplifié (Auteur, 2017)

La simulation a été lancée en août (un pas de temps d'une heure) et les résultats ont été exportés au format (xls). Le graphique a été ensuite détaillé par le programme ORIGIN courant août (5088.0---58320). Les quatre jours sélectionnés durant cette période (01/11/21/31) correspondent aux heures de l'année (5088.0/5336.0/5584.0/58320).

3.1 Le prototype 01

Il représente un mur constitué d'une seule rangée de briques (35/10/15 cm) avec 5 cm d'isolant en paille et 2 cm d'enduit d'argile, ce montage désigne le prototype expérimental B. Au 1er août (5088.00 h), la température ambiante est de 30°C ; de 35°C le 11 août (5336.0h),

de 32°C le 21 août (5584.0h) et de 38°C le 31 août (5832.0h). Cela donne une température moyenne de 33,75°C.

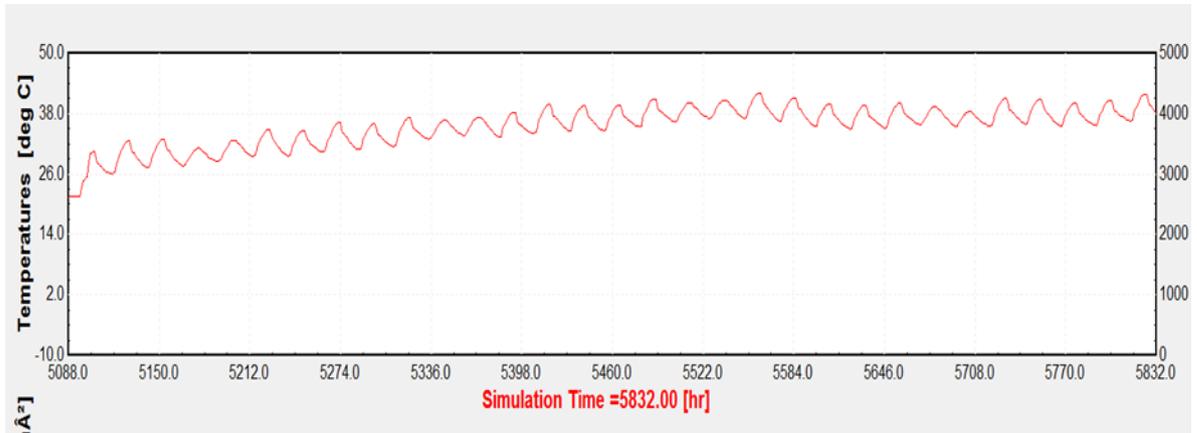


Figure 15-ch6 Résultat de simulation du prototype 1 (Auteur, 2017)

3.2 Prototype 02 :

Le prototype 02 est constitué par un mur en double encollage sans lame d'air avec un enduit de 2cm de ciment, ce prototype présente le 1er août (5088.00h) une température ambiante de 25°C, le 11 (5336.0h) de 28°C, le 21 (5584.0h) de 31°C et le 31 (5832.0h) une température de 33°C . Cela donne une température moyenne de 29,25°C.

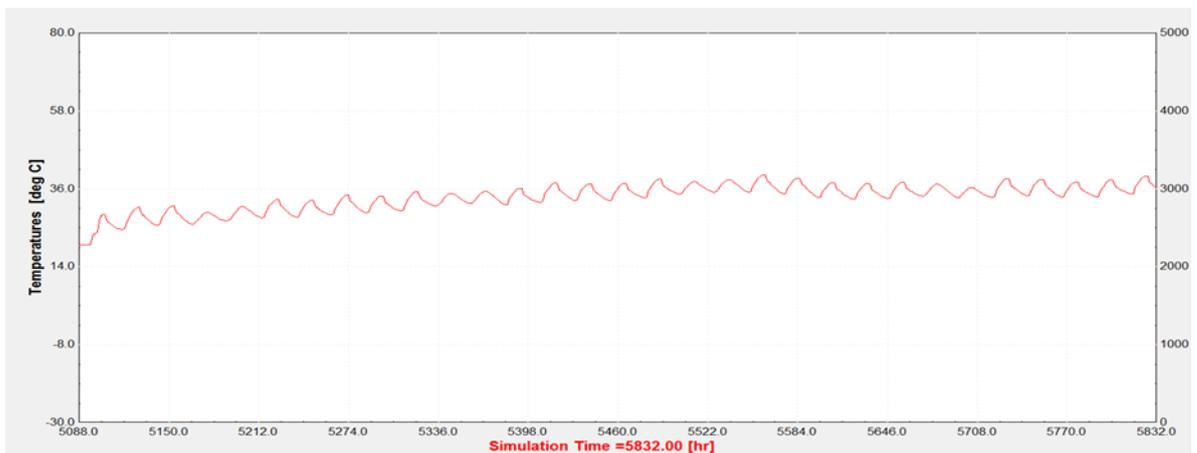


Figure 16-ch6 Résultat de simulation du prototype 2 (Auteur, 2017)

3.3 Prototype 03 :

Le prototype 03 est constitué par une double paroi avec une lame d'air de 5 cm avec un enduit de ciment 2 cm. Ce prototype présente le 1er août (5088.00h) une température ambiante de 21°C, le 11 (5336.0h) une température de 27°C, le 21 ((5584.0h) de 28.5°C et le 31 (5832.0h)) de 30°C. Cela donne une température moyenne de 33,75°C.

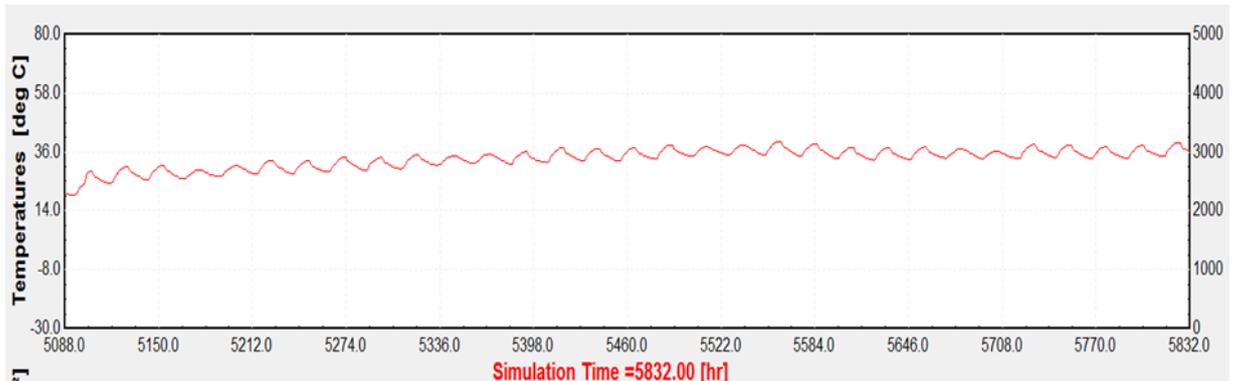


Figure 17-ch6 Résultat de simulation du prototype 3 (Auteur, 2017)

4 Confrontation et discussion des résultats expérimentaux et de simulation

L'accord entre les températures ambiantes mesurées (expérimentales) et simulées le 31 août était de 37°C, la différence entre les températures mesurées et simulées le 1er août était de 2°C, quant aux journées du 11 et 21 août, elles étaient équivalentes et (5°C). Le 1er août, elles atteignent 27°C, soit 1°C de moins que la marge de confort.

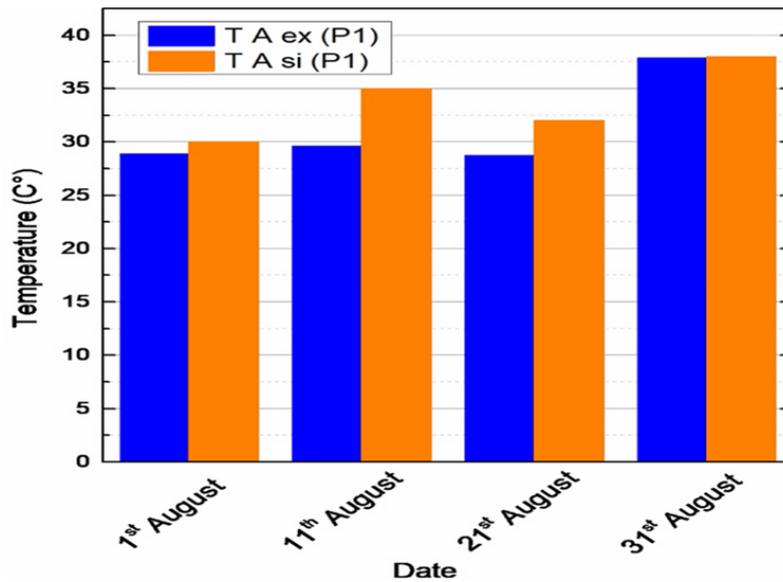


Figure 18-ch6 Histogramme montrant la différence entre la moyenne des températures entre expérimentation et simulation (Auteur, 2017)

Pour estimer la demande énergétique, des seuils de température pour le fonctionnement des bâtiments résidentiels ont été déterminés, soit 23°C à 26°C pour les climatiseurs. Cette zone est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251) qui donne des plages de température selon le type de bâtiment

NF EN 15251

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Plage de température pour le chauffage, °C Vêtire - 1,0 clo	Plage de température pour le rafraîchissement, °C Vêtire - 0,5 clo
Bâtiments d'habitation, pièces de séjour (chambres, séjours, etc.) Activité sédentaire - 1,2 met	I	21,0 - 25,0	23,5 - 25,5
	II	20,0 - 25,0	23,0 - 26,0
	III	18,0 - 25,0	22,0 - 27,0
Bâtiments d'habitations, autres locaux (cuisines, rangements, etc.) Station debout, marche - 1,5 met	I	18,0 - 25,0	
	II	16,0 - 25,0	
	III	14,0 - 25,0	

Table 3-ch6 La norme NF EN 15251 (D.T.R., 1998)

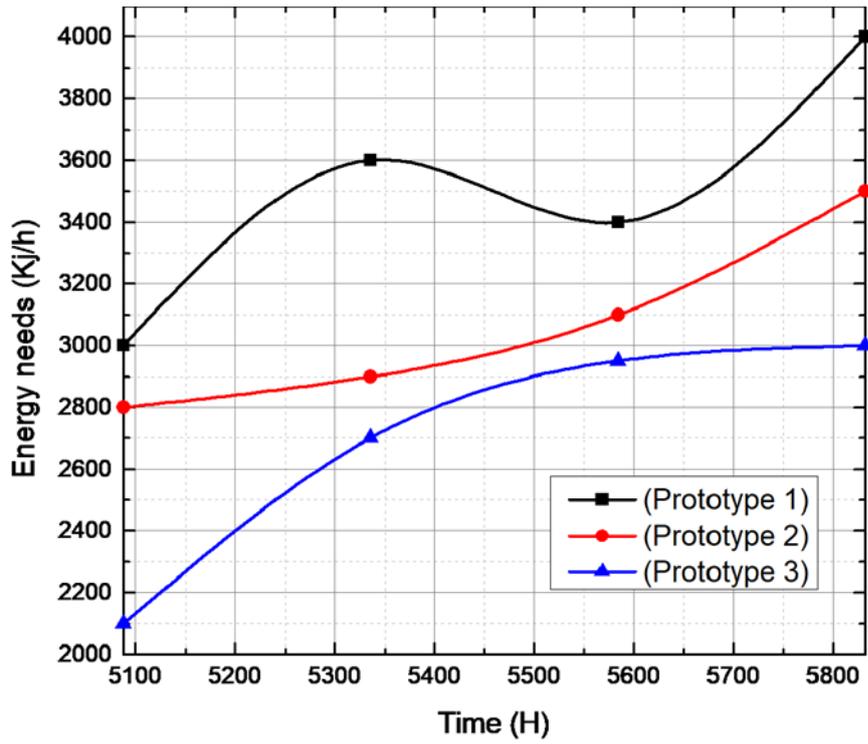


Figure 19-ch6 Les besoins énergétiques des trois prototypes (Auteur, 2017).

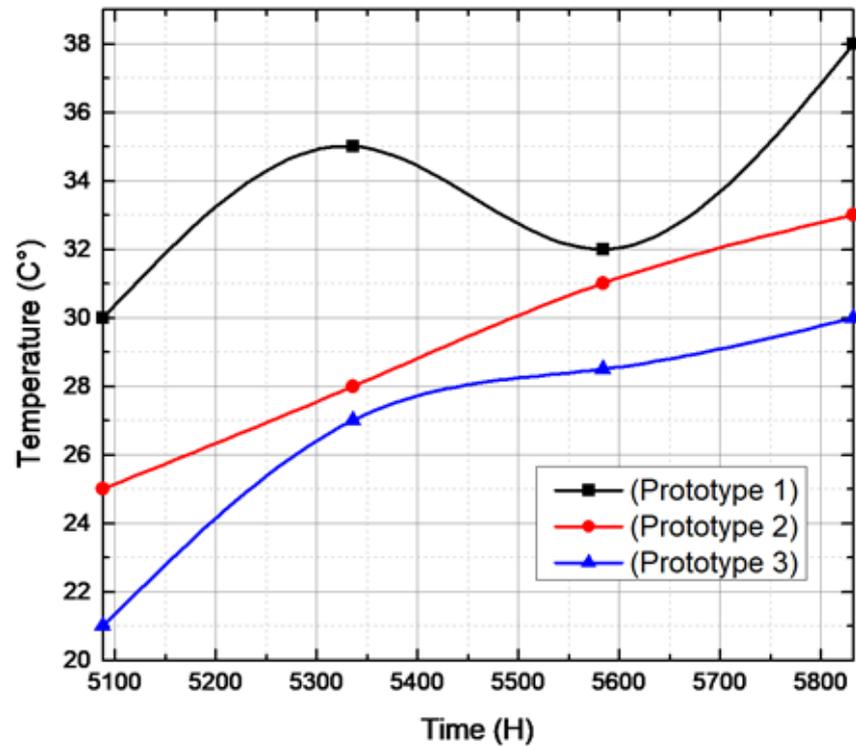


Figure 20-ch6 Les températures ambiantes des trois prototypes (Auteur, 2017).

Le besoin énergétique minimum pour le climatiseur est le prototype 3 (double paroi avec lame d'air de 5 cm. Revêtement en ciment de 2 cm) avec des valeurs variant entre (2100,00/ 2700,00/ 2950,00 / 3000,00 KJ/H) correspondant à des heures (5088,00 / 5336,0 / 5584.0/ 5832.0h) et jours (1/11/21/31 août). Indiquant le besoin énergétique le moins observé, suivi de double paroi (prototype 2). Vient ensuite un troisième prototype (prototype B de l'expérience) correspondant au premier prototype.

Le Prototype 3 du 21ème jour est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251). De plus, le 11 présentait également un confort acceptable à 26°C.

5 Conclusion

Des simulations numériques du prototype ont été réalisées pour optimiser l'effet de plusieurs paramètres : coefficient d'absorption, transfert de chaleur, et besoins énergétiques. Dans cette partie du travail, un modèle numérique est développé qui combine trois types de murs ; les résultats montrent que le contrôle des éléments de construction tels que les matériaux de construction affecte directement l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment, et que l'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) n'est pas suffisante et doit être améliorée. Quelques paramètres (ventilation et humidité relative) doivent également être concernés par différents composants de la façade, comme la peinture réfléchissante, pour réduire les gains de chaleur.

Conclusion de la deuxième partie

Concernant les méthodes utilisées dans les recherches portant sur les propriétés des matériaux, on retrouve des méthodes analytiques sous forme de calculs mathématiques (classiques), des méthodes expérimentales à travers des modèles réels ou simplifiés, des mesures empiriques in situ, et comme à travers des simulations numériques.

Cette méthode analytique permet de décrire la fonction thermique d'un bâtiment en utilisant les principes de la physique du bâtiment. La démarche expérimentale consiste également à tester la validité de l'hypothèse en reproduisant le phénomène et en modifiant les paramètres. Les paramètres changeants sont implicites dans les hypothèses. Les résultats expérimentaux vérifient ou ne vérifient pas l'hypothèse. Compte tenu de ses atouts et de la fiabilité de ces résultats, l'utilisation de cellules tests à échelle réduite est la méthode adoptée et qui est la plus utilisée dans ce type de recherche.

Afin de mieux comprendre les performances thermiques du matériau de recherche (BTSC) dans les climats chauds et arides, cette étude utilise une approche quantitative (Analytique) basée sur l'utilisation d'expériences (prototypes simplifiés) et de simulations (TRYNSIS-17).

L'expérimentation est la méthode principale et se divise en deux phases. Phase 1 : Développement des matériaux de construction. Étape 2 : Mesure de la température ambiante et de surface.

La simulation est également divisée en deux étapes, la première étape est la vérification (validation) du prototype expérimental, et la deuxième étape est la simulation (optimisation) de différentes combinaisons. Des simulations numériques sont effectuées sur les prototypes pour optimiser l'influence de certains paramètres : coefficient d'absorption, transfert de chaleur et demande énergétique. Dans cette partie du travail, un modèle numérique a été développé combinant trois types de murs ; les résultats ont montré que des éléments de construction tels que les matériaux de construction ou le contrôle du bâtiment affectent directement l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment. L'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) ne suffit pas et doit être améliorée. Quelques paramètres (ventilation et humidité relative) doivent également intervenir sur différents composants de la façade (ex : peinture réfléchissante) pour réduire les apports de chaleur.

Les expériences montrent que les propriétés du sol et les propriétés des liants utilisés comme stabilisants et la contrainte de compactage sont les paramètres de base affectant les performances du BTSC, de même, la concentration de sable dans le BTC a peu d'effet sur la résistance mécanique. Les doses comprises entre 25% et 40% ont donné les meilleurs résultats. Par conséquent, 30 % de sable concassé ont été ajoutés au mélange utilisé dans cette étude. Le poids du mélange sec global par bloc reste le même. Durant toutes les étapes de cette étude, elle a été prise égale à 2 500 kg,

Pour fabriquer les briques, des moules sont conçus en fonction du modèle. Fabriqué en acier trempé, il se compose de 5 éléments et a un volume de 10x10x20 cm³ une fois assemblé. La filière est équipée de pistons pour assurer le transfert des efforts de compactage de la presse vers le mélange. Habituellement, le mélange est compacté par une presse hydraulique de manière statique à simple effet.

Comme le béton, la résistance des liants du sol augmente avec l'âge. Mais une période de cure de 10 jours est essentielle. Pendant cette période, le matériau sera conservé dans un environnement humide, et à l'abri du vent et du soleil, pour ne pas avoir un dessèchement trop rapide. Dans les conditions réelles de stockage, les blocs doivent être protégés par du plastique pendant quelques jours avant utilisation. Après démoulage, retirer soigneusement le bloc à la main en évitant de toucher les bords, car le bloc est fragile, puis recouvrez-le d'un film plastique pour assurer son étanchéité. Pour favoriser une hydratation maximale de l'adhésif, stockez ensuite les blocs sans plastique, mais toujours dans un endroit frais pendant encore 10 jours, en les retournant tous les trois jours pour permettre aux blocs de sécher uniformément.

Le prototype expérimental appelé prototype (A) est un cube (1,00 X 0,70 X 1,00 m) avec des bords intérieurs). Planches et planchers, fortement isolés par une double couche de polystyrène rigide de 5 cm d'épaisseur, soit une épaisseur de 10 cm. Cellule de prison, orientée nord-sud (la façade la plus défavorable avec la façade principale orientée au sud). Surélevez le sol de 50 cm à l'aide du support en métal, voir photo. Sur le mur sud nous avons fait une ouverture pour y glisser l'instrument de mesure (porte), 30/30 cm de large et de haut, la porte fait 42 cm de haut et 30 cm de large. Les deux prototypes sont suffisamment éloignés pour éviter de projeter des effets d'ombre. Nous mesurerons la température de surface intérieure du mur sud, car c'est le mur le moins favorable et il sera exposé au soleil toute la journée.

- Le prototype A est une batterie non isolée (SI) en BTSC.
- Le prototype B est une batterie en BTSC avec isolation (AS).

Il faut également noter que le prototype est situé dans un milieu urbain à Biskra, dans les mêmes conditions climatiques, orientées au sud, la distance entre les unités a été conservée pour ne pas affecter la projection d'ombre. Les mesures ont été prises le 1/11/21/31 pendant une période de 4 jours. Les mesures sont prises toutes les 15 heures de 6h à 20h. (Tex dans l'ombre à 1,2 m de hauteur).

Les mesures de température ont montré qu'au 1er août : la température ambiante avec isolation (T_i) et la température de surface intérieure avec isolation ($T_{m\ ex}$) étaient très inférieures à la température extérieure moyenne du prototype B avec isolation, et les températures ambiantes et de surface étaient idem pour les deux prototypes le matin (de 8h à 12h), mais se sont avérées supérieures de 2 degrés le soir. La température ambiante du prototype isolé (Prototype B) était très proche de 1 degré de sa température de surface, tandis que la température extérieure était très élevée (écart de 4°C à 6°C). Les températures ambiantes et de surface du prototype A sans isolation suivent la même courbe, différant de 1°C le matin et de 3°C à 4°C le soir.

11 août : Les températures ambiantes (T_i) et de surface ($T_{s\ i}$) du prototype B avec isolation suivent la même courbe le matin avec un écart de 1°C, alors que la température ambiante à 12h commence à 17h-19h vers 12h : 00, augmentant de 2°C toutes les deux heures, pour une différence de 5°C à 6°C. La température ambiante sans isolation (Prototype A) a suivi la même courbe que la température ambiante du Prototype B, augmentant de 1°C de (8---9h) et (6-20h), et de 2 à 3 degrés entre les deux. (10h à 19h). La température de surface du Prototype « A » (non isolé) atteint un maximum de 37°C à 16h et chute à 33°C à 20h. La température de la surface intérieure utilisant l'isolation du Prototype « B » est restée presque constante entre 24°C et 26°C tout au long de la journée.

Le 21 août n'a pas fait exception, les résultats ont prouvé que la température de surface du prototype B (avec isolation) était de 28°, atteignant un maximum de 31° à 16h, soit seulement 1 degré de plus que la température ambiante tout au long de la journée, et s'est stabilisée toutes les deux heures à 17h. Entre 7h, 30°. La température ambiante avec isolation du Prototype B a été réduite de 2° à 3° entre la température ambiante du Prototype A (sans isolation). La température de surface des deux prototypes a suivi la même courbe que la température de surface isolante, chutant de 1° entre 12h et 14h et de 3° à 4° entre 18h et 20h. La température ambiante non isolée (A) suit la courbe de température de surface avec ou sans isolation en ne baissant que de 1° Jusqu'à 28° min et 29° max et 3° à 4° de la température ambiante non isolée (A) jusqu'à 27° min et max 30°

31 août : Le prototype B (avec isolation) avait des températures ambiantes et de surface 3° à 4° plus froides que les températures extérieures (température moyenne TM et température extérieure moyenne mesurée). Contrairement aux autres jours, la différence constatée ce jour-là est que l'écart de la température de surface interne (prototype B) par rapport à la température ambiante (B) est inférieur à 2°. La température ambiante sans isolation (A) est de 30° à 38° et de 3° à 4° inférieures à la température mesurée à l'extérieur. Nous avons également remarqué qu'il y avait une différence de deux degrés entre les températures ambiantes (A) et (B), avec un minimum entre 30° et 32° et un maximum entre 36° et 38°, sans différence entre les surfaces extérieures courbe de température non isolée et courbe de température ambiante non isolée.

Les journées du 11/21 août sont donc évidemment très proches, avec des températures oscillant entre 26°C à 6h et 34°C à 18h. La température ambiante du Prototype B le 31 août était supérieure de 4°C le matin et de 5°C l'après-midi. On observe l'écart de courbe inverse au paramètre précédent, où il y a des courbes très différentes pour chaque jour, le plus bas et la courbe du 1er août, puis 11 et 21/31.

Le 11 août, Le prototype B avait la température de surface intérieure la plus basse, inférieure de 3°C au (21/01/31), et ces températures étaient les mêmes que celles mesurées le matin du 21/01/31, avec une différence de 1°C par rapport à midi à 1°C. Par rapport au 21/11, le 1er août est inférieur de 1°C. Le 11 août diffère beaucoup des autres jours, avec un écart de 3° à 4° le 31 et le jour où la température maximale atteint 36°. Le 11 août, les températures à la surface extérieure ont culminé à 14 h et chuté à 28° à 20 h. Cela est dû à la pluie observée l'après-midi, contrairement aux autres jours où la température maximale entre 4 et 6 est de 39° l'après-midi

Toutes les températures ont suivi la même courbe, sauf le 11 où nous avons constaté une baisse de température de 3° par rapport aux autres jours. De 6h00 à 12h00 du matin, la température de surface extérieure du prototype B est presque la même, avec une différence de 1°, mais il y a une différence notable le soir (à partir de 12h00), la plus basse est 11h00, et le plus haut est 31. Nous avons constaté trois séries de températures très différentes, la température de surface était nettement inférieure à la température ambiante, la différence variait entre 2°C et 5°C. La température ambiante varie entre 2°C et 6°C de la température de la surface extérieure.

Concernant l'entrée (input) dans la simulation, il est nécessaire de définir la géométrie du modèle pour en étudier la forme, la taille et son orientation. Les données météorologiques de la

ville concernée sont importées au format Tm2, puis les détails liés au prototype sont importés à l'aide de TRNbuild. Les propriétés des matériaux pour les murs (mur-plafond-sol) et les ouvertures peuvent être définies. Scénario à utiliser (occupation - pénétration - fonctionnement de l'éclairage artificiel de chauffage ou de climatisation) concernant la sortie Le logiciel de sortie offre la possibilité de simuler plusieurs paramètres de nature différente dans notre cas deux aspects ont été étudiés, le premier aspect Propriétés thermiques (ambiance température - température de surface intérieure et température de surface extérieure). Le second concerne les propriétés énergétiques (consommation énergétique pour le chauffage et/ou la climatisation, gains énergétiques), le tout pour assurer un environnement thermique confortable (voir détail en annexe).

Trois modèles ont été simulés en été pour optimiser l'utilisation de ce matériau. La simulation a été lancée en août (pas de temps d'une heure) et les résultats ont été exportés au format (xls). Après cela, le graphique a été détaillé par le programme ORIGIN courant août (5088.0---58320). Les quatre jours sélectionnés durant cette période (01/11/21/31) correspondent aux heures de l'année (5088.0/5336.0/5584.0/58320).

Le prototype 01 représente un mur constitué d'une seule rangée de briques (35/10/15 cm) avec 5 cm d'isolant en paille et 2 cm d'enduit d'argile, ce prototype montre le prototype expérimental B : 1er août (5088.00 h) La température ambiante est de 30°C, 35°C le 11 août (5336.0h), 32°C le 21 août (5584.0h) et 38°C le 31 août (5832.0h). Cela donne une température moyenne de 33,75°C.

Le prototype 02 représente un mur en double encollage sans lame d'air. Enduit de 2cm de ciment, ce prototype présente : Le 1er août (5088.00h) la température ambiante est de 25°C, le 11 (5336.0h) est de 28°C 21 (5584.0h) est de 31°C, le 31 (5832.0h) est de 33°C . Cela donne une température moyenne de 29,25°C.

Le prototype 03 représente une double paroi avec une lame d'air de 5 cm. Enduit de ciment 2 cm, ce prototype présente : 1er août (5088.00h) température ambiante 21°C, 11 (5336.0h) 27°C 21 (5584.0h) 28.5°C, 31 (5832.0h)) à 30°C. Cela donne une température moyenne de 33,75°C.

L'accord entre les températures ambiantes mesurées (expérimentales) et simulées au 31 août était de 37°C, la différence entre les températures mesurées et simulées au 1er août était de 2°C, et d'autre part, les 11 et 21 août Il y a 5 °C à 5°C de différence le 1er août et nous avons atteint 27°C, une différence de 1°C par rapport à la marge de confort. Pour estimer la demande

énergétique, des seuils de température pour le fonctionnement des bâtiments résidentiels ont été déterminés, soit 23°C à 26°C pour les climatiseurs. Cette zone est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251) qui donne des plages de température selon le type de bâtiment

Le besoin énergétique minimum pour le climatiseur est le prototype 3 (double paroi avec lame d'air de 5 cm. Revêtement en ciment de 2 cm) avec des valeurs variant entre (2100,00/ 2700,00/ 2950,00 / 3000,00 KJ/H) correspondant à des heures (5088,00 / 5336,0 / 5584.0/ 5832.0h) et jours (1/11/21/31 août). Donc le p1 a le besoin énergétique le moins observé, suivi de la double paroi (prototype 2). Vient ensuite un troisième prototype (prototype B de l'expérience) correspondant au premier prototype.

Le Prototype 3 du 21ème jour est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251). De plus, le 11 présentait également un confort acceptable à 26°C. L'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) ne suffit pas, certains paramètres doivent être améliorés (ventilation et humidité relative), et une attention doit également être portée sur différents composants de la façade, comme la peinture réfléchissante, pour réduire l'absorption de chaleur.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion de cette thèse, on peut affirmer que le climat affecte le confort thermique d'une manière directe. Ce dernier est déterminé par l'équilibre dynamique établi par l'échange de chaleur entre le corps et son environnement, ce qui motive l'homme à s'adapter aux différents climats rigoureux en créant des conditions relativement confortables au sein de son habitat.

Généralement, l'adaptation de l'habitat au rayonnement solaire et aux facteurs climatiques se produit de manière naturelle. Permettre au soleil d'entrer dans la pièce pour stocker la chaleur aide à augmenter la température ambiante intérieure. Tirer parti de la lumière du soleil est obtenu en jouant avec les caractéristiques de forme et les propriétés des matériaux utilisés.

Le premier chapitre montre la relation entre l'architecture et le climat. Nous avons introduit le climat, ses paramètres, puis nous avons discuté de la performance énergétique de la conception des bâtiments et des facteurs qui peuvent l'améliorer. Ensuite, les aspects de l'isolation ont été discutés, ainsi que les caractéristiques des matériaux d'isolation et des différents types d'isolation. Il faut noter que les effets de la masse thermique et de l'inertie thermique. Aujourd'hui, les règles d'adaptation à l'environnement, à l'architecture et au climat permettent d'allier les traditions millénaires à la technologie moderne, et les exigences de confort sont de plus en plus élevées, et les concepteurs semblent ignorer la fonction d'adaptation à l'environnement.

Nous avons ensuite constaté que la conception des bâtiments est étroitement liée à la performance énergétique et a un impact direct. La forme du bâtiment change tout le temps. Certaines formes standard minimisent le transfert de chaleur. Le choix du matériau de construction et les propriétés du matériau isolant ainsi que les différents types d'isolation sont très importants. Les murs sont choisis pour représenter 60 à 70 % de la masse thermique du bâtiment et les planchers pour représenter 30 à 40 %. C'est la raison de choisir des murs et de leur donner plus d'importance.

Dans la plupart des cas. Nous avons constaté que plus la masse ~~thermique est~~ thermique est élevée, mieux c'est. Pour cela, il est recommandé d'utiliser autant de masse thermique que possible pour obtenir des conditions intérieures confortables.

La grande inertie du matériau permet d'atténuer les changements de température en emmagasinant l'excédent de chaleur estivale et en le restituant la nuit. L'inertie thermique de

l'enveloppe extérieure augmente considérablement, la variation journalière de température disparaît, et seul le cycle annuel exerce une pression sur l'atmosphère intérieure. L'exemple montre que lorsque la température de surface du mur extérieur la dépasse, la température intérieure peut rester stable autour de 30°C. Les maisons construites en terre ou en briques de terre ont le plus souvent des murs épais (pas moins de 300 mm), donc une grande masse thermique. Du coup, la forte inertie de ces matériaux réduit les échanges thermiques à l'intérieur lorsque la température extérieure fluctue dans des conditions confortables, et fonctionne particulièrement bien en été.

Des exemples de grands bâtiments offrent une stabilité de la température intérieure entre le jour et la nuit ou bien entre l'été et l'hiver. Ceci est obtenu naturellement grâce à l'utilisation d'éléments structurels lourds. Les vieilles maisons aux murs épais apportent de la fraîcheur en été et isolent du froid en hiver.

Le choix des matériaux utilisés est l'un des axes de cette étude. Par exemple, les différentes manières de construire une maison écologique sont principalement le choix de matériaux naturels. Ce dernier peut intervenir à chaque étape du chantier, de la charpente à la toiture, en passant par les murs et l'isolation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu :

- Quelques techniques modernes basées sur des techniques de construction anciennes, utilisant des matériaux naturels, leurs caractéristiques et leurs qualités environnementales.
- La diversité des matériaux à base de sol tels que l'adobe, les techniques de fabrication et les produits utilisés dans la construction. Nous avons classé les matériaux par type pour choisir le matériau que nous pouvions choisir d'étudier, et BTS était la meilleure étude de cas.

La technologie des sols compactés stabilisés est optimisée grâce au développement de nouvelles technologies, ce qui peut accélérer le processus de construction. La Terre a permis de construire des bâtiments solides dans le monde entier, qui existent encore aujourd'hui. Parce qu'elle permet de réaliser des structures très diverses en forme et en fonction. La terre est le plus ancien des matériaux de construction, voire millénaire, mais peut aussi être moderne et innovant. Une architecture qui peut exister là où se trouve la terre. Les matériaux naturels tels que la terre, l'argile, la paille, le bois sont des alternatives durables utilisées dans le monde entier depuis des milliers d'années. Ces matériaux de construction naturels peuvent être utilisés aussi

bien à l'extérieur qu'à l'intérieur. Ils peuvent être aussi utilisés en sol et au plafond, ou bien des murs.

Le chapitre 2 présente une gamme de matériaux à base de terre, tels que les briques perforées, et les murs à base de mortier de ciment, de mortier de chaux, ou de mortier de ciment élargé ou d'argile, des petits blocs en terre moulés (adobe) sont construits comme des briques et sont porteurs. Ils sont utilisés dans les murs intérieurs pour stocker la chaleur et fournir une isolation phonique, ou comme enveloppe intérieure des structures à ossature de bois.

Les murs de terre crue (pisé) sont construits par battage de terre en coffrage (généralement dans notre pays avec un pilon à main ou à air comprimé). Ce type de murs sont porteurs, stockent la chaleur et leur structure irrégulière leur donne des propriétés particulières. Les morceaux de paille et de cellulose, et petits morceaux de bois. Ils sont fabriqués pour l'isolation thermique ou l'isolation acoustique des murs extérieurs et intérieurs en ossature bois, ou comme mortiers isolants intérieurs pour les murs extérieurs, les colles et enduits à base de matériaux naturels comme l'argile, et la chaux. Matériaux d'isolation fabriqués à partir de matières premières renouvelables telles que le bois, le chanvre, le lin, le seigle, les fibres de bois, le liège, la laine ou les panneaux de construction secs en cellulose ou à partir de matériaux naturels tels que les fibres de bois, le chanvre, le roseau, le liège. Les enduits d'argile paille sont principalement utilisés pour la rénovation des murs de remplissage (maisons de bois). L'aspect naturel de la matière et sa plasticité permettent toute expression artistique et toute décoration. En plus d'être un régulateur d'humidité et un isolant phonique, la terre crue présente des avantages environnementaux et économiques majeurs. En raison de l'action simple et pure du séchage de l'adobe au soleil, les dommages à la nature sont considérablement réduits, nous pouvons donc principalement localiser la qualité du sol brut avant et après la phase de construction, et les économies d'énergie dans le chauffage et la climatisation grâce au confort thermique que nous procurent les matériaux en terre et les propriétés thermiques de la terre.

Les matériaux en terre peuvent être obtenus partout, peuvent être obtenus partout et présentent de nombreux avantages. Contrairement à d'autres matériaux, ils ne consomment aucune énergie (non renouvelable et polluante). Les constructions en terre peuvent être recyclées et utilisées une autre fois comme matériaux de construction ; les matériaux en terre utilisent très peu d'eau, une ressource vitale pour la vie humaine. Les blocs de terre comprimée coûtent 20 à 30 % de moins que la maçonnerie que l'on trouve dans les blocs de ciment, les pierres ou même les briques de terre cuite. Ce matériau ne génère aucune émission de déchets pendant le processus de fabrication. Son utilisation garantit également l'absence de nuisances

dans la vie de tous les jours, et son autre avantage est qu'il est presque entièrement recyclable après une première utilisation ; les techniques et les outils nécessaires à la fabrication des matériaux en terre sont simples et accessibles à tous.

Malgré tous les avantages que le matériau terreux peut offrir, il présente également des inconvénients importants, il s'érode facilement, ce qui le rend difficile à utiliser dans les zones à fortes précipitations ; lorsqu'il est utilisé comme paillis, il absorbe l'eau, devient lourd et provoque un affaissement ; n'adhère pas au bois, ce qui peut provoquer une séparation autour des ouvertures, il ne résiste pas à la flexion ; les liaisons entre particules du matériau terre ont des propriétés physiques qui s'affaiblissent voire se neutralisent au contact de l'eau, ce qui peut dégrader le matériau et réduire considérablement ses propriétés mécaniques et sa durabilité dans le temps.

Ces inconvénients sont principalement liés à l'eau, qui entraîne des désordres structuraux appelés conditions de vieillissement, qui varient selon le climat et peuvent être contrôlés par des mesures préventives.

Les matériaux naturels ont généralement une toxicité plus faible que les matériaux synthétiques. Ils nécessitent moins de traitement et ont moins d'impact sur l'environnement, beaucoup d'entre eux, comme la terre, sont théoriquement renouvelables.

Les matériaux de construction écologiques répondent à plusieurs exigences différentes, ne nuisent pas à la santé des habitants, évitent les pertes d'énergie, ne nécessitent pas beaucoup de transport et ne nécessitent pas trop d'énergie pour être produits. Ils sont recyclables et produisent peu ou pas de pollution. En les choisissant, nous faisons quelque chose pour la planète en plus d'améliorer la qualité de vie. Le génie de la terre a permis de construire partout dans le monde des édifices solides qui existent encore aujourd'hui (en Afrique, depuis le 12^e siècle, et dans le sud-ouest des États-Unis d'Amérique, depuis le 16^e siècle). Parce qu'il permet la réalisation d'édifices de forme et de fonction très diverses (cabanes africaines, palais, temples, mosquées, églises, greniers, moulins, portes monumentales, etc.).

Les constructions en terre s'intègrent dans des sites urbains en milieu rural (en Afrique, en Asie, au Moyen-Orient, en Amérique latine, en Europe et aux États-Unis) sous des formes grouillantes, compactes, parfois défensives ou dispersées (Lyon, France, Nouveau-Mexique). Santa Fe, Colombie, Bogota, Afrique et Moyen-Orient). La géo-ingénierie a également permis de construire des bâtiments de très grande hauteur, comme ceux de la ville de Shibam, au Yémen, entièrement construits en terre, atteignant une hauteur de 30 m, ainsi que des structures

gigantesques, comme la mosquée de Mopti. au Mali, et l'église Saint-Xavier. Enfin, le génie de la terre a permis de conférer chaleur et confort spirituel aux constructions en terre.

Alors que l'humanité a connu un développement technologique au cours des derniers siècles et a permis à l'homme moderne de posséder une variété sans précédent de matériaux de construction, on assistera aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre dans plusieurs pays, y compris les nations industrialisées, utilisant le soutien de la recherche scientifique pour développer une variété de technologies de production. L'une des raisons de l'importance du foncier dans la construction est sa disponibilité et sa proximité avec les chantiers de construction de l'habitat, la mise en œuvre doit être relativement facile et nécessite des outils limités, souvent de la part des agriculteurs. Pour ces raisons, les constructions en terre concernent principalement les constructions rurales, même s'il existe de nombreux exemples de constructions en terre dans les zones urbaines.

Parmi les avantages de la terre crue, on peut également souligner la faible énergie nécessaire à sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et sa bonne inertie thermique, qui permettent un habitat frais en été et une rétention de chaleur en hiver, mais le problème des constructions en terre est qu'elles manquent de résistance, se fissurent systématiquement par retrait et souffrent de problèmes liés à leur sensibilité à l'eau.

Depuis l'Antiquité, l'homme a cherché à éviter les inconvénients des matériaux en terre, utilisant divers moyens de stabilisation pour améliorer leurs propriétés et leur sensibilité à l'eau, aboutissant à plusieurs produits en terre : adobe, terre battue, épis de maïs, blocs de terre comprimée. (BTC) etc... La technologie de ces blocs (BTC) est une nouvelle technologie par rapport à l'histoire de la construction civile, qui permet aux blocs d'avoir un format très flexible en termes de maçonnerie et peut être intégré dans les structures poteaux-poutres comme matériau de remblai et comme matériau principal pour murs porteurs. Afin d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques du BTC, de réduire sa porosité, son changement de volume (dilatation et contraction) et d'améliorer la résistance aux intempéries (réduire l'usure de surface et la perméabilité des blocs), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés : tels que le ciment, la chaux, l'asphalte, la fibre, etc.

Ainsi, dans le chapitre 3, nous avons recherché des méthodes ou des techniques de fabrication permettant d'optimiser ces blocs de terre comprimée pour augmenter leur résistance mécanique et pallier leurs défauts.

Le BTC est stabilisé en utilisant un renfort en fibres, dont la paille est fréquemment utilisée dans le monde depuis l'Antiquité. Il existe de nombreux types de briques d'adobe stabilisées à la paille faites à la main, mais nous connaissons également l'utilisation de fibres pour construire des épis de maïs, de la paille de boue, des épis de maïs, des blocs compactés et de la terre battue. Dans le cas des fibres synthétiques, elles sont souvent utilisées pour renforcer le sol afin d'augmenter la résistance à la compression et au cisaillement. Si elle est actuellement confirmée, la stabilité des liants et bitumes au BTC augmente leur résistance mécanique et leur insensibilité à l'eau. L'effet stabilisant de la fibre sur le BTC n'est pas partagé par tous les chercheurs.

Stabilisation des sols, ce qui veut dire modification des propriétés des systèmes sol-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications spécifiques. Mais la stabilité est une question complexe en raison des nombreux paramètres impliqués. Il faut vraiment comprendre : les caractéristiques de la terre, les aménagements envisagés, l'économie du projet, la technologie pour mettre en œuvre la terre choisie pour le projet, et l'entretien du projet. Les principaux objectifs de la stabilisation des sols sont les suivants : obtenir de meilleures propriétés mécaniques du sol (augmentation de la résistance à la compression, à la traction et au cisaillement), réduire la porosité et le changement de volume (réduire le retrait et la dilatation dus à l'eau), et enfin améliorer la résistance à l'érosion éolienne et pluviale (réduit l'usure de surface et la perméabilité à l'eau).

Il existe trois méthodes de stabilisation : La stabilisation mécanique est un terme général utilisé pour stabiliser un sol par compactage. Ce processus modifie les propriétés de la Terre (densité, compressibilité, perméabilité et porosité) en intervenant dans la structure. La stabilité physique ou les propriétés du sol peuvent être modifiées en intervenant dans la texture : un mélange contrôlé de différentes fractions de particules (argile et sable). La stabilité chimique de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou produits chimiques qui altèrent ses propriétés, soit par des réactions physico-chimiques entre les particules de terre et le produit ajouté, soit par la création d'une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer notamment le ciment, la chaux, le bitume et les sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques ajoutés dépendront de la nature du sol et du degré souhaité d'amélioration de la qualité du sol. Il existe en fait deux façons de traiter les matériaux du sol avec des produits chimiques, l'un est le traitement dans le sol (introduction d'une quantité minimale de stabilisants dans le sol), et l'autre est le traitement de surface (peinture, peinture, hydrofuge), pour protéger la surface en trempant les parties exposées.

Dans ce chapitre, nous avons également vu l'effet stabilisant du ciment /chaux (mixte). Ce type de traitement se fait sur des sols trop humides et plastiques. Nous utilisons d'abord de faibles niveaux de chaux seule, puis du ciment. Ces deux adhésifs ne sont pas concurrents, mais complémentaires.

Concernant les méthodes de recherche centrées sur les propriétés des matériaux, on retrouve des méthodes analytiques sous forme de calculs mathématiques (classiques), des méthodes expérimentales avec des modèles simplifiés, des mesures empiriques in situ, et des simulations numériques.

Cette méthode analytique permet de décrire la fonction thermique d'un bâtiment en utilisant les principes de la physique du bâtiment. La démarche expérimentale consiste également à tester la validité de l'hypothèse en reproduisant le phénomène et en modifiant les paramètres. Les paramètres changeants sont implicites dans les hypothèses. Les résultats expérimentaux ont vérifié l'hypothèse.

Pour mieux comprendre les performances thermiques du matériau de recherche (BTSC) dans les climats chauds et arides, cette étude utilise une approche quantitative (Analytique) basée sur l'utilisation d'expériences (prototypes simplifiés) et de simulations (TRYNSIS-17).

L'expérimentation est la méthode principale et se divise en deux phases. Phase 1 : Développement des matériaux de construction. Étape 2 : Mesure de la température ambiante et de surface.

La simulation est également divisée en deux étapes, la première étape est la vérification (validation) du prototype expérimental, et la deuxième étape est la simulation (optimisation) de différentes combinaisons. Des simulations numériques ont été réalisées sur le prototype pour optimiser l'influence de certains paramètres : coefficient d'absorption, transfert de chaleur et demande énergétique. Dans cette partie du travail, un modèle numérique a été développé combinant trois types de murs ; les résultats ont montré que des éléments de construction tels que matériaux de construction. Le contrôle du bâtiment affecte directement l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment, l'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) ne suffit pas et doit être améliorée. Quelques paramètres (ventilation et humidité relative) doivent également intervenir sur différents composants de la façade (ex : peinture réfléchissante) pour réduire les apports de chaleur.

Les expérimentations montrent que les propriétés du sol et les propriétés du liant utilisé comme stabilisant et la contrainte de compactage sont des paramètres fondamentaux affectant le comportement du BTSC selon la méthode proposée par l'APMC. Nous avons montré que la concentration en sable a peu d'effet sur la résistance mécanique, mais des doses comprises entre 25% et 40% donnent les meilleurs résultats. Par la suite, 30 % de sable concassé ont été introduits dans le mélange utilisé dans cette étude. Le poids du mélange sec global par bloc reste le même

À toutes les étapes de l'étude, le poids a été pris égal à 2 500 kg. Pour fabriquer les briques, un moule en acier trempé a été conçu, composé de 5 éléments, assemblés pour former un volume de 10x10x20 cm³. La filière est équipée de pistons pour assurer le transfert des efforts de compactage de la presse vers le mélange.

Habituellement, le mélange est compacté par une presse hydraulique de manière statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse déplace l'ensemble d'entraînement - matrice + mélange + piston, et le plateau supérieur reste fixe. Procédez ainsi jusqu'à ce que l'écran de lecture de la pression souhaitée s'affiche. Une contrainte de compactage de 5 à 10 MPa a été appliquée tout au long de l'étude. Mais les blocs de cette étude ont été réalisés dans une presse dynamique qui pétrit et compacte le mélange à une contrainte de 10 MPa. (Nous avons changé le moule pour un moule parallélépipédique. Parce qu'ils ont un moule cylindrique). Comme le béton, la résistance des liants du sol augmente avec l'âge. Tous les sols ne se comportent pas de la même manière, mais une période de cure de 10 jours est essentielle. Pendant cette période, le matériau sera conservé en atmosphère humide, à l'abri du soleil, et à l'abri du vent, ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions réelles de stockage, les blocs doivent être protégés par du plastique pendant quelques jours avant utilisation.

Après démoulage, retirer soigneusement le bloc à la main en évitant de toucher les bords, car le bloc est fragile, puis recouvrez-le d'un film plastique pour assurer son étanchéité. Favorise une hydratation maximale de l'adhésif. Les blocs ont ensuite été stockés sans plastique, mais toujours à l'ombre pendant encore 10 jours, en les retournant tous les trois jours pour permettre aux blocs de sécher uniformément.

Le prototype expérimental appelé prototype (A) est un cube (1,00 X 0,70 X 1,00 m) avec des bords intérieurs). Planches et planchers, fortement isolés par une double couche de polystyrène rigide de 5 cm d'épaisseur, soit une épaisseur de 10 cm. Cellule de prison, orientée nord-sud, (la façade la plus défavorable avec la façade principale orientée au sud). Surélever le

sol de 50 cm à l'aide du support en métal, voir photo. Sur le mur sud nous avons fait une ouverture pour y glisser l'instrument de mesure (porte), 30/30 cm de large et de haut, la porte fait 42 cm de haut et 30 cm de large. Les deux prototypes sont suffisamment éloignés pour éviter de projeter des effets d'ombre. Nous mesurerons la température de surface intérieure du mur sud, car c'est le mur le moins favorable et il sera exposé au soleil toute la journée.

Le prototype A est une batterie non isolée (SI) en BTSC.

Le prototype B est une batterie en BTSC avec isolation (AS).

Il faut également noter que le prototype est situé dans l'environnement urbain de la ville de Biskra, avec les deux unités dans les mêmes conditions climatiques, orientées au sud, la distance entre les unités a été conservée pour ne pas affecter la projection d'ombre. Les mesures ont été prises le 1/11/21/31 pendant une période de 4 jours. Les mesures sont prises toutes les 15 heures de 6h à 20h. (Tex dans l'ombre à 1,2 m de hauteur).

La température ambiante et de surface du prototype B (avec isolation) était inférieure de 3° à 4° à la température extérieure (température moyenne TM et température extérieure moyenne mesurée). Contrairement aux autres jours, la différence constatée ce jour-là est que l'écart de la température de surface interne (prototype B) par rapport à la température ambiante (B) est inférieur à 2°. La température ambiante sans isolation (A) est de 30° à 38° et de 3° à 4° inférieures à la température mesurée à l'extérieur. Nous avons également remarqué qu'il y avait une différence de deux degrés entre les températures ambiantes (A) et (B), avec un minimum entre 30° et 32° et un maximum entre 36° et 38°, sans différence entre les surfaces extérieures. Température non isolée courbe et courbe de température ambiante non isolée.

Les jours du 11/21 août sont apparemment très proches, avec des températures oscillant entre 26°C à 6h et 34°C à 18h. La température ambiante du Prototype B le 31 août était supérieure de 4°C le matin et de 5°C l'après-midi. On observe l'écart de courbe inverse au paramètre précédent, où chaque jour à une courbe très différente, le plus bas et la courbe du 1er août, puis le 11, puis le 21/31. Le 11, Le prototype B avait la température de surface interne la plus basse, inférieure de 3°C au (21/01/31), et ces températures étaient les mêmes que celles mesurées le matin du 21/01/31, avec une différence de 1°C par rapport à midi à 1°C. Par rapport au 21/11, le 1er août était inférieur de 1°C. Le 11 août est assez différent des autres jours, avec un écart de 3° à 4° le 31 et le jour où la température maximale atteint 36°. Le 11 août, les températures à la surface extérieure ont culminé à 14 h et chuté à 28° à 20 h. Cela est dû à la

pluie observée l'après-midi, contrairement aux autres jours où la température maximale entre 4 et 6 est de 39° l'après-midi

⚡ Toutes les températures ont suivi la même courbe, sauf le 11 où nous avons constaté une baisse de température de 3° par rapport aux autres jours. De 6h00 à 12h00 du matin, la température de surface extérieure du prototype B est presque la même, avec une différence de 1°, mais il y a une différence notable le soir (à partir de 12h00), la plus basse est 11h00, et le plus haut est 31. Nous avons observé trois ensembles de températures très différentes, avec une température de surface nettement inférieure à la température ambiante, l'écart variant entre 2°C et 5°C. La température ambiante varie entre 2°C et 6°C de la température de la surface extérieure.

L'analyse climatique est un modèle fiable qui identifie avec précision les paramètres climatiques et leur importance pour déterminer leur impact sur les microclimats, les personnes et les villes, et la conception des bâtiments. Les régions arides et chaudes - notre cas d'étude - présentent des facteurs défavorables en été qui affectent le bien-être individuel et peuvent être une source d'inconfort s'ils ne sont pas pris en compte lors de la conception. Elles doivent être prises en compte et notées pour réguler le microclimat et l'atmosphère intérieure au profit de l'homme et de son équilibre thermique.

Des études expérimentales par la réalisation de deux prototypes réduits ont permis de tester la fonction thermique (température de surface extérieure, température ambiante, température de surface intérieure) de murs en pisé stabilisé et comprimé. Ces prototypes offrent la possibilité de déterminer l'impact pratique des propriétés thermiques des BTSC. Les résultats obtenus montrent que ce matériau a un effet positif sur la fonction thermique des murs et sur le confort thermique de l'intérieur, avec une diminution de la température de surface jusqu'à 7°C, ce qui affecte la chaleur stockée et le flux de chaleur transféré. Baisser la température interne à 6°C, puis baisser la température ambiante d'environ 5°C.

Pour la simulation, il est nécessaire de définir la géométrie, la forme, la taille et l'orientation du modèle étudié. Les données météorologiques de la ville concernée sont importées au format Tm2, puis les détails liés au prototype sont importés à l'aide de TRNbuild. Les propriétés des matériaux pour les murs (mur-plafond-sol) et les ouvertures peuvent être définies. Les scénarios utilisés (occupation - infiltration - fonctionnement de l'éclairage artificiel pour le chauffage ou la climatisation) concernant Le logiciel de sortie offre la possibilité de simuler plusieurs paramètres de propriétés différentes dans notre cas Deux aspects

ont été étudiés Le premier concerne les propriétés thermiques (ambiance température - température de la surface intérieure et température de la surface extérieure). Le second concerne les propriétés énergétiques (consommation d'énergie pour le chauffage et/ou la climatisation, bénéfices énergétiques), le tout pour assurer un environnement thermique confortable (voir détails en annexe).

Trois modèles ont été simulés en été pour optimiser l'utilisation de ce matériau. La simulation a été lancée en août (pas de temps d'une heure) et les résultats ont été exportés au format (xls). Ces cartes ont depuis été détaillées par le programme ORIGIN courant août (5088.0--58320). Les quatre jours sélectionnés durant cette période (01/11/21/31) correspondent à la période de l'année (5088.0/5336.0/5584.0/58320).

Le prototype 01 représente un mur constitué d'une seule rangée de briques (35/10/15 cm) avec 5 cm d'isolant en paille et 2 cm d'enduit d'argile, ce prototype montre le prototype expérimental B : 1er août (5088.00 h) La température ambiante est de 30°C, 35°C le 11 août (5336.0h), 32°C le 21 août (5584.0h) et 38°C le 31 août (5832.0h). Cela donne une température moyenne de 33,75°C. Le prototype 02 représente un mur en double encollage sans lame d'air. Enduit de 2cm de ciment, ce prototype présente : Le 1er août (5088.00h) la température ambiante est de 25°C, le 11 (5336.0h) est de 28°C 21 (5584.0h) est de 31°C, le 31 (5832.0h) est de 33°C. Cela donne une température moyenne de 29,25°C. Le prototype 03 représente une double paroi avec une lame d'air de 5 cm. Enduit de ciment 2 cm, ce prototype présente : 1er août (5088.00h) température ambiante 21°C, 11 (5336.0h) 27°C 21 (5584.0h) 28.5°C, 31 (5832.0h) à 30°C. Cela donne une température moyenne de 33,75°C.

L'accord entre les températures ambiantes mesurées (expérimentales) et simulées au 31 août était de 37°C, la différence entre les températures mesurées et simulées au 1er août était de 2°C, et d'autre part, les 11 et 21 août Il y a 5 °C à 5°C de différence le 1er août et nous avons atteint 27°C, une différence de 1°C par rapport à la marge de confort. Pour estimer la demande énergétique, des seuils de température pour le fonctionnement des bâtiments résidentiels ont été déterminés, soit 23°C à 26°C pour les climatiseurs. Cette zone est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251) qui donne des plages de température selon le type de bâtiment.

Le besoin énergétique minimum pour le climatiseur est le prototype 3 (double paroi avec lame d'air de 5 cm. Revêtement en ciment de 2 cm) avec des valeurs variant entre (2100,00/ 2700,00/ 2950,00 / 3000,00 KJ/H) correspondant à des heures (5088,00 / 5336,0 / 5584.0/

5832.0h) et jours (1/11/21/31 août). Présentant le besoin énergétique le moins observé, suivi de la double paroi (prototype 2). Vient ensuite un troisième prototype (prototype B de l'expérience) correspondant au premier prototype. Le Prototype 3 du 21ème jour est dans la zone de confort thermique de la norme (NF EN 15251). De plus, le 11 présentait également un confort acceptable à 26°C.

Des simulations numériques ont été réalisées sur le prototype pour optimiser l'influence de certains paramètres : coefficient d'absorption, transfert de chaleur et demande énergétique. Dans cette partie du travail, un modèle numérique a été développé qui combine trois types de murs ; les résultats montrent que les matériaux de construction comme le bâtiment. Le contrôle des éléments affecte directement l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment, et l'optimisation d'un seul paramètre (température ambiante) ne suffit pas et doit être améliorée. Quelques paramètres (ventilation et humidité relative) doivent également intervenir sur différents composants de la façade (ex : peinture réfléchissante) pour réduire les apports de chaleur.

Limite de recherche

Le manque de moyens est considéré comme une limite de l'étude, à commencer par l'absence de BTC ou BTS pour mener nos expérimentations et pouvoir mesurer in situ et utiliser le matériau directement sans le fabriquer. Ensuite, pendant une courte période, l'équipement de mesure n'a pas été disponible (nous avons espéré réaliser les expériences pendant les trois mois d'été). De plus, le manque d'instruments de mesure avancés capables d'enregistrer les valeurs d'une journée pour éviter les erreurs de mesure, comme l'utilisation de caméras thermiques, serait une contribution précieuse.

Un temps de simulation plus avancé, c'est-à-dire un an, peut également montrer les performances du BTSC en saison froide.

Avec les recherches futures, les résultats obtenus peuvent servir de point de départ pour de futures recherches :

- Introduire tous les paramètres climatiques, c'est-à-dire l'humidité et la ventilation.
- Collaborer avec des chercheurs en matériaux pour améliorer les qualités mécaniques et physiques du BTSC
- Proposer plusieurs modèles de ce matériau et de pouvoir le développer.
- Étudier la durabilité et le cycle de vie de ce matériau.

Bibliographie

Articles scientifiques

- Abbou, M., Semcha, A., & Kazi-Aoual, F. (2020). Stabilization of compressed earth block clayey materials from Adrar (Algeria) by lime and crushed sand. *Journal of Building Materials and Structures*, 7(1), 42-50.
- Abdelhamid, G., & Mohamed, G. (1998). Influence des types d'argiles sur les propriétés physico-mécaniques du béton de terre stabilisée au ciment.
- Amraoui, K. (2021). Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe.
- Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.
- Belouettar, R., Klepaczko, J., & Abadlia, M. (2002). Etude du comportement mécanique du béton cellulaire autoclavé produit en Algérie. *Sciences & Technologie. A, sciences exactes*, 49-54.
- Berkouk, D., & Mazouz, S. (2017). Étude expérimentale de l'impact de la température ambiante de l'air sur le niveau du confort thermique des occupants. *Courrier du Savoir*, 23, 173-182.
- Bessemoulin, P., & Olivieri, J. (2000). Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La météorologie*.
- Burrough, P. A. (1989). Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of soil science*, 40(3), 477-492.
- Berghout, N., Meerman, H., van den Broek, M., & Faaij, A. (2019). Assessing deployment pathways for greenhouse gas emissions reductions in an industrial plant—A case study for a complex oil refinery. *Applied Energy*, 236, 354-378.
- Boquera, L., Castro, J. R., Pisello, A. L., & Cabeza, L. F. (2021). Research progress and trends on the use of concrete as thermal energy storage material through bibliometric analysis. *Journal of Energy Storage*, 38, 102562
- Brun, E., & Camille, M. (2009). De l'imagerie 3D des structures à l'étude des mécanismes de transport en milieux cellulaires. Aix-Marseille 1.
- Chabi, S., Mezghiche, B., & Guettala, H. (2004). Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers.
- Dubois, P.-L. (2018). Chapitre 3. Choix des méthodes de recherche: discours contre La méthode! : Editions EMS, Management & Société, Collection Business Science Institute.

- Easton, R. D., & Shor, R. E. (1976). An experimental analysis of the Chevreul pendulum illusion. *The Journal of General Psychology*, 95(1), 111-125.
- Favre-Brun, A. (2013). Architecture virtuelle et représentation de l'incertitude: analyse des solutions de visualisation de la représentation 3D. Paper presented at the Colloque Virtual Retrospect 2013.
- Ferrara, L., Van Mullem, T., Alonso, M. C., Antonaci, P., Borg, R. P., Cuenca, E., . . . Roig-Flores, M. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. *Construction and Building Materials*, 167, 115-142.
- Garay, R., Uriarte, A., & Apraiz, I. (2014). Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade. *Energy and Buildings*, 85, 579-591.
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119-127.
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2003). Durability of cement and cement plus resin stabilised earth blocks.
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119-127.
- Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., & Chebili, R. (2002). Durability of lime stabilized earth blocks.
- Guettala, S., & Mezghiche, B. (2011). Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1263-1269.
- Guggenheim, S., Alietti, A., Bain, D., Drits, V., Formoso, M., Galan, E., . . . Watanabe, T. (1997). Report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 1996. *Clay Minerals*, 32(3), 493-495.
- Halpern, B. (1966). Concepts philosophiques de Claude Bernard d'après l'Introduction à l'étude de la Médecine expérimentale. *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 19(2), 97-114.
- Houben, H. (2011). Keynote Address: L'architecture de terre, une discipline à part entière? Paper presented at the Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage.
- Houben, H., Rigassi, V., & Garnier, P. (1996). Blocs de terre comprimée: équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149.

- Huang, L., & Zhai, Z. J. (2020). Critical review and quantitative evaluation of indoor thermal comfort indices and models incorporating solar radiation effects. *Energy and Buildings*, 224, 110204.
- Khadraoui, M. A., & Sriti, L. (2017). Facades' thermal behavior of the office buildings in a hot and arid climate. *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism*, 1(2), 28-38.
- Keddaoui, I., & Boukadoum, A. (2016). *Matériaux de construction et architecture durable*.
- Khaoula, G. (2019). Effet des ajouts minéraux avec la chaux sur la durabilité de mortier de terre crue.
- Kujala, K., Mäkikyrö, M., & Lehto, O. (1996). Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils. *Grouting and Deep Mixing In: Proceeding of IS-TOKYO 96*. Paper presented at the The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo.
- Lirola, J. M., Castaneda, E., Lauret, B., & Khayet, M. (2017). A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. *Energy and Buildings*, 142, 72-110.
- Locat, J., Trembaly, H., & Leroueil, S. (1996). Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian geotechnical journal*, 33(4), 654-669.
- Mackenzie, R. (1975). The classification of soil silicates and oxides *Soil Components* (pp. 1-25): Springer.
- Mango-Itulamy, L. A., Collin, F., Pilate, P., Courtejoie, F., & Fagel, N. (2019). Evaluation of Belgian clays for manufacturing compressed earth blocks. *Geologica Belgica*, 22(3-4).
- Mesbah, A., Morel, J.-C., & Olivier, M. (1999). Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents. *Materials and structures*, 32(9), 687-694.
- Morel, J.-C., & Kouakou, C. H. (2009). Performances mécaniques de l'adobe. 3èmes échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue, 17-2
- Paillé, P. (2022). La méthodologie de recherche dans un contexte de recherche professionnalisante: douze devis méthodologiques exemplaires. *Recherches qualitatives*, 27(2), 133-151.
- Pellicone, G., Caloiero, T., & Guagliardi, I. (2019). The De Martonne aridity index in Calabria (Southern Italy). *Journal of Maps*, 15(2), 788-796.
- Pignal, B. (2005). de l'article/du chapitre Terre crue. *Techniques de construction et de restauration: distributeur Eyrolles*.

- Rapone, G., & Saro, O. (2012). Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm. *Energy and Buildings*, 45, 189-196.
- Rosso, F., Peduzzi, A., Diana, L., Cascone, S., & Cecere, C. (2021). A sustainable approach towards the retrofit of the public housing building stock: energy-architectural experimental and numerical analysis. *Sustainability*, 13(5), 2881.
- Rosso, F., Pisello, A., Castaldo, V., Fabiani, C., Cotana, F., Ferrero, M., & Jin, W. (2017). New cool concrete for building envelopes and urban paving: Optics-energy and thermal assessment in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 151, 381-392.
- Sassine, E., Younsi, Z., Cherif, Y., & Antczak, E. (2017). Thermal performance evaluation of a massive brick wall under real weather conditions via the Conduction Transfer function method. *Case studies in construction materials*, 7, 56-65.
- Saiyouri, N. (1996). Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées. Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- Soufiane, M., Imane, B., Ikram, R., Fatah, B., & Belkacem, D. (2017). Modeling and control thermal of building for improve comfort level by using PID and on/off methods in the case south-west Algeria. Paper presented at the International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems.
- Spitz, C. (2012). Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments. Université de Grenoble.
- Sutcu, M., del Coz Díaz, J. J., Rabanal, F. P. Á., Gencel, O., & Akkurt, S. (2014). Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste. *Energy and Buildings*, 75, 96-108.
- Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., & Kriker, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161-168.
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J., & Leroueil, S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian geotechnical journal*, 39(3), 535-546.
- Wail, A. (2020). Investigation hydrochimique des eaux de sources de BEN SMIH-GUELMA.
- Zeroual, D. (2006). Impact des gains de chaleur sur la morphologie des batiments. Cas des climats chauds et arides.

Les theses

- Amraoui, K. (2021). Pour une optimisation des potentialités environnementales de l'enveloppe architecturale dans le contexte des zones chaudes et arides: Cas des bâtiments résidentiels. Université Mohamed Khider-Biskra
- Benhammane, M. (2019). Développement d'un modèle opérationnel de puissance pour systèmes photovoltaïques à concentration (CPV). Université Pascal Paoli.
- Benmessaoud, S. (2004). Prospection pour l'introduction de la construction en matériaux locaux dans le secteur du logement à Tamanrasset. Mémoire du diplôme de spécialisation et d'approfondissement-Architecture de Terre, 2004-2006.
- Berkouk, D. (2017). Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Bouchra, B., & Benatiallah, A. (2021). Etude et simulation de l'effet de paramètre climatique sur les modules solaires en couche mince en région saharien. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR.
- Bousri, A., Fouial, R., Merabet, S., & Bouketta, S. E. (2017). Les dispositifs de contrôle climatique dans la construction : Cas de la façade à double peau. Université de Jijel.
- Davtian, G. (1998). Analyse des données et cartographie automatique : application aux principales variables climatiques du versant méditerranéen du Maghreb. Université de Nice Sophia-Antipolis (UNS).
- DeJong-Hughes, J., Moncrief, J. F., Voorhees, W., & Swan, J. (2001). Soil compaction: causes, effects and control: St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service.
- Faure, X. (2007). Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique. Grenoble 1.
- Khadraoui, M. A. (2019). Étude et optimisation de la façade pour un confort thermique et une efficacité énergétique (Cas des bâtiments tertiaires dans un climat chaud et aride). UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- Lamouri-Hannani, H., & Khedidja, A. H.-K. (2014). Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun. Université Ahmed Draia-ADRAR.

- Latreche, S. (2019). Étude et amélioration des performances climatiques de l'enveloppe architecturale en milieux chauds et arides. Cas de l'architecture domestique autoproduite à Biskra. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Lecomte, R. (1982). Introduction aux méthodes de recherche évaluative: Presses Université Laval.
- Abdelhamid, H. (2019). Contribution à la production des blocs de terre comprimée et renforcée par des fibres. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.
- Leila, K. H. L. (2017). Etude des caractéristiques de béton cellulaire environnementale. Faculté des Sciences et Technologies.
- Medjelekh, D., & Abdou, S. (2010). Impact de l'isolation thermique sur la température intérieure du bâtiment. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE. Constantine, Algérie.
- Mobuchon, C. (2008). Étude des propriétés microstructurales et rhéologiques de suspensions non-aqueuses d'argile: École Polytechnique de Montréal.
- Ouedraogo, K. A. J. (2019). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- P'Kla, A. (2002). Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): application aux maçonneries" BTC-Mortier de terre". Lyon, INSA.
- Rodriguez, G. (2013). Modélisation de la réponse de l'architecture au climat local. Bordeaux 1.
- Taallah, B. (2014). Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Université Mohamed Khider Biskra.
- Tessier, D. (1984). Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation.

Livres

- Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., & Ruiz, E. (2011). Construire en terre, une autre voie pour loger la planète. *Secteur Privé & Développement*, revue bimestrielle de Proparco, 10, 18-21.
- Aubin-Auger, I., Mercier, A., Baumann, L., Lehr-Drylewicz, A.-M., Imbert, P., & Letrilliart, L. (2008). Introduction à la recherche qualitative. *Exercer*, 84(19), 142-145.
- Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (1997). Thermal comfort.
- Austroroads. (1998). Guide to stabilization in road works. (Vol. No. AP-60/98.). Sydney: Publication Austroroads,
- Bogue, R. H. (1955). The chemistry of Portland cement (Vol. 79): LWW.
- Colombert, M., Salagnac, J.-L., Morand, D., & Diab, Y. (2012). Le climat et la ville: la nécessité d'une recherche croisant les disciplines. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*(Hors-série 12).
- Choquette, M. (1988). La stabilisation à la chaux des sols argileux du Québec.
- Delbecq, C. (2011). Approche contemporaine de la construction en terre. *Histoire de la construction en terre*, 21.
- Delvoe, C. (1971). James Mellaart, Villes primitives d'Asie Mineure. Traduit de l'anglais par Antoinette
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). Construire en terre: Éditions Alternative et parallèles.
- Canguilhem, G. (1966). Le concept et la vie. *Revue philosophique de Louvain*, 64, 193-223.
- Canguilhem, G. (1981). Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie: nouvelles études d'histoire et de philosophie des sciences: Vrin.
- Canguilhem, G. (1983). Études d'histoire et de philosophie des sciences: Vrin.
- Chahwane, L. (2011). Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. Université de Grenoble.
- Chevreur, M. E. (1866). Histoire des connaissances chimiques (Vol. 1): Guérin.

- Claparède, E. (1933). La genèse de l'hypothèse: étude expérimentale. Archives de psychologie.
- Cornet, A. (1988). Principales caractéristiques climatiques. Estudio integrado de los recursos
- Corvol, P. (2013). Claude Bernard et la médecine expérimentale au Collège de France. La lettre du Collège de France(36), 19-21vegetación, suelo y agua en la Reserva de la Biósfera de Mapimí, 45-76.
- CNERIB. (1993). Recommandations Pour la Production et Mise en œuvre du Béton de Terre Stabilisée: CNERIB Algiers, Algeria.
- De Ponte, F. (2002). Conductivité thermique des isolants : Ed. Techniques Ingénieur.
- Duplay, C., & Duplay, M. (1982). Méthode illustrée de création architecturale : Editions du Moniteur.
- Floret, C., & Pontanier, R. (1984). Aridité climatique, aridité édaphique. Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 131(2-4), 265-275.
- Gaillard, C. (2021). Le climat est-il une ressource?. Perspectives historiques à partir de la conception bioclimatique en architecture. Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère(11).
- Gayon, J. (1996). Les réflexions méthodologiques de Claude Bernard: contexte et origines. Bulletin d'Histoire et d'Épistémologie des Sciences de la Vie, 3(1), 75-81.
- Givoni, B. (1978). Facteurs de conception affectant la ventilation. L'Homme, L'Architecture et le climat. Editions du Moniteur, Paris, 303-318.
- Givoni, B., & Izard, J.-L. (1978). L'homme, l'architecture et le climat: Ed. du Moniteur.
- Granger, G. G. (1994). Formes, opérations, objets: Vrin.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1989). Traité de construction en terre.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). Earth construction: a comprehensive guide.

- Houben, H., & Guillaud, H. (2006). *Treaty construction earth*. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France.
- Houben, H., Rigassi, V., & Garnier, P. (1996). *Blocs de terre comprimée: équipements de production*. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149.
- Houben, H., Verney, P.-E., Olivier, M., Mesbah, A., & Michel, P. (1987). *Construction en terre crue*: CRATerre.
- Hufty, A. (2001). *Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*: Presses Université Laval.
- Izard, J.-L., & Millet, J.-R. (1993). *Architectures d'été: construire pour le confort d'été*: Edisud
- Mandoul, T. (2012). Climat (s) : nouveau paradigme pour l'architecture ? *Raison publique*(2), 141-161.
- Mazouz, S. (2004). *Éléments de conception architecturale*. Éditions OPU.
- Michot, A. (2008). *Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile: évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400 C*. Limoges.
- Pédro, G. (1994). *Les minéraux argileux dans Pédologie (2-Constituants et propriétés du sol)*. Eds. Duchaufour Ph. et Southier B: Masson, Paris 665p.
- Pépin, A. (2018). *Performance énergétique et confort thermique : effet de la masse thermique, de la résistance et des matériaux de l'enveloppe*.
- Picon, A. (2010). *Culture numérique et architecture: une introduction*: Editions Birkhäuser.
- Pidwirny, M. (2006). *Causes of climate change*. *Fundamentals of physical geography*.
- Rigassi, V. (1995). *Blocs en terre comprime. Volume I. Manuel de production*. CraTerre-EAG.
- Verdeyen, J., Roisin, V., & Nuyens, J. (1971). *APPLICATIONS DE LA MECANIQUE DES SOLS. TOME 2*.

Vénuat, M. (1980). Le traitement des sols à la chaux et au ciment.

Winterkorn, H. (1975). Soil stabilization: Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Zundel-Bernard. L'Antiquité Classique, 40(1), 390-392.

Documents techniques

Bisch, P., & Calgaro, J.-A. (2004). Eurocodes-Codes européens de conception des constructions. Techniques de l'ingénieur. Construction(C60), C60. 61-C60. 19.

Brindley, G. W., & Pédro, G. (1970). Rapport du Comité International de Nomenclature AIPEA-TOKYO-1969. Bulletin du Groupe français des Argiles, 22(1), 1-4.

Caillère, S. (1982). Mineralogie des argiles. ii: classification et nomenclature.

D.T.R., C.-. (1998). Document, 'Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitations - Règles de Calcul des déperditions Calorifiques', Fascicule 1, CNERIB.

Pédro, G. (1967). Commentaires sur la classification et la nomenclature des minéraux argileux. Bulletin du Groupe français des Argiles, 19(1), 69-86.

Sites internet

- . Auroville, Inde. (<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.nathaliesbackyard.com%2Fdeux-semaines-en-inde-lexperience-dauroville> 24/avril/2022 à 11h03),
- . brique extrudée. (https://www.google.com/search?q=Terre+extrud%C3%A9e+&tbm=isch&ved=2ahUK_Ewi9gK_Km933AhWpXvEDHWbuDloQ2-cCegQIABAA&oq 23/avril2022à 15h04),
- . construction en terre façonée. (www.google.com/search?q=Terre+fa%C3%A7onn%C3%A9e+&tbm=isch&ved=2ahUK_EwjnmI62nd33AhWUZfEDHSoKDn0Q2-cCegQIABAA&oq=Terre+fa%C3%A7onn%C3%A9e+ 25avril2022à 14h10),
- . Djenné, L. g. m. d. (<https://images.fineartamerica.com/images-medium-large-5/great-mosque-of-djenne-mali-africa-panoramic-images.jpg> 5-4-202117h15), from <https://images.fineartamerica.com/images-medium-large-5/great-mosque-of-djenne-mali-africa-panoramic-images.jpg>
- . cliff palace. (https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Mesa_Verde_National_Park_Cliff_Palace_Right_Part_2006_09_12.jpg 14h36), from [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier: Mesa_Verde_National_Park_Cliff_Palace_Right_Part_2006_09_12.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Mesa_Verde_National_Park_Cliff_Palace_Right_Part_2006_09_12.jpg)
- . Différents produits de blocs de terre comprimée. (https://www.google.com/search?q=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e&rlz=1C1CHZL_frDZ718DZ718&ved=2ahUK_EwjnmI62nd33AhWUZfEDHSoKDn0Q2-cCegQIABAA&oq=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e&rlz=1C1CHZL_frDZ718DZ718& 22/avril/2022 à 15h08), from [https://www.google.com/search?q=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e&rlz=1C1CHZL_frDZ718DZ718&](https://www.google.com/search?q=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e&rlz=1C1CHZL_frDZ718DZ718&ved=2ahUK_EwjnmI62nd33AhWUZfEDHSoKDn0Q2-cCegQIABAA&oq=1-1-1-La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e&rlz=1C1CHZL_frDZ718DZ718&)
- . Iran, T. z. e. (<http://irandoostan.com/dostcont/uploads/2016/09/Chogha-Zanbil-1.jpg> 18-04-2022 14h10),
- . l'Isle d'Abeau, France. (https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.les-caue-occitanie.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Ffichiers%2Fressource%2Ffield_fichiers%2F82_construire_terre_crue.pdf&psig=AOvVaw3RBayXU0- 24/avril2022 à 22h03),
- . Maison troglodytiques de Matmata Tunis (https://www.google.com/search?q=matmata+tunis&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUK_EwispZjLz9r3AhUOi_0HHUVrBVQQ_AUoAXoECAIQAw) 20/03/2022 à 14h10),

Mari, s. (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/MariZimri-LimPalace.jpg/220px-MariZimri-LimPalace.jpg> 5-12-2021 18h05),

Meteonorm, & CSTB, p. Base de données météorologiques, from <https://www.batirama.com/produit/10371-donnees-en-ligne/47271-meteonorm-page-1.html>)

. mur en adobe.), from

<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.sitiosolar.com%2Ffr%2Fla-construction-en-terre-crue-la-brique-dadobe-et-le-pise%2F&psig=AOvVaw2sxRLD3oxvLNgoAcViqCBc&ust=1652560277574000&source=images&cd=vfe&ved=0CAkQjRxqFwoTCPDe5YGp3fcCFQAAAAAdAAAAABAE10/mai/2022> 15h15

. mur en bauge., from <http://totem-terre-couleurs.fr/maconnerie-terre/mur-de-bauge.html> (23/avril/2022 à 15h05)

. mur en pisé, from https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.futura-sciences.com%2Fmaison%2Fdefinitions%2Farchitecture-pise-17869%2F&psig=AOvVaw3b-PUcpNpikv-5uyBHAY-w&ust=1652560166519000&source=images&cd=vfe&ved=0CAkQjRxqFwoTCNCQ_8ao3fcCFQAAAAAdAAAAABAJ(23/mai/2022 à 10h34)

. mur en torchis., from

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3D_0dxUW8hO38&psig=AOvVaw3BTXYgCuDbjf36eyDTVQBh&ust=1652560387823000&source=images&cd=vfe&ved=0CAkQjRxqFwoTCLCchq-p3fcCFQAAAAAdAAAAABAD(22/mai/2022 14h15)

. mur terre-paille., from <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ffaits-le-mur.com%2Fterre-paille%2F&psig=AOvVaw14UO2SJNuDGXf-U3G0ccK8&ust=1652559848387000&source=images&cd=vfe&ved=0CAkQjRxqFwoTCJjqrbyn3fcCFQAAAAAdAAAAABAD>(24/mai/2022.10h03)

. terre comprimé 1., from <https://www.google.com/search?q=1-1-1-+La+terre+stabilis%C3%A9e+compact%C3%A9e>(23/avril/2022 à 14h23)

. terre comprimée 2.from

<https://www.google.com/search?q=brique+de+terre+comprim%C3%A9e&source=Inms&tbn=isch&sa=> (23/avril/2022 à 15h10)

. Simulation-thermique-dynamique, from
<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.phoenix-energie.fr%2Fvotre-besoin%2Fsimulation-thermique-dynamique> (10 septembre 2018)

Yémen, S. a. from <https://img.ev.mu/images/attractions/7744/960x640/435725.jpg>(8-12-202114h07)

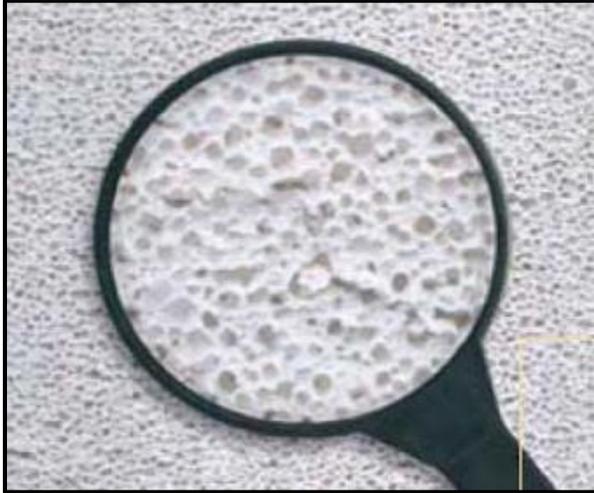
Weatherspark. (2017). données climatologiques from <https://fr.weatherspark.com>

Annexe

Annexe A : LE BETON CELLULAIRE

Le Béton cellulaire est un matériau de construction minéral et massif. Ses propriétés physiques (Légèreté & solidité, isolation thermo acoustique, ininflammabilité) en font un matériau d'exception.

Grâce à sa structure contenant des millions de pores, il présente une faible masse volumique tout en assurant une solidité optimale, ce qui lui permet d'être un matériau simple à construire à usage multiple (résidentiel et industriel).



Composition du béton cellulaire :

Les matières premières principales pour la fabrication du béton cellulaire sont le sable, la chaux, le ciment et l'eau. Toutes ces matières

premières sont présentes en abondance dans la nature.

En présence d'eau, la chaux réagit avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). Chaux et ciment servent de liants. L'agent d'expansion, sous forme de poudre extrêmement fine (environ 50 m) en très faible quantité ($\pm 0,05\%$) sert de levain en cours de fabrication pour faire lever la pâte et créer des cellules qui se remplissent rapidement d'air.

En moyenne, la proportion de matières premières utilisées lors de la fabrication est la suivante :

- Environ 65 % de sable de quartz siliceux.
- Environ 20 % de ciment.
- Environ 15 % de chaux.
- 0,05 % d'agent d'expansion.
- Environ 1 % de gypse.
- Eau.

➤ **Avantage :**

- **Isolation thermique :** Grâce aux bulles d'air emprisonnées dans ses cellules, le béton cellulaire acquiert des propriétés d'isolation thermique significatives. Il assure une ambiance agréable à l'intérieur par l'élimination des ponts thermiques. Le béton cellulaire absorbe l'augmentation de la température extérieure durant le jour et restitue l'énergie accumulée pendant la nuit.

- **Légèreté :**

Le Béton cellulaire présente un poids léger par rapport aux autres matériaux de construction. Cette propriété donne l'avantage d'un transport et d'une construction plus facile. Sa légèreté permet une économie de masse sur les structures et les fondations.

Résistance à la compression Le béton cellulaire se caractérise par une résistance à la compression extrêmement élevée. Les essais réalisés en laboratoire font d'ailleurs apparaître des résistances mécaniques nettement supérieures à celles imposées par les normes.

- **Résistance au feu** : Le béton cellulaire est une garantie de sécurité contre le feu. Grâce à son matériau minéral naturel, il est incombustible et coupe-feu de 1 heure à 6 heures selon l'épaisseur. Il assure une protection exceptionnelle et remarquable contre le feu tant pour les bâtiments industriels que pour l'habitation individuelle sans dégagement des fumées ou gaz toxiques.

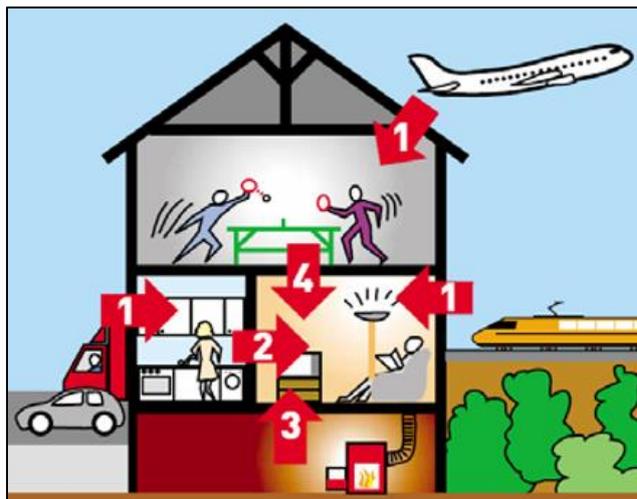
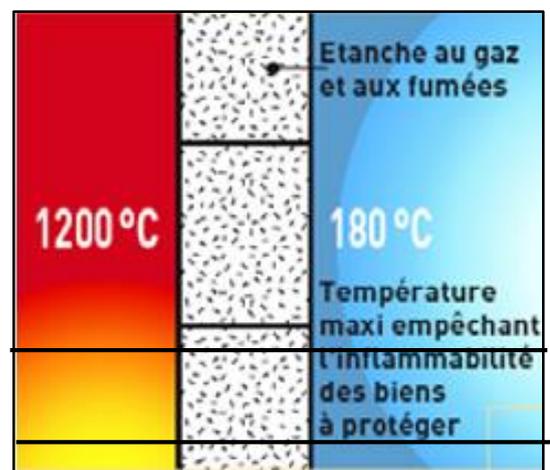


Figure : résistance au feu. **Source** : construire en béton cellulaire

- **Affaiblissement acoustique** :

Le Béton Cellulaire répond aux exigences de la nouvelle réglementation acoustique en vigueur, celui-ci permet une parfaite isolation phonique aussi bien pour les bruits intérieurs qu'extérieurs à l'habitation.

Figure: affaiblissement acoustique. **Source** : construire en béton cellulaire.



- **Manipulation facile :**

Le béton cellulaire peut être découpé et ajusté facilement avec une scie manuelle ou une scie à ruban. Les travaux de plomberie et d'installation électrique sont exécutés aisément.

Figure: manipulation facile. **Source :**
construire en béton cellulaire

- **Dimensions précises :**

Le béton cellulaire possède des dimensions précises et une planéité parfaite ce qui permet de réduire la quantité nécessaire du mortier pour la construction ainsi que pour l'enduit.

- **Confort intérieur :**

Il constitue un véritable régulateur hygrométrique en adoucissant l'air sec par diffusion de vapeur ou en absorbant l'humidité excessive. Il contribue ainsi à créer un climat sain et agréable dans toute la maison. On dit de lui qu'il « respire ».

(Les molécules de vapeur d'eau passent entre les particules de matière, mais les gouttes d'eau, trop grosses, ne passent pas.)

- **Économie :**

La facture énergétique est en hausse continue pesant lourdement sur le consommateur. Le béton cellulaire, grâce à son avantage d'isolation thermique, permet de réaliser des économies aussi bien sur la taille des équipements de chauffage et de climatisation que sur l'énergie consommé.

- **Ami de l'environnement :**

Le béton cellulaire respecte l'environnement. Il ne contient ni matière toxique, ni élément radioactif. Il est l'ami de la nature durant son cycle de vie depuis sa production jusqu'à son utilisation dans les travaux du bâtiment.

➤ **Gamme de produits :**

- **Les blocs :**

Destinés à la réalisation de murs extérieurs et de séparation, de murs de remplissage, de sous-sol et de murs coupe-feu.

Longueur (cm)	60	60	60
Hauteur (cm)	25	25	25
Épaisseur (cm)	20	25	30
Nombre de pièces/m²	7	7	7
Consommation du mortier colle kg/m²	2,6	3.25	3.9
Avec emboîtement			

Tableau: dimensions des blocs du béton cellulaire. **Source :**
construire en béton cellulaire

- **Les carreaux :**

Les carreaux sont destinés à la réalisation de cloisons massives de séparation ou en doublage de mur, en aménagement intérieur tant en neuf qu'en rénovation.

Longueur (cm)	60	60	60
Hauteur (cm)	25	25	25
Épaisseur (cm)	7,5	10	15
Nombre de pièces/m²	7	7	7
Consommation du mortier colle kg/m²	1,13	1,41	1,76

Tableau: dimensions des carreaux en béton cellulaire. **Source :**
construire en béton cellulaire

- **Les linteaux :**

Les linteaux sont des éléments armés préfabriqués de dimension standard. Ils complètent et améliorent les qualités thermiques en supprimant les ponts thermiques. Leur utilisation garantit une totale sécurité de résistance. Leur mise en œuvre s'effectue par une simple pose collée, sans étai ni coffrage et sans arrêt du chantier.

- **Le mortier colle :**

Le mortier colle est destiné pour la réalisation de gros œuvre, de tous types de construction. Il garantit une utilisation des quantités exactes nécessaires pour le chantier. L'utilisation des truelles à dents adaptées à l'épaisseur du mur permet de réaliser des joints minces de 2 mm environ.

➤ **Caractéristiques techniques des blocs en béton cellulaire :**

Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (w/m.k)	Résistance à la compression (N/mm ²)
400	0,120	3,0
450	0,130	3,5
500	0,165	4,0

Tableau: caractéristiques techniques des blocs en béton cellulaire.

Source : construire en béton cellulaire.

Remarque : en raison de sa faible résistance à la traction, ses extrémités sont coulé en béton armé.

➤ **Comparatif béton cellulaire/autres matériaux de construction :**

Désignations	Épaisseur (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (en W/m .K)	Résistance thermique R (m ² .K/W)	Affaiblissement acoustique Rw (db) > norme* = 30 db
Béton cellulaire	20	400	0,12	1,54	47
Brique creuse	20	700-1000	0,35	0,57	47
Parpaing creux	20	1000	1,10	0,18	54

Tableau: Comparatif béton cellulaire/autres matériaux de construction.

Source :

construire en béton cellulaire

*Affaiblissement demandé par la réglementation acoustique.

➤ **Application du mortier colle :**

-préparer le mortier colle : 3 volumes de mortier colle pour 1 volume d'eau. - Laisser reposer la pâte pendant 20 minutes. - Avant la pose du 1er rang, Appliquer une couche de ciment (1 volume de ciment pour 4 volumes de sable). - Les joints verticaux ne sont pas nécessaires pour les blocs à emboîtement. - L'épaisseur des joints varie entre 2 et 3 mm.



Figure: pose de mortier c **Source :** construire en béton cellulaire.

Remarque : Pour garantir une meilleure isolation thermique, il est recommandé d'utiliser le mortier colle.

➤ **Outillage nécessaire:**

Truelle dentée adaptée à l'épaisseur des murs pour application du mortier à joints minces	
Marteau en caoutchouc	
Mélangeur de mortier	
Planche à poncer pour éliminer les inégalités des murs et pour permettre une meilleure fixation du mortier	
Scie égoïne pour découpe des blocs	
Équerre de découpe pour garantir des dimensions précises en sciant les blocs	
Rainureuse pour réaliser des saignées d'installation électrique	
Mèche pour encastrement boîtier électrique	

Tableau : outillage nécessaire à la mise en œuvre. **Source** : construire en béton cellulaire.

Annexe B :

Caractéristiques		Ind ¹ .	
Données Techniques	Conductivité thermique (λ) :	1,1 W/m. °C	<input checked="" type="checkbox"/>
	Masse volumique (ρ) :	2 000 kg/m ³	
	Chaleur spécifique (C) :	1 500 J/kg. °C	
	Capacité thermique volumique :	3 000 kJ/m ³ . °C	
	Capacité thermique surfacique :	1 200 kJ/m ² . °C	
	Diffusivité thermique (a) :	1,32.10 ⁻⁶ m ² /s	
	Effusivité (E) :	30 W.h.0,5/m ² . °C	
	Dimensions :	De 4x20x19 à 120x100x22	
	Résistance à la compression (Rd) :	78 bars	
	Résistance à l'écrasement après 48 heures d'immersion :	33 bars	
Coefficient de diffusion à la vapeur d'eau (μ)	10		
Normes	Avis technique	En cours	

Annexe C : l'expérimentation

Etape de construction











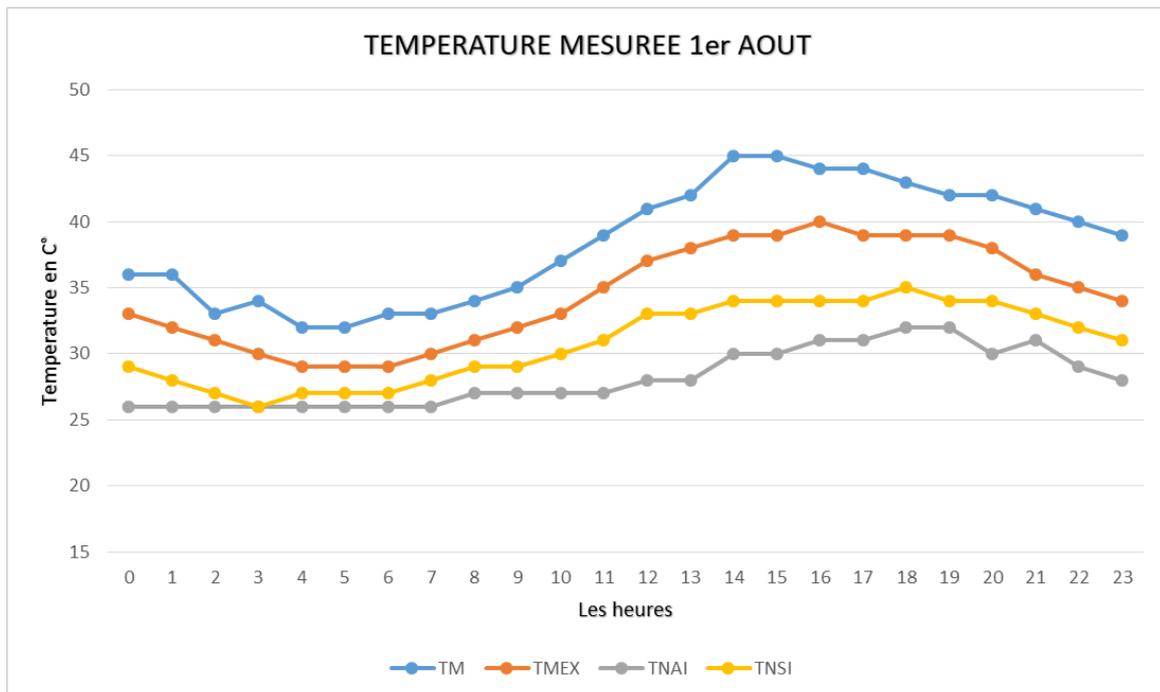
Kg.



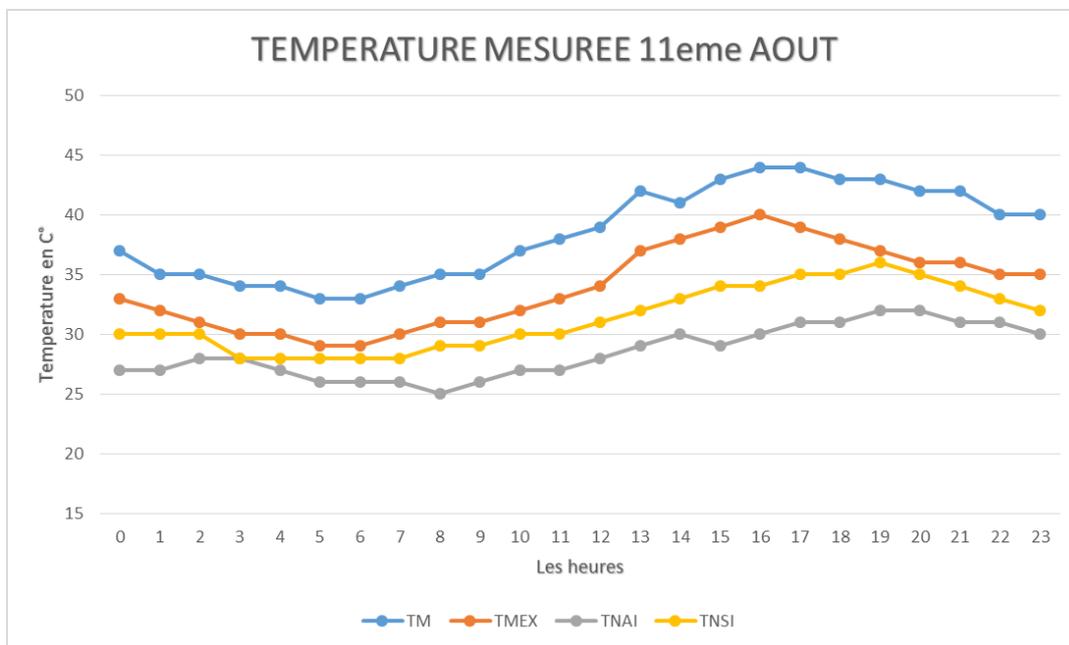


ANNEXE D : prise de mesure

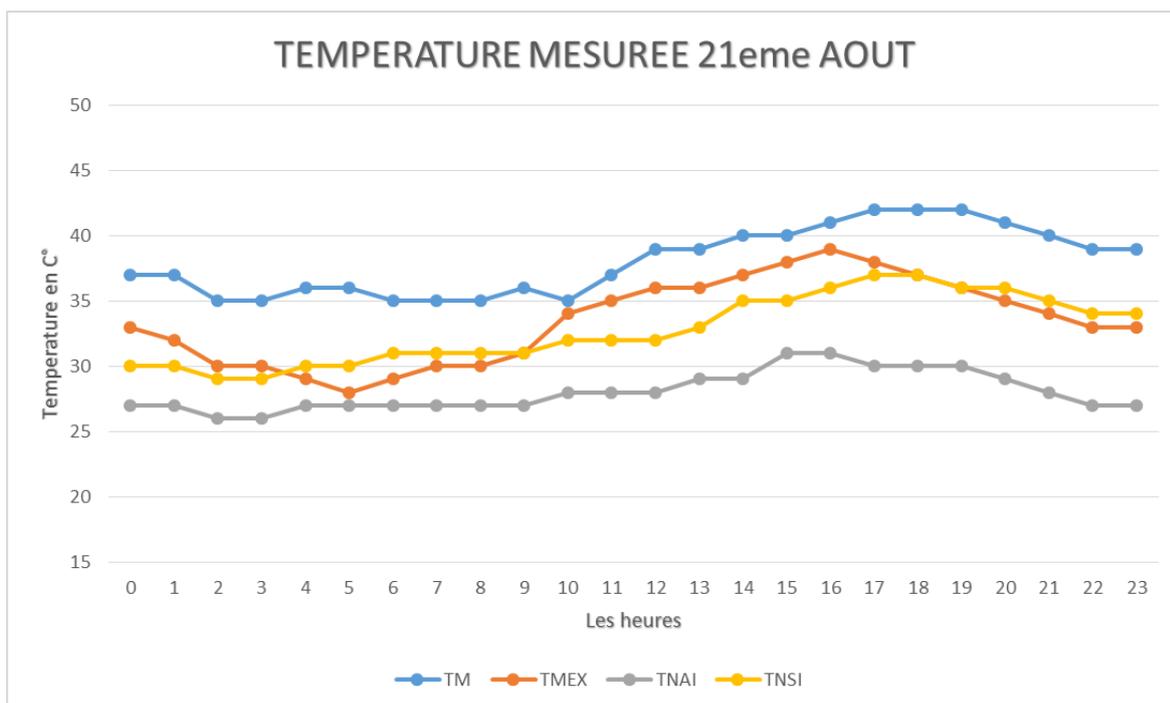
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
TM	36	36	33	34	32	32	33	33	34	35	37	39	41	42	45	45	44	44	43	42	42	41	40	39
TMEX	33	32	31	30	29	29	29	30	31	32	33	35	37	38	39	39	40	39	39	39	38	36	35	34
TNAI	26	26	26	26	26	26	26	26	27	27	27	27	28	28	30	30	31	31	32	32	30	31	29	28
TNSI	29	28	27	26	27	27	27	28	29	29	30	31	33	33	34	34	34	34	35	34	34	33	32	31



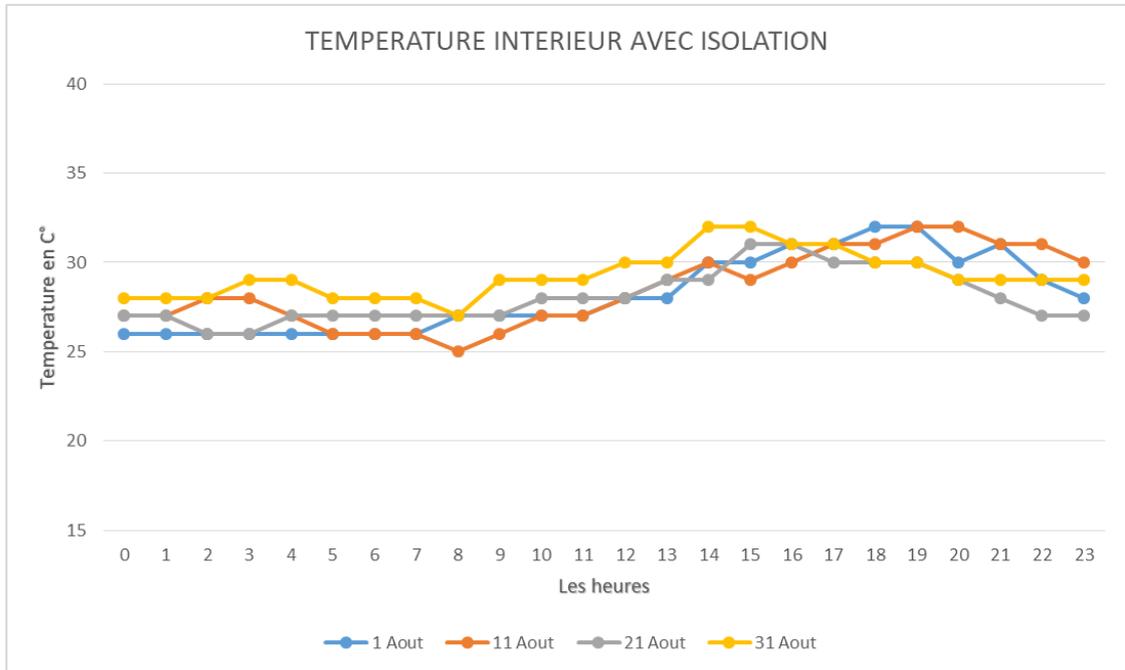
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
TM	37	35	35	34	34	33	33	34	35	35	37	38	39	42	41	43	44	44	43	43	42	42	40	40	
TMEX	33	32	31	30	30	29	29	30	31	31	32	33	34	37	38	39	40	39	38	37	36	36	35	35	
TNAI	27	27	28	28	27	26	26	26	25	25	26	27	28	29	30	29	30	30	31	31	32	32	31	31	30
TNSI	30	30	30	28	28	28	28	28	29	29	30	30	31	32	33	34	34	35	35	36	35	34	33	32	



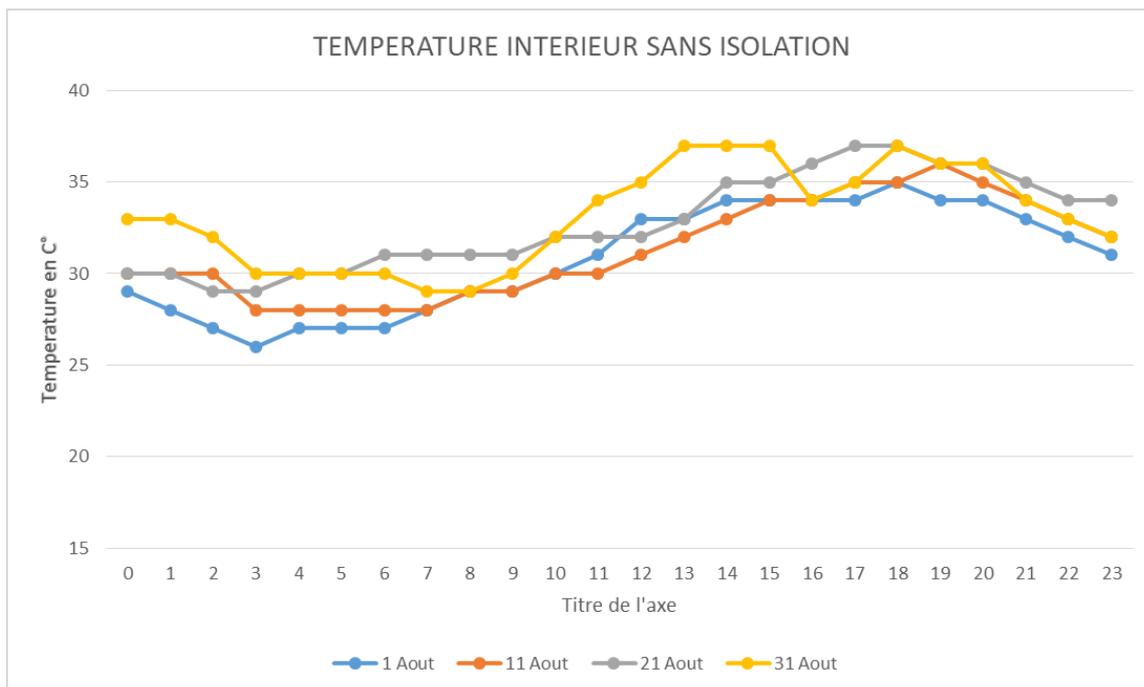
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
TM	37	37	35	35	36	36	35	35	35	36	35	37	39	39	40	40	41	42	42	42	41	40	39	39
TMEX	33	32	30	30	29	28	29	30	30	31	34	35	36	36	37	38	39	38	37	36	35	34	33	33
TNAI	27	27	26	26	27	27	27	27	27	27	28	28	28	29	29	31	31	30	30	30	29	28	27	27
TNSI	30	30	29	29	30	30	31	31	31	31	32	32	32	33	35	35	36	37	37	36	36	35	34	34



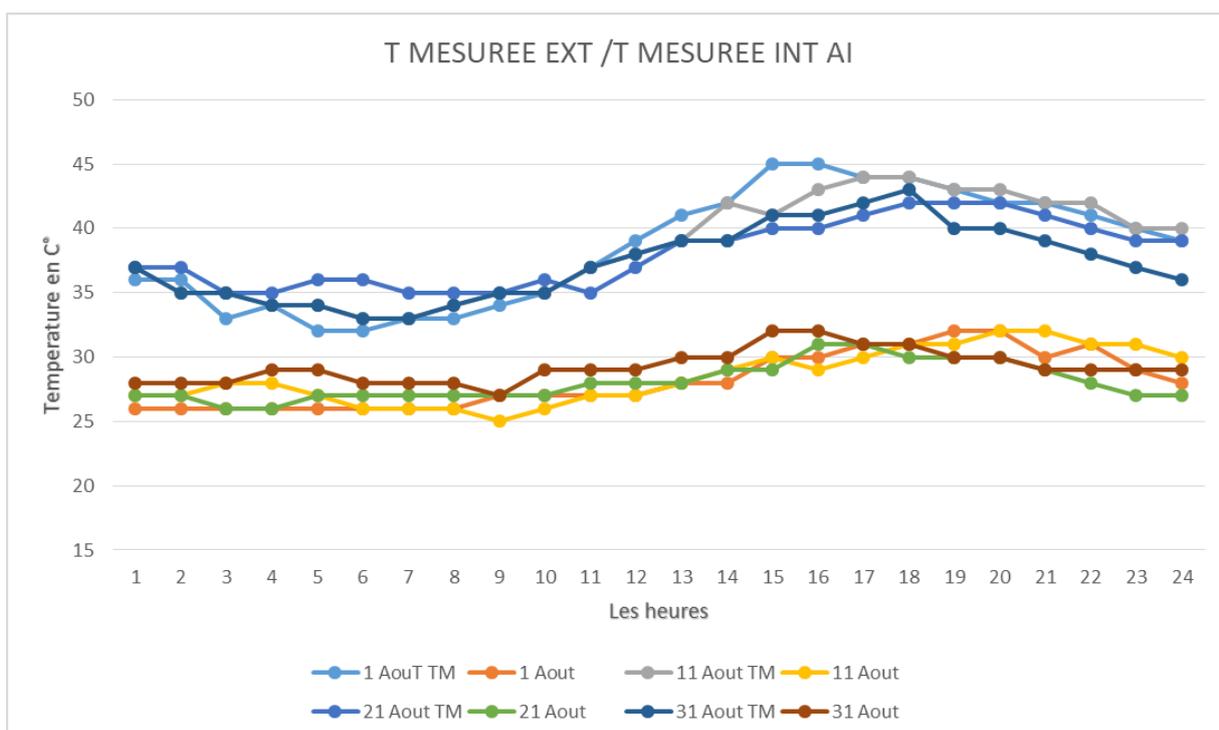
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
TM	37	35	35	34	34	33	33	34	35	35	37	38	39	39	41	41	42	43	40	40	39	38	37	36	
TMEX	31	30	29	28	28	27	27	28	29	29	32	33	34	35	35	36	37	36	36	36	35	36	34	33	32
TNAI	28	28	28	29	29	28	28	28	27	29	29	29	30	30	32	32	31	31	30	30	29	29	29	29	
TNSI	33	33	32	30	30	30	30	29	29	30	32	34	35	37	37	37	34	35	37	36	36	34	33	32	



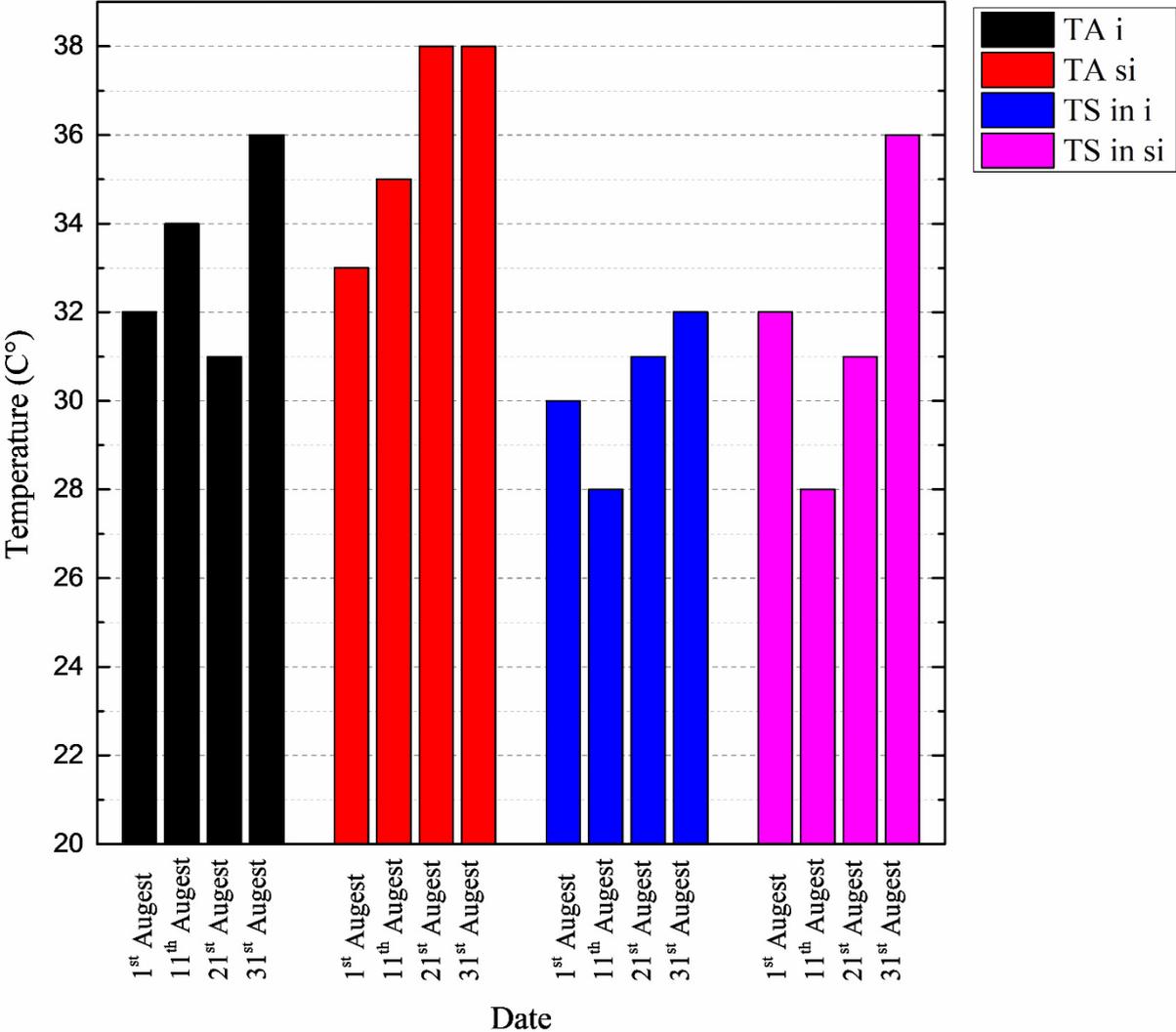
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1 Aout	29	28	27	26	27	27	27	28	29	29	30	31	33	33	34	34	34	34	35	34	34	33	32	31
11 Aout	30	30	30	28	28	28	28	28	29	29	30	30	31	32	33	34	34	35	35	36	35	34	33	32
21 Aout	30	30	29	29	30	30	31	31	31	31	32	32	32	33	35	35	36	37	37	36	36	35	34	34
31 Aout	33	33	32	30	30	30	30	29	29	29	30	32	34	35	37	37	34	35	37	36	36	34	33	32

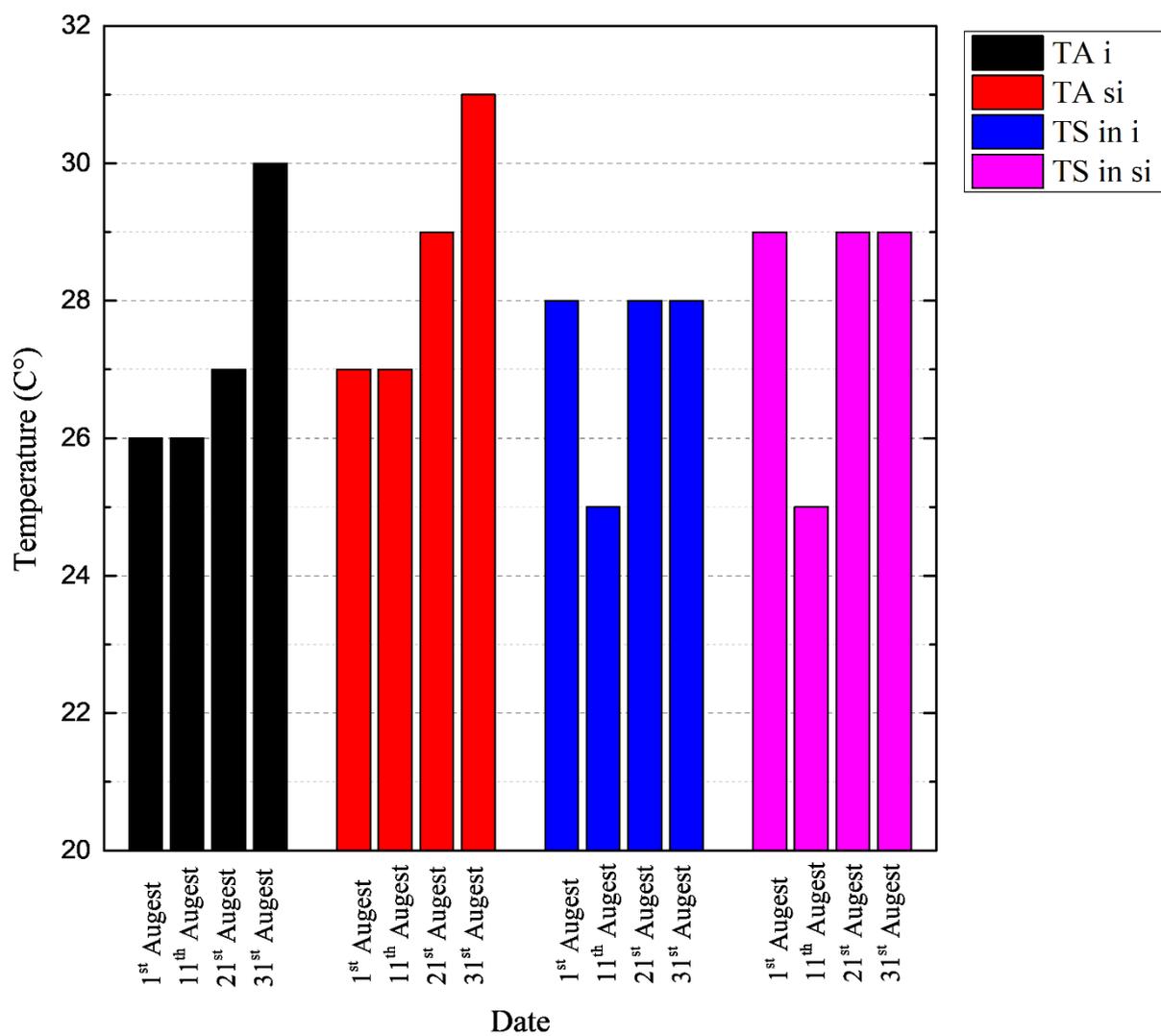


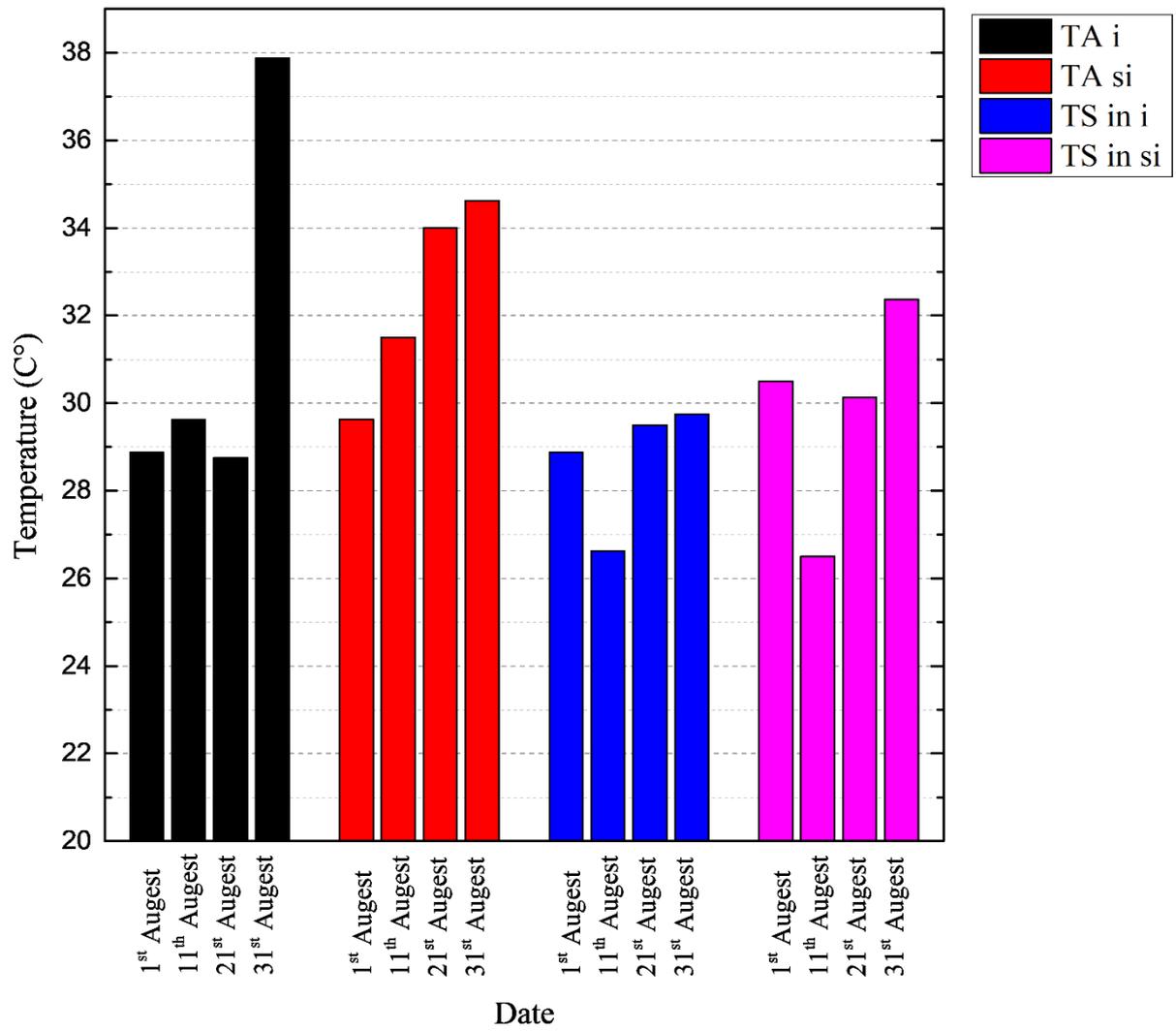
heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1 Aou TTM	36	36	33	34	32	32	33	33	34	35	37	39	41	42	45	45	44	44	43	42	42	41	40	39	
1 Aout	26	26	26	26	26	26	26	26	27	27	27	27	28	28	30	30	31	31	32	32	30	31	29	28	
11 Aout TTM	37	35	35	34	34	33	33	34	35	35	37	38	39	42	41	43	44	44	43	43	42	42	40	40	
11 Aout	27	27	28	28	27	26	26	26	25	26	27	27	28	29	30	29	30	31	31	32	32	31	31	30	
21 Aout TTM	37	37	35	35	36	36	35	35	35	36	35	37	39	39	40	40	41	42	42	42	42	41	40	39	39
21 Aout	27	27	26	26	27	27	27	27	27	28	28	28	28	29	29	31	31	30	30	30	29	28	27	27	
31 Aout TTM	37	35	35	34	34	33	33	34	35	35	37	38	39	39	41	41	42	43	40	40	39	38	37	36	
31 Aout	28	28	28	29	29	28	28	28	27	29	29	29	30	30	32	32	31	31	30	30	29	29	29	29	



Anexe E: Thermal comfort has a direct impact on energy







Annexe G : simulation d'une année

