

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE A.MIRA BEJAIA
FACULTE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de master en génie civil

Option : Structures

Thème

Impact de l'utilisation des matériaux bio-sourcés sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments

Présenté par :

DJIDI TINHINANE

BEHAIRI RABAH

Encadré par :

Mme : H.CHIKH AMER

Soutenus le 1 septembre 2020

Devant le jury composé de :

CHELOUAH Nasser	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
TAHAKOURT Abdelkader	Professeur	Univ. de Bejaia	Examineur

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

À MA CHÈRE SŒUR KATIA ET MON ADORABLE FRÈRE ANIS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À MES GRANDS PARENTS, ONCLES ET TANTES

En témoignage de mon attachement et de ma grande considération.

J'espère que vous trouverez à travers ce travail l'expression de mes sentiments les plus chaleureux.

Que ce travail vous apporte l'estime, et le respect que je porte à votre égard, et soit la preuve du désir que j'aie depuis toujours pour vous honorer.

Tous mes vœux de bonheur et de santé. ...

À MES ADORABLES COUSINS ET COUSINES

Je vous dédie ce travail tout en vous souhaitant une longue vie pleine de réussite, de santé et de bonheur...

À MON binôme « BEHAIRJ RABAH » et à toute sa famille

À tous les membres de ma promotion.

À tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS ET TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ À L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL ET QUE J'AI OMIS DE CITER.

DJIDI TINHINANE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- à mes parents qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers toujours plus d'efforts ;
- à ma sœur qui a été toujours là pour m'aider et me soutenir ;
- à tous les membres de ma grande famille : grands-parents, oncles, tantes, cousins et cousines et à tous les membres des deux familles BEHAIRI et TABET ;
- à mes professeurs, mes amis et à tous ceux qui m'ont assisté et soutenu dans mes études.
- à mon binôme TINHINANE qui a fournie tant d'efforts et à toute sa famille.

BEHAIRI RABAH

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné l'audace pour dépasser toutes les difficultés, ainsi que la force pour arriver à terme d'un travail commencé.

On souhaite adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et ont permis par leur soutien et leurs encouragements à finir ce travail. Nos remerciements s'adressent particulièrement à:

Notre encadreur madame H.CHIKH AMER, pour sa disponibilité et la confiance qu'elle nous a accordée. Nous avons profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont nous avons pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. Nous aimerons aussi la remercier pour l'autonomie qu'elle nous a accordée, et ses précieux conseils qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs de l'université de Bejaia qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires, aux intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions.

Nous adressons nos remerciements à nos familles (petites et grandes) pour tout le soutien qui nous ont apporté malgré que des fois ça n'a pas été très facile pour eux mais ils ont su gérer la situation.

Afin de n'oublier personne, nous adressons nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés à la réalisation de ce modeste mémoire.

Résumé

Le secteur du bâtiment contribue à hauteur de 30% aux émissions de gaz à effet de serre (GES), et de 40% des consommations d'énergie, principalement à travers sa consommation de chauffage. Ainsi, isoler correctement les constructions contribuera à améliorer le confort thermique, diminuer les factures énergétiques et diminuer l'émission des GES.

Dans le cadre du développement durable, les nouvelles réglementations en matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, conduisent les chercheurs à la recherche de nouveaux matériaux pour constituer des systèmes économes en énergie tout en assurant le confort de l'habitat. Cette recherche s'est très vite dirigée vers l'utilisation de matériaux à base végétale. Les matériaux biosourcés font l'objet depuis plusieurs années, d'études visant à comprendre et à caractériser leur comportement hygrothermique. Ces études montrent que ces matériaux présentent des performances spécifiques par rapport aux phénomènes hygrothermiques. Ces performances particulières jouent un rôle important dans le confort intérieur d'un bâtiment. De ce fait, l'intégration de ce type de matériaux dans la construction algérienne est primordiale et bénéfique du point de vue développement durable.

Ce travail consiste à trouver une alternative de construction par l'intégration de matériaux nouveaux et surtout avec une empreinte écologique pour l'amélioration de la performance hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment.

L'étude a porté sur la simulation avec le logiciel TRNSYS 16 du comportement hygrothermique d'une construction en matériaux biosourcés sous un climat aride. Les matériaux choisis sont le béton de chanvre et le béton de palmier dattier.

Les résultats ont révélé que ces matériaux présentent d'excellentes qualités de régulation de température et d'humidité, comparées à celles obtenues avec la construction classique en double-brique.

Mots clés : matériaux bio-sourcés, confort thermique, isolation thermique, TRNSYS.

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I Construction, énergie et environnement	3
I.1 Introduction	3
I.2 Consommation énergétique en bâtiment	3
I.2.1 Consommation mondiale	3
I.2.2 Consommation en Algérie.....	4
I.2.2.1 Bilan de la consommation d'énergie	5
I.3 Impact environnemental de la construction sur les émissions des GES	7
I.3.1 Bilan des émissions CO2.....	7
I.4 Conclusion	8
Références Bibliographiques.....	10
CHAPITRE II Etat de l'art des différents Matériaux bio-sourcés utilisés en bâtiment	12
II.1 Introduction	12
II.2 Matériaux biosourcés	13
II.2.1 Avantages des matériaux bio-sourcés.....	14
II.2.2 Présentation de quelques matériaux bio-sourcés.....	14
II.2.2.1 Le bois de palmier dattier.....	14
II.2.2.2 Béton de chanvre	18
II.2.2.3 La ouate de cellulose	21
II.2.2.4 Le liège	24
II.3 Caractéristiques thermo-physiques et hydriques de quelques matériaux biosourcés	28
II.3.1 Caractéristiques thermo-physiques	28
II.3.1.1 Masse volumique.....	28
II.3.1.2 Conductivité thermique.....	33
II.3.1.3 Chaleur massique.....	38
II.3.2 Caractéristiques hydriques	42
II.3.2.1 Perméabilité à la vapeur	42
II.3.2.2 Valeur du tampon hydrique (MBV)	46
II.3.3 Synthèse des caractéristiques thermo-physiques et hydriques des matériaux étudiés....	50
I.4 CONCLUSION.....	51

Références Bibliographiques.....	53
CHAPITRE III Description du logiciel TRNSYS	64
III.1 Introduction.....	64
III.2 Description du logiciel	64
III.2.1 Fonctionnement.....	65
III.2.2 Les différentes interfaces de TRNSYS.....	66
III.2.2.1 TRNBuild	66
III.2.2.2 TRNEdit	69
III.2.2.3 TRNSYS Studio.....	69
III.3 Les différents TYPES utilisés	70
III.4 Les liaisons entre les types	72
III.5 Avantages du logiciel	72
III.6 Inconvénients du logiciel	74
III.7 Conclusion	74
Références Bibliographiques.....	76
CHAPITRE IV Etude des performances énergétiques et thermiques de quelques matériaux bio-sourcés	77
IV.1 Introduction	77
IV.2 Présentation et description du bâtiment simulé	78
IV.2.1 Géométrie du bâtiment étudié	78
IV.2.2 Constituants des parois de l'enveloppe du bâtiment simulé.....	78
IV.3 Déroulement de la simulation	81
IV.4 Résultats et discussions	83
IV.4.1 Analyse des températures intérieures	83
IV.4.2 Analyse des températures de surface.....	86
IV.4.3 Indices de confort	87
IV.4.3.1 Période d'été	89
IV.4.3.2 Période d'hiver	90
IV.4.4 Analyse des courbes d'humidité relative	92
IV.4.5 Besoins énergétiques.....	93
IV.5 Conclusion	94
Références Bibliographiques.....	95
Conclusion Générale.....	96
Annexe	98

Table des figures

Figure I.1. Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017.....	4
Figure I.2. Répartition de la consommation d'énergie finale en Algérie par secteur en 2019.....	5
Figure I.3. Evolution de la consommation d'énergie finale en Algérie entre 2009 et 2018.....	6
Figure I.4. Bilan de la consommation.....	6
Figure I.5. Emissions de CO2 attribuables au secteur résidentiel.....	9
Figure II.1. Forêt palmier dattier.....	16
Figure II.2. Schéma d'une palme.....	16
Figure II.3. Bois de palmier dattier.....	17
Figure II.4. Echantillons de composite fibres-matrice à base de ciment.....	18
Figure II.5. Plante de cannabis, la tige et la chènevotte.....	19
Figure II.6. Intégration structurelle (Gourlay & Arnaud 2010) - Maison en béton de chanvre.....	19
Figure II.7. Dosage en fonction de l'utilisation.....	20
Figure II.8. Processus de production.....	22
Figure II.9. Panneau en ouate de cellulose.....	23
Figure II.10. Ouate de cellulose en vrac.....	23
Figure II.11. Écorce d'un chêne-liège.....	24
Figure II.12. La répartition du liège au tour du bassin méditerranéen.....	24
Figure II.13. Processus de production du liège.....	26
Figure II.14. Différentes formes du liège.....	27
Figure II.15. Masse volumique en fonction des bétons testés en fonction du pourcentage de liège substitué.....	31
Figure II.16. Réalisation de la masse volumique apparente.....	33
Figure II.17. Comparaison de la masse volumique et de la conductivité thermique du bois de pétiole de palmier dattier à d'autres matériaux naturels.....	34
Figure II.18. Conductivité thermique du liège en fonction de la masse volumique.....	36
Figure II.19. Mesure de la conductivité des charges à l'aide d'un CT mètre.....	38
Figure II. 20. Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la concentration de fibres.....	39
Figure II.21. Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BL7.....	41
Figure II.22. Evaluation de la chaleur spécifique du liège aggloméré noir en fonction de la température....	42
Figure II.23. Mesure de la perméabilité par la méthode de la coupelle.....	45
Figure II.24. Classification des valeurs de capacité tampon hydrique (MBV).....	47
Figure II.25. Valeur tampon hydrique (MBV) de matériaux usuels et du béton de chanvre moulé nu et enduit.....	48
Figure III.1. L'interface TRNBuild.....	67
Figure III.2. La fenêtre de ZONE.....	67
Figure III.3. Interface graphique du TRNSYS Studio.....	70
Figure III.4. forme convexe et concave.....	74
Figure IV.1. Vue en plan de la construction.....	78
Figure IV.2. Vue 3D de la construction modélisée.....	78
Figure IV.3. Représentation sous Simulation STUDIO des interactions entre les différents composants.....	82
Figure IV.4. Evolution de la température intérieure mensuelle dans les différents bâtiments. Climat Bechar.....	83
Figure IV.5. Evolution de la température intérieure dans les différents bâtiments. Climat Bechar.....	84
Figure IV.6. Evolution de la température intérieure dans les différents bâtiments. Climat Bechar.....	85

Figure IV.7. Evolution de la température de surface du mur nord dans les différents bâtiments. Journée du 29 juillet, climat Bechar.....	86
Figure IV.8 : Représentation d'indice de PPD.....	88
Figure IV.9. Distribution fréquentielle (dans le temps) de l'indice PMV dans les différents bâtiments durant les deux mois les plus chauds.....	89
Figure IV.10. Distribution fréquentielle de l'indice PPD dans les différents bâtiments durant les deux mois les plus chauds.....	90
Figure IV.11. Distribution fréquentielle de l'indice PMV dans les différents bâtiments durant les mois les plus froids.....	91
Figure IV.12. Distribution fréquentielle de l'indice PPD dans les différents bâtiments durant les mois les plus froids.....	92
Figure IV.13. Evolution des humidités relatives extérieure et intérieure. Climat Bechar.....	92
Figure IV.14. Besoins de chauffage et de climatisation annuels dans les différents bâtiments. Bechar.....	93

Liste des tableaux

Tableau II.1. Exemples de dosages du béton de chanvre selon les applications.....	20
Tableau II.2. Masse volumique des échantillons d'essais avant et après séchage.....	29
Tableau II.3. Masse volumique, teneur en eau saturée, porosité ouverte pour différents matériaux Collet et WUFI.....	30
Tableau II.4. Masse volumique des échantillons de béton de liège.....	31
Tableau II.5. Densité de différents isolants dont le liège.....	32
Tableau II.6. Propriétés thermiques des fibres de bois de palmier à pression Atmosphérique.....	34
Tableau II.7. Résultats de la conductivité thermique à l'état sec et humide et à différents niveaux de température.....	35
Tableau II.8. Quelques caractéristiques des isolants en liège.....	37
Tableau II.9. Propriétés thermiques des fibres de bois de palmier à pression Atmosphérique.....	39
Tableau II.10. Valeurs de la perméabilité du composite à base de FPD.....	43
Tableau II.11. Résultats du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau en point sec.....	43
Tableau II.12. Perméabilité à la vapeur d'eau de certains matériaux.....	45
Tableau II. 13. Composition et densité des échantillons ciment-liège à l'état sec.....	49
Tableau II.14. Tableau récapitule les valeurs des propriétés thermophysique et hydrique des matériaux étudiées.....	50
Tableau IV.1. Constitution et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en double briques.....	79
Tableau IV.2. Constitutions et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en béton de chanvre.....	80
Tableau IV.3. Constitutions et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en béton palmier dattier.....	81

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
TEP	Tonne d'équivalent pétrole	
Clients BT	Clients Basse Tension	
λ	Conductivité thermique	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
rapport E/L	rapport eau/liant	
ρ	Masse volumique	$[kg.m^{-3}]$
μ	Viscosité dynamique du fluide caloporteur dans les tubes	$[kg/m.s]$
Cp	Chaleur spécifique	$[J kg^{-1} K^{-1}]$
a	Diffusivité thermique	$[m^2/s]$
e	Epaisseur	$[m]$
π, δ	Perméabilité de vapeur	$[kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}]$
P_v	Pression de la vapeur	$[Pa]$
q_v	Densité de flux de vapeur	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
DPC	Béton palmier dattier	
MBV	Valeur de tampon hydrique	$[g.m^{-2}.\%RH]$
VCTH	valeur de la capacité tampon hydrique	$[g.m^{-2}.\%RH]$
T_{int}, T_{ext}	Température de surface intérieure et extérieure	$[^{\circ}C]$
Text, Tsint	Température extérieur et intérieur	$[^{\circ}C]$
PMV	Vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique	$[\%]$
PPD	Pourcentage prévu des insatisfaits	$[\%]$
clo	Résistance thermique des vêtements	$[clo]$
Met	Métabolisme	$[-]$

Introduction Générale

Le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis déjà plusieurs décennies. Cette énergie reste dans l'écrasante majorité, d'origine fossile donc non renouvelable à court et moyen terme et qui est la première source des émissions de gaz à effet de serre dans un monde qui souffre déjà des effets de l'activité humaine sur son environnement.

Le secteur du bâtiment représente 40% de la consommation totale d'énergie et une grande part des impacts environnementaux d'origine anthropique. Le secteur de la construction est en outre confronté au problème de la démographie mondiale qui augmente très rapidement : nous serons 9.7 milliards d'habitants en 2050, et 11.2 milliards en 2100 [1]. Ainsi, pour répondre aux besoins actuels et futurs, la construction de logements et d'équipements devra elle aussi augmenter.

Ce secteur représente donc une cible de choix dans la réduction des consommations tout en luttant contre la dégradation environnementale.

Comme pour tous les pays du monde, le développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction n'a pas épargné l'Algérie qui connaît une hausse importante dans le nombre de nouvelles constructions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (énergie, matériaux, ...) et des impacts importants sur l'environnement surtout avec la généralisation de l'usage de matériaux à base de ciment. Tout cela nous amène à questionner l'utilisation de matériaux comme le béton, largement utilisé pour le gros-œuvre, ou les isolants les plus courants tels que les laines de roche ou laines de verre dans le secteur du bâtiment. En effet, ces matériaux sont issus de ressources non renouvelables et leur production consomme une grande quantité d'énergie et émet des gaz à effet de serre néfastes pour l'environnement.

[1] **ONU.** La population. *ONU.* [En ligne] Citation : 06 aout 2020. <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/population/index.html#:~:text=Projections%20pour%20l%27an%202100,statistiques%20d%C3%A9mographiques%20des%20Nations%20Unies>

Il s'agit de développer des matériaux alternatifs à faible impact environnemental pour varier l'offre sur le marché du bâtiment. Ceux-ci devront notamment contribuer à la performance hygrothermique des bâtiments et au confort intérieur tout en étant abordables d'un point de vue économique. Parmi les récentes alternatives éclairées, guidées par le développement durable et qui répondent aux objectifs, l'utilisation récente dans les pays industrialisés de matériaux de construction bio-sourcés issus des ressources locales naturelles renouvelables d'origines biologiques à faible impact environnemental.

L'utilisation de ces produits, en tant que matériaux de construction, permet elle d'améliorer les performances thermiques et l'efficacité énergétique des constructions en Algérie?

Ce travail s'inscrit dans ce contexte et le manuscrit qui en résulte est composé de quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré à un état de l'art sur la consommation énergétique dans le bâtiment et son impact sur la dégradation environnementale et les émissions des gaz à effet de serre.

Le second chapitre met l'accent sur le concept des éco-matériaux. Quelques exemples de matériaux à base végétale sont présentés afin de cerner leurs caractéristiques thermo-hydrauliques évaluées par les différents travaux.

Le chapitre trois sera consacré à une description générale du logiciel TRNSYS, utilisé dans notre travail.

Le dernier chapitre porte principalement sur la modélisation dynamique du comportement thermique d'un local monozone conçu avec différentes enveloppes : double-brique, béton de chanvre et béton de bois de palmier dattier. Les performances thermiques et énergétiques ont été évalués sous un climat aride et les résultats obtenus ont ensuite été comparés et analysés.

Le mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise le travail effectué afin d'en tirer les renseignements les plus intéressants.

CHAPITRE I

Construction, Énergie et Environnement

I.1 Introduction

Le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis déjà plusieurs décennies. Cette augmentation est confrontée à une réduction des ressources énergétiques fossiles et à une dégradation irréversible de la qualité environnementale.

Réduire les consommations énergétiques constitue une alternative intéressante à ces problèmes. Le secteur du bâtiment dispose d'un grand potentiel d'économie pour contribuer à cet objectif. En effet, ce secteur est l'un des plus gros consommateurs d'énergie au niveau mondial où les besoins de chauffage et de climatisation représentent un des principaux postes responsables de cette situation. En outre, le processus industriel utilisé dans la manufacture des matériaux de construction utilisés, contribue d'une manière significative à cette situation et à l'émission des gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, la première partie de ce chapitre est dédiée à la consommation énergétique en construction dans le monde on s'intéressera par la suite au bilan de la consommation en Algérie. La deuxième partie est plutôt ciblée et consacrée à l'impact environnemental de la construction sur les émissions des gaz à effet de serre.

I.2 Consommation énergétique en bâtiment

I.2.1 Consommation mondiale

La construction bâtiment est parmi les secteurs économiques les plus énergivores au niveau mondial avec une consommation d'énergie croissante. D'après le Bilan Mondial établi en 2018 [1], la construction et l'exploitation de bâtiments représentaient 36% de la consommation d'énergie finale mondiale et 39% des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en 2017 (figure I.1), ce qui fait de ce secteur le premier consommateur d'énergie et émetteur de CO₂.

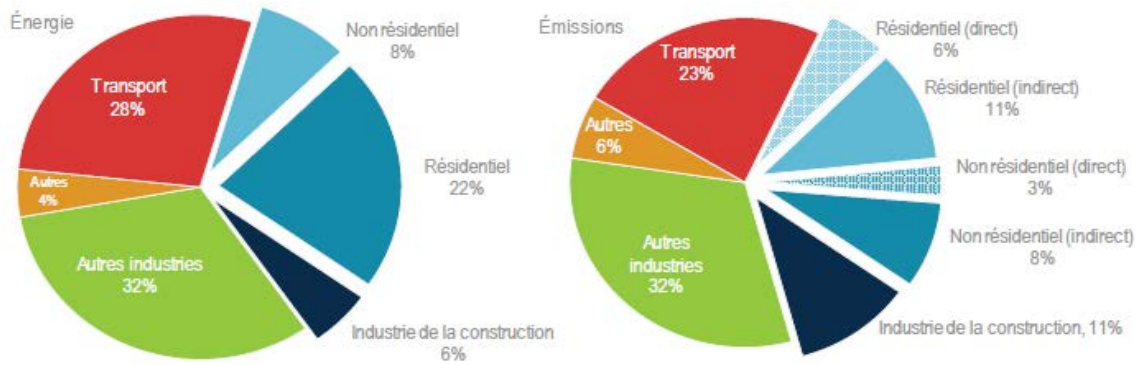


Figure I.1. Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017 [2].

Étant donné la croissance massive de la construction neuve dans les économies en transition et l'inefficacité du parc immobilier existant dans le monde, si rien n'est fait, les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments vont plus que doubler au cours des 20 prochaines années [3].

I.2.2 Consommation en Algérie

Le pays connaît depuis bientôt quelques années un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'Etat ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics, les exigences et normes en matière de performances énergétiques et environnementales ne sont pas intégrées aux processus de conception et de construction. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (énergie, matériaux, ...) et des impacts importants sur l'environnement. A ce sujet, le Docteur Imessad Khaled, directeur de la division thermique au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), a fait savoir qu' « avec un scénario de laisser aller actuel, tout ce qu'on va produire en hydrocarbures, à l'horizon 2030, 2035, va à peine subvenir à notre consommation et là il s'agit de notre sécurité énergétique, qui est en jeu ». Tout en assurant que « si on arrive à éliminer la crise de logement, une autre crise va se profiler à nous. Il s'agit de la crise énergétique qui va peut-être, être plus dangereuse » [4,5].

D'après les dernières statistiques indiquées par le chef de département bâtiment, en 2019 le secteur a consommé 41% de l'énergie finale devançant le secteur agricole qui

absorbe 33% de l'énergie ainsi que le secteur industriel et celui des transports avec des taux respectifs de 19% et 7% (figure I.2). Si l'état algérien n'agit pas et continue à ce rythme qui ne cesse de progresser d'année en année, la consommation interne d'énergie risque de doubler à l'horizon de 2030, voire tripler à l'horizon de 2040 selon le bilan du ministère de l'énergie [6], et ceci est lié au développement économique ainsi qu'à l'augmentation de la qualité de vie. Selon les statistiques le parc immobilier a augmenté de plus de deux million de logements durant la dernière décennie, il présente donc des potentialités élevées d'économie d'énergie [6-8].

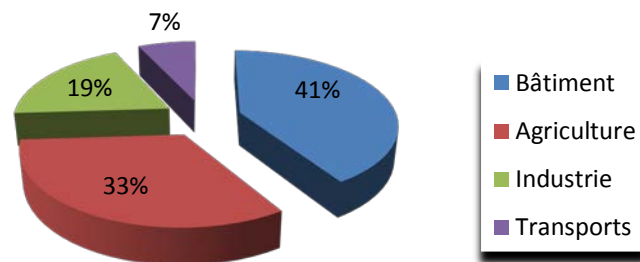


Figure I.2. Répartition de la consommation d'énergie finale en Algérie par secteur en 2019.

En effet, le bâtiment est un pilier de la lutte contre cette hausse importante de la consommation énergétique. Aujourd'hui, la conception des bâtiments jouent un rôle très important dans la dépense de celle-ci, ce qui a justement poussé les pouvoirs publics à la recherche de la meilleure efficacité dans le bâtiment qui permettra l'amélioration du confort thermique dans les logements et la réduction de la consommation liée au chauffage et à la climatisation [4,8].

1.2.2.1 Bilan de la consommation d'énergie

Les bilans énergétiques nationaux communiqués par le Ministère de l'Énergie et des Mines (MEM), montrent l'évolution de la consommation finale en Algérie qui a enregistré une légère croissance en moyenne de 5% par an entre 2009 et 2018. Cette consommation est passée de 30.9 M Tep en 2009 à 48.1 M tep en 2018 reflétant une hausse de 55.79% [9]. La figure 1 donne un aperçu global et détaillée de cette évolution.

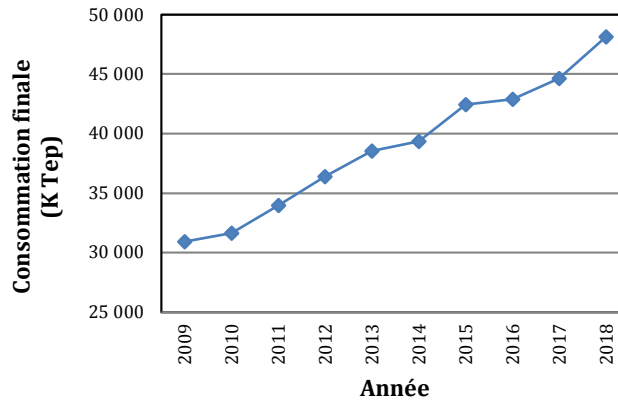


Figure I.3. Evolution de la consommation d'énergie finale en Algérie entre 2009 et 2018.

L'évolution de la consommation finale par secteur d'activité entre 2009 et 2018 est présentée en figure I.4.

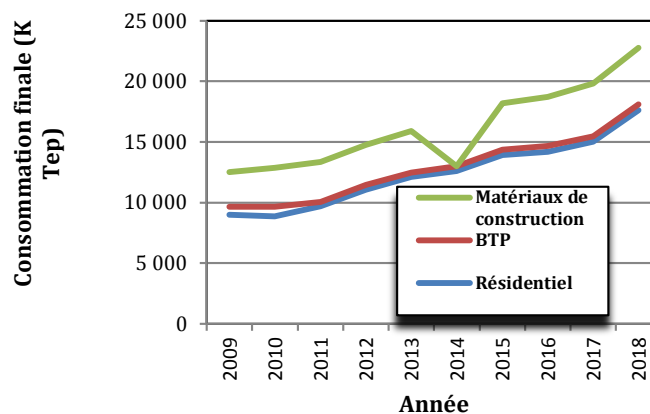


Figure I.4. Bilan de la consommation.

D'après la figure I.4, le secteur résidentiel note une croissance significative des consommations, 95.83% sur la période 2009-2018 soit un taux de croissance annuel de 8% et ceci est l'effet de la conjonction de plusieurs facteurs notamment, le développement démographique, le nombre important de logements livrés ainsi que l'accroissement du nombre de clients BT.

I.3 Impact environnemental de la construction sur les émissions des GES

Les gaz à effet de serre jouent un rôle très important dans la régulation de la température dans le globe terrestre, ils empêchent les rayons de soleil d'être renvoyés de la terre vers l'espace. Grâce à l'effet de serre la température moyenne sur terre est d'environ 15 °C, au lieu de -18°C sans lui [10].

Mais l'effet de serre est déséquilibré par les activités humaines, en particulier l'utilisation des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) qui provoquent artificiellement l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et, par conséquent, accentuent le réchauffement de notre planète.

Le secteur du bâtiment est parmi les facteurs principaux de ce déséquilibre avec une surconsommation et une utilisation inefficace de l'énergie. A l'heure actuelle, l'électricité est la principale énergie utilisée pour la climatisation et les appareils électroménagers dans les bâtiments, tandis que la plupart des pays ont recours à des combustibles fossiles pour le chauffage. Il est plus que temps de rendre nos bâtiments plus efficaces en énergie parce que leur consommation énergétique croissante aura un impact négatif sur nous tous. Il faut placer la barre beaucoup plus haut en ce qui concerne les bâtiments écologiques à haut rendement énergétique et les pratiquer dans le secteur de la construction, pour arriver à un potentiel en terme d'économies d'énergie dans les bâtiments neufs et existants compris entre 50% et 90% [10-12].

I.3.1 Bilan des émissions CO2

Le CO2 est le principal gaz à effet de serre puisqu'il représente plus de 80% des émissions totales, la figure I.5 montre l'évolution des émissions de CO2 attribué au secteur résidentiel qui occupe le second poste le plus émetteur des rejets nationaux; utilisation du gaz naturel par les ménages étant à l'origine d'une grande partie de ces émissions [13].



Figure I.5. Emissions de CO2 attribuables au secteur résidentiel [14].

Pour l'ensemble de la période 1971-2014 la moyenne annuelle est de 15.1 et le changement enregistré entre la première et la dernière année est de 10%. C'est en 1976 qu'on enregistre la valeur la plus élevée (19.39) et c'est en 1985 qu'on enregistre la valeur la plus basse (11.39).

I.4 Conclusion

Le bâtiment est considéré comme un secteur économique clé fortement consommateur d'énergies et émetteur de gaz à effet de serre. La climatisation et le chauffage consomment une portion non négligeable en matière d'énergies et ce phénomène reste toujours destructeur vis-à-vis de notre planète et ne risque pas de diminuer vue sa croissance considérable et surtout dans les années 2000. Face à ces préoccupations environnementales, le choix des matériaux adéquats est une bonne solution pour limiter l'impact sur l'environnement et assurer un milieu intérieur confortable et ceci doit figurer parmi les objectifs de toute politique énergétique viable.

Dans ce contexte il est donc devenu primordial de s'interroger sur les matériaux de construction conventionnels actuels et penser à ceux de demain, Ces derniers doivent limiter la consommation énergétique du secteur du bâtiment liée à leur qualité thermique, et participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de leur durée de vie mais aussi posséder un climat intérieur sain et confortable et être sûrs et accessibles, d'où la mobilité de plusieurs pays à mettre en place des politiques pour encourager le déploiement d'une économie bio-sourcé basée

sur l'extraction et la valorisation de la biomasse ce qui fera l'objet de notre étude dans le prochain chapitre [15-17].

Références bibliographiques :

- [1] **T. Abergel, et al.** le global status report 2018. United Nations Environment Programme, 2018., 2018.
- [2] **AIE Energy Technology. IEA.** [En ligne] international energy agency, 2018. [Citation : 31 mars 2020.] www.iea.org/buildings.
- [3] **H. Huovila, M. Alla-Juusela, L. Melchert, S. Pouffary.** Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers. United Nations Environment Programme, 2009.
- [4] *2eme Congres de l'Association Marocaine de Thermique.* **S. SAMI-MECHERI, D. SEMMAR, A. HAMID.** Casablanca(Maroc), 18-19 Avril 2012. EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT : EXPERIENCE ALGERIENNE.
- [5] **I. Amokrane.** L'éco-construction au coeur de l'efficacité énergétique (Vidéos). *LIBERTE.* [En ligne] KREO, 19 janvier 2018. [Citation : 26 mars 2020.] <http://liberte-algerie.com/actualite/leco-construction-au-coeur-de-lefficacite-energetique-videos-285398>.
- [6] **Algérie presse service.** Le secteur du bâtiment, premier consommateur d'énergie en Algérie. Algérie presse service. [En ligne] APS-DT, 13 février 2019. [Citation : 26 mars 2020.] <http://www.aps.dz/economie/85470-le-secteur-du-batiment-premier-consommateur-d-energie-en-algerie>.
- [7] **N. Izouaouen.** ALGÉRIE: LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES MÉNAGES EN HAUSSE DE PRÈS DE 7%. *Maghreb Émergent.* [En ligne] 12 juillet 2018. [Citation : 2 avril 2020.] <https://maghrebemergent.info/algerie-la-consommation-energetique-des-menages-en-hausse-de-pres-de-7/>.
- [8] **K. IMESSAD.** Pour une construction Eco-énergétique en algérie. Division Solaire Thermique et Géothermie - CDER. Recherche et Développement. p10.
- [9] **MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE.** Bilan Énergétique National du secteur. [En ligne] [Citation : 2 avril 2020.] <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>.

- [10] **Ministère de la transition écologique et solidaire.** Un PHÉNOMÈNE complexe en marche.[En ligne] 2018. [Citation : 26 mars 2020.]
file:///C:/Users/prive/Downloads/1ONERC_Panneaux_expo_CCC_MAJ-2019_800x1100_DEFweb.pdf.
- [11] **P. Chalmers .** Changement climatique :Répercussions sur les bâtiments. LE CLIMAT EST L’AFFAIRE DE TOUS. [En ligne] 2013. [Citation : 2 avril 2020.]
file:///C:/Users/prive/Downloads/2Buildings_Briefing_Web_FR.pdf.
- [12] **ONU programme pour l’environnement.** Le secteur du bâtiment et de la construction détient un énorme potentiel inexploité de réduction des émissions. *ONU.* [En ligne] 7/ 12/ 2018. [Citation : 2 avril 2020.]
[https://www.unenvironment.org/fr/actualites-et-recits/communique-de-presse/le-secteur-du-batiment-et-de-la-construction-detient-un.](https://www.unenvironment.org/fr/actualites-et-recits/communique-de-presse/le-secteur-du-batiment-et-de-la-construction-detient-un)
- [13] **A. Bida, et al.** Indicateurs de maîtrise de l’énergie dans les pays de la rive sud de la Méditerranée. APRUE. 2009.
- [14] **Perspective Monde.** Émissions de CO2 attribuables aux autres secteurs (%). *Perspective Monde.* [En ligne] [Citation : 1 mai 2020.]
[http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=10&codeStat=EN.ATM.CO2E.KT&codePays=DZA&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=10&codeStat2=EN.CO2.OTHX.ZS&codePays2=DZA&optionsDetPeriodes=avecNumeros.](http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=10&codeStat=EN.ATM.CO2E.KT&codePays=DZA&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=10&codeStat2=EN.CO2.OTHX.ZS&codePays2=DZA&optionsDetPeriodes=avecNumeros)
- [15] **A. TOUIL, S. MERGHACHE.** AU SUJET DE L’EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE -VERS DES BÂTIMENTS MOINS ÉNERGIVORES-. *Thèse de master.* UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2017. p. 90.
- [16] **H. Bourhaneddine.** Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques. *Thèse de Doctorat.* Université El-Hadj Lakhdar - BATNA 1, 2017. p. 125.
- [17] **G. COSTANTINE .** Etude et optimisation des performances énergétiques d’une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment. *THÈSE DOCTORAT.* REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE : UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, 19/ 10/ 2018. p. 155.

CHAPITRE II

Etat de L'art des Différents Matériaux Bio-Sourcés Utilisés en Bâtiment

II.1 Introduction

Les bâtiments affectent fortement l'environnement à travers les consommations d'énergies et de ressources naturelles. Dans un contexte de réchauffement climatique et de fin programmée des énergies fossiles, le secteur du bâtiment vise à réduire de 38% sa consommation d'énergie et à atteindre 10% de matériaux biosourcés utilisés dans la construction à l'horizon 2020 [1].

En Algérie, un pays dans lequel le secteur de la construction et des travaux publics souffre d'une situation catastrophique en raison de la consommation d'énergie dans les bâtiments, estimée à 40% et la fabrication des principaux matériaux utilisés dans la construction, parmi lesquels on cite le "béton". Certes, ce matériau est difficile à remplacer dans la construction en raison de sa résistance à la compression associée à son coût raisonnable, cependant, l'empreinte écologique est le point noir du béton car sa fabrication est basée sur un matériau peu écologique, qui est le ciment.

L'industrie du ciment utilise un processus basé sur une combinaison physico-chimique à très haute température qui se caractérise par sa consommation intensive en énergie et des émissions atmosphériques importantes de particules ayant un impact environnemental conséquent sur l'environnement et la santé. En plus de ça, il est communément admis que la fabrication d'une tonne de ciment libère près d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère et plus de 60% des émissions de CO₂ sont produites durant la phase de "décarbonatation" et que la production du ciment est responsable d'environ 5% des émissions de CO₂ de la planète [2].

Il est donc temps de prendre des mesures essentielles dans ce sens par le développement de nouveaux matériaux en respect des contraintes environnementales, et c'est ce qui a poussé la communauté scientifique à rechercher des nouvelles

alternatives pouvant remplacer les matériaux classiques par des matériaux écologiques à faible impact environnemental.

L'intégration de matériaux bio-sourcés dans la construction apparaît comme une solution pertinente et peut jouer un rôle majeur grâce à leur bilan environnemental et à leurs propriétés hygrothermiques qui leur permettent d'assurer un rôle d'amortisseur thermique et de stabilisateur de confort.

Ce deuxième chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à une recherche bibliographique sur certains matériaux bio-sourcés tels que le bois du palmier dattier, le béton de chanvre, la ouate de cellulose et le liège. Dans la seconde partie, on présentera les caractéristiques essentielles thermo-physiques et hydriques de ces matériaux.

II.2 Matériaux biosourcés

Les matériaux bio-sourcés sont par définition des matériaux dont les matières premières proviennent de la biomasse végétale ou animale [3]. Issus de la biomasse végétale, animale et des recyclés de ces familles, les matériaux et produits bio-sourcés sont à la croisée des chemins de mondes aussi différents que ceux de l'agriculture, de l'industrie et du bâtiment [4]. Ils couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction [5,6]. On trouve principalement des matériaux isolants (bois, paille, chanvre, laine, plume, ouate de cellulose, miscanthus) mais aussi des produits chimiques (colles, peintures), des composants (panneaux en fibres végétales, renforts, matrices) et du béton (de chanvre, lin, bois).

Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses étapes de la construction et de la rénovation. Concernant l'isolation, ils répondent aux mêmes critères techniques que les isolants plus conventionnels comme les laines minérales (ex. laine de verre) ou les isolants synthétiques (ex. polystyrène) et ont des caractéristiques propres leur assurant un bon comportement au confort d'été [3].

II.2.1 Avantages des matériaux bio-sourcés

Les matériaux bio-sourcés présentent de nombreux avantages [7,8] :

- Un argument socio-économique avec la création d'emplois non délocalisables. L'éco-matériau mobilise des ressources et des filières locales (circuit court), favorisant une économie "verte".
- Les ressources sont abondantes et renouvelables.
- Faible énergie grise.
- Des faibles répercussions environnementales et un bilan carbone faible en raison des taux d'émission de gaz à effet de serre fortement réduits (transport, exploitation, recyclage des matériaux optimisés), en particulier les matériaux issus de la biomasse végétale.
- Les isolants bio-sourcés concurrencent les laines minérales et les mousses alvéolaires de l'industrie en offrant des performances comparables. En effet, le coefficient de conductivité thermique est compris entre 0.035 et 0.051 W/(m.K) pour les éco-matériaux contre 0.030 et 0.042 W/(m.K) pour les isolants classiques. La plupart d'entre eux présentent en outre d'intéressantes propriétés en termes d'isolation acoustique, de régulation hygrothermique et de durabilité.

II.2.2 Présentation de quelques matériaux bio-sourcés

Les filières prises en compte dans le cadre de cette étude sont celles correspondant aux matières premières suivantes :

- Bois palmier dattier ;
- Chanvre ;
- ouate de cellulose ;
- liège.

II.2.2.1 Le bois de palmier dattier

Le bois est une ressource naturelle renouvelable produite par l'arbre au cours de sa croissance, c'est un matériau hétérogène comme la plupart des matériaux naturels ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et biologiques varient extrêmement d'une espèce à l'autre. Les différences de comportement existent également à l'intérieur d'une même espèce, d'un même peuplement et d'un même arbre. Le palmier dattier est l'un

des arbres fruitiers le plus anciennement cultivé dans le monde, rustique, il s'adapte aux régions les plus arides du monde et constitue la principale source de vie de la population saharienne. Cette espèce se trouve principalement dans la région afro-asiatique, et est une composante essentielle de l'écosystème oasien; grâce à son adaptation aux conditions climatiques, la haute valeur nutritive de ses fruits et les multiples utilisations de ses produits [9-14].

Selon les statistiques du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, la superficie globale des palmiers-dattiers en Algérie s'élève à 167.663 hectares, alors que les palmiers productifs sont estimés à 15.7 millions et ceux plantés à 18.53 millions [15]. Les régions phoenicicoles se situent généralement au sud de l'atlas saharien et couvrent 16 wilayas. La wilaya de Biskra vient en tête avec une production de plus de 4.38 millions de quintaux, suivie des wilayas d'El Oued, avec plus de 2.6 millions de quintaux, puis Ouargla avec plus de 1.4 million de quintaux [15,16].

II.2.2.1.1 Valorisation du palmier dattier

Le palmier (Figure II.1) est une herbe géante de 20 à 30m de hauteur, au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles [12].

Le palmier dattier peut vivre jusqu'à un âge d'environ 200 ans, et peut atteindre une hauteur de plus de 80 pieds (environ 24 mètres). Les opérations de nettoyage des palmiers dattiers consistent principalement à éliminer les organes végétatifs qui ne sont plus fonctionnels, en particulier les palmes sèches. Le nombre des palmes peut atteindre 50 à 200 chez un arbre adulte, avec une durée de vie de trois à sept ans, selon la variété et le mode de culture [16].

Beaucoup d'auteurs considèrent le palmier dattier comme source de matières premières pour des applications industrielles [11,17-20].



Figure II.1. Foret palmier dattier.

Une palme (Figure II.2) est une feuille composée de plusieurs parties principales : base pétiolaire, rachis ou pétiole qui porte les épines et les folioles qui sont disposées en position généralement oblique le long du rachis [16].

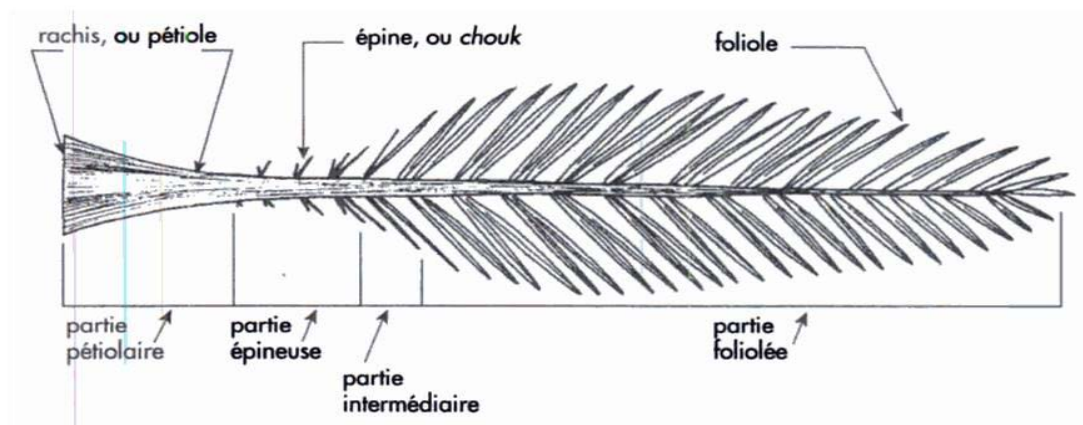


Figure II.2. Schéma d'une palme [16].

La seule partie utile de la palme sèche est la partie foliolée, tandis que la partie restante est jetée comme déchet d'agriculture sans aucune valeur économique (Figure II.3).

L'idée consiste à utiliser cette ressource naturelle renouvelable (déchet de palmier dattier) dans de nombreux domaines, ce qui aurait un impact positif sur notre environnement et contribuerait à réduire la consommation de matières premières non renouvelables. Dans le cadre de la définition de ce matériau naturel, plusieurs travaux dans la littérature ont été consacrés à l'étude des propriétés thermo-physiques, mécaniques, chimiques et hydrophiliques.



Figure II.3. Bois de palmier dattier [21].

II.2.2.1.2 Utilisation du palmier dattier

❖ Composite à base de gypse

Comme pour les particules de chanvre, le bois de palmier dattier a été utilisé pour préparer des matériaux composites à matrice minérale. B. AGOUDJIL et al [22] ont réalisé des matériaux composites dans le laboratoire contenant différentes tailles et concentrations massiques de fibres de bois de palmier dattier. L'objectif était le développement d'un nouveau matériau composite à faible conductivité thermique et masse volumique adapté pour l'isolation thermique dans les bâtiments, en utilisant des composants à faibles coûts économiques.

Le composite gypse-fibres a été préparé au laboratoire en mélangeant dans un malaxeur automatique pendant 5 minutes la poudre de gypse et l'eau avec un rapport eau/gypse égale à 0.6 qui produit une pâte bonne à travailler. Des fibres sont ensuite ajoutées tout en continuant à malaxer les composants pendant 5 minutes. Le mélange est enfin versé rapidement dans les moules.

❖ Composite à base de ciment

B. AGOUDJIL et al [22] ont aussi étudié un nouveau matériau, composé d'un liant à base de ciment et les fibres de palmier dattier. L'objectif principal était d'évaluer la possibilité d'utiliser ce composite comme un matériau de construction pour l'isolation thermique.

La préparation des composites est effectuée en mélangeant les fibres, le ciment et le sable (0/5 mm) dans un malaxeur pendant 3 minutes. L'eau de gâchage est ensuite ajoutée progressivement jusqu'à ce que le mélange devient homogène et plus malléable. Finalement, le mélange est rapidement versé dans les moules. Les échantillons après le démoulage sont présentés dans la Figure II.4.



Figure II.4. Echantillons de composite fibres-matrice à base de ciment [23].

II.2.2.2 Béton de chanvre

Parmi les nouveaux matériaux à base végétale, le chanvre qui a été redécouvert à la fin du XXe siècle. Il tient une place primordiale grâce à ses nombreux avantages qui consiste à sa bonne régulation hygrométrique, à son renouvellement permanent et à ses bilans énergétiques et écologiques très favorables. Il fait partie des matériaux bio-sourcés utilisés pour construire, rénover et restaurer tous les types de bâtiments : maison, habitat collectif, tertiaire, tous les ouvrages du patrimoine, du vernaculaire jusqu'aux monuments historiques [24-26].

L'utilisation du chanvre est considérée comme un atout sur plusieurs plans [27]:

- a. Un atout écologique : c'est une plante qui est non seulement renouvelable et recyclable, mais possède un système racinaire permettant de structurer le sol. En plus 100 hectares de chanvre absorbe autant de CO₂ qu'un hectare de forêt. Aussi 1m² de mur construit en béton de chanvre emmagasine 48 kg d'équivalent CO₂ sur 100 ans.
- b. Un atout agronomique comme le chanvre supporte la sécheresse et ne nécessite pas des travaux de culture et d'irrigation.
- c. Un atout économique étant donné que les producteurs sont à proximité des industries de transformation ce qui réduit les prix de transportation et de fabrication.

La chènevotte (figure II.6) est fabriquée à partir de la tige de chanvre, plante ne nécessitant aucun traitement phytosanitaire, peu d'eau et facilitant la régénération des sols agricoles. Résulte de la combinaison chaux chanvre un béton naturel, léger, voir ultra-léger, au comportement thermohydrodynamique permettant la réalisation

d'ouvrages très performants, en total adéquation avec les réglementations thermiques actuelles et à venir [26].

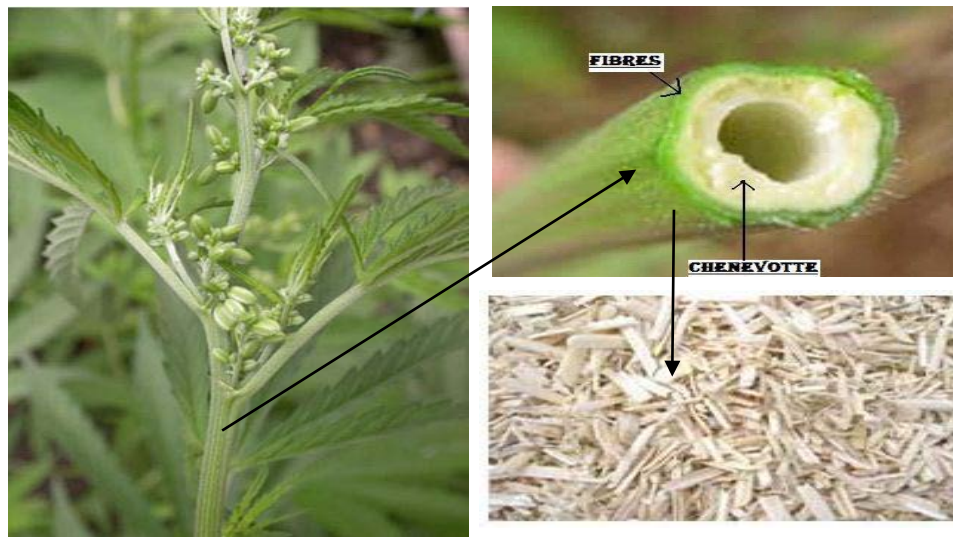


Figure II.5. Plante de cannabis, la tige et la chènevotte [28].

II.2.2.2.1 Utilisation des bétons de chanvre

Le béton de chanvre se réalise en mélangeant chaux aérienne et chanvre (copeaux de chènevotte) suivant des proportions adaptées à l'ouvrage à mettre en place. Ce qui permet de confectionner des murs isolants, des doublages isolants, des toitures isolantes, des chapes isolantes et combles perdus isolants ainsi que des enduits isolants (figure II.6) [26].

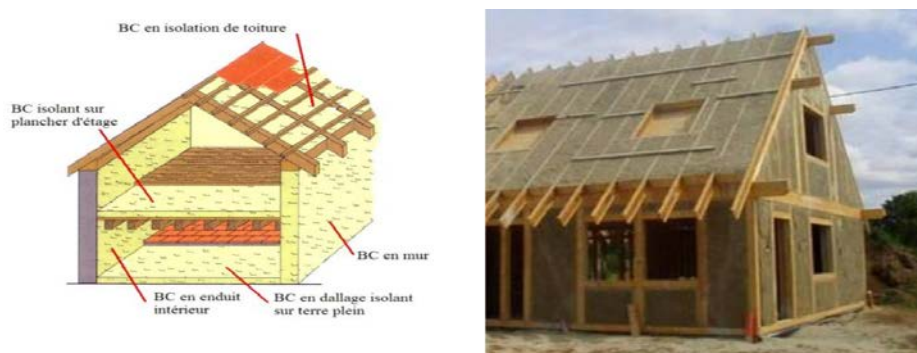


Figure II.6. Intégration structurelle (Gourlay & Arnaud 2010) - Maison en béton de chanvre [29].

La formulation "toit" contient une forte proportion de chènevotte, tandis que celles "mur" et "dalle" présentent une quantité de liant plus importante. Dans la formulation

"enduit", la chènevotte est noyée dans la matrice de liant [27]. La (figure II.17) montre les dosages utilisés en fonction de l'utilisation [30]:

- Le tradical 70 est un liant formulé à base de chaux grasse (75%), de liant hydraulique (15%) et matériau pouzzolanique (10%) ;
- Chanvribat est un granulat fabriqué à partir de chènevotte extraite mécaniquement du chanvre.

Des dosages correspondant à ces formulations sont proposés à titre d'exemple dans le Tableau II.1 pour un liant Tradical PF 70 et une chènevotte "Chanvribat". Les modalités d'application sont régies depuis 2007 par des règles professionnelles de mise en œuvre, qui facilitent et encadrent l'assurabilité de ces constructions [31].

Tableau II.1. Exemples de dosages du béton de chanvre selon les applications [30].

Formulation (pour 1m ³)	Chènevotte (kg)	Liant (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)
Toit	130	110	-	225
Mur	130	220	-	350
Sol	130	275	-	500
Enduit	130	485	160	650

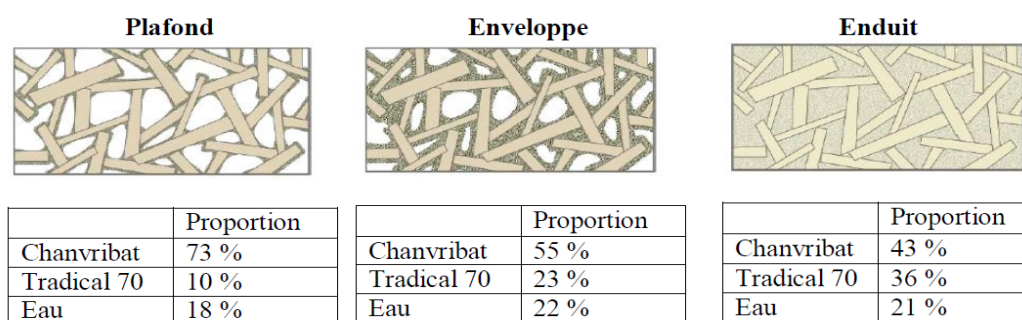


Figure II.7. Dosage en fonction de l'utilisation [30].

II.2.2.2 Différents types de béton de chanvre

Plusieurs types de béton de chanvre peuvent être distingués dans la littérature selon leurs méthodes de fabrication [32,33]:

- Béton de chanvre coulé en place : ce mode de mise en œuvre a besoin d'une bétonnière ou un malaxeur et un coffrage. Ce mode nécessite de gâcher le béton de chanvre avec une quantité importante d'eau en raison de fort pouvoir absorbant de la

chènevotte (au moment du malaxage), avec un rapport E/L varie entre 1.6 à 2. Cette technique présente un problème de temps de séchage qui est relativement long (plusieurs mois).

- Béton de chanvre projeté : la projection mécanique par voie sèche consiste au pré-mélange à sec des constituants (chènevotte et liant) puis à la pulvérisation d'une quantité réduite d'eau. Cette quantité d'eau peut être proche de celle nécessaire à l'hydratation du liant. Cette technique ne laisse pas le temps à la chènevotte d'absorber l'eau de gâchage. Le temps de séchage de béton de chanvre projeté peut être réduit à une dizaine de jours, il est utilisé pour le remplissage des parois-murs, toitures etc, ou pour apporter des compléments d'isolation sur des parois existantes. Cette technologie est utilisée pour l'isolation de bâtiments existants mais également pour les constructions contemporaines (maisons individuelles, collectifs et industriels). Le béton de chanvre projeté répond aux exigences des marchés publics.
- Béton de chanvre préfabriqué : ce mode consiste à utiliser le procédé de projection pour remplir des moules et produire des blocs préfabriqué. Il peut être réalisé dans des ateliers spécialisés ou dans ateliers de préfabrication de béton.

II.2.2.3 La ouate de cellulose

La ouate de cellulose, aussi désignée comme "isolant de cellulose" thermique et phonique [34], est un matériau de construction isolant très pris en éco construction. Elle est fabriquée à partir d'environ 85% de journaux recyclés (figure II.8), les 15% restants c'est du sel de bore, additif naturel inoffensif, pour résister au feu, à la corrosion, à la vermine et aux moisissures afin de durer dans le temps comme n'importe quel isolant [35,36]. Il existe également une ouate de cellulose composée de pâte à papier non recyclable, mais cette dernière, contrairement à l'isolant de cellulose d'origine, a l'inconvénient d'avoir une densité deux fois plus importante [37].

Elle permet la création de produits de construction comme des panneaux semi-rigides ou peut être utilisée directement en vrac. La ouate de cellulose pour la construction est fabriquée en usine [7].

Figure II.8. Processus de production [7].

II.2.2.3.1 Utilisation de la ouate de cellulose

La ouate de cellulose est utilisée en tant que matériau isolant depuis les années 1930 en Amérique du Nord. Son utilisation s'est répandue en Europe dans les années 1970, à la suite du premier choc pétrolier, lorsque l'isolation est devenue un enjeu majeur de réduction de la facture énergétique. Ce matériau est particulièrement répandu dans les pays d'Europe du Nord. Elle est commercialisée soit sous forme de flocons pour une utilisation en vrac, soit sous forme de panneaux semi-rigides [38,39].

❖ Panneaux en ouate de cellulose

La ouate de cellulose est un isolant écologique exploitant le recyclage de papier journal. Sélectionné et trié, le papier est ensuite broyé afin d'obtenir la ouate de cellulose qui est ensuite traitée pour en faire une matière première destinée à la construction ou la rénovation. Elle peut être conditionnée sous forme de panneaux (figure II.9) héritent des performances thermiques et phoniques de ce matériau isolant. Ces domaines d'application sont [7]:

- isolation des murs ;
- isolation des combles perdus.

Souvent associé à d'autres fibres comme le chanvre pour le Biofib ouate afin d'en assurer la tenue mécanique. La conductivité thermique de ce produit en fait un excellent isolant répondant à l'ensemble des exigences notamment au regard des réglementations

thermiques pour la construction neuves mais également des dispositifs d'aides à la rénovation [40].



Figure II.9. Panneau en ouate de cellulose [41].

❖ **Ouate de cellulose en vrac**

Issue de la filière bio-sourcée et du recyclage, la ouate de cellulose en vrac (figure II.10) est l'isolant thermique le plus polyvalent et moins cher du marché et un des plus efficace car sa densité fait merveille pour les fortes chaleurs d'été tout en proposant un confort acoustique de premier plan.

Reconnu comme un isolant conventionnel en Amérique du Nord, il est identifié comme un isolant écologique en Europe ou ce sont les éco-artisans qui en font un usage immodéré [42]. Elle peut être appliquée en voie sèche ou en voie humide et ces domaines d'application sont [7]:

- soufflage à sec en combles perdus ;
- insufflation à sec dans des caissons (murs, planchers) ;
- projection humide sur les murs ;
- flocage (humide) en sous face de planchers.

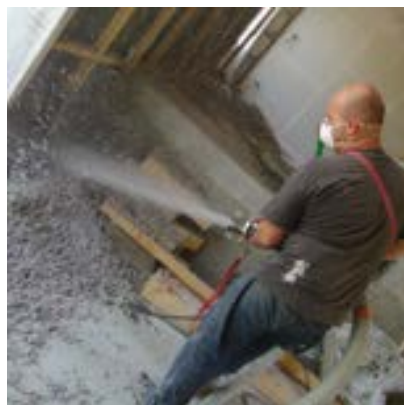


Figure II.10. Ouate de cellulose en vrac [7].

II.2.2.4 Le liège

Le liège est un produit agricole et un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, et notamment celle du chêne-liège (Figure II.11). Ce dernier est le seul arbre dont on peut enlever l'écorce sans qu'il meure. De plus, l'écorce se régénère de quelques millimètres par année, de sorte à ce que l'on puisse à nouveau la récolter au bout d'une quinzaine d'année. Il protège l'arbre des insectes, du froid et des intempéries tout en lui permettant de respirer, par de minces canaux appelés lenticelles (les trous du liège et de certains fruits). L'arbre chêne-liège est un puits de carbone d'autant plus efficace que l'arbre est exploité à produire du liège [43,44].



Figure II.11. Écorce d'un chêne-liège [45].

Le liège est une ressource renouvelable mais faiblement disponible. Il est réutilisable en raison de sa disponibilité réduite et de son coût élevé, il est réservé à des usages ponctuels pour lesquels les autres isolants écologiques ne sont pas adaptés [46]. Le liège expansé est obtenu à partir du chêne liège, poussant essentiellement sous climat méditerranéen (Portugal, Algérie, Maroc, Italie, sud de la France : Figure II.12). Le prélèvement de l'écorce, appelé démasclage, s'effectue tous les huit à dix ans et, en exploitation raisonnée, ne nuit pas au bon équilibre des arbres [47].



Figure II.12. La répartition du liège au tour du bassin méditerranéen [48].

L'Algérie est le troisième producteur mondial [43] et ce matériau est fabriqué à Jijel par la Société Nationale des industries des lièges et du bois. Le liège aggloméré expansé pur est constitué de granulés calibrés et débarrassés d'impuretés soumis à la fois, à la chaleur de vapeur sèche portée à 180°C ou 200°C et à une compression atteignant 10 à 12 kg.cm⁻². Le matériau a une bonne tenue d'eau et du point de vue comportement au feu il se consume en présence d'une flamme mais il s'étend de lui-même en air calmé, et ne propage par la flamme. Il se présente en panneaux de dimensions 50 × 100cm et l'épaisseur varient de 2 à 20cm [49]. On le trouve sous divers conditionnements : en vrac pour l'isolation en remplissage de caisson ou insufflation, en granulés pour béton isolant allégés ou en panneaux sous dalles, chapes, murs et sous toiture [47].

Les isolants en liège sont reconnus pour leurs performances en réduction de la transmission du bruit. Conditionné sous formes de plaques, le liège est très simple à mettre en œuvre pour une isolation des murs, isolation des combles et des soubassements [50]. Tout d'abord, c'est un isolant thermique et acoustique extrêmement performant pour les murs et les sols. Contre le froid, il est aussi performant que les meilleurs isolants. Contre la chaleur, il est supérieur à tous les produits du marché. Il ne craint pas les rongeurs, ni les termites, ni l'humidité. Il ne bouge pas dans le temps, ne se tasse pas. C'est aussi le seul isolant 100% naturel. En effet, quand le liège est façonné pour en faire des plaques, c'est la résine naturelle qui sert de liant [44].

II.2.2.4.1 Types de liège

On distingue deux types de liège : le liège femelle, qui sert à la fabrication des bouchons, et le liège mâle, qui croit lorsque l'arbre est jeune, fortement crevassé et utilisé principalement pour les matériaux d'isolation.

C'est le liège mâle qui est utilisé pour les matériaux d'isolation thermique. Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne-liège. Pour sa fabrication, on utilise uniquement l'écorce. Seul le liège mâle, très riche en subérine et en composés agglomérats, est utilisé pour la fabrication du liège expansé. Le prélèvement de l'écorce mâle, appelé démasclage, s'effectue lorsque l'arbre atteint l'âge de 30 ans environ (lorsque la circonférence atteint 70cm sur écorce). Les récoltes suivantes, de liège femelle cette fois-ci, appelées levée ou levage, se font environ tous les 10 à 15 ans, en exploitation raisonnée, ne nuisent pas au bon équilibre des arbres [46].

II.2.2.4.2 Produits de construction et domaines d'application

La production de matériaux de construction à base de liège (figure II.13) est réalisée principalement grâce au chêne-liège ou par le recyclage des bouchons. L'écorce de cet arbre permet la création de produits de construction comme les panneaux et rouleaux recyclés 100% liège et les granulats [7].

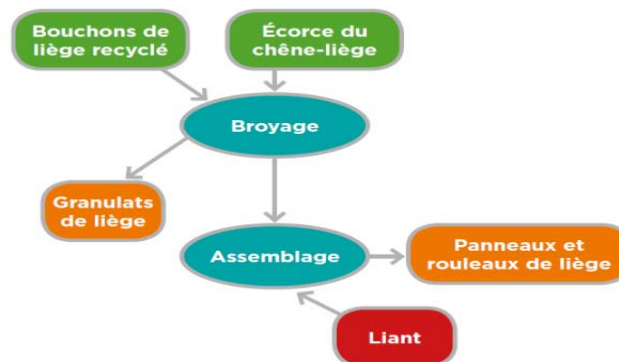


Figure II.13. Processus de production du liège [7].

❖ Panneaux et rouleaux de liège (figure II.14 -a-)

Les panneaux et rouleaux de liège sont fabriqués à partir de l'écorce de chêne liège ou de bouchons de liège. Domaines d'application [7] :

- isolation des planchers ;
- isolation des murs par l'intérieur ou l'extérieur ;
- isolation des combles perdus ;
- isolation des rampants de toiture.

Des certifications Acermi ont été délivrées pour certains panneaux de liège.

❖ Granulats (figure II.14 -b-)

Les granulats de liège sont utilisés en remplissage de caissons ou mélangés à du béton afin d'obtenir une chape légère et isolante. Domaines d'application [7] :

- remplissage : combles, murs... ;
- béton allégé : chape isolante.



Figure II.14. Différentes formes du liège.

II.2.2.4.3 Propriété du liège

Le liège est un produit de faible densité, antistatique, isolant thermique, acoustique et vibratoire. Il résiste relativement bien au feu et également à l'eau grâce à la subérine qui imprègne les cellules. Contrairement à la croyance populaire, le liège est inflammable au même titre que tout composé ligneux. Il est souple et se décompose lentement. On distingue deux types de liège : « naturel » et « expansé » [43]:

- Le liège expansé est chauffé à haute température, gonflé d'air, ce qui le rend plus léger et plus performant en résistance thermique ;
- Le liège brut ne subit aucun traitement, excepté l'ébouillantage, c'est pourquoi il est qualifié de « liège naturel » à l'inverse du « liège expansé ».

II.2.2.4.4 Pourquoi ce matériau ?

Le liège résiste très bien à la compression. Il est quasi imperméable aux liquides et aux gaz. Il est résistant aux parasites et imputrescible. Essentiellement produit au Portugal, le liège noir est broyé en granulés, puis chauffé pour l'expansé. Les granulés s'agglomèrent avec leur résine naturelle pour former des panneaux. Le vrac provient souvent des résidus de fabrication. Le liège blanc est lui issu du recyclage de bouchons auxquels il faut ajouter un liant. Le vrac peut servir à alléger des bétons ou enduits (chaux, terre, plâtre). Certains panneaux sont utilisés comme supports d'enduits [51].

D'autre part, le liège ralentit la vitesse du son, ce qui veut dire que les sons régnants sont affaiblis. Dire que le liège élimine le son serait donc faux. Les sons ne se prolifèrent non seulement à travers les parois, mais aussi à travers les tuyaux, châssis, plafonds, carrelages... Puisque le liège absorbe les bruits, nous ne pouvons le qualifier que de « matériau favorable à l'oreille » [44].

En plus de ça, le liège est un éco-matériau très riche en qualité (durabilité, sécurité, performance architecturale, facilité de recyclage, faible empreinte écologique) en plus de tout ça en Algérie il s'agit d'une ressource local. Il faut savoir aussi que la croissance du chêne-liège fixe le charbon au lieu d'en émettre, et l'énergie grise (le bilan énergétique de l'extraction + Transformation + transport + mise en œuvre) est bien plus faible que pour les autres matériaux d'isolation. Pour ça il faut absolument se pencher plus sur ce matériau pour nos constructions et sensibiliser les maitre d'ouvre a l'utiliser beaucoup plus [52].

II.3 Caractéristiques thermo-physiques et hydriques de quelques matériaux biosourcés

II.3.1 Caractéristiques thermo-physiques

II.3.1.1 Masse volumique

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume (kg.m^{-3}). Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ ou μ [53].

❖ Le bois de palmier

Certains bois sont légers (peuplier, épicéa,...) et d'autres sont très lourds (chêne,...). La densité varie non seulement d'une essence à l'autre, mais aussi cela varie au sein d'une même espèce, à savoir même pour le même arbre pour des régions différentes.

Pour le bois de palmier, plusieurs études ont été consacrées à la caractérisation de la masse volumique [54-55].

Les travaux de thèse de M.TLIJANI [54] ont porté sur des échantillons obtenus à partir du bois palmier dattier extraits du tronc de trois types de dattiers : Deglat, ftimi et Rtoub, et du pétiole de palme Deglat. Les résultats de mesure de la masse volumique, avant et après séchage, sont résumés dans le tableau II.2.

Tableau II.2. Masse volumique des échantillons d'essais avant et après séchage [54].

Type de bois	ρ (kg.m ⁻³)	ρ (kg.m ⁻³)
	avant séchage	après séchage
Degla	885	760
Ftimi	515	355
Rtoub	347	332
Ecaille ou pétiole de palme		173

T. GUETTAF [56] s'est intéressé dans sa thèse à d'autres types de palmier dattier, très répandus à Biskra : Mech Degla, Deglet Nour et El Ghers. La masse volumique, qui a été mesurée à deux positions: le cœur et la surface, variait en moyenne de 683 à 777 kg.m⁻³ pour la Mech Degla, de 515 à 640 kg.m⁻³ pour Deglet Nour et 295 à 462 kg.m⁻³ pour El Ghers.

Les travaux de B. AGOUDJIL et al [55] ont porté sur la caractérisation par MEB d'une fibre d'échantillon de pétiole de la variété Deglet-Nour issu d'une oasis de la province de Biskra, découpés dans deux directions perpendiculaires. La masse volumique de l'échantillon prélevé dans la grappe est de 389 kg.m⁻³ qui est légèrement supérieure à celle de l'échantillon prélevé dans le pétiole 187 kg.m⁻³, il présente donc une porosité importante qui explique les valeurs faibles de masse volumique.

❖ **Béton de chanvre**

Les caractéristiques physiques d'un matériau poreux sont liées à la structure de sa porosité. En tenant compte de la connexion entre les pores. On distingue : la porosité ouverte dont les vides sont connectés et la porosité close dont les vides ne sont pas liés.

Les études effectuées par COLLET [57] sur deux gâchées de béton de chanvre notées A et B montrent que c'est un matériau macroporeux dont les pores atteignent un diamètre médian de 0.69 μm et 0.78 μm pour les bétons A et B respectivement. Concernant la porosité ouverte, les moyennes obtenues pour le béton de chanvre ont été comparées à quelques matériaux dans la construction (tableau II.3). Les résultats montrent que le béton de chanvre a une porosité ouverte beaucoup plus grande et une masse volumique sèche plus faible que les autres matériaux.

Tableau II.3. Masse volumique, teneur en eau saturée, porosité ouverte pour différents matériaux COLLET et WUFI [57,58].

Matériaux	Teneur en eau	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Porosité ouverte
	Saturée massique		
Béton de chanvre A	163.6%	413	63.8%
Béton de chanvre B	168.3%	425	72%
Béton cellulaire	87%	600	43.5%
Béton C15/25	7.95%	2200	17.5%
Brique extrudée	20%	1630	33.3%

M. ASLI [59] a mesuré la masse volumique à l'état sec du béton de chanvre qui est de 335 kg.m⁻³, un peu moins du double de la masse volumique sèche des fibres de bois 187 kg.m⁻³ et ceci est lié principalement à la taille des fibres de chanvre selon les analyses des images microscopiques.

D'autres travaux DHAKAL, BERARDI, GORGOLEWSKI, & RICHMAN [60] qui ont porté sur la caractérisation hygrothermique et mécanique du béton de chanvre, ont présenté des valeurs de la masse volumique à l'état sec variant de 300 à 500 Kg.m⁻³. On remarque donc que les résultats obtenus par les différents auteurs sont très proches et se correspondent les uns des autres.

❖ **Le liège**

Les travaux de thèse de N. SOTEHI [61] ont porté sur l'influence de l'incorporation des granulats de liège sur la masse volumique du béton. Sept échantillons ont été pris en considération, avec différentes masses de liège injecté. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau II.4. Il est clairement remarquable que plus la masse du liège est importante, plus la masse volumique diminue.

Tableau II.4. Masse volumique des échantillons de béton de liège [61].

Echantillons de liège	BL 1	BL 2	BL 3	BL 4	BL 5	BL 6	BL 7
Masse de liège (kg)	4.5	9	13.5	18	22.5	27	31.5
ρ (kg.m ⁻³)	2092	1990	1939	1862	1811	1760	1684

Les travaux DIB et AMARA [62] ont porté sur l'influence du mode de malaxage sur les propriétés du béton de liège et ont présenté la variation de la masse volumique des diverses compositions de béton à 28 jours en fonction du pourcentage de liège substitué (figure II.15).

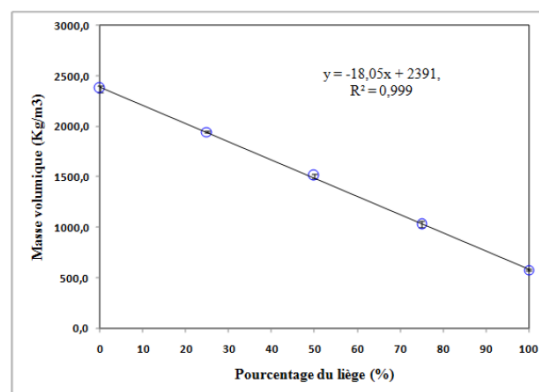


Figure II.15. Masse volumique en fonction des bétons testés en fonction du pourcentage de liège substitué [62].

Plus le taux de remplacement augmente, plus la masse volumique diminue ce qui indique une relation parfaitement linéaire entre la masse volumique des mélanges et le pourcentage du liège substitué. Cette masse volumique est passée de 2383.7 Kg.m⁻³ à 716.5Kg.m⁻³ lorsque le taux de remplacement est allé de 0% (béton de référence) à 100% soit une chute de 70%. Ce résultat est dû au fait de remplacer un volume de granulats minéraux dont la masse volumique moyenne est de 1500 kg.m⁻³ par son équivalent en granulats de liège présentant une masse volumique moyenne de 85 kg.m⁻³.

Quelques travaux de recherche qui ont abordé le sujet du béton de liège :

- MOREIRA et al [63] ont étudié différentes caractéristiques des chapes à base de granulats de liège (ciment, sable, liège et de l'eau). Ils ont trouvé que l'addition du liège affecte les propriétés des chapes par une diminution de la masse volumique.

- A. ZIREGUE et al [64] ont étudié un béton à base des chutes de granulats de liège provenant de la fabrication des panneaux d'isolation. Ils ont trouvé qu'il existe un effet significatif de l'ajout des granulats de liège sur la diminution de la densité du béton et sur l'amélioration de l'isolation thermique ainsi que sur la diminution des performances mécanique.
- H. BOUSSETOUA et al [65] ont trouvé que l'augmentation de la quantité du liège dans un béton (liège, sable, ciment et eau) a tendance à diminuer la densité. Ils ont conclu qu'un béton de liège peut être utilisé comme un isolant thermique ou comme un matériau structurel selon sa teneur en liège.

Selon SILVA et al [66] et PINTOR et al [67] Le liège est considéré comme étant un matériau alvéolaire peu dense, et sa densité varie entre 120 et 240 kg.m⁻³ et cela dépend de la qualité du matériau et comprend près de 80% d'air. Par contre Les parois cellulaires leur densité est estimée à 1200 kg.m⁻³ d'après Gibson et al [68]. Le tableau II.5 montre la densité de différents isolants dont le liège.

Tableau II.5. Densité de différents isolants dont le liège [66,69].

	Densité Kg.m ⁻³
Liège	120-240
Liège aggloméré expansé	100-120
Mousse de polyuréthane	20
Mousse de polystyrène	25
Laine de verre	25-30
Air	1.17 (25°C, HR = 50%)

❖ Ouate de cellulose

La masse volumique apparente de la ouate de cellulose est réalisée sur les charges en vrac, elle a été mesurée par la méthode RILEM [70] qui consiste à peser les échantillons et à mesurer le volume correspondant avec de l'eau à l'aide d'un tube cylindrique transparent (Figure II.16) mais pour le cas de la ouate de cellulose ça nécessite plus de précautions car celle-ci est très sensible au tassement et à l'électricité statique.

Les masses volumiques apparente et réelle obtenue pour ce matériau sont 35.8 kg.m^{-3} et 1481 kg.m^{-3} dans l'ordre et la porosité totale ouverte de ce dernier est de 97.6%.

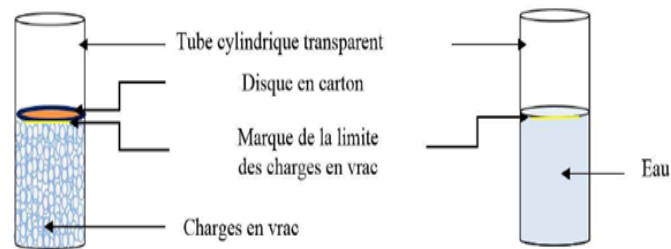


Figure II.16. Réalisation de la masse volumique apparente [70].

II.3.1.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique traduit la propriété qu'ont les corps à transmettre la chaleur par conduction. Elle correspond au flux de chaleur qui traverse en 1 seconde un matériau d'une surface de 1m^2 et de 1m d'épaisseur pour un écart de température de 1°C entre les 2 faces.

Elle est désignée par le coefficient λ exprimé en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant [71].

❖ Le bois de palmier dattier

Les travaux de recherche de B. AGOUDJIL [21] ont porté sur l'étude expérimentale des propriétés thermophysiques du bois de palmier en vue de sa possible utilisation pour la réalisation de nouveaux matériaux isolants. L'étude a été consacrée à la caractérisation de différents échantillons prélevés de parties renouvelables de bois de palmiers dattiers de différentes variétés (Deglet-Nour, Mech-Degla, Elghers) provenant de l'oasis de Biskra (Algérie). Elle rapporte une conductivité thermique de l'ordre de 0.072 à $0.085 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$.

Les résultats de caractérisation de la conductivité obtenus par M. TLIJANI [54] sur les fibres de bois extraits des différentes variétés de palmiers citées au paragraphe (II.3.1.1) sont résumés dans le tableau II.6.

Tableau II.6. Propriétés thermiques des fibres de bois de palmier à pression Atmosphérique [54].

Type de palmier	λ (w.m ⁻¹ .k ⁻¹)
Degla	0.168
Ftimi	0.144
Rtoub	0.102
Ecaille ou pétiole de palme	0.058

La figure II.17 présente une comparaison de la conductivité thermique et de la masse volumique du bois de palmier dattier (valeurs obtenues pour le pétiole de la variété Deglet-Nour) à d'autres matériaux naturels utilisés actuellement pour la réalisation de composites ou de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment, sélectionnés à partir des données de la littérature [72-75].

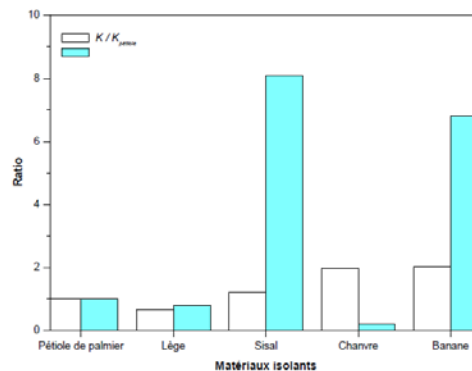


Figure II.17. Comparaison de la masse volumique et de la conductivité thermique du bois de pétiole de palmier dattier à d'autres matériaux naturels [54].

On peut dire que le bois de palmier dattier est un bon candidat pour la réalisation de nouveaux matériaux isolants car il présente une conductivité thermique faible et une masse volumique faible. Seul le liège possède à la fois une conductivité et une masse volumique plus faibles.

Les travaux de B. HABA [76] ont porté sur le béton de palmier dattier où la conductivité thermique a été mesurée à l'état sec et humide et à différentes températures. Les résultats sont présentés dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Résultats de la conductivité thermique à l'état sec et humide et à différents niveaux de température [76].

Température °C	Conductivité thermique a l'état sec w.m ⁻¹ .k ⁻¹	Conductivité thermique a l'état humide w.m ⁻¹ .k ⁻¹
14	0.189	0.250
27	0.199	0.270
42	0.214	0.295

Les résultats de la conductivité thermique montrent une importante capacité d'isolation thermique à l'état sec. De plus, sous des conditions sévères de température et d'humidité relative, le matériau semble être valable pour les applications d'isolation thermique selon la classification RILEM [77]. En effet, le béton des granulats légers avec une conductivité thermique inférieure à 0.3 W.m⁻¹.K⁻¹ peut satisfaire les exigences de l'isolation thermique.

❖ **Béton de chanvre**

La mesure de la conductivité thermique du béton de chanvre a été effectuée par de nombreuses équipes COLLET [57] ; CEREZO [78] et EVRARD [30] et les résultats obtenus pour les valeurs équivalentes de masse volumique sont cohérents entre eux. La conductivité thermique des bétons de chanvre est faible, en lien avec leur faible masse volumique.

Pour un milieu sec, EVRARD [30] a trouvé que les conductivités thermiques varient de 0.109 à 0.121 Wm⁻¹.K⁻¹ pour une masse volumique variant entre 460 et 500 kg.m⁻³. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par CEREZO [78], dont les valeurs varient entre 0.09 et 0.16 W.m⁻¹.K⁻¹ pour une masse volumique variant de 400 à 700 kg.m⁻³.

Comme les autres isolants bio-sourcés, l'isolant en fibres de chanvre est conditionné sous la forme de rouleaux, de panneaux semi-rigides ou en vrac, d'après M. AGHAHADI [79] sa conductivité thermique varie entre 0.039 à 0.042 W.m⁻¹.K⁻¹ et cela en fonction de sa masse volumique.

Les travaux DHAKAL, BERARDI, GORGOLEWSKI, & RICHMAN [60] ont porté sur la caractérisation hygrothermique et mécanique du béton de chanvre et ont présenté des valeurs de la conductivité thermique variant de 0.06 à 0.12 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

MAZHOUD et al [80] ont mené une étude comparative des propriétés thermiques et des propriétés hydriques de deux plâtres de chanvre qui diffèrent l'un de l'autre par la taille des fibres de chanvre dont ils sont fabriqués, ce matériau présente une conductivité thermique d'environ 0.2 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, bien plus faible que celle du gypse (0.48 à 0.80 $\text{W}/\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Cette étude montre que les plâtres de chanvre peuvent améliorer les performances thermiques des murs, afin de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le confort thermique de l'habitat.

Les avantages de leur utilisation dans la construction sont basés sur leur bonne résistance thermique c'est à dire leur faible conductivité thermique et la propriété d'un bon isolant du point de vue de la régulation de la température.

❖ **Le liège**

La conductivité thermique des isolants en liège a fait l'objet de plusieurs recherches. Les études expérimentales de N. KELLATI [81] ont montré une influence notable de la masse volumique et de l'humidité sur la conductivité donc sur le pouvoir d'isolation thermique (figure II.18). Les résultats de mesure donnent des valeurs variant de 0.032 à 0.058 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

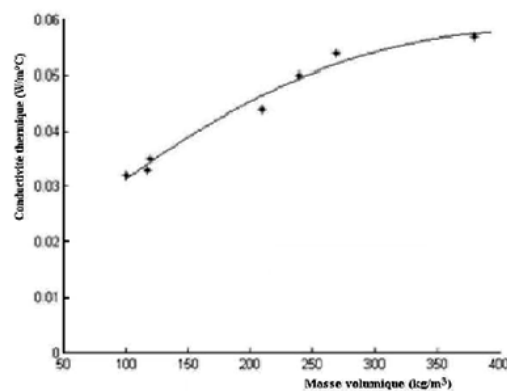


Figure II.18. Conductivité thermique du liège en fonction de la masse volumique [81].

L'état du matériau (granulaire ou compact) influence beaucoup la valeur de la conductivité. Le tableau II.7 repris de la thèse de M. AGHAHADI [79] montre des valeurs variant entre 0.038 à 0.043 $W.m^{-1}.K^{-1}$ en fonction de leur masse volumique. Sur le plan environnemental, ils contribuent deux fois moins au réchauffement climatique par rapport aux isolants en fibres de bois comme le montrent leurs bilans CO2 (Tableau II.8).

Tableau II.8. Quelques caractéristiques des isolants en liège [79].

Type	Masse volumique ρ ($kg.m^{-3}$)	Conductivité thermique λ ($w.m^{-1}.k^{-1}$)	Bilan CO2 (Kg CO2 équivalent)
Vrac expansé	70	0.038	-22
Panneau expansé	120	0.043	-27

D'autres études se sont intéressés aux composites à base de liège:

- N. SOTEHI [61] a mesuré la conductivité thermique du béton de liège en fonction du pourcentage des granulats de liège (1 à 7%) incorporé au béton. Les résultats de mesure ont donné des valeurs de conductivité variant entre 0.382 $w.m^{-1}.k^{-1}$ pour un béton avec 1% de liège et 0.656 avec 7%.
- LIMAM et al [82] qui ont étudié la conductivité thermique d'un multicouche de liège-bois. Celui-ci est constitué de deux panneaux de bois de 2 cm d'épaisseur entre lesquels est inséré un panneau de liège de 4 cm d'épaisseur. L'étude a été menée sur trois échantillons de différentes masses volumiques (322, 212 et 267 $kg.m^{-3}$). les conductivités thermiques équivalentes des trois échantillons multicouches sont respectivement de 0.068; 0.063 et 0.065 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Dans l'étude menée par CHERKI et al [83], l'isolant est une structure composite liège-gypse. Cette structure sert à fabriquer une brique avec un pouvoir isolant amélioré comme le cas des briques en béton de chanvre. Cette étude montre clairement que l'incorporation des broyats du liège dans la structure en gypse permet de réduire de plus de 60% la conductivité thermique effective de ce dernier. En effet, la conductivité thermique moyenne du gypse est d'environ 0.3

$W.m^{-1}.K^{-1}$ tandis que la conductivité thermique moyenne du composite est d'environ $0.11 W.m^{-1}.K^{-1}$.

- MOUNIR et al [84] ont également mis en œuvre la méthode "plan chaud" pour caractériser une structure composite d'argile-liège. L'incorporation du liège dans la structure en argile réduit la conductivité thermique de celle-ci de $0.406 W.m^{-1}.K^{-1}$ à $0.23 W.m^{-1}.K^{-1}$.

❖ **Ouate de cellulose**

La conductivité thermique λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) de la ouate de cellulose est mesurée en régime transitoire à l'aide d'un CT-mètre. La conductivité thermique du matériau en vrac est mesurée en produisant un échantillon représentatif stabilisé à $23^{\circ}C$ et 50%HR dans deux cylindres, la sonde étant insérée entre les deux (Figure II.19). L'effet de la température sur la conductivité au point sec est ensuite étudié. L'échantillon est séché en étuve à $40^{\circ}C$ puis stabilisé en armoire sèche (gel de silice) à différentes températures ($40^{\circ}C$; $30^{\circ}C$; $20^{\circ}C$; $10^{\circ}C$).



Figure II.19. Mesure de la conductivité des charges à l'aide d'un CT mètre [70].

La conductivité thermique obtenue par le CT mètre est de $0.04 W.m^{-1}.K^{-1}$, cette dernière permet de classer la ouate de cellulose comme isolant thermique du bâtiment au sens de la norme AFNOR NF P75-101 ($\lambda < 0.065 W.m^{-1}.K^{-1}$) [70].

II.3.1.3 Chaleur massique

La capacité calorifique massique à pression constante C_p s'exprime en $J.kg^{-1}.K^{-1}$ et peut être définie par la quantité d'énergie à apporter à un kilogramme de matière pour élever sa température d'un Kelvin. Cette propriété reflète donc l'aptitude du matériau à emmagasiner de l'énergie et à restituer la chaleur.

❖ Le bois de palmier

La connaissance de la masse volumique, de la conductivité et de la diffusivité thermique de l'échantillon permet de retrouver sa capacité thermique, Les résultats obtenus par M. TLIJANI [54] de la capacité thermique identifiée de différents échantillons sont présentées dans le tableau II.9.

Tableau II.9. Propriétés thermiques des fibres de bois de palmier à pression Atmosphérique [54].

Type de palmier	$a \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1})\cdot 10^{-7}$	$C_p \text{ (j}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1})$
Degla	1.921	1151
Ftimi	4.808	844
Rtoub	4.368	703
Ecaille ou pétiole de palme	2.867	1163

La chaleur massique a également été mesurée en fonction de différentes concentrations de fibres palmier dattier dans les 28 jours suivant le séchage naturel par N.BENMANSOUR [23], la figure II.20 illustre cette évolution.

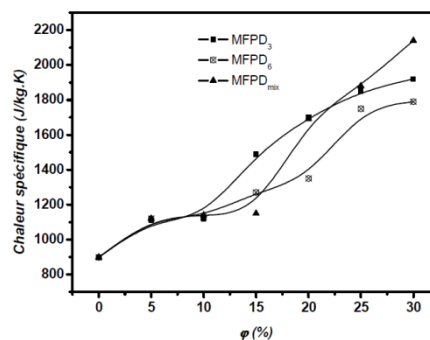


Figure II. 20. Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la concentration de fibres [23].

D'après les résultats obtenus on constate que plus la chaleur massique est élevée, plus les matériaux sont capables de stocker et de restituer des quantités importantes de chaleur puisqu'ils présentent des valeurs importantes pour les concentrations élevées de fibre palmier dattier.

Une capacité thermique élevée traduit une forte inertie thermique ou une grande capacité à emmagasiner de la chaleur ce qui donne une aptitude au matériau à évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Elle joue aussi le rôle de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [86].

H.BENARAB [86] a étudié la chaleur massique sur des échantillons à base de composite gypse fibre palmier dattier grosse étuvé avec différentes pourcentages des fibres (0, 1, 3, 5%). Les résultats de mesure ont donné des valeurs variant entre 1112.8 à 965.2 $\text{Kj.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$ pour 0% à 5% de fibre.

❖ **Béton de chanvre**

Les mesures de la chaleur massique du béton de chanvre sec et humide ont été effectuées par COLLET et EVRARD [57,30]. Les résultats obtenus ne sont pas très proches. En effet, selon Evrard, elle est de l'ordre de $1530 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ alors que selon Collet elle est de $1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour des échantillons secs de masses volumiques très proches (440 kg.m^{-3} et 408 kg.m^{-3} respectivement). Cette divergence a été expliquée par le fait que dans le cas des travaux de Collet, la chaleur spécifique n'a pas été mesurée directement mais calculée à partir des mesures de conductivité et de diffusivité thermique. Les erreurs de mesure se cumulent et peuvent entraîner une erreur assez importante. Dans le cas de la thèse d'Evrard, les échantillons ont été séchés à 100°C , température jugée trop élevée étant donné que le béton de chanvre contient de la matière végétale. Pour le bois par exemple, la température de séchage maximale est de l'ordre de 80°C et on recommande même plutôt 40°C afin de ne pas modifier le matériau (réaction de la cellulose et des lignines à la température). Par conséquent, la technique de séchage utilisée (100°C) a peut-être endommagé le matériau.

Les travaux de F. BENNAI [87] ont montré que la chaleur spécifique du béton de chanvre est sensible aux variations de la teneur en eau. Ce paramètre passe de $1161 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à l'état sec à $3021 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à l'état saturé.

Les travaux DHAKAL, BERARDI, GORGOLEWSKI, & RICHMAN [60] ont porté sur la caractérisation hygrothermique et mécanique du béton de chanvre et ont présenté des valeurs de la chaleur massique à l'état sec de l'ordre de 1500 à $1600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

❖ Le liège

A défaut d'avoir pu mesurer " a", la diffusivité thermique du matériau étudié, N. SOTEHI [61] a calculé la chaleur massique à partir des mesures de la diffusivité thermique existant dans la littérature (ceux trouvés par Elbakkouri). Les mesures ont été faites sur un béton avec 7% de liège (BL7) et les résultats sont présentés dans la figure II.21.

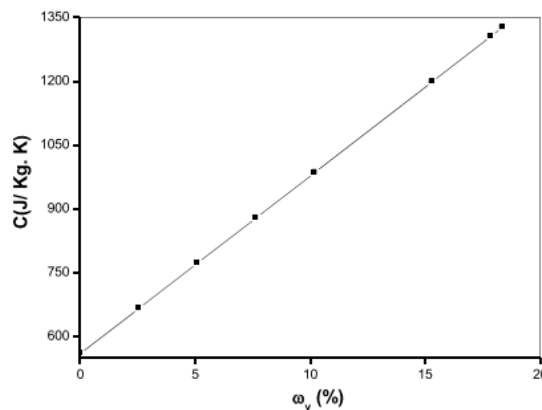


Figure II.21. Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BL7 [61].

L'observation de figure II.21 représente la variation de la chaleur massique (C_p) de l'échantillon BL7 en fonction de la teneur en eau, permet de remarquer que cette grandeur croît de manière linéaire avec la teneur en eau.

A. ZERIZER [88] à étudié des échantillons de liège aggloméré noir qui serviraient de couche central pour un panneau sandwich. La valeur de la conductivité thermique obtenue est de $0.04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une Chaleur spécifique de $1670 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, mesurées à l'aide de l'appareil Conductivité mètre (CTmètre) en régime transitoire grâce à l'utilisation des sondes à choc thermique. Limam [89] à mesuré la chaleur spécifique du liège aggloméré noir obtenu à partir de granulés de liège après broyage et pressage dans un autoclave à 350°C , les résultats obtenus pour les trois échantillons sont d'environ $1.90 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ dans une plage de température allant de 0 à 45 °C à l'aide d'une calorimétrie MDSC7.

La figure II.22 montre que le liège est un bon absorbant de chaleur et ceci est en raison de sa structure en nid d'abeilles.

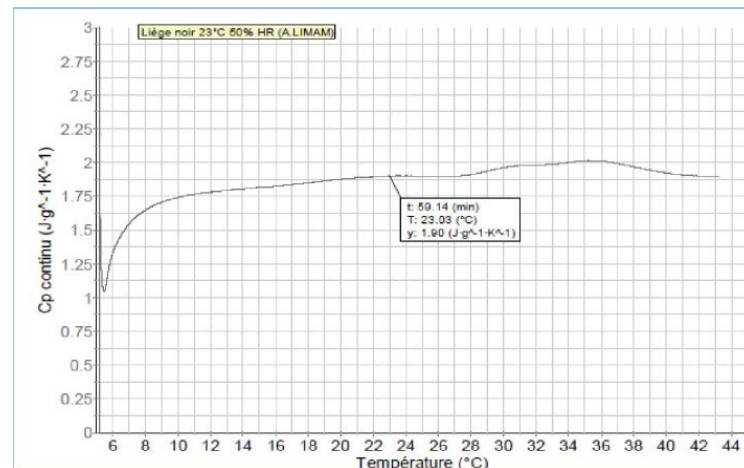


Figure II.22. Evaluation de la chaleur spécifique du liège aggloméré noir en fonction de la température.

II.3.2 Caractéristiques hydriques

II.3.2.1 Perméabilité à la vapeur

Tout comme la chaleur qui se déplace des zones de température la plus élevée vers les zones de température la plus basse, la vapeur d'eau se déplace des zones à forte concentration en vapeur vers les zones à faible concentration, on parle de la diffusion de vapeur. Ce phénomène est caractérisé par la perméabilité à la vapeur qui exprime la quantité de vapeur transmise à travers une surface par unité de temps, de pression et d'épaisseur. Par conséquent, plus la perméabilité à la vapeur est importante, plus le matériau est perméable [85].

❖ Le bois de palmier

La perméabilité à la vapeur d'eau des fibres palmier dattier a été étudiée par A.GHERFI et al [90] en utilisant la méthode la plus reconnue et plus utilisée dite méthode de la coupelle, décrite dans la norme ISO 12572 (AFNOR, 2001) sur trois échantillons fabriqués à base de fibres de palmier dattier (20%, 35% et 50% de fibres) et de chaux. La méthode permet d'exposer un échantillon d'épaisseur "e" à un gradient de pression de vapeur constant et monodimensionnel dans un environnement contrôlé (conditions isothermes). Les valeurs de la perméabilité π et le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ de l'ensemble des échantillons sont résumées dans le tableau II.10.

Tableau II.10. Valeurs de la perméabilité du composite à base de FDP [90]

Matériau	Coupelle sèche		Coupelle humide	
	Perméabilité $\pi \times 10^{-11}$		Perméabilité $\pi \times 10^{-11}$	
	μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)		μ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	
20% de FDP	2.22	8.87	3.27	5.96
35% de FDP	2.32	8.54	3.38	5.77
50% de FDP	2.55	7.61	3.51	5.56

On remarque que la perméabilité à la vapeur est sensible à la variation du rapport fibre/chaux, la diminution de ce dernier se traduit par de plus faibles perméabilités. Les plus grandes valeurs de la perméabilité ont été observées pour les échantillons à 50% de fibres, pour cette formulation, les perméabilités mesurées sont 3.51×10^{-11} Kg .m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ pour la coupelle humide et 2.55×10^{-11} Kg.m⁻¹.s⁻¹.Pa⁻¹ pour celle sèche.

La résistance à la vapeur d'eau du béton de palmier dattier a été étudiée par B. HABA et comparée à quelques matériaux de construction [76]. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau II.11. Résultats du facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau en point sec.

	Résistance a la diffusion de vapeur d'eau	Référence
DPC	4.4	[76]
LHM-WALL	4.8	[30]
Béton solide	130	[91]
Béton cellulaire autoclavé	10	[91]

On peut constater que le DPC a une valeur très faible ainsi que le béton de chanvre (noté LHM-wall) qui sont des matériaux bio-composites, contrairement aux matériaux de construction traditionnels comme le béton solide et le béton cellulaire autoclavé qui présentent une forte résistance à la vapeur d'eau. Ainsi, la présence de fibres de palmier

dattier dans un liant à base de ciment a conduit à améliorer de manière significative la microstructure et également le transfert de vapeur d'eau.

Pour la mesure de la perméabilité à la vapeur (coupelle sèche et humide), S. NAFTI et O. HALEM [92] ont étudiés trois échantillons chacun diffère de l'autre en termes de pourcentage de fibre (50%, 35% et 20%), les résultats obtenus montrent que dans le cas des coupelles sèches et humides les valeurs de perméabilité à vapeur d'eau varient respectivement de 2.25×10^{-11} et 3.1×10^{-11} $\text{kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour 20% à 3.4×10^{-11} et 3.47×10^{-11} $\text{kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour 50%.

Les valeurs montrent ainsi une augmentation de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en fibres pour les coupelles sèche et humide. C'est-à-dire que l'augmentation de la quantité de fibre améliore la perméabilité des échantillons.

❖ **Béton de chanvre**

Afin de déterminer la perméabilité à la vapeur du béton de chanvre, plusieurs essais ont été effectués par COLLET [57] et EVRARD [30]. Le principe de la mesure, dite « la coupelle » consiste à placer un échantillon d'épaisseur "e" sous gradient de vapeur constant et unidimensionnel en condition isotherme (figure II.23). La connaissance de flux de vapeur traversant le matériau et déterminé à partir de la pesée de l'ensemble coupelle-échantillon, permet de calculer la perméabilité à la vapeur selon la formule 1 ci-après (dans le cas où on suppose qu'on a un mélange de gaz parfait de part et d'autre de la coupelle et en négligeant la résistance massique de la couche d'air entre la solution saline et la coupelle):

$$\pi = e \frac{q_v}{P_{v2}-P_{v1}} = e \frac{q_v}{\Delta P_v} \dots \dots \dots (1)$$

Où π est la perméabilité de vapeur ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$) ;

e : épaisseur de l'échantillon (m) ;

P_v : pression de la vapeur (Pa) ;

q_v : densité de flux de vapeur ($\text{kg.m}^{-2} .\text{s}^{-1}$).

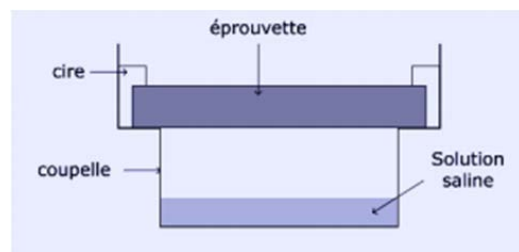


Figure II.23. Mesure de la perméabilité par la méthode de la coupelle [93].

Le tableau II.12 montre les valeurs obtenues par WUFI [58] et COLLET [57] de la perméabilité à la vapeur d'eau de certains matériaux. On peut constater que la valeur du béton de chanvre est la plus élevée ainsi que le béton cellulaire contrairement à la valeur du béton normal C12/25 qui est la plus petite.

Tableau II.12. Perméabilité à la vapeur d'eau de certains matériaux.

Matériau	Perméabilité a la vapeur $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{pa}^{-1}$
Béton de chanvre	2.3×10^{-11}
Béton cellulaire (600kg.m^{-3})	2.29×10^{-11}
Béton C12/25	2.17×10^{-12}
Brique extrudée	2.1×10^{-11}

On remarque aussi que les valeurs du palmier dattier sont légèrement inférieures à celles du béton de chanvre

COLLET [57] a mesuré la perméabilité à la vapeur de bétons de chanvre selon la méthode normative de la coupelle. Les perméabilités obtenues sont de $1.7 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le point « sec » et de $2.3 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le point « humide » (0/85).

L'agromatériau chanvre-amidon présente une perméabilité à la vapeur d'eau équivalent à $4.36 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le matériau traité et $3.78 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ pour le matériau brut selon C. MAALOUF [94]. Ces deux valeurs sont relativement élevées par rapport aux résultats trouvés dans la littérature sur le béton de chanvre-chaux. Le béton de chanvre-chaux projeté étudié par COLLET [25] présente une perméabilité à la vapeur d'eau δ égale à $3.2 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur trouvée par CHAMOIN [95] égale à $2.922 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. En revanche, les formulations étudiées par WALKER et PAVIA [96] donnent des résultats similaires à

ceux du chanvre-amidon, avec δ variant entre $3.99 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ et $4.21 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$.

Les formulations de béton de chanvre-chaux étudiées par COLLET [25] présentent une perméabilité à la vapeur d'eau δ de $3.2 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ et $2.5 \times 10^{-11} \text{ kg.m}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ respectivement pour une humidité relative faible de 0/50 et moyenne de 0/85.

➤ **Ouate de cellulose**

La cellulose est un matériau ouvert à la diffusion, donc perméable à la vapeur d'eau. Ce matériau va permettre la régulation de l'humidité grâce aux parois de la maison, Il peut absorber plus de 15% de son poids en eau, et la restituer sans perdre ses qualités. Comme une éponge, la couche de ouate absorbe de l'humidité, l'accumule et la restitue seulement lorsque le climat s'assèche. Les pièces ne sont donc ni trop humides, ni trop sèches, ce qui est très confortable [97].

II.3.2.2 Valeur du tampon hydrique (MBV)

Née du terme anglais "Moisture buffer value" (MBV), la valeur de la capacité tampon hydrique (VCTH) indique la quantité d'eau absorbée ou libérée en un temps donné lorsque le matériau est soumis à une variation d'humidité relative extérieure. Elle représente un bon indicateur sur la capacité du matériau à modérer les variations de l'humidité intérieure dans le bâtiment [98]. Le projet NORDTEST [99] a été mis en place afin de déterminer la valeur de la capacité tampon hydrique des matériaux. Il définit un cycle dynamique, de période 24h, dans lequel l'humidité relative est fixée à 75% pour 8h ensuite à 33% pour les 16h suivantes. La valeur de la capacité tampon hydrique est déterminée par la quantité d'humidité adsorbée ou désorbée par une unité de surface lorsque le matériau est soumis à un changement de 1% d'humidité relative. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique sous les conditions diurnes, la VCTH est indépendante de l'épaisseur du matériau et de l'amplitude de variation de l'humidité relative. La classification adoptée est présentée en figure II.24.

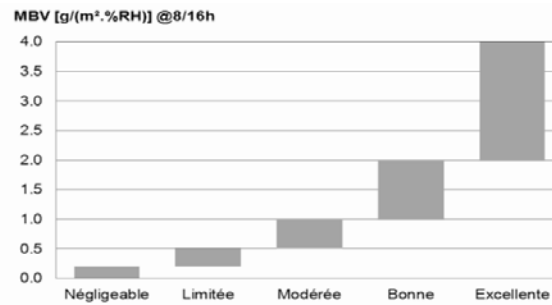


Figure II.24. Classification des valeurs de capacité tampon hydrique (MBV) [99].

❖ Le bois de palmier

Afin de déterminer la Valeur tampon hydrique du palmier dattier, BELAKROUM et al [100] ont procédé à une étude. Le principe de l'essai consiste à soumettre les échantillons fabriqués essentiellement à base de fibres de palmier dattier et de chaux de différentes formulations à des cycles d'humidités relatives pour être représentatifs des cycles rencontrés dans les bâtiments selon le projet NORDEST. Le suivi massique des échantillons permet alors de déterminer la valeur tampon hydrique du matériau.

Pour l'ensemble des échantillons, les valeurs moyennes de MBV trouvées sont comprises entre 1.79 et 2.41 g/(m².%HR). Ce qui classe ce matériau comme bon ($1 < MBV < 2$) ou excellent ($2 < MBV$) régulateur hydrique d'après la classification des valeurs de capacité tampon hydrique MBV (figure II.20).

La valeur du tampon hydrique est sensible à la composition du matériau (rapport fibre/chaux), on peut dire que les fibres de dattes sont très sensibles à l'eau et très poreuses et vu les résultats trouvés, nous remarquons qu'un matériau à base de fibres de palmier dattier est donc un très bon régulateur hydrique.

❖ Béton de chanvre

De par leur fortes capacités à transférer et à stocker/déstocker l'humidité de l'air environnant, les bétons de chanvre sont de très bons régulateurs hydriques et c'est le matériau le plus documenté concernant le comportement thermo-hydrique. Dans ses travaux de recherche, SAMRI [101] a mis en évidence les phénomènes d'évapo-condensation de l'eau au sein d'un mur en béton de chanvre soumis à des gradients de température. Il a montré combien l'aspect poreux influence fortement les échanges

d'eau sous forme vapeur et liquide au sein du matériau. SAMRI a remarqué que la présence d'enduits modifiait les transferts de vapeur d'eau et qu'ils agissaient comme un filtre hydrique.

Les travaux de COLLET et al [102] ont porté sur la caractérisation dynamique du comportement hydrique de béton de chanvre moulé. Dans un premier temps, l'étude est réalisée sur le matériau seul, puis sur le matériau enduit. Les essais sont réalisés selon la méthode définie dans le NORDTEST PROJECT. Le suivi massique des échantillons a permis alors de déterminer la valeur tampon hydrique des différents matériaux testés (figure II.25).

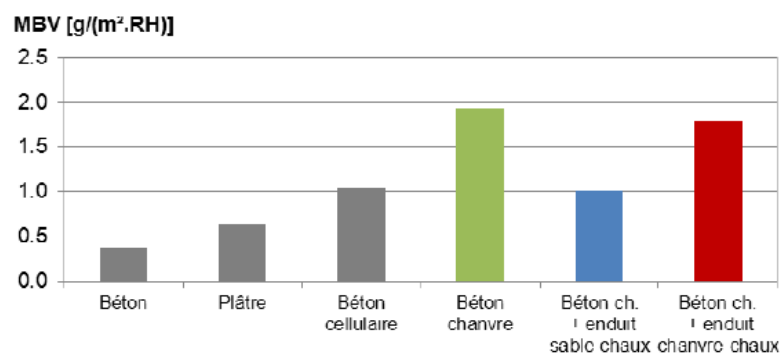


Figure II.25. Valeur tampon hydrique (MBV) de matériaux usuels et du béton de chanvre moulé nu et enduit [102].

Les résultats montrent que le béton de chanvre moulé est un très bon régulateur hydrique ($MBV=1.94 \text{ g/m}^2.\%HR$) largement meilleur que les matériaux usuels. Une fois enduit le béton de chanvre moulé reste bon régulateur hydrique avec un enduit fermé et très bon régulateur hydrique avec un enduit ouvert.

Dans une étude plus récente, COLLET et al [103] ont comparé le comportement hygroscopique de trois bétons de chanvre utilisés dans les murs pour identifier si la composition et la fabrication ont un impact sur les propriétés hydriques. Les investigations ont été basées sur la mesure de l'isotherme de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité et la valeur du tampon hydrique. Les résultats ont souligné que les capacités de transfert et de stockage de ces matériaux sont élevées. Ils sont classifiés en tant qu'excellents (ou presque excellents) régulateurs hydriques.

EVARD et DE HERDE [104] ont étudié, par simulation avec le logiciel WUFI, les réponses hygrothermiques de différents systèmes de mur soumis à des variations de

température et ont évalué différentes grandeurs permettant de caractériser ces réponses.

Les résultats ont mis en évidence, pour les bétons de chanvre et les briques d'argile, des déphasages respectifs de 15h et 12h et des amortissements thermiques élevés de l'ordre de 92 et 95%. Les murs en béton de chanvre ont présenté les meilleures capacités de tampon hydrique avec $2.11 \text{ g/m}^2 \text{ \% RH}$ contre $0.96 \text{ à } 1.01 \text{ g/m}^2 \text{ \% RH}$ pour la brique d'argile. DHAKAL, BERARDI, GORGOLEWSKI, & RICHMAN [60] ont aussi utilisé ce logiciel pour un échantillon de béton de chanvre, ils ont trouvé une valeur de MBV de $2.11 \text{ à } 2.14 \text{ g/m}^2 \text{ \% RH}$.

RAHIM et al [105] ont comparé les propriétés hydriques de béton de lin avec le béton de chanvre ; les résultats ont montré que ces matériaux biosourcés ont des propriétés hydriques très intéressantes et présentent une importante capacité tampon hydrique.

D'un point de vue hydrique, le béton de chanvre présente de nombreux avantages. Il possède un pouvoir tampon à l'humidité (MBV) "excellent". Ce qui lui permet de maintenir la qualité de l'air intérieur. De plus, sa structure très poreuse, et sa porosité totale proche de la porosité ouverte, le rendent capable d'absorber des quantités d'eau importantes.

❖ Le liège

CHADI et al [106] ont proposé une étude sur un composite liège-ciment afin de déterminer ses propriétés hygrothermiques. Les constituants faisant le mélange du composite sont du sable écrasé, des granulats de liège, du ciment Portland (CEM II / BL 32.5 N) et de l'eau. Deux types d'échantillons ont été préparés en substituant une proportion de mélange minéral par des granulats de liège selon le tableau suivant:

Tableau II. 13. Composition et densité des échantillons ciment-liège à l'état sec [106].

Échantillon	Sable (Kg.m^{-3})	Granulats		Ciment (Kg.m^{-3})
		Liège (Kg.m^{-3})		
L50	557.9	36.8		186
L75	323.3	64		107.8

Les mesures des valeurs tampons hydriques (MBV) ont montré que la composition contenant une fraction volumique importante de granulats de liège a une bonne régulation hydrique par rapport à l'autre composition [106]. De plus, les matériaux combinés ciment-liège, testés sur une paroi, peuvent réduire la consommation énergétique de 29% en les comparant avec une construction classique fabriquée par la brique creuse.

❖ La ouate de cellulose

La valeur du tampon hydrique de la ouate de cellulose a été mesurée en suivant le protocole du projet NORDTEST PROJECT RODE et al [107], qui a été porté sur un échantillon d'une stabilisation de 23°C, 50%HR (le même échantillon pour la conductivité thermique), celui-ci est soumis à des cycles d'humidité journaliers. Nous remarquons que la ouate de cellulose ne présente pas une très bonne performance de régulation hydrique comparé aux autres matériaux qu'on a étudié (bois de palmier, béton de chanvre) avec une valeur MBV des charges en adsorption de 1.32 g/(m².%HR) et une valeur de 1.31 g/(m².%HR) en désorption. Ainsi selon la classification du NORDTEST PROJECT RODE *et al* [107], la ouate de cellulose est classées comme un bons régulateurs hydriques ($1 < MBV < 2$ g/(m².%HR)).

II.3.3 Synthèse des caractéristiques thermo-physiques et hydriques des matériaux étudiés

Le tableau II.14 récapitule les valeurs des propriétés thermophysiques et hydriques des matériaux étudiées sur la base des travaux consultés :

Tableau II.14. Tableau récapitulatif des valeurs des propriétés thermophysique et hydrique des matériaux étudiées

Matériaux	Caractéristiques thermo-physiques			Caractéristiques hydriques		Références
	Masse volumique Kg.m ⁻³	Conductivité thermique W.m ⁻¹ .°C ⁻¹	Chaleur massique J.Kg ⁻¹ .°C ⁻¹	Perméabilité à la vapeur kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹	Tampon hydrique g/(m ² .%HR)	
Bois de palmier	295 - 462	0.072 - 0.085	965.2 - 1112,8	2.55x10 ⁻¹¹ 3.51x10 ⁻¹¹	1.79 - 2.41	[21,55,76,100]

Béton de chanvre	200-800	0.06-0.15	1 350-1 800	1.7 x 10 ⁻¹¹ 2.3x10 ⁻¹¹	2.11 – 2.14	[57,60,108]
Liège	65-180	0.037-0.044	1 600-1 900	1.05 x 10 ⁻¹²	-	[108]
Ouate de cellulose	30 -70	0.037 – 0.042	2 000	-	1.31	[107,108]

II.4 CONCLUSION

D'après les résultats qu'on a pu observer dans ce chapitre on peut dire que chaque matériau bio-sourcé a ses bénéfices. Ces derniers ont montré que le bois du palmier dattier à une faible masse volumique, et de fortes propriétés thermiques ont été observées prouvant que le bois de palmier est un bon isolant thermique par comparaison à d'autres matériaux isolants, ce qui fait de lui un bon candidat pour la réalisation de nouveaux matériaux isolants.

Le béton de chanvre quand à lui, du point de vu thermique il s'apparente au béton cellulaire, mais l'un de ses grands atouts est sa respirabilité, par contre l'une de ces faiblesse est sa crainte a l'eau, par conséquent, il est fondamental de se montrer très vigilant sur un certain nombre de détails techniques. En conclusion, le béton de chanvre est un biomatériau composite léger à classer parmi les bétons légers. Il s'agit d'un matériau capillaro-poreux hygroscopique non porteur ce qui conduit à l'utiliser principalement en matériau de remplissage.

Contrairement aux autres matériaux, le liège conserve des propriétés d'isolation dans une très large plage des températures. À cet égard, ses propriétés sont très élevées en raison de sa faible conductivité thermique, il est toujours agréable au toucher, parce qu'il ne laisse pas passer et n'absorbe pas la chaleur dans notre corps. Ce matériau a également la propriété de stabiliser la température d'air et de son humidité. En plus de cet avantage, il est intéressant de noter la valeur très élevée de sa chaleur spécifique. Et bien sur sa richesse en qualité (durabilité, sécurité, performance architecturale, facilité de recyclage, faible empreinte écologique) ne fait que confirmer l'indispensabilité de ce matériau sur tout qu'en Algérie c'est une ressource locale.

D'après les informations qui on été vues sur la ouate de cellulose on peut dire que ce matériau promet un avenir radieux à l'innovation de la construction bâtiment. D'un

point de vu technique, écologique et/ou économique, il n'existe pas d'isolant parfait, cependant, si nous devions opérer un classement des isolants, sans aucun doute, la ouate serait dans le peloton de tête et, probablement, pas loin de la place de leader.

Pour conclure, afin de réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment et limiter son impact en vers la nature, on peut avancer que les matériaux bio-sourcés présentent une bonne alternative aux matériaux classiques.

Références bibliographiques :

- [1] **MEDDE-MLET.** Stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé. Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages. 2012. p47
- [2] **Regional activity centre for sustainable consumption and production.** Séminaire sur la prévention de la pollution dans le secteur du ciment en Algérie [En ligne] 2009. [Citation : 22 03 2020.] <<http://www.cprac.org/fr/events/seminaire-sur-la-prevention-de-la-pollution-dans-le-secteur-du-ciment-en-algerie#:~:text=Il%20est%20commun%C3%A9ment%20admis%20que,de%20CO2%20de%20la%20plan%C3%A8te.>>
- [3] **Espaces info-énergie Occitanie.** matériaux bio-sourcés que faut-il en penser . [En ligne] 2018. [Citation : 24 03 2020.] < <https://www.infoenergie-occitanie.org/materiaux-bio-sources-que-faut-il-en-penser/>>.
- [4] **Karibati.** matériaux biosourcés . [En ligne] 2020. [Citation : 24 03 2020.] < <http://www.karibati.fr/materiaux-biosources/>>.
- [5] **Dreal paca.** matériaux bio-sourcés . [En ligne] 2020. [Citation : 24 03 2020.] < <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/materiaux-bio-sources-r1634.html>>.
- [6] **Consoglobe.** Matériaux biosourcés : une solution écologique pour la construction ? [En ligne] 2014. [Citation : 24 03 2020.] <<https://www.consoglobe.com/materiaux-biosources-construction-ecologique-cg>>.
- [7] **Ffbatiment.** LES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS DANS LE BÂTIMENT. FFP paris : s.n., 2015. p. 23.
- [8] **Notre-planete.info.** Les avantages des éco-matériaux biosourcés pour la Construction . [En ligne] 2019. [Citation : 24 03 2020.] < <https://www.notre-planete.info/actualites/379-eco-construction-eco-materiaux>>.
- [9] **S. Abani, A. Kriker, A. Bali.** effect of curing and mix design types on performance of date palm fibres reinforcement concrete under hot dry environment. 2008.

- [10] **H.S. Agopyan, V.M. John , M.A. Cincotto.** Developments on vegetable fibre-cement based materials. *Cement & Concrete Composites*. 2005. pp. 527-536.
- [11] **A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khenfer, M. Chabannet, A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khen.** Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. 2005. pp. 554-564. Vol. 27.
- [12] **A. Bessas, L. Benmoussa, K. Mohamed.** Dosage biochimique des composés phenoliques dans les dattes et le miel récoltés dans le sud algérien. Université Djillali Liabes sidi Bel Abbès. 2008. p. 81.
- [13] **A. Chehma, HF. Longo, A.Siboukeur.** Estimation du tonnage et valeurs alimentaire des sous produits du palmier dattier chez les ovins. *Recherche Agronomique*. 2000. pp. 7-15. Vol. 7.
- [14] **K. Bousdira.** Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleure gestion et une valorisation de la biomasse: caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région de Mزاب, c. classification et évaluation de la qualité, Thèse de magistère, Université de Boumerdes 2006. p. 186.
- [15] **Algérie presse service.** Une production de plus 10 millions de quintaux de dattes en 2017. [En ligne] 2018. [Citation : 22 03 2020.] <<http://www.aps.dz/economie/76955-une-production-de-plus-10-millions-de-quintaux-de-dattes-en-2017> >.
- [16] **G. Peyron.** Cultiver le palmier-dattier : Guide illustré de formation. Montpellier, France, 2000.
- [17] **S. RHOUMA, S. DAKHLAOUI-DKHIL, S. ALI OULD MOHAMED, S. ZEHDIA ZOUZI, A.RHOUMA, M.MARRAKCHI, T. Mok.** Genetic diversity and phylogenetic relationships in date-palms (*Phoenix dactylifera*L) as assessed by random amplified microsatellite polymorphism markers (RAMPOs). *Scientia horticultrae* 2008. Vol. 117, pp. 53-57.
- [18] **M.S. Abdel-Azim.** Development of Prototype Structure for Low-Cost and Energy-Efficient House by Utilizing Palm Tree Fronds. *Building and Environment* 1997. Vol. 32, pp. 375-380.

- [19] **P. Khristova, O. Kordsachia, T. Khider.** Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from sudan. *Bioresource Technology* 2005. Vol. 96, pp. 79-85.
- [20] **R. Khiari, M.F. Mhenni, M.N. Belgacem, E. Mauret.** Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – A comparison with other wood and non-wood fibre sources. *Bioresource Technology* 2010. Vol. 101, pp. 775-780.
- [21] **B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois.** Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and Buildings* 2011. Vol. 43, pp. 491-497.
- [22] **M. Chikhi, B. Agoudjil, A. boudenne, A. Gherabli.** Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings* 2013. Vol. 66, pp. 267-273.
- [23] **N. Benmansour.** Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat. Université Hadj Lakhdar de Batna, Algérie *Thèse de doctorat.* p. 2015.
- [24] **T. Anh Dung.** ETUDE DES TRANSFERTS HYGROTHERMIQUES DANS LE BETON DE CHANVRE ET LEURAPPLICATION AU BATIMENT. UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE *Thèse doctorat.* 2010 . p. 208.
- [25] **F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, C. Lanos.** Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings* 2013. Vol. 62, pp. 294-303.
- [26] **tradicall.** béton de chanvre doublage isolant. [En ligne] 2020. [Citation : 20 03 2020.] < <https://www.bcb-tradicall.com/le-beton-de-chanvre/beton-de-chanvre-doublage-isolant/>>.
- [27] **G. POLIDORI.** Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre pour le bâtiment. POLIDORI G, Etude et optimisation des performances énergétiques d'une enveloppe en béton de chanvre p UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DU NUMERIQUE ET DE L'INGENIEUR *Thèse doctorat.* 2018. p. 155.
- [28] **Chanvre habitat.** technique 01/matériau. [En ligne] 2016. [Citation : 23 03 2020.] < <http://chanvre-habitat.revolublog.com/technique-2-c28531274>>.

- [29] **P. Bouloc, S. Allegret, A. Laurent.** Le chanvre industriel: production et utilisations. Paris , France, 2006.
- [30] **A. Evrard.** Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials. Ecole polytechnique de Louvain. Thèse de doctorat. Belgique, 2008.
- [31] **RP2C.** Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre. 2007.
- [32] **C. Magniont.** Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro ressources. Université de Toulouse *Thèse doctorat.* 2010.
- [33] **VEGETAL(E).** Béton de chanvre. [En ligne] [Citation : 20 03 2020.] < http://www.vegetal-e.com/fr/beton-de-chanvre_295.html>.
- [34] **B. Boyeux, F. rollin.** Les filières franciliennes des matériaux et produits bio-sourcés pour la construction. arène Île-de-France paris, 2014. p. 71.
- [35] **contributeurs de wikipédia.** ouate de cellulose . *wikipédia l'encyclopédie libre.* [En ligne] 2020. [Citation : 24 03 2020.] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouate_de_cellulose#cite_note-7>.
- [36] **le bâtiment de cnidep.** Ouate de cellulose . [En ligne] 2014. [Citation : 2020 03 24.] < <http://www.batiment-cnidep.eu/fiches/ouate-de-cellulose>>.
- [37] **Futura maison.** ouate de cellulose . [En ligne] 2020. [Citation : 2020 03 24.] < <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-ouate-cellulose-10809/>>.
- [38] Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois). Etat des lieux économique du secteur et des filières Mise à jour 2017. p. 21.
- [39] 163ème TABLE RONDE NATIONALE TECHNIQUE ET JURIDIQUE. ANCIEN COUVENT DES RECOLLETS 148 rue du Faubourg Saint Martin 75010 PARIS, Vendredi 15 juin 2018. LES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS.
- [40] **les matériaux verts.** PANNEAU OUATE DE CELLULOSE. [En ligne] [Citation : 25 03 2020]<https://www.les-materiaux-verts.com/nos-materiaux/isolation->

naturelle/isolants-thermiques-ecologiques/ouate-de-cellulose/panneau-ouate-de-cellulose.html.

[41] **Sm bois.** Ouate de cellulose panneau 80 mm 1200x600. [En ligne] 2020. [Citation : 24 03 2020.] < <https://www.smbois.com/ouate-de-cellulose-panneau-80-mm-1200x600.html>>.

[42] **les matériaux verts.** OUATTITUDE OUATE DE CELLULOSE EN VRAC POUR L'ISOLATION DE COMBLES ET L'INSUFFLATION. [En ligne] [Citation : 25 03 2020.] <https://www.les-materiaux-verts.com/isocell-ouate-de-cellulose-en-vrac-pour-l-isolation-de-combles-et-l-insufflation.html>.

[43] **Contributeurs de wikipédia.** liège (matériau). *wikipédia l'encyclopédie libre*. [En ligne]2020. [Citation : 25 03 2020.] Contributeur< [https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge_\(mat%C3%A9riau\)#cite_note-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge_(mat%C3%A9riau)#cite_note-1) >.

[44] **Isoliège.** Le liège : Matériau Naturel. [En ligne] 2020. [Citation : 25 03 2020.] < <https://isoliege.eu/le-liege-materiau-naturel/> >.

[45] **Wikimedia commons contributors.** file : quercus suber aka cork oak.jpg. *Wikimedia commons*. [En ligne] 2020. [Citation : 25 03 2020.] < https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Quercus_suber_aka_cork_oak.jpg&oldid=355432732 >.

[46] **VEGETAL(E).** le liège dans la construction. [En ligne] 2020. [Citation : 25 03 2020.] http://www.vegetal-e.com/fr/le-liege-dans-la-construction_137.html.

[47] **Le département Haute-Loire.** guide_des_materiaux_isolants. *Le Puy-en-Velay*. [En ligne]2020. [Citation : 24 03 2020.] < http://www.cg43.fr/sites/cg43/IMG/pdf/guide_des_materiaux_isolants.pdf >.

[48] **P.Casalonga.** Journées Techniques du Liège Plan de La Tour. *Le Liège dans la construction Desserrons les freins !* 21 et 22 novembre 2013, p. 17.

[49] **Eugene dimitriu-valcea.** Isolation thermique des constructions en Algerie. Entreprise Nationale des Arts Graphiques Unité Ahmed zabana – Alger 1986.

- [50] **Matériaux biologique construction.** liège . [En ligne] 2015. [Citation : 25 03 2020.]<<http://www.materiauxbioconstruction.com/product-category/isolation/liege/>>.
- [51] **ARPE Normandie.** Fiche sur le materiau liège. [En ligne] 2019. [Citation : 25 03 2020.]ARPE Normandie< https://arpenormandie.org/wp-content/uploads/2020/01/20200123_WEBFiche-Type-Li%C3%A8ge_Globale.pdf >.
- [52] **Amorim wise.** liège. [En ligne] 2020. [Citation : 25 03 2020.] www.amorimflooring.com .
- [53] **J. Liboid.** Guide des unités de mesure : Un mémento pour l'étudiant. Boeck Université 1999. p. 59.
- [54] **M. Tlijani.** Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier. Thèse de doctorat, Université de Paris Est, 2016.
- [55] **B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos , M. Fois.** Caractérisation thermophysique du bois de palmier dattier en vue de son utilisation en isolation thermique dans l'habitat. 2011/05/24.
- [56] **T. Guettaf.** Modélisation du comportement mécanique des constituants du palmier dattier. Université Mohamed Khider Biskra *Thèse doctorat*. p. 108.
- [57] **F. Collet.** Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de Génie Civil à faibles impacts environnementaux. Thèse de doctorat de l'INSA de Rennes 2004.
- [58] **WUFI.** Wärme und Feuchte instationär . [En ligne] http://www.wufi.de/index_e.html.
- [59] **M. ASLI.** Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux bio-sourcés : Approches numérique et expérimentale. Université d'Artois *Thèse doctorat*. 2017. p. 217.
- [60] **U. Dhakal, U. Berardi, M. Gorgolewski, R. Richman.** Hygrothermal performance of 453 hempcrete for Ontario (Canada) buildings. 2017. Vol. 142.

- [61] **N. Sotehi.** Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation. Thèse doctorat, UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE 2010.
- [62] **M. R.DIB, A. AMARA.** Influence du mode de malaxage sur les propriétés du béton de liège. Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen *Diplome Master.* 2018. p. 90.
- [63] **A. Moreira, J. Antonio, A. Tadeu.** lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. *Cement and Concrete Composites* 2014. Vol. 49.
- [64] **A. Ziregue, M. Mouldi Khenfer, M. Quéneudec-t'Kint , N. Montrelay.** Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2016. pp. 934-946.
- [65] **H. Boussetoua, C. Maalouf, M. Lachi , A. Belhamri, T. Moussa.** Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering.* Taylor & Francis. DOI 2017.
- [66] **S.P. Silva, M.A. Sabino, E.M. Fernandes, V.M. Correlo, L.F. Boesel, R.L. Reis.** Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews* 2005. Vol. 50, pp. 345-365.
- [67] **A.M.A. intor, C.I.A. Ferreira, J.C. Pereira , P. Correia , S.P. Silva , V.J.P. Vilar , C.M.S. Botelho , R.A.R. Boaventura.** Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: A review. *Water Research* 2012. pp. 3152-3166. *Water Research.*
- [68] **L.J. Gibso, K.E. Easterling, M.F.Ashby.** The structure and mechanics of cork. *Proceeding of the Royal Society of London A* 377. 1981. pp. 99-117.
- [69] **H. Pereira.** Cork: biology, production and uses. Amsterdam, Elsevier Science 2007.
- [70] **Thiebleson, M. Marcelle.** Elaboration et caractérisation de matériaux issus de ressources locales recyclées ou biosourcées. UNIVERSITE DE RENNES 1 *Thèse doctorat.* 2018.

[71] GUIDE DES MATÉRIAUX ISOLANTS pour une isolation efficace et durable. *energivie.info*. [En ligne] centre de ressources *energivie.info*. [Citation : 30 avril 2020.] http://www.aldeau.com/ouvrages_libres/15.pdf.

[72] **G. Kalaprasad, P. Pradeep, G. Mathew, S. Pavithran and S. Thomas** (2000). Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres, *Composites Science and Technology*, 60, 2967-2977

[73] **T. Behzad, M. Sain**. 2007. Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. *Polymer Engineering & Science*, 47(7), 977- 983.

[74] **F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman and A.S. Lavine**. 2007. Fundamentals of heat and mass transfer. USA: John Wiley & Sons.

[75] **S.A Paul, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph, S. Thomas**. 2008. Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. *Composites Part A* 39:1582-1588.

[76] **B.HABA**. Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques. Université El-Hadj Lakhdar - BATNA 1. Thèse de Doctorat. 2017. p. 125.

[77] **RILEM**. Functional classification of lightweight concretes. *Materials and Structures*. 1978. pp. 281-282. Vol. 11.

[78] **V.Cerezo**. Propriété mécanique thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: Approche expérimentale et modélisation théorique. *Thèse de doctorat*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2005.

[79] **M.Aghahdi**. Etude expérimentale et modélisation physique des transferts couplés chaleur-humidité dans un isolant bio-sourcé. Université de Technologie Belfort-Montbéliard *Thèse de doctorat*. 2019.

[80] **B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin**. Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment* 2016. Vol. 96, pp. 206–216.

- [81] **N. Kellati, et al.** *Etude de propriétés thermophysiques et acoustiques*. Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc. 2007. pp. 241 – 244.
- [82] **A. LIMAM, et al.** Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings*. 2016. pp. 89–95.
- [83] **A.B. Cherki, et al.** *Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite*. *Construction and Building Materials*. 2014. pp. 202–209.
- [84] **S. Mounir, et al.** *Thermal properties of the composite material clay/granular cork*. *Construction and Building Materials*. 2014. pp. 183–190.
- [85] **A.D. Tranle.** Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment. Université de Reims Champagne Ardenne *Thèse de Doctorat*. 2010. p. 209.
- [86] **B. HABA.** Matériau composite renforcée par les fibres naturelles utilisées dans l'isolation thermique. Université saad dahlab blida *Diplome Master*. 2015. p. 70.
- [87] **F. Bennai.** Étude des mécanismes de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux poreux de construction en régime insaturé. Thèse de doctorat en cotutelle université de la rochelle/ université de bejaia. 2017.
- [88] **A. Zerizer.** Modélisation du transfert de chaleur à travers un panneau sandwich destiné à la construction: cas d'application par Comsol multiphysics. paris : Septième édition du Colloque FRancophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique, 23 - 24 - 25 avril 2014.
- [89] **A. LIMAM.** Élaboration et caractérisation d'un nouveau panneau composite isolant à base de Pin d'Alep et de liège. UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES *Thèse de doctorat*. 2017. p. 155.
- [90] **A. Gherfi, R. Belakroum, C. Maalouf, M. Lachi , A. Merabet.** Perméabilité à la vapeur d'eau d'un composite d'isolation biosourcé à base de fibre de palmier dattier. Constantine : Congrès Algérien de Mécanique (CAM 2017), December 2017.

- [91] **F. Collet, S. Pretot.** Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall. *Building and Environment* 2014. Vol. 82, pp. 459-466.
- [92] **S. NAFTI, O.E. HALEM.** Etude du comportementt hygrothermique de nouveaux composites à base de fibres de palmier dattier. OUARGLA, UNIVERSITE KASDI MERBAH 2018.
- [93] **A. Piot.** Hygrothermique du bâtiment: expérimentation sur une maison à ossature bois en condition climatiques réelles et modélisation numérique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon *Thèse doctorat.* 2009.
- [94] **C. MAALOUF, et al.** Study of th hygric behaviour and moisture buffering performance of a hemp-starch composite panel for buildings. *BioResources*, 2014.
- [95] **J. CHAMOIN.** Optimisation des pripiétés (Physiques, hyriques et mécaniques) de béton de chanvre par la maitrise de la formulation. Thèse de l'INSA de Rennes 2013.
- [96] **R. WALKER, S. PAVIA.** *Construction and Building Materials.* 2014. Vol. 64, pp. 270–276.
- [97] **DS Isolation.** Le confort au naturel. LA OUATE DE CELLULOSE. [En ligne] [Citation : 9 Mai 2020.] <http://www.ds-isolation.fr/fr/article/la-ouate-de-cellulose>.
- [98] **A. KABORE.** Modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment avec le matériau chanvre. MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE de quebec pour l'obtention de la MAÏTRISE en ÉNERGIE RENOUVELABLE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE.
- [99] **Department of Civil Engineering.** Technical University of Denmark. *Moisture Buffering of Building Materials* 2005.
- [100] **R. BELAKROUM, A. GHERFI, C. MALOUF, N. EL WAKIL, H. MAI T, M. LACHI, M. KADJA.** Etudes des propriétés d'absorption hydrique et acoustique d'un nouveau matériau d'isolation bio-sourcé. Constantine, Algeria : 2ème conférence internationale sur l'Energétique et la pollution "CIEP'14, December 2014.

- [101] **D. SAMRI.** « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique ». *Thèse de doctorat*. INSA de Lyon, spécialité : Génie Civil , octobre 2008.
- [102] **F. COLLET, S. PRETOT, C. LANOS.** Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques. Cachan : 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S, 29 au 31 mai 2013.
- [103] **A.D. TRAN LE, C. MAALOUF, T.H. MAI, E. WURTZ, F. COLLET.** Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Buildings* 42. pp : 1797–1806.
- [104] **A. EVRARD, A. DE HERDE.** Hygrothermal performance of limehemp. Online first (novembre 26, 2009) : *Journal of building physics*, July 2010. Vol. 34, 15-25.
- [105] **M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre.** Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings* 2015. Vol. 88, pp. 91-99.
- [106] **M. Chadi, M. Tala , B. Hocine.** " Etude expérimentale et numérique d'un composite à base de ciment-liège", Conférence IBPSA France – Marne-la-Vallée – 2016.
- [107] **C. Rode.** Report BYG·DTU R-126. *Moisture buffering of Building Materials*. ISBN 87-7877-195, 2005.
- [108] **Espace INFO ENERGIE.** GUIDE DES MATERIAUX ISOLANTS. *C.A.U.E. de la Haute-Loire*.

CHAPITRE III

Description du logiciel TRNSYS

III.1 Introduction

La simulation est utilisée dans divers domaines de recherche pour analyser le comportement du système et améliorer son fonctionnement avant sa mise en œuvre. Un modèle numérique simulé n'est pas une représentation exacte de la réalité physique, mais il est seulement apte à restituer les caractéristiques les plus importantes du système analysé.

La simulation thermique dynamique permet de faire « vivre virtuellement » le bâtiment sur une longue période, afin d'étudier son comportement prévisionnel pour des résultats proches de la réalité. Son objectif est de reproduire les conditions physiques réelles en utilisant des modèles mathématiques pouvant représenter tous les flux d'énergie ainsi que leurs interactions.

Plusieurs logiciels existent sur le marché pour faciliter aux chercheurs et aux professionnels de traiter les questions de l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires ainsi que celle des équipements connexes. Ils sont devenus des outils incontournables pour analyser les performances énergétiques, à des fins comme la maîtrise des consommations d'énergie, la réduction d'impact environnemental et surtout le confort thermique.

Nous avons choisi l'utilisation de TRNSYS (Transient System Simulation Tool), devenu aujourd'hui la référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes où plusieurs auteurs ont réalisé des comparaisons entre ces différents logiciels de simulation thermique dynamique des systèmes et ont souvent confirmé la performance de TRNSYS [1-6].

III.2 Description du logiciel

TRNSYS a été créé dans les années 70 à l'université du Wisconsin à Madison (Ph.D. de Sanford A. Klein) et développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) dans le cadre de collaborations internationale.

Le logiciel TRNSYS est un environnement complet et extensible qui permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (systèmes de chauffage, climatisation) pour mener une étude mono ou multizone détaillée de son comportement thermique. Elle permet également d'intégrer les variables d'emplacement, de matériaux de construction, d'architecture globale, de concept énergétique choisi, y compris les plus complexes tels que les systèmes solaires innovants.

Des composants utilitaires permettent de coupler la simulation avec les conditions météorologiques, des plans d'occupation, d'utilisation de différentes formes d'énergie, et de générer les fichiers de résultats souhaités. Il permet également la visualisation à un pas de temps défini par l'utilisateur de la consommation d'énergie en termes de chauffage, de refroidissement etc, ainsi que la production annuelle d'énergie des équipements solaires et/ou thermiques pour un bâtiment donné (chauffe-eau solaire, panneau photovoltaïque, etc)

La conception modulaire et ouverte de TRNSYS, basée sur une définition d'une interface logicielle rigoureuse permet l'intégration de nouveaux composants dans cette structure d'accueil.

III.2.1 Fonctionnement

Le fonctionnement du logiciel est basé sur l'assemblage de modules élémentaires appelés TYPES, modélisant des composants du système, des parties de ces composants, des éléments extérieurs, ou des fonctions de calcul ou de traitement des données. Une vaste bibliothèque regroupant un grand nombre de fonctions est fournie avec le logiciel (capteur solaire, réservoir d'eau, échangeur de chaleur ou encore système de régulation).

Pour simuler un système, l'utilisateur choisit les TYPES décrivant les éléments de ce système qui seront insérés dans le fichier de simulation DECK de TRNSYS (Simulation Studio) puis les connecte entre eux et définit leurs interactions. Chaque TYPE est un sous programme possédant des paramètres (fixes durant la simulation), des entrées (inputs) et des sorties (outputs). Ainsi, la sortie d'un TYPE pourra être l'entrée d'un autre TYPE. Les informations pouvant être échangées entre les TYPES sont très diverses (ex: température, débit, taux d'échange de chaleur, signal de régulation, etc.).

L'utilisateur renseigne les paramètres des types pour décrire le comportement du système. En raison des interconnexions, il existe souvent des bouclages entre modules. Dans ce cas, le logiciel effectue l'ensemble des calculs de manière itérative, jusqu'à obtenir la convergence. Celle-ci a lieu lorsque la variation sur les entrées entre deux itérations consécutives est inférieure à la tolérance choisie.

Pratiquement le programme nécessite pour son fonctionnement la création de deux sous programmes :

1. Un fichier.BUI, à partir du sous programme TRNBuild, qui contient en fait la partie description géométrique et constructive du bâtiment (propriétés des matériaux, épaisseurs, hauteurs..). Celui-ci est partagé en zones thermiques.
2. Un fichier.tpf, à partir du sous programme Simulation Studio. Ce fichier est en fait le panneau d'assemblage des différents composants du bâtiment.. Dans ce programme il est possible, d'introduire par les types les données météorologiques du site, les orientations, le descriptif du bâtiment ... etc, comme il est possible de créer un nouveau composant (type)

A partir de ces deux fichiers, nous arrivons à mettre les résultats de la simulation en forme graphique et numérique.

III.2.2 Les différentes interfaces de TRNSYS

III.2.2.1 TRNBuild

Pour la description d'un bâtiment on utilise l'interface TRNBuild anciennement Prebid (figure III.1) pour créer et modifier toutes les informations non géométriques requises par le modèle de construction TRNSYS et saisir les données d'entrée pour les bâtiments multizones. Il permet de spécifier tous les détails de la structure du bâtiment, ainsi que tout ce qui est nécessaire pour simuler son comportement thermique, il offre à l'utilisateur plusieurs avantages : une grande flexibilité dans la modification des propriétés des matériaux des murs et des couches, la création de profils de ventilation et d'infiltration, l'ajout de gains, la définition de plafonds et de planchers rayonnants et le positionnement des occupants pour les calculs de confort.

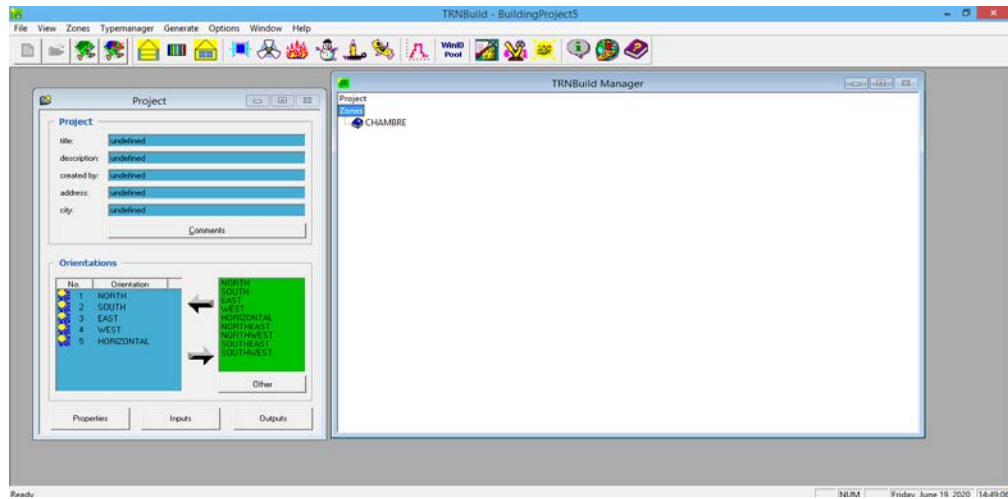


Figure III.1. L'interface TRNBuild.

III.2.2.1.1 Fenêtre d'initiation du projet et la fenêtre d'orientation

Dans la fenêtre d'initialisation du projet, on commence d'abord à faire rentrer les informations générales sur le projet (le volume thermique à étudier), définir les orientations des différentes surfaces de l'enveloppe du bâtiment décrit (Nord, Sud, Est, Ouest et horizontal) et les orientations qui seront masquées par des masques lointains (maisons voisines) et les masques proches (casquettes ...). On définit également certaines propriétés des matériaux (densité, capacité, la chaleur de vaporisation de l'air...). Les inputs et outputs doivent être également définis.

III.2.2.1.2 La fenêtre de zones

La fenêtre ZONE contient toutes les informations décrivant une zone thermique du bâtiment comme indiqué dans la figure III.2.

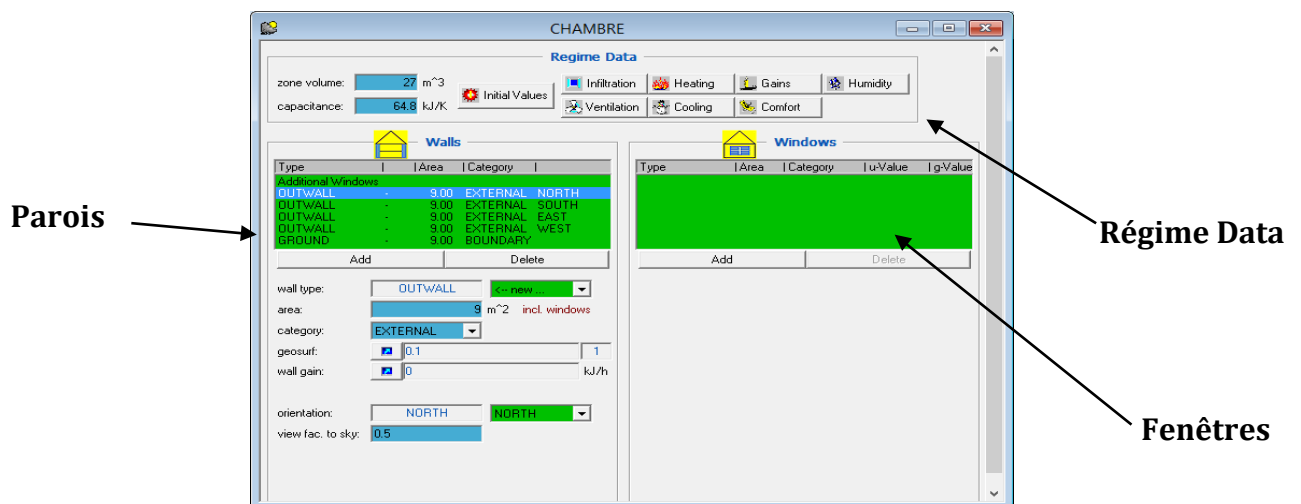


Figure III.2. La fenêtre de ZONE.

a-Définir les parois

Pour définir un nouveau mûr, deux possibilité s'offre a nous: on peut soit définir une paroi déjà existante dans la bibliothèque des parois, ou bien la définir grâce à la bibliothèque des matériaux dans une nouvelle fenêtre qui nous permet de décrire les différents matériaux constitutifs de la paroi.

b-Définir les fenêtres

Les fenêtres peuvent être définies pour des murs externes, adjacents ou comme fenêtre supplémentaire sans mur.

La partie droite de la fenêtre ZONE permet à l'utilisateur de modifier, supprimer ou ajouter des fenêtres en sélectionnant un mur sur lequel la fenêtre est localisée

c-Régime Data

➤ Infiltration

Un flux d'air dans la zone peut être indiqué par le menu INFILTRATION, ce paramètre est désactivé par défaut et sa spécification est facultative.

Après avoir cliqué sur le bouton INFILTRATION dans la fenêtre ZONE, une boîte de dialogue s'ouvre et l'utilisateur peut l'activer et définir un type d'infiltration pour la zone en sélectionnant un type précédemment défini ou un nouveau type dans le menu déroulant.

➤ Ventilation

Un flux d'air, par exemple, des équipements de chauffage ou de refroidissement dans la zone peut être spécifié par VENTILATION et sa spécification est facultative.

➤ Heating (Chauffage)

Le besoin de chauffage de toute zone soumise à un contrôle de chauffage idéalisé peut être déterminé en spécifiant un type de chauffage, ce paramètre est désactivé par défaut.

La procédure de définition d'une commande de chauffage est similaire à la commande de refroidissement en cliquant sur le bouton CHAUFFAGE dans la fenêtre ZONE, une boîte de dialogue s'ouvre, celle-ci permet a l'utilisateur d'activer la commande et spécifier le type de chauffage dans la zone en sélectionnant un type prédéfini ou un nouveau type dans la liste déroulante.

Si l'équipement de chauffage est conçu en dehors du modèle TYPE 56 (type indépendant), le chauffage ne doit pas être défini à ce niveau.

III.2.2.2 TRNEdit

TRNSYS 16 possède plus de 1000 fichiers météo, générés avec METEONORM.

Le logiciel Météonorm permet de disposer pour TRNSYS, des données climatiques fiables chaque heure et durant une année. Si on ne dispose pas d'une station météorologique, METENORM peut calculer par interpolation entre différentes stations disponibles sur des rayons allant de 50 à 200 km les conditions climatiques d'un lieu quelconque.

Trois fichiers météorologiques Algériens sont disponibles dans la bibliothèque de TRNsys : Dar ElBaidha (Alger), Bechar et Tamanrasset.

TRNEdit est un éditeur spécialisé qui peut être utilisé pour créer ou modifier des fichiers d'entrée (decks) TRNSYS. D'un autre côté, TRNEdit peut être utilisé pour créer des applications redistribuables (appelées Applications TRNSED). Ces exécutables peuvent être librement distribués aux utilisateurs finaux qui n'ont pas de licence TRNSYS pour les équiper.

III.2.2.3 TRNSYS Studio

Simulation Studio (figure III.3) qui est l'interface de calcul permet de modéliser l'environnement du bâtiment (climat, apports solaires, autres données d'entrée) et d'obtenir les résultats de simulation. Il génère un fichier « ****.tpf* »

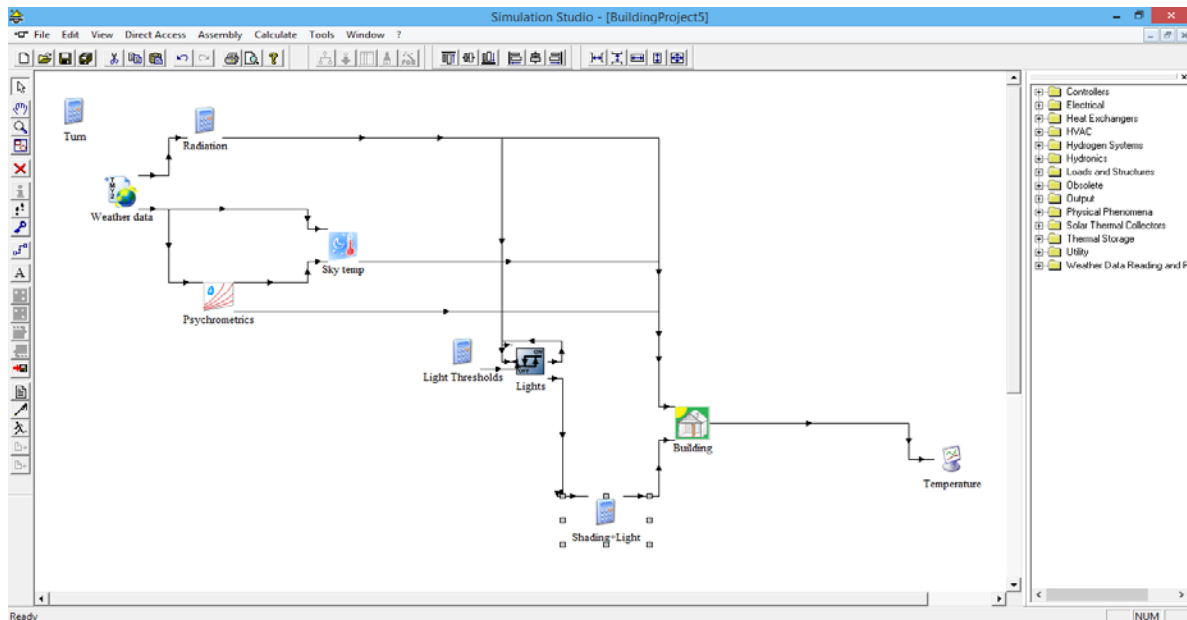


Figure III.3. Interface graphique du TRNSYS Studio.

III.3 Les différents TYPES utilisés

➤ TYPE 56 (multizone building)

TRNSYS permet de modéliser le comportement thermique d'un bâtiment multizone à travers le type 56 inclus dans sa bibliothèque. Le programme TRNBuild qui est l'interface graphique du Type 56 génère un fichier de type (*.bui) contenant la description du bâtiment. Il requiert en entrée la description physique du bâtiment ainsi que les gains internes et les débits d'échange d'air et détermine en sortie un grand nombre de variables dont la température d'air et opérative, l'humidité relative, les quantités de chaleur sensibles et latentes. Ce fichier est indispensable afin de pouvoir travailler sur l'interface graphique TRNStudio. On le trouve dans direct access/Cstb/Traduction/batiment multi-zone, puis choisir sans ou avec fichier de sortie (type56a ou type56b).

➤ Type 109 (données climatiques)

Ce type intègre plusieurs fonctions en un seul composant :

1. Lecteur de données météo à intervalles réguliers, à partir d'un fichier de données on le trouve dans direct access/Weather Data Reading and processing puis choisir

le type 109 souhaité. Les fichiers météorologique de certains villes d'Algérie ce trouve dans le type 109TMY2.

2. Conversion des unités afin de les adapter aux composants standards.
3. Calculs de rayonnement solaire sur des surfaces inclinées.

Ce format de fichier est utilisé par le National Solar Radiation Data Base (USA), ainsi que par la base de données Meteonorm (fichiers fournis en standard dans le répertoire weather).

➤ **Type 33 (Psychrométrie)**

Ce composant est utilisé pour calculer différentes propriétés de l'air humide. Il prend en entrée : la température sèche et une autre propriété, selon le mode : température humide, humidité relative, température de point de rosée, taux d'humidité, ou enthalpie; ou le taux d'humidité et l'enthalpie. Il appelle le sous-programme 'Psychrometrics' pour calculer le taux d'humidité, la température humide, l'enthalpie, la densité de mélange air-eau, densité de l'air sec uniquement, humidité relative (en pourcentage), température sèche du bulbe et température du point de rosée.

➤ **Type 69 (Température effective du ciel)**

Une température effective du ciel est utilisée pour calculer l'échange de rayonnement de grande longueur d'onde depuis les surfaces externes vers l'atmosphère. Pour ce calcul, le ciel est supposé être une surface noire idéale. L'émissivité réelle du ciel clair et nuageux doit être connue. Ainsi, la température effective du ciel est fonction de la température ambiante, de l'humidité de l'air, du facteur de nébulosité du ciel et de la pression atmosphérique locale.

➤ **Type 77 (Température de sol)**

Ce composant modélise la distribution verticale des températures du sol compte tenu de la température moyenne de surface du sol pour l'année qui est typiquement la moyenne annuelle de la température de l'air au lieu.

La température du sol non perturbé est fonction de la période de l'année et de la profondeur sous la surface. Si ce composant n'est pas utilisé on prend la température du sol constante.

➤ **Type 65 (Traceur en ligne)**

Ce composant graphique est utilisé pour afficher les variables sélectionnées à des intervalles de temps spécifiés pendant la progression de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations variables précieuses et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas correctement. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Ainsi, un fichier contenant les variables sélectionnées est créé au cours de la simulation.

➤ **Type 28**

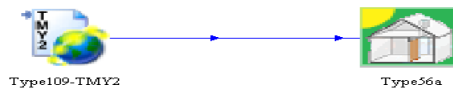
Sert à stocker les résultats dans des fichiers bien précis en intégrant ses entrées pendant un intervalle de temps choisi.

III.4 Les liaisons entre les types

Pour compléter la simulation, on fait une liaison entre les différents types, cela de faire relier une sortie (output) d'un TYPE à une entrée (input) d'un autre TYPE.

- **Exemple de liaisons**

Type 109 - Type 56

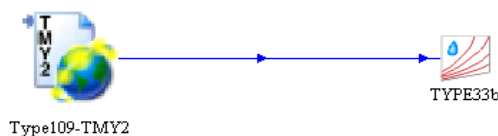


(Outputs type109)

(Input type56)

Dry bulb temperature	—————>	ambient temperature
Relative humidity	—————>	Relative ambient humidity

Type 109 - Type 33



(Outputs type109)

(Input type33)

Dry bulb temperature	—————>	Dry bulb temperature
Relative humidity	—————>	Relative humidity

Type 69 – Type 56**(Outputs type69)****(Input type56)**

Fictive sky temperature → Fictive sky temperature

III.5 Avantages du logiciel

TRNSYS est la référence mondiale dans le domaine de la simulation dynamique des bâtiments et des systèmes qui permet aux bureaux d'études et aux fabricants de réduire le temps et le coût des études tout en prenant en compte les phénomènes physiques dynamiques pour la réalisation des bâtiments économes en énergie.

Les avantages qu'offre le logiciel TRNSYS sont très nombreux. En effet, en utilisant l'utilitaire TRNBuild la définition du bâtiment est devenue de plus en plus facile et permet de faire changer les différents paramètres très facilement. D'autre part,

TRNSYS se trouve à être un logiciel modulaire extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité avec la possibilité de simuler des nouveaux composants des systèmes et une variété de concepts énergétiques. TRNSYS fournit une documentation des sous-programmes, y compris des explications, des usages usuels, des équations de base, et permet également une définition très flexible de la période de simulation avec un choix de pas de temps du début à la fin de la simulation.

TRNSYS ne se contente pas d'étudier le comportement thermique du bâtiment, il permet également de résoudre de nombreux systèmes d'équations, réalise des simulations dynamiques et permet la possibilité de créer de nouveaux modèles et de les intégrer à la bibliothèque existante. Nombreux avantages y sont associés : résolution multizone, couplage de systèmes, possibilité d'utiliser des ressources externes comme Excel pour y associer des programmes réalisés sous VBA, EES ou encore Matlab ce qui laisse la possibilité d'amélioration du modèle en y incluant différents phénomènes thermo-aérauliques et en y incluant aussi un modèle simulant les systèmes de chauffage, climatisation, ventilation et réfrigération. De multiples données peuvent également être

prises en compte, comme par exemple la consommation d'ECS, le temps d'occupation des résidents, la consommation d'énergie électrique EDF et de gaz GDF et de leurs tarifs associés.

III.6 Inconvénients du logiciel

Mais TRNSYS comporte aussi quelques désavantages à tenir en compte lors des hypothèses et interprétations des résultats. Ce dernier ne dispose pas de valeurs ou de systèmes par défaut, donc l'utilisateur doit introduire l'ensemble des données définissant les systèmes du bâtiment. Le logiciel procède à la simplification du gradient d'échange de chaleur par une approche standard de la température ce qui engendre de petites erreurs de calcul et il ne dispose pas d'une vérification d'erreurs dans les surfaces et volumes ce qui oblige l'utilisateur de les vérifier manuellement.

Il est difficile de profiter réellement du dessin de l'architecte car le zonage est propre à la simulation et on remarque aussi que parfois le dessin est plus long que la saisie numérique, quand à la forme des zones dessinées, la concavité peut entraîner des problèmes donc ils doivent avoir une forme convexe (figure III.4). Dans la saisie graphique, les parois internes sont impossibles avec Trnsys3D: elles sont à rajouter dans TRNBUILD mais on perd les avantages de la saisie 3D (lors du passage du « mode 3D » en « mode mixte » TRNBUILD ne peut plus calculer la répartition du rayonnement à l'intérieur)

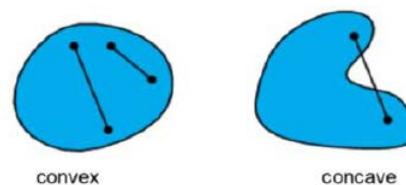


Figure III.4. forme convexe et concave.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la présentation ainsi qu'à la justification du choix de l'outil de simulation TRNSYS. Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, TRNsys est l'un des outils les plus puissants utilisées qui permet de réaliser des études d'évaluation du comportement thermique dynamique des systèmes énergétiques, il est formé de

plusieurs sous-programmes qui obéissent à différentes règles mathématiques, il contient également plusieurs interfaces et plusieurs types qui lui permettent de prévoir la quantité d'énergie qu'il faut pour avoir un bon confort d'hiver et d'été à l'intérieur de la maison.

Références bibliographiques :

- [1] **W.A.Beckman, L.Broman, A.Fiksel, S.A.Klein, E.Lindberg, M.Schuler and J.Thornton** (1994). TRNSYS The Most Complete Solar Energy System Modeling and Simulation Software. Renewable Energy, doi:10.1016/0960-1481(94)90420-0.
- [2] **C.Buratti, E.Moretti, E.Belloni and F.Cotana** (2013). "Unsteady Simulation of Energy Performance and Thermal Comfort in Non-Residential Buildings". Building and Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.015.
- [3] **M.Asim, J.Dewsbury and S.Kanan** (2016). "TRNSYS Simulation of a Solar Cooling System for the Hot Climate of Pakistan". Energy Procedia, doi:10.1016/j.egypro.2016.06.233.
- [4] **M.Khabbaz, B.Benhamou, K.Limam, P.Hollmuller, H.Hamdi, and A.Bennouna** (2016). "Experimental and Numerical Study of an Earth-to-Air Heat Exchanger for Air Cooling in a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate". Energy and Buildings, doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.071.
- [5] **S.Issam, A.Brakez and B.Benhamou** (2017-a). Analysis for Thermal Behavior and Energy Savings of a Semi-Detached House with Different Insulation Strategies in Hot Semi Arid Climate. Journal of Green Building,12:72-106.
- [6] **TRNSYS** – a Transient simulation program, version 16. University of Wisconsin, Madison: Solar Energy Laboratory; 2006.

CHAPITRE IV

Etude des Performances Énergétiques et Thermiques de Quelques Matériaux Bio-Sourcés

IV.1 Introduction

L'étude du comportement thermique des constructions, pour la prédiction de la performance énergétique et hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment, fait partie des étapes nécessaires lors de la conception. Des outils de calcul ou de simulation ont été développés dans ce sens.

Ces outils ont pour rôle d'aider les chercheurs et les concepteurs à bien comprendre le comportement des composants du bâtiment face au climat extérieur qui varie d'année en année.

Aujourd'hui, il existe des outils puissants qui permettent de simuler des bâtiments de très grande taille s'étendant même jusqu'à l'échelle du quartier. De nombreux couplages sont également possibles entre outils pour prendre en compte la multitude de phénomènes physiques impliqués dans le domaine du bâtiment (thermique, aéraulique, éclairage, acoustique, hygrométrie, modèles comportementaux, métabolisme).

Cela permet de faire des réflexions intéressantes sur les interactions entre le climat et la construction afin de maîtriser les besoins énergétiques et d'améliorer l'environnement interne des habitations [1].

Dans ce chapitre, en utilisant le logiciel TRNSYS, on simule le comportement hygrothermique d'un local monozone en utilisant des matériaux différents pour son enveloppe.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont : le béton de palmier dattier, le béton de chanvre et la brique de terre creuse. L'objectif est d'évaluer l'intérêt de l'utilisation des matériaux à base végétale pour l'amélioration des performances des bâtiments.

Les simulations ont été réalisées en utilisant les données climatiques de la ville de Bechar dont le fichier est disponible dans la bibliothèque de TRNSYS.

IV.2 Présentation et description du bâtiment simulé

IV.2.1 Géométrie du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié est un local construit sur sol avec quatre façades, il se compose d'une seule pièce de 24m² de surface et 72 m³ de volume. La hauteur de la cellule est de 3m avec une fenêtre à simple vitrage dans la façade sud et une porte dans la façade nord (figures IV.1 et IV.2). Le plafond et les parois verticales de ce local sont en contact avec l'ambiance extérieure tandis que le plancher est en contact avec le sol.

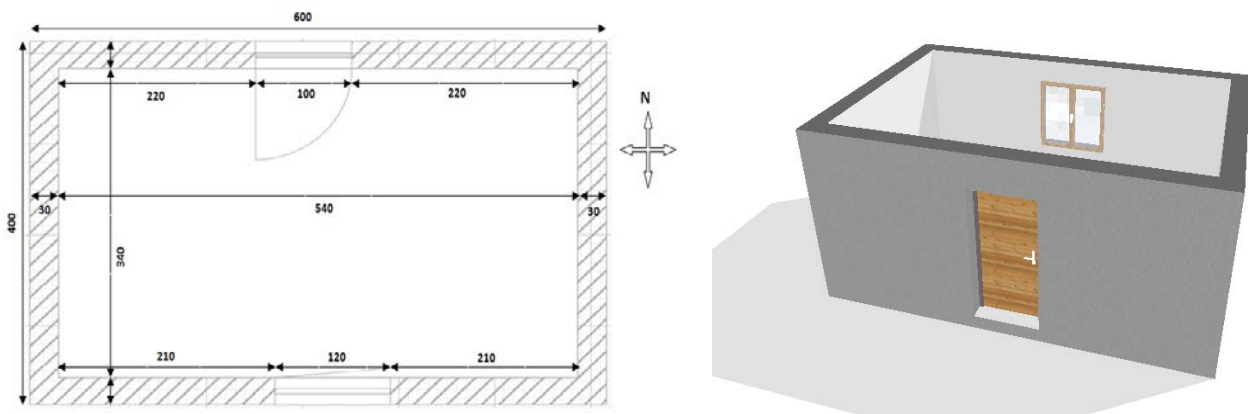


Figure IV.1. Vue en plan de la construction. **Figure IV.2.** Vue 3D de la construction modélisée.

IV.2.2 Constituants des parois de l'enveloppe du bâtiment simulé

Les enveloppes choisies dans cette étude sont le béton de chanvre, le plus documenté au niveau des bétons végétaux, et le béton de palmier dattier, un matériau prometteur très disponible dans la région d'étude. La composition utilisée pour les parois en matériaux biosourcés a été inspirée de la littérature [2, 3].

Pour l'enveloppe en double-briques, la composition est celle habituellement utilisée dans la construction-type algérienne.

- Cellule en double brique

Les parois verticales du bâtiment sont constituées de murs en doubles briques séparées par une lame d'air (parois largement utilisées en construction courante). Les parois horizontales sont une dalle pleine pour le plancher bas et en corps creux pour le plafond. La constitution détaillée, des différentes parois de l'enveloppe du bâtiment ainsi que les propriétés thermo-physiques des différents matériaux, ont été tirés du DTR C3-2 [4] et résumées dans le tableau (IV-1).

Tableau IV.1. Constitution et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en double briques.

parois	constituants	Caractéristique thermo-physique			
		Conductivité thermique λ (kJ/hmk)	Masse volumique (densité) ρ (kg/m ³)	Capacité thermique C_p (kJ/kgk)	Epaisseur e (cm)
Murs extérieurs	Enduit de plâtre	1,26	900	0.936	02
	Brique perforée	2.016	900	0.936	10
	Lame d'air	0.33	1	1.23	05
	Brique perforée	2.016	900	0.936	15
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
Plancher haut	Enduit de plâtre	1.26	900	0.936	02
	Plancher à corps creux	5.22	1450	1.08	20
	Enduit extérieur	4.152	1700	1	02
Plancher bas	Carrelage granito	7.56	2200	0.936	02
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
	Béton plein	6.3	2500	1.08	10
	Sable gravillon	4.32	1800	0.792	05

- Cellule en béton de chanvre

Les murs extérieurs de cette cellule sont constitués principalement d'une paroi en béton de chanvre de 30cm d'épaisseur. Quant aux parois horizontales, il s'agit d'une dalle pleine de 10 cm d'épaisseur pour le plancher sur sol et une dalle en béton de chanvre de 10 cm pour le plancher haut [2].

La constitution détaillée, des différentes parois de l'enveloppe du bâtiment ainsi que les propriétés thermo-physiques des différents matériaux partant de l'intérieur vers l'extérieur, ont été résumées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Constitutions et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en béton de chanvre.

parois	constituants	Caractéristique thermo-physique			
		Conductivité thermique λ (kJ/hmk)	Masse volumique (densité) ρ (kg/m ³)	Capacité thermique C_p (kJ/kgk)	Epaisseur e (cm)
Murs extérieurs	Enduit chanvre-chaux	0.72	805	0.810	03
	Béton de chanvre	0.381	413	1	30
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
Plancher haut	Enduit chanvre-chaux	0.72	805	0.810	03
	Béton plein	6.3	2500	1.08	10
	Béton de chanvre	0.381	413	1	10
	Enduit extérieur	4.152	1700	1	02
Plancher bas	Carrelage granito	7.56	2200	0.936	02
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
	Béton plein	6.3	2500	1.08	10
	Sable gravillon	4.32	1800	0.792	05

- Cellule béton palmier dattier

Tout comme les murs extérieurs de la cellule en béton de chanvre, ceux de la cellule en palmier dattier se compose essentiellement d'une paroi en béton de palmier dattier de 30cm d'épaisseur entre deux enduis intérieur et extérieur. Quant aux parois horizontales, elles sont formées d'une dalle pleine en béton de 10 cm sur sol et d'une dalle en béton de palmier dattier de 10 cm pour le plancher haut.

La constitution détaillée, des différentes parois de l'enveloppe du bâtiment ainsi que les propriétés thermo-physiques des différents matériaux partant de l'intérieur vers l'extérieur, ont été résumées dans le tableau IV.3 [3].

Tableau IV.3. Constitutions et caractéristiques thermo-physiques des parois du bâtiment en béton palmier dattier.

parois	constituants	Caractéristique thermo-physique			
		Conductivité thermique λ (kJ/hmk)	Masse volumique (densité) ρ (kg/m)	Capacité thermique C_p (kJ/kgk)	Epaisseur e (cm)
Murs extérieurs	Gypse/FBPD (10%)	0.576	753	1.3	03
	Béton de palmier dattier	0.666	954	1.5	30
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
Plancher haut	Gypse/FBPD (10%)	0.576	753	1.3	03
	Béton plein	6.3	2500	1.08	10
	Béton palmier dattier	0.666	954	1.5	10
	Enduit extérieur	4.152	1700	1	02
Plancher bas	Carrelage granito	7.56	2200	0.936	02
	Mortier de ciment	5.04	2200	1.08	02
	Béton plein	6.3	2500	1.08	10
	Sable gravillon	4.32	1800	0.792	05

IV.3 Déroulement de la simulation

Le déroulement de la simulation avec le logiciel TRNSYS.16 s'effectue selon deux étapes importantes dont les captures sont présentées en annexe 1.

1. La première étape concerne la définition détaillée du bâtiment dans l'interface TRNBUILD en prenant en compte l'épaisseur, la conductivité, la capacité thermique du matériau et l'orientation. Les gains, les infiltrations, éventuellement le chauffage ou la climatisation.... sont introduits à ce niveau. Les résultats désirés doivent aussi être précisés à cette étape.

Dans notre cas :

- Aucun système de chauffage ni climatisation n'est défini,
- Les apports internes dus aux occupants sont de 150 watts (ISO 7730) pour une activité légère, et sont de 5 W/m² pour les gains dus à l'éclairage artificiel,
- Le taux d'infiltration a été fixé à 0.5 ACH.

Le fichier de données concernant le bâtiment est alors enregistré sous format *****.bui**

La deuxième étape consiste à coupler le bâtiment avec son environnement au sein de Simulation Studio.

2. Simulation Studio est le logiciel de calcul de TRNSYS. Il fait appel aux différents composants (ou modèles ou TYPES) nécessaires à la modélisation et les connectés entres eux.

On crée d'abord l'environnement du bâtiment en faisant appel à :

- Type 109 : Lecteur des données météorologiques du site choisi,
- Type 33: Module psychrométrique, permet de déterminer les conditions d'humidité,
- Type 69 : Module qui permet le calcul de la température fictive du ciel,
- Type 77 : Modélise la distribution verticale de la température du sol.
- Type 56 : Module qui permet de lire le fichier de données concernant le bâtiment modélisé,
- Type 28 : Extraction des résultats des simulations.

Il est recommandé d'effectuer la simulation sur 9504 heures soit 13 mois et d'exploiter les 12 derniers pour éliminer l'impact des conditions initiales définies lors du 1^{er} mois de simulation.

La figure IV.3 montre l'interface graphique qui permet de visualiser les interactions entre les différents composants dans TRNSYS STUDIO après la description du bâtiment dans TRNBuild (TYPE 56).

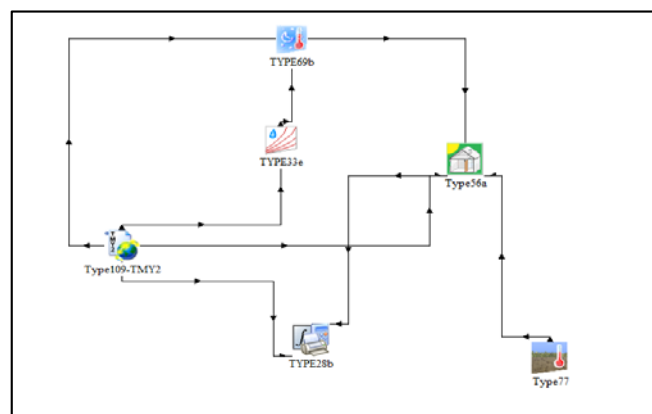


Figure IV. 3. Représentation sous Simulation STUDIO des interactions entre les différents composants.

IV.4 Résultats et discussions

Pour évaluer les performances énergétiques et hygrothermiques des différentes enveloppes, nous nous sommes intéressés aux indicateurs suivants :

- ❖ L'évolution libre des températures à l'intérieur des locaux;
- ❖ L'évolution libre des humidités relatives;
- ❖ l'évaluation des indices de confort définis par la norme ISO 7730, PMV (pourcentage de vote moyen) et PPD (pourcentage de personnes insatisfaites);
- ❖ l'évaluation des besoins de chauffage et de climatisation.

IV.4.1 Analyse des températures intérieures

L'évolution mensuelle des températures, représentée par la figure IV.4, montre que durant les mois les plus froids (décembre-février) le béton de chanvre enregistre les températures les plus élevées. Il est suivi de très près par le béton de palmier dattier et enfin la double-brique. Pour les mois les plus chauds (juin-août), les températures les plus basses sont aussi obtenues avec le béton de chanvre et le palmier dattier, ce qui laisse dire que les matériaux à base végétale offrent un meilleur confort que les matériaux classiques.

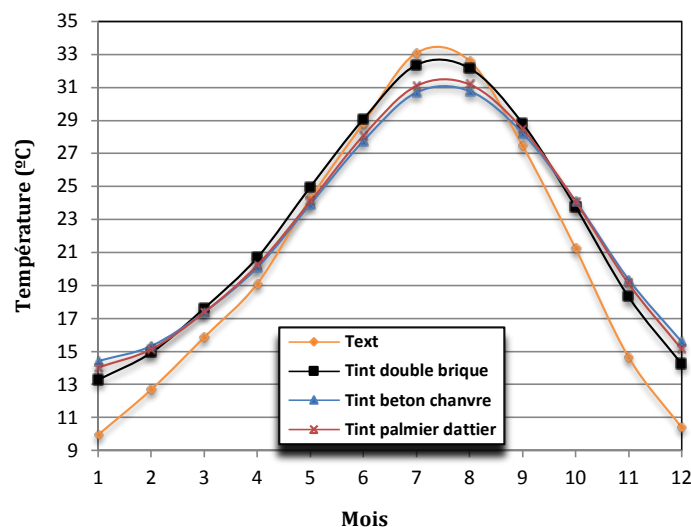


Figure IV. 4. Evolution de la température intérieure moyenne mensuelle dans les différents bâtiments. Climat Bechar.

Les températures intérieures ont été simulées pour les deux mois les plus défavorables : janvier (le plus froid) et juillet (le plus chaud). Les résultats, présentés dans le graphe IV.5, montrent une différence maximale de température entre l'intérieur et l'extérieur durant le mois de janvier de 8.44°C pour le bâtiment en béton de chanvre, 8°C pour le bâtiment en béton palmier dattier et seulement 6.64°C pour le bâtiment en double briques. Les résultats sont similaires pour le mois de juillet avec 7.6, 7.27 et 6.71°C respectivement de différences maximales.

Concernant les amplitudes maximales des températures à l'intérieur de chaque local, durant le mois de janvier on note 3.38°C pour le béton de chanvre, 3.16°C pour le palmier dattier contre 5.08°C pour la double-brique. Elles sont respectivement de 3.12, 3.17 et 4.33°C durant le mois de juillet. On constate clairement que les cellules en béton de chanvre et palmier dattier sont les moins froides car elles permettent le maintien des températures internes grâce à leur potentiel de stockage thermique qui leur permet d'emmagasiner de la chaleur quand le soleil est là et de maintenir la température stable. Lorsque la température extérieure diminue, la chaleur emmagasinée est restituée à l'ambiance intérieure contrairement à la construction en double brique qui suit harmonieusement les fluctuations de la température extérieure.

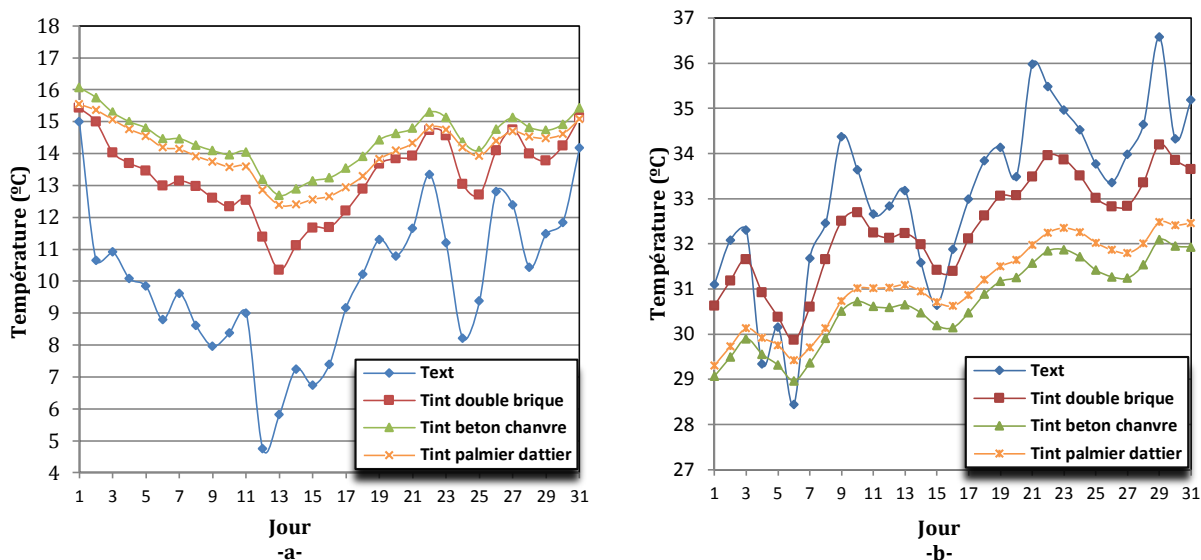


Figure IV. 5. Evolution de la température intérieure dans les différents bâtiments.

Climat Bechar.

-a- Mois de janvier

-b- Mois de juillet

En faisant un zoom sur les journées la plus chaude (29 juillet) et la plus froide (12 janvier) (figure IV.6), l'évolution des températures intérieures nous confirme que les locaux en béton de chanvre et béton de palmier dattier sont les plus chaudes en hiver et les plus fraîches en été.

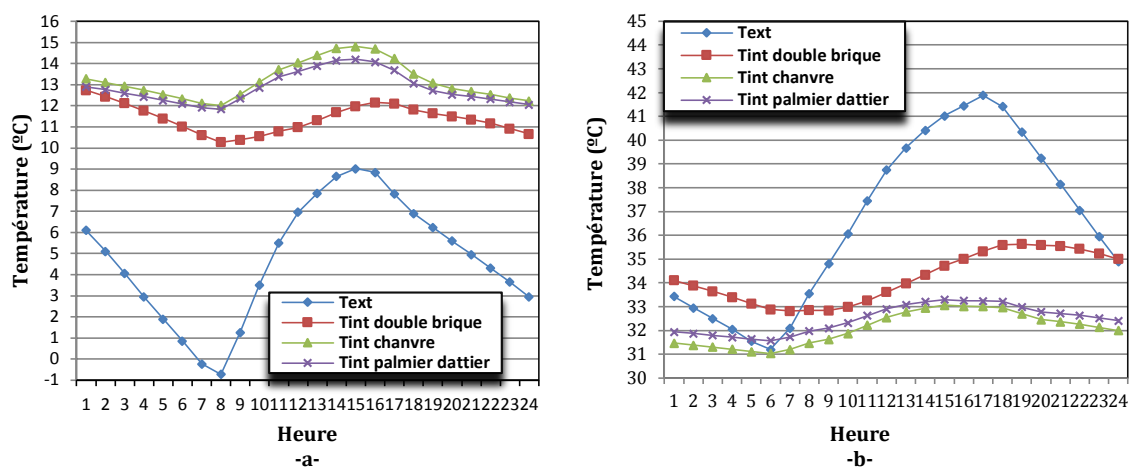


Figure IV. 6. Evolution de la température intérieure dans les différents bâtiments.

Climat Bechar.

-a- 12 janvier

-b- 29 juillet

En analysant les graphiques, nous remarquons que la température intérieure varie entre 12°C et 15°C pour la cellule en béton de chanvre, entre 12°C et 14.2°C pour la cellule en béton palmier dattier, et est entre 10.2°C et 12.9°C seulement pour la cellule en double-briques.

Pour la journée chaude, nous pouvons clairement voir que les températures diurnes des cellules en béton de chanvre et en palmier dattier sont dans la fourchette 31 à 33°C alors qu'elles sont supérieures à 34°C dans la cellule à double brique. Une différence de température pouvant atteindre presque 9°C avec l'extérieur est enregistrée dans les locaux avec des matériaux bio-sourcés alors qu'elle n'est que de 6.5°C avec des parois en doubles-briques.

Une fois de plus les résultats confirment clairement que les matériaux à base végétale offrent un meilleur confort intérieur, été comme hiver, grâce à leurs propriétés d'isolation qui limitent les pertes de chaleurs entre l'intérieur et l'extérieur.

IV.4.2 Analyse des températures de surface

L'évolution des températures de surfaces intérieure et extérieure d'un des murs (nord) durant une journée-type est montrée sur la figure IV.7.

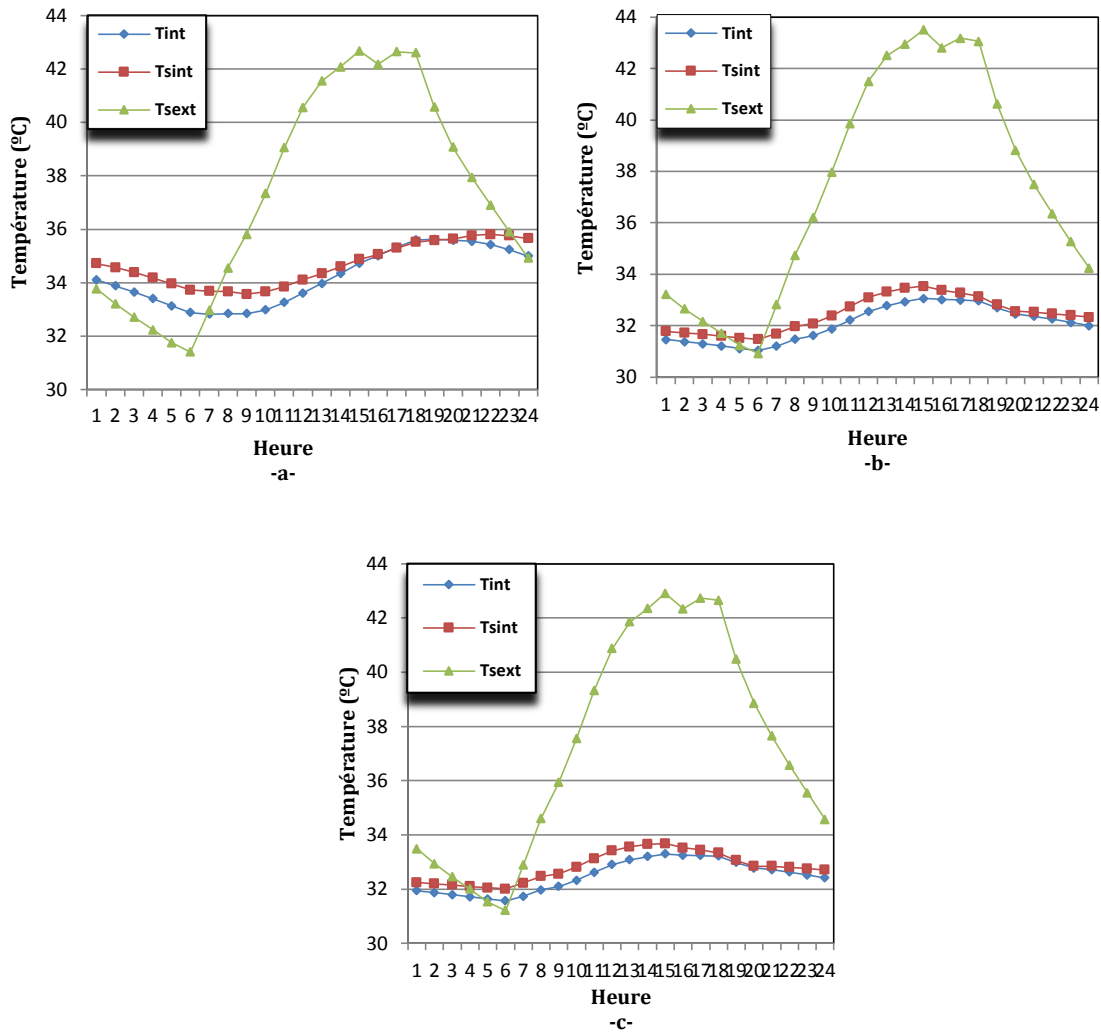


Figure IV. 7. Evolution de la température de surface du mur nord dans les différents bâtiments.

Journée du 29 juillet, climat Bechar.

-a- Cellule en double-briques

-b- Cellule en béton de chanvre

-c- Cellule en béton de palmier dattier

Les faces intérieure et extérieure de la paroi produisent des échanges superficiels liés à des phénomènes de rayonnement et de convection : la température de surface de la paroi n'est pas la même que la température du milieu ambiant (intérieur ou extérieur).

Selon les graphiques obtenus on voit bien que malgré la grande variation de la température de la surface extérieure, elle reste plutôt stable au niveau de la surface intérieure pour les trois bâtiments. Des écarts de température significatifs entre les faces interne et externe ont été notés dans les locaux avec des enveloppes en matériaux bio-sourcés. Ils ont atteint de 10°C avec le béton de chanvre et 9.2°C avec le béton de palmier dattier. Cependant cet écart ne dépasse pas 7°C avec des parois en doubles-briques. Ce qui signifie que ces deux matériaux à base végétale ont une forte capacité à amortir les oscillations de température.

IV.4.3 Indices de confort

L'ISO 7730:2005 présente des méthodes de prévision de la sensation thermique générale et du degré d'inconfort (insatisfaction thermique) général des personnes exposées à des ambiances thermiques. Elle permet de déterminer analytiquement et d'interpréter le confort thermique, par le calcul des indices PMV (vote moyen prévisible) et PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits).

-Indices PMV (Predicted Mean Vote)

L'indice de vote moyen prévisible exprimerait un vote de sensation de confort thermique en se référant à l'échelle suivante :

- Une valeur de PMV de zéro exprime une sensation de confort thermique optimale.
- Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale et signifie qu'une majorité des occupants a plutôt froid.
- Réciproquement, une valeur positive signale qu'elle est plus élevée et signale que les occupants ont chauds.

Dans la détermination de l'indice de vote moyen prévisible interviennent:

- L'activité métabolique W/m^2 ,
- Le travail W/m^2 ,
- La température sèche de l'air °C,
- La température moyenne radiante °C,
- La pression de vapeur Pa,
- Le coefficient de convection $W/m^2°C$,

- Température superficielle habits °C,

L'échelle suivante de l'indice PMV est utilisée pour estimer la sensation de confort dans une ambiance:

- +3 : sensation très chaude
- +2 : sensation chaude
- +1 : sensation légèrement chaude
- 0 : sensation neutre
- -1 : sensation légèrement froide
- -2 : sensation froide
- -3 : sensation très froide

-Indices PPD (pourcentage prévu des insatisfaits) :

C'est le pourcentage des personnes insatisfaites par rapport à une situation. Il est en fonction de l'indice PMV. La figure ci-dessous montre la relation entre les indices PMV et PPD.

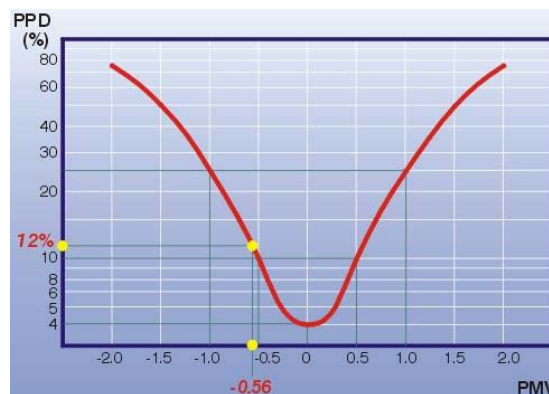


Figure IV.8. Représentation d'indice de PPD [5].

Ces indices ont été estimés avec les hypothèses suivantes [6]:

- vêtue légère $clo = 0.5$
- activité sédentaire à légère (métabolisme) $Met = 1.2$
- vitesse de vent $v = 0.1\text{m/s}$.
- aucun système de conditionnement d'air (ni actif ni passif) n'est considéré.

IV.4.3.1 Période d'été

La figure IV.9. Présente la distribution fréquentielle de l'indice PMV dans les différents bâtiments durant les deux mois les plus chauds (juillet et aout).

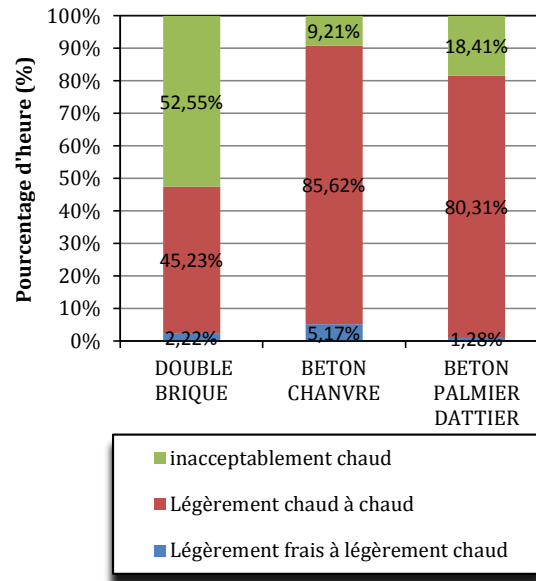


Figure IV.9. Distribution fréquentielle (dans le temps) de l'indice PMV dans les différents bâtiments durant les deux mois les plus chauds.

Nous remarquons dans les bâtiments étudiés pour juillet et aout, que la sensation de légèrement chaud à chaud est présente la plupart du temps dans les bâtiments en béton de chanvre et béton palmier dattier avec 85.62% et 80.31 % contre 45.23 % dans les bâtiments en double briques. Cependant, la sensation de chaleur insupportable est beaucoup moins ressentie dans le bâtiment en béton de chanvre avec 9.21%, alors qu'elle est enregistrée dans 18.41% du temps avec le palmier dattier, et dans plus de 52% du temps avec la double brique.

La figure IV.10 montre le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) durant la même période.

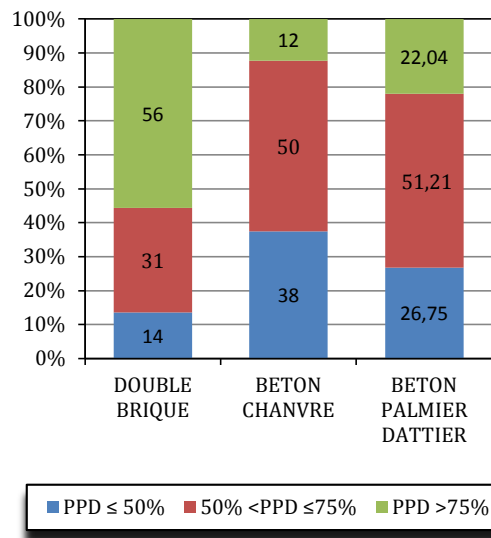


Figure IV. 10. Distribution fréquentielle de l'indice PPD dans les différents bâtiments durant les deux mois les plus chauds.

On constate que le PPD dépasse 75% dans la majorité du temps (plus de la moitié du temps) dans le bâtiment en double brique contre seulement 12% et 22.04% du temps respectivement pour les cellules en béton de chanvre et palmier dattier. En revanche pour la situation dans laquelle le Pourcentage des insatisfaits est inférieur à 50%, elle est enregistrée dans 38% de temps dans le local en béton de chanvre, 26.75% avec le palmier dattier et 14% pour la double-brique. Ces résultats montrent bien l'intérêt de la construction en matériaux bio-sourcés dans des climats semi-arides et arides.

IV.4.3.2 Période d'hiver

Les indices de confort ont été évalués durant une plus longue période (mi-novembre à mi-mars) pour une meilleure évaluation. La figure IV.11 montre la distribution fréquentielle de l'indice PMV dans les différents bâtiments.

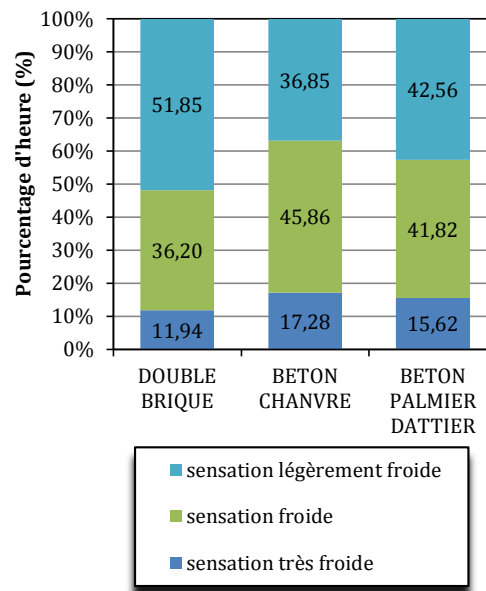


Figure IV.11. Distribution fréquentielle de l'indice PMV dans les différents bâtiments durant les mois les plus froids.

Tout d'abord on constate que la cellule en double brique enregistre un pourcentage du temps le plus élevé pour une sensation très froide avec une valeur de 51.85% contre 36.85% et 42.56% pour les bâtiments en béton de chanvre et palmier dattier. Les zones de confort sont plus étendues dans les bâtiments à base de matériaux bio sourcés que dans le bâtiment en double brique. En effet, environ 17.28% des PMV simulés pour une sensation légèrement froide dans le bâtiment en béton de chanvre et 15.62% dans le bâtiment en palmier dattier et seulement 11.94% dans celui en doubles briques.

La figure IV.12 montre que pour $PPD > 75\%$ enregistré en double brique est de 88.83% contre 83.7% et 85.4% pour les bâtiments en béton de chanvre et palmier dattier. On conclut que les bâtiments à base de matériaux bio-sourcés offrent un meilleur confort en été et en hiver qu'un bâtiment en double brique.

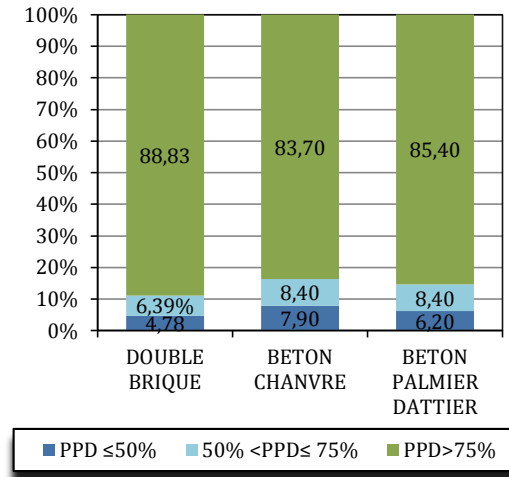


Figure IV. 12. Distribution fréquentielle de l'indice PPD dans les différents bâtiments durant les mois les plus froids.

IV.4.4 Analyse des courbes d'humidité relative

En revenant à l'analyse des humidités relatives, les résultats obtenus représentés dans les courbes des graphes ci-dessous (Figure IV.13) montrent l'évolution d'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur durant une séquence d'été (3 jours très chauds : 28-30 juillet) et une séquence d'hiver (3 jours très froids : 11-13 janvier).

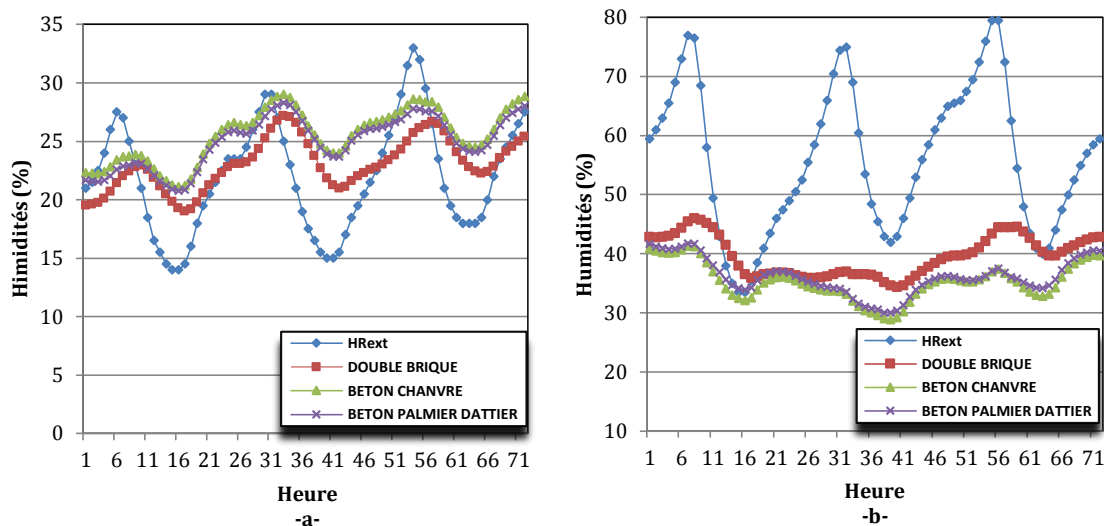


Figure IV.13. Evolution des humidités relatives extérieure et intérieure. Climat Bechar.

-a- Séquence d'été

-b- Séquence d'hiver

On voit sur le graphe que dans les bâtiments en matériaux bio-sourcés, les humidités sont plus stables. Ces matériaux régulent l'humidité à l'intérieur des bâtiments par rapport à l'extérieur: en été lorsque l'humidité extérieure est basse, ils offrent des humidités plus importantes que la double-brique et en hiver lorsque l'humidité est élevée, ils offrent des humidités plus faibles. Grâce à leurs vastes réseaux poreux ouverts, ils sont capables d'adsorber une quantité considérable de vapeur d'eau, qui se condense sous forme d'eau liquide et se fixe à la surface de leurs pores lorsque l'hygrométrie de l'air ambiant est importante, et de la restituer lorsque l'air est sec.

Cette capacité d'échanger beaucoup d'humidité avec l'air ambiant grâce aux phénomènes physiques d'adsorption et de désorption font de la plupart des bétons végétaux des excellents régulateurs hydriques.

IV.4.5 Besoins énergétiques

La figure IV.14 montre les besoins énergétiques annuels (chauffage et climatisation) des trois bâtiments avec les conditions météorologiques de Béchar.

Les besoins de chauffage ont été évalués pour une température de consigne de 22°C et ceux de climatisation avec une température de 25°C.

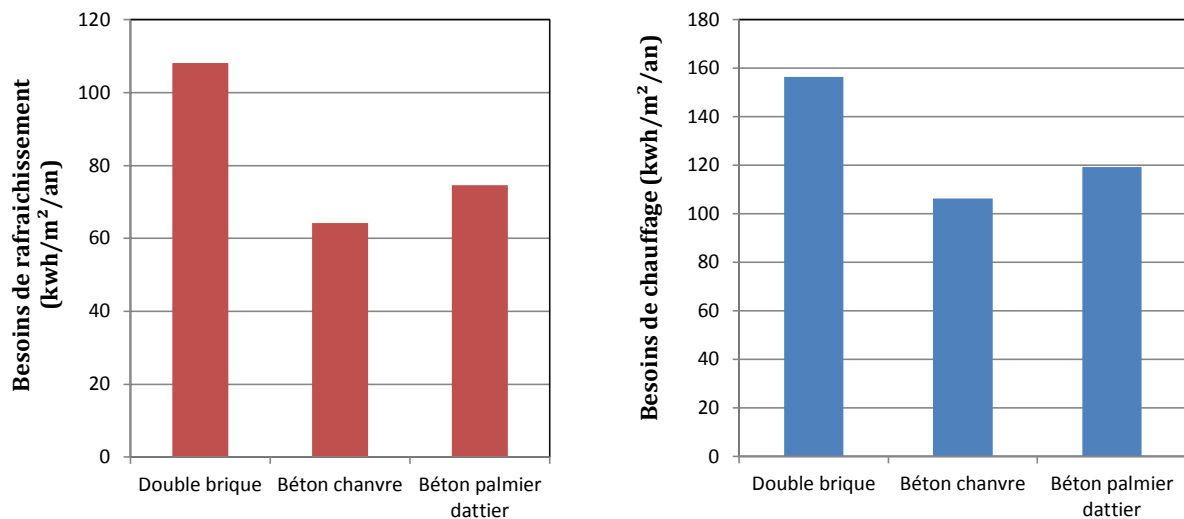


Figure IV. 14. Besoins de chauffage et de climatisation annuels dans les différents bâtiments.
Climat Bechar.

Nous constatons que les bâtiments en béton de chanvre et palmier dattier sont celles qui ont les plus faibles besoins de rafraîchissement et de chauffage. En effet la cellule en double brique consomme plus d'énergie pour le chauffage et la climatisation. L'utilisation du béton de palmier dattier au lieu de la double-brique réduit les besoins de chauffage de 24% et de 31% les besoins de rafraîchissement. Ces taux de réduction sont respectivement de 32% et 40% pour le béton de chanvre. Ceci montre que ces matériaux améliorent l'efficacité énergétique

IV.5 Conclusion

Le travail porté dans ce chapitre est une modélisation conçue à l'aide du logiciel TRNSYS16 de différents bâtiments à base de chanvre, palmier dattier et la double brique qui est largement utilisée dans la construction algérienne. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés dans les points suivant :

- L'analyse thermique a permis de conclure que l'évolution des températures intérieures ainsi que l'estimation des indicateurs de confort ont montré que la construction en matériaux bio-sourcés (chanvre et palmier dattier) offre un meilleur confort thermique que ce soit en hiver ou en été.
- A noter également que les matériaux bio-sourcés ont la capacité à réguler l'humidité à l'intérieur des bâtiments grâce aux phénomènes physiques d'adsorption et de désorption.
- Les besoins énergétiques de refroidissement et de chauffage sont beaucoup plus faibles dans les bâtiments à base de chanvre et palmier dattier que dans le bâtiment en double brique ce qui se traduit par d'importantes économies d'énergie.

Références bibliographiques

- [1] **H. Kazoui**. Utilisation des matériaux locaux pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Thèse doctorat en science, université A.mira Bejaia, 2017.
- [2] **Anh Dung Tran Le**. Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous titre: simulation numérique et approche expérimentale). Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Reims - Champagne Ardenne, 2010.
- [3] **B. HABA**. Etude in-situ des performances énergétiques et mécaniques des matériaux biosourcés et locaux. Thèse de Doctorat, université Batna1, 2017
- [4] **DTR C3-2**. Règlement thermique des bâtiments d'habitation; règles de calcul des déperditions calorifiques FACICULE 1, annexe2.
- [5] <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/confort/2.1.htm>.
- [6] **ISO 7730**. Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Standards organization, Geneva, 1994.

Conclusion Générale

Dans ce travail de fin d'études, les comportements thermique et énergétique de quelques enveloppes à base de matériaux bio-sourcés ont été étudiés via une approche numérique. L'objectif était de voir s'il peut constituer potentiellement une alternative sérieuse comme matériau de construction durable en Algérie. Plusieurs typologies climatiques devaient être étudiées, malheureusement les conditions n'étaient pas favorables et nous nous sommes contentés d'un seul type de climat (le semi-aride).

Ce modeste travail est partagé en deux parties essentielles. La première est une revue de la littérature qui porte sur les propriétés de quelques matériaux à base végétale (bois de palmier dattier, béton de chanvre, ouate de cellulose, liège). Les études montrent que ces matériaux présentent des propriétés d'isolation très intéressantes et un comportement hygro-thermique très satisfaisant.

La deuxième représente la modélisation, faite à l'aide du logiciel TRNSYS, pour évaluer les performances thermiques et énergétiques d'une construction mono-zone. Trois matériaux pour l'enveloppe ont été simulés : des matériaux classiques (double briques) et des matériaux biosourcés (béton de chanvre et béton de palmier dattier). Une comparaison des résultats a été faite pour évaluer l'efficacité de chaque matériau.

Les résultats obtenus montrent que la température interne pour la bâtisse en béton de chanvre et celle en béton de bois de palmier dattier est plus confortable que pour celle en matériaux classiques. En effet, elle est plus élevée en hiver et plus basse en été, ce qui nous amène à des économies dans l'utilisation de la climatisation et le chauffage.

Quant à la capacité à amortir les oscillations de température, on a constaté dans les résultats que l'écart de température obtenu entre les surfaces extérieure et intérieure du mur étudié est plus important pour les deux matériaux biosourcés, ce qui nous amène à

dire qu'elle est plus importante pour ces deux derniers par rapport aux matériaux classiques.

Les matériaux à base végétale offrent une bonne performance de régulation de l'humidité relative, c'est ce que les résultats nous ont confirmé. Car l'humidité est plus stable à l'intérieur des constructions en béton de chanvre et béton palmier dattier.

Cette petite étude a montré que l'utilisation des matériaux bio-sourcés à la place de la brique réduit les besoins de chauffage de 24% et les besoins de rafraîchissement de 31% ce qui permet de confirmer que ça peut être une bonne solution pour l'excès des dépenses énergétique dans le secteur du bâtiment.

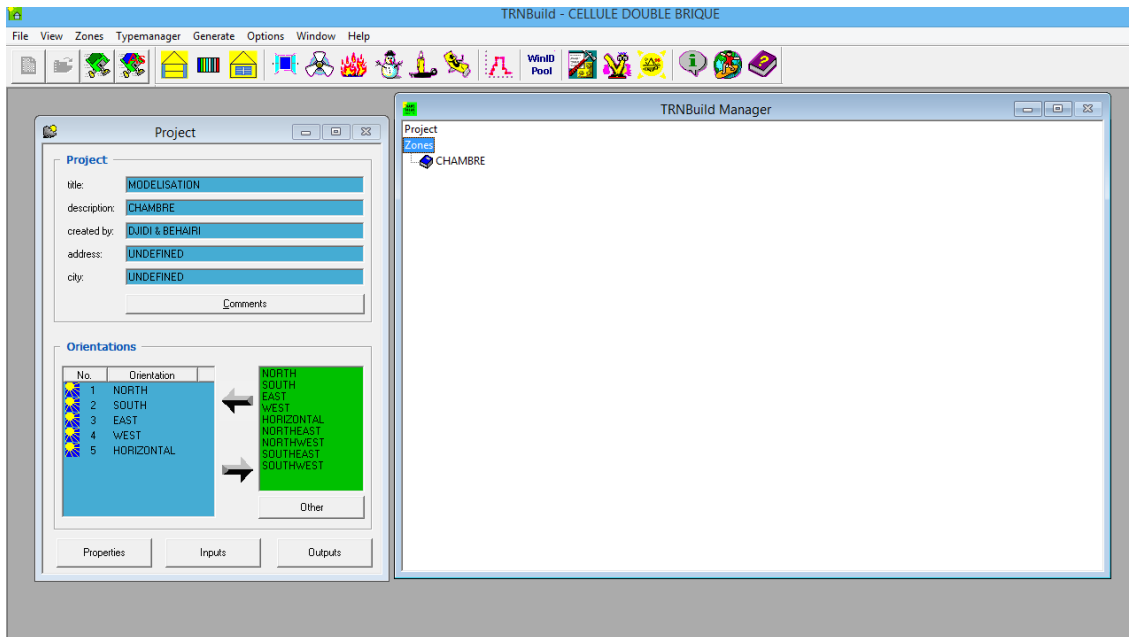
Le travail a été effectué en ne considérant que le modèle simplifié de transfert d'humidité de TRNSYS. Une étude plus complète est nécessaire en tenant compte de transfert d'humidité dans le matériau afin de voir son incidence sur les performances.

L'étude doit aussi être élargie à d'autres zones climatiques afin d'estimer l'avantage de l'utilisation de ces matériaux par rapport aux matériaux utilisés habituellement.

Annexe

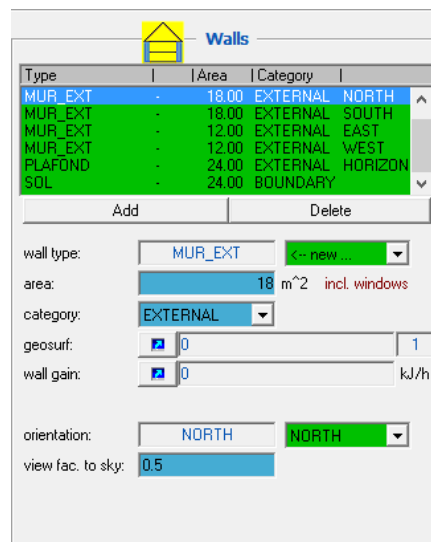
Description du bâtiment au sein de l'interface de TRNBUILD

A. La fenêtre d'initialisation du projet et la fenêtre d'orientation



B. La fenêtre de zone

❖ Définition des parois



❖ Définition des fenêtres

The figure shows four screenshots of software interfaces for defining walls and windows. Each window displays a table of properties and a configuration panel below.

Walls (Left):

Type	Area	Category	Orientation
MUR_EXT	18.00	EXTERNAL	NORTH
MUR_EXT	18.00	EXTERNAL	SOUTH
MUR_EXT	12.00	EXTERNAL	EAST
MUR_EXT	12.00	EXTERNAL	WEST
PLAFOND	24.00	EXTERNAL	HORIZON
SOL	24.00	BOUNDARY	

Configuration panel: wall type: MUR_EXT, area: 18 m², category: EXTERNAL, geosurf: 0, gain: 0, orientation: SOUTH, view fac. to sky: 0.5.

Windows (Top Middle):

Type	Area	Category	U-Value	lg-Value
FENETRE	1.80	EXTERNAL	5.74	0.87

Configuration panel: window type: FENETRE, area: 1.8 m², category: EXTERNAL, geosurf: 0, gain: 0, orientation: SOUTH, view fac. to sky: 0.5.

Walls (Top Right):

Type	Area	Category	Orientation
MUR_EXT	18.00	EXTERNAL	NORTH
MUR_EXT	18.00	EXTERNAL	SOUTH
MUR_EXT	12.00	EXTERNAL	EAST
MUR_EXT	12.00	EXTERNAL	WEST
PLAFOND	24.00	EXTERNAL	HORIZON
SOL	24.00	BOUNDARY	

Configuration panel: wall type: MUR_EXT, area: 18 m², category: EXTERNAL, geosurf: 0, gain: 0, orientation: NORTH, view fac. to sky: 0.5.

Windows (Bottom Right):

Type	Area	Category	U-Value	lg-Value
PORTE	2.00	EXTERNAL	5.74	0.87

Configuration panel: window type: PORTE, area: 2 m², category: EXTERNAL, geosurf: 0, gain: 0, orientation: NORTH, view fac. to sky: 0.5.

❖ Régime Data

❖ Infiltration

The screenshot shows the "Infiltration Type Manager" dialog box. It features a dropdown menu for "infiltration type" set to "INFIL001". Below this is a section titled "Airchange of Infiltration" with a text input field containing "0.5" and the unit "1/h". At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons, and a row of four colored buttons: Red, Green, Blue, and Yellow.

❖ Heating (Chauffage)

The screenshot shows the "Heating Type Manager" dialog box. It features a dropdown menu for "heating type" set to "HEAT1". Below this is a section titled "Room Temperature Control" with a text input field for "set temperature" set to "22" and the unit "°C". Another section titled "Heating Power" has radio buttons for "unlimited" (selected) and "limited", and a text input field for "radiative part" set to "0" and the unit "% / 100". A third section titled "Humidification" has radio buttons for "off" (selected) and "on". At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons, and a row of four colored buttons: Red, Green, Blue, and Yellow.

❖ **Cooling**

Cooling Type Manager

cooling type: CLIM1

Room Temperature Control

set temp.: 25 °C

Cooling Power

unlimited
 limited

Dehumidification

off
 on

OK Cancel **R D C N**

❖ **Gains**

Gains [Zone: CHAMBRE]

Persons

off on
 ISO 7730 Table degree of activity: Seated, light work, typing
 VDI 2078 Table
 scale: 0

Computer

off on

Artificial Lighting

off on
 related floor area: 24 m²
 total heat gain: 5 W/m² control strategy: S: 1*NUIT
 convective part: 0 % scale: S: 1*NUIT

Other Gains

Type	Scale	Geo Position

Add Delete

OK Cancel

❖ **Comfort**

Comfort Type Manager

comfort type: COMF1

Clothing factor: 0.5 clo

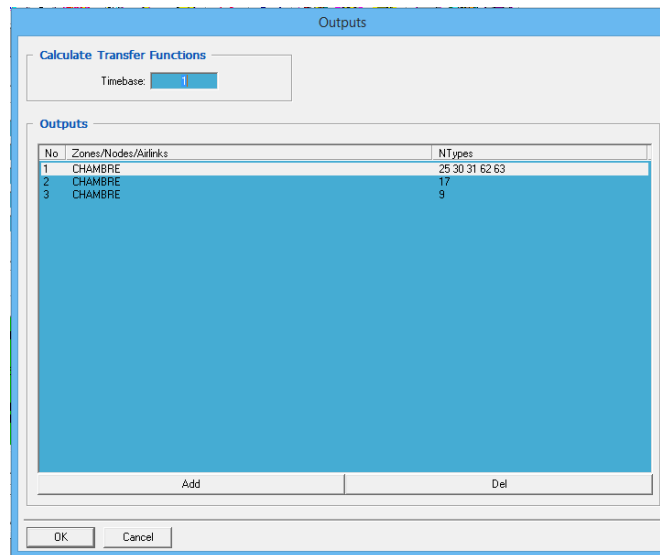
Metabolic rate: 1.2 met

External work: 0 met

Relative air velocity: 0.1 m/s

OK Cancel **R D C N**

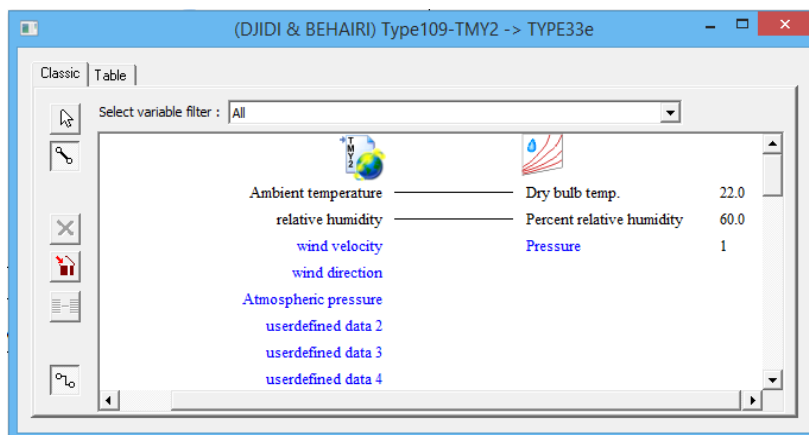
C. LES OUTPUTS



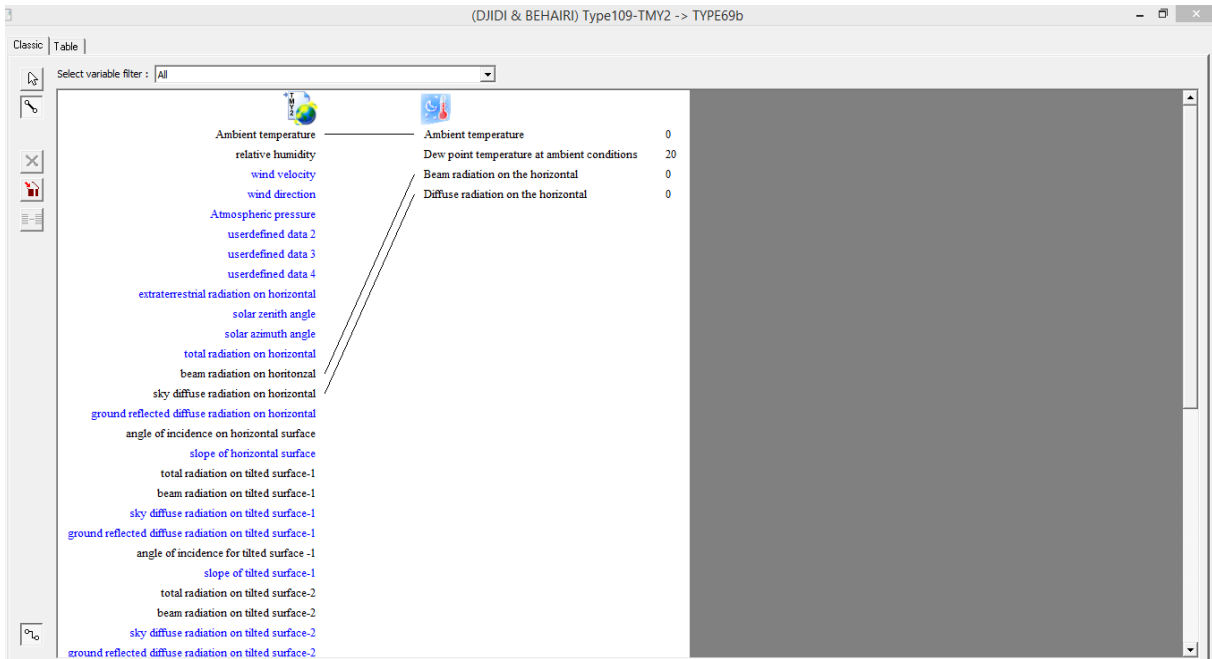
Couplage bâtiment environnement au sein du TRNSTUDIO

❖ Liaisons entre les types : dans notre fichier

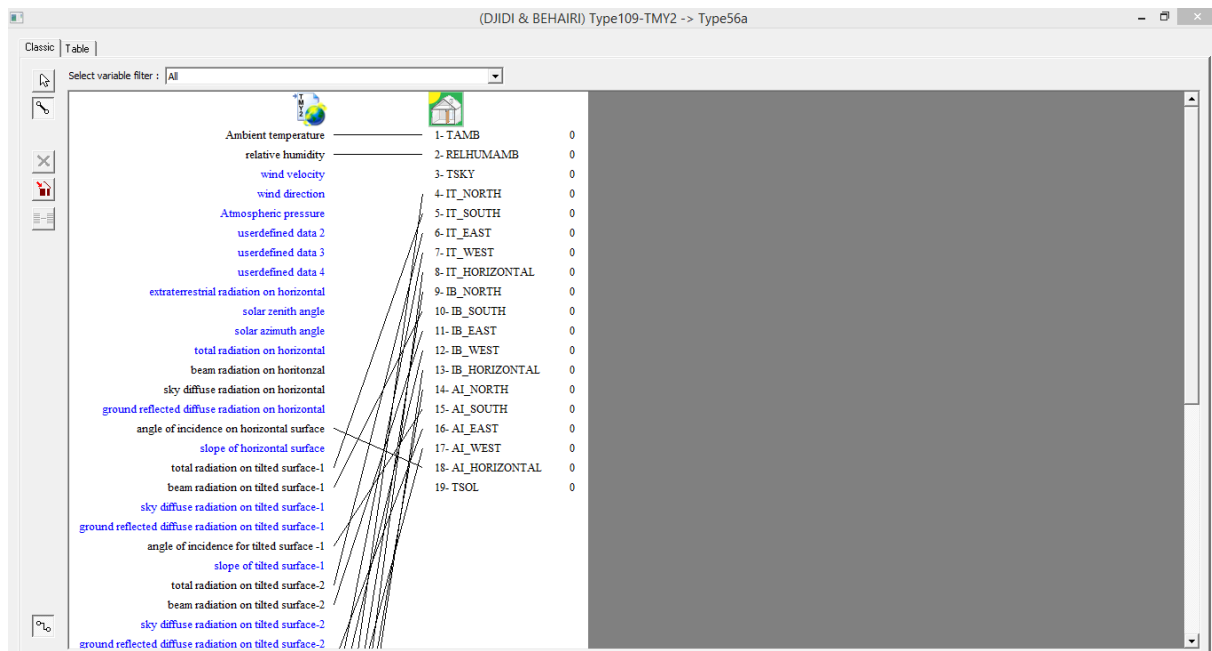
➤ TYPE 109 & TYPE 33



➤ **TYPE 109 & TYPE69**



➤ **TYPE 109 & TYPE56**



➤ **TYPE 109 & TYPE 28**

(DJIDI & BEHAIRI) Type109-TMY2 -> TYPE28b

Classic | Table | Select variable filter : All

Ambient temperature	Summary input-1	0.0
relative humidity	Summary input-2	0.0
wind velocity	Summary input-3	0.0
wind direction	Summary input-4	0.0
Atmospheric pressure	Summary input-5	0.0
userdefined data 2	Summary input-6	0.0
userdefined data 3	Summary input-7	0.0
userdefined data 4	Summary input-8	0.0
extraterrestrial radiation on horizontal	Summary input-9	0.0
solar zenith angle		
solar azimuth angle		
total radiation on horizontal		
beam radiation on horizontal		
sky diffuse radiation on horizontal		
ground reflected diffuse radiation on horizontal		
angle of incidence on horizontal surface		
slope of horizontal surface		
total radiation on tilted surface-1		
beam radiation on tilted surface-1		
sky diffuse radiation on tilted surface-1		
ground reflected diffuse radiation on tilted surface-1		
angle of incidence for tilted surface -1		
slope of tilted surface-1		
total radiation on tilted surface-2		
beam radiation on tilted surface-2		
sky diffuse radiation on tilted surface-2		
ground reflected diffuse radiation on tilted surface-2		

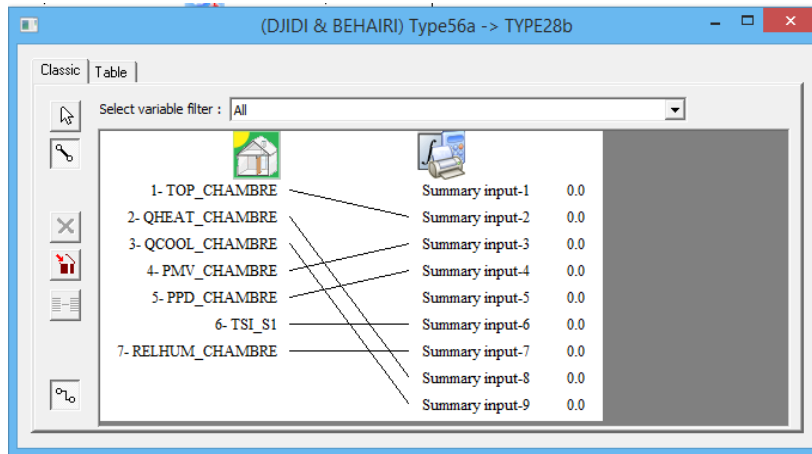
➤ **TYPE 69 & TYPE 56**

(DJIDI & BEHAIRI) TYPE69b -> Type56a

Classic | Table | Select variable filter : All

Fictive sky temperature	1- TAMB	0
Cloudiness factor of the sky	2- RELHUMAMB	0
	3- TSKY	0
	4- IT_NORTH	0
	5- IT_SOUTH	0
	6- IT_EAST	0
	7- IT_WEST	0
	8- IT_HORIZONTAL	0
	9- IB_NORTH	0
	10- IB_SOUTH	0
	11- IB_EAST	0
	12- IB_WEST	0
	13- IB_HORIZONTAL	0
	14- AI_NORTH	0
	15- AI_SOUTH	0
	16- AI_EAST	0
	17- AI_WEST	0
	18- AI_HORIZONTAL	0
	19- TSOL	0

➤ **TYPE 56 & TYPE 28**



➤ **TYPE 77 & TYPE 56**

