



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

CONTRIBUTION DES ENVELOPPES NANOTECHNOLOGIQUES
DANS L'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Climatique et Environnement

Par
Hocine BELILI

Année Universitaire
2020-2021



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

CONTRIBUTION DES ENVELOPPES NANOTECHNOLOGIQUES
DANS L'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture Climatique et Environnement

Par
Hocine BELILI

Devant le Jury Composé de :

Mohamed DERRADJI	Président	Professeur	Université Constantine3
Saliha OUTTAS	Directrice	Professeur	Université Constantine3
Boubekeur BOUDINE	Examineur	Professeur	Université Constantine1
Mourad ZAABAT	Examineur	Professeur	Université Oum El Bouaghi
Samira LOUAFI	Examinatrice	MCA	Université Constantine3
Abida HAMOUDA	Examinatrice	MCA	Université Batna1

Année Universitaire
2020-2021

Remerciements

Grâce à l'aide de Dieu tout-puissant, j'ai pu accomplir ce modeste travail.

Le travail qui fait l'objet de cette thèse a été réalisé au sein du laboratoire d'Architecture Bioclimatique et Environnement de la Faculté d'Architecture et d'Urbanisme de l'Université de Constantine 03, sous la direction du Professeur ABDOU Saliha. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude à ma directrice de thèse, le Professeure Saliha ABDOU, pour son soutien et ses suggestions pertinentes. Elle a supervisé ce travail de thèse de manière permanente. Elle m'a patiemment accompagné tout au long du processus de préparation.

Je tiens à remercier les Professeurs Mourad ZAABAT et Boubekour BOUDINE, ainsi que les Docteurs Samira LOUAFI et Abida HAMOUDA, pour avoir accepté d'être rapporteurs de thèse et membres de mon jury, et le Professeur Mohamed DERRADJI pour avoir accepté d'être membre et président du jury. A cette occasion particulière, j'ai pu apprécier le soin qu'ils portent à mon travail. Je tiens à leur exprimer ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail ou avec qui j'ai eu des débats fructueux, souvent pragmatiques, et extrêmement pertinents, en particulier le professeur Salah LAOUAR et le chef du laboratoire de béton Mehdi MOSTPHAOU.

Je remercie également le Dr. Walid SOUTHY qui m'a accompagné lors de la validation des résultats in situ et qui m'a facilité la manipulation du logiciel "TRNSys 17".

Ma gratitude s'étend également aux membres du laboratoire L.T.P EST, du Laboratoire Scientifique Régional de Constantine, du Laboratoire Scientifique Central d'Alger, du Laboratoire de Cristallographie de l'Université de Constantine¹ et de l'Institut de Technologie Ain M'Lila.

Dédicaces

À mes chers parents pour leur affection et leur soutien,

À ma chère épouse et à mes enfants pour leur sacrifice et leur soutien,

À mes chers frères et sœurs pour leurs encouragements.

TABLE DES MATIERES

	Page
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xviii
LISTE DES ABREVIATIONS	xix
RESUME	xx
INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE.....	1
Introduction.....	1
1 Problématique	6
2 Objectifs.....	9
3 Méthodologie et outils de recherche.....	9
4 Structure de la thèse.....	10
CHAPITRE I	
EFFICACITE ENERGETIQUE ET ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS.....	12
Introduction.....	12
1.1 Contexte énergétique	12
1.1.1 Aperçue de la situation énergétique dans le monde.....	12
1.1.2 Contexte et situation énergétique en Algérie.....	13
1.1.3 Etude comparative entre la consommation de gaz et de l'électricité en Algérie durant 20 ans.....	14
1.1.4 Politique d'efficacité énergétique en bâtiment	14
1.1.4.1 Secteur du bâtiment.....	15
1.1.4.2 Instruments de la politique d'efficacité énergétique déployés dans le secteur de bâtiments.....	17
1.1.4.3 Stratégie nationale de la maîtrise de l'énergie en bâtiment.	18
1.1.5 Centre d'intérêt du laboratoire -ABE- (Rétrospective d'expériences)	19
1.1.5.1 Toiture végétalisée	19
1.1.5.2 Isolation thermique	19
1.1.5.3 Inertie thermique	20
1.2 Catégories et caractéristiques des matériaux d'isolation thermique	20
1.2.1 Matériaux d'isolation thermique conventionnelles	20
1.2.1.1 La laine minérale.....	20
1.2.1.2 Polystyrène expansé et extrudé ((EPS - XPS).....	21
1.2.1.3 Polyuréthane (PUR)	21
1.2.2 Matériaux d'isolation thermique non conventionnels naturelles et écologiques « Vertes ».....	23
1.2.2.1 Liège.....	23
1.2.2.2 Paille de blé	24
1.2.2.3 Enveloppe de riz.....	24
1.2.2.4 Fibre de noix de coco	25
1.2.2.5 Fibre de palmier dattier	26
1.2.2.6 Isolants thermiques à fibres cellulosiques organiques	27
1.2.2.6.1 Nanocellulose	27
1.2.2.6.2 Nanofibrilles de cellulose	27

1.2.3 Isolation thermique à haute performance (super isolation)	28
1.2.3.1 Panneaux isolants sous vide (VIP)	28
1.2.3.2 Aérogels	29
1.2.3.3 Matériaux à changement de phase (PCM)	30
1.2.3.4 Les nanotechnologies, futures perspectives d'isolation thermique des bâtiments	31
1.2.3.4.1 Matériaux de nano-isolation (NIM).....	32
1.2.3.4.2 Matériaux d'isolation sous vide (VIM).....	32
1.2.3.4.3 Matériaux d'isolation au gaz (GIM)	33
1.2.3.4.4 Matériaux d'isolation dynamique (DIM).....	33
1.2.3.4.5 Matériaux d'isolation en Nano béton (Nano Conc)	33
1.3 Méthodes et techniques d'isolation thermique	34
1.3.1 Isolation thermique des parois	34
1.3.1.1 Isolation thermique des parois intérieures.....	34
1.3.1.2 Isolation thermique des parois extérieures	34
1.3.1.3 Isolation thermique répartie	35
1.4 Réhabilitation énergétique des constructions	36
1.4.1 Les approches novatrices d'isolation thermique	37
1.4.2 Transition de la performance thermique à la performance énergétique dans les bâtiments.....	37
1.4.3 Perspectives d'isolation thermique alternative	38
Conclusion	40
CHAPITRE II	
ETAT DE L'ART	42
Introduction.....	42
2.1 Impact de la Nanotechnologie sur la conception architecturale (nano architecture)	42
2.1.1 NanoArchitecture.....	42
2.1.2 Nanomatériau en architecture	43
2.1.3 Vers une vision adaptative de la nano architecture	43
2.2 Revêtements de nanomatériaux	43
2.2.1 Auto nettoyage (photo catalytique)	44
2.2.2 Effet Lotus (autonettoyant).....	45
2.2.3 Intégration des nanomatériaux hydrophobes dans les constructions	45
2.3 Champ d'application de la nanotechnologie dans les matériaux de construction.....	48
2.3.1 Nano-béton	48
2.3.1.1 Nanotubes de carbone (CNT)	49
2.3.1.2 Oxyde de titane (TiO2).....	50
2.3.2 Nanotechnologie et Acier	50
2.3.3 Nanotechnologie et Verre	51
2.3.4 Nanotechnologie et Bois.....	52

2.4 Contribution de la Nanotechnologie au développement des matériaux d'isolation à haute performance thermique	53
2.4.1 Isolation thermique des bâtiments à base de nanomatériaux.....	54
2.4.1.1 Les panneaux sous vides (PIV)	54
2.4.1.2 Les aérogels.....	55
2.4.1.3 Matériaux à changement de phase (MCP)	59
2.5 Révolution nanotechnologique dans les composites à base de nanofibre cellulosique.....	61
2.5.1 Fibre de palmier dattier.....	62
2.5.1.1 Nanofibrilles de cellulose (NFC)	63
2.5.1.2 Nanocristaux de cellulose (NCC).....	64
2.5.2 Bionanomatérial issu de déchets agricoles	65
2.5.3 Synthèse des travaux réalisés sur les matériaux nanobiocomposite	67
Conclusion	74

CHAPITRE III

ELABORATION D'UN NANOCOMPOSITE A BASE DE NANOFIBRES CELLULOSIQUES ET DU CIMENT

Introduction.....	75
3 Matériaux et méthode expérimentale.....	75
3.1 Palmiers dattier une ressource innovante.....	75
3.1.1 Gisement et applications.....	75
3.1.2 Croissance durable du potentiel agronomique.....	76
3.1.3 Enjeu socio-économique.....	77
3.2 Matériaux.....	77
3.2.1 Nanofibres cellulosique de palmier (noyaux de datte) ND	77
3.2.1.1 Caractéristiques morphologiques des noyaux de dattes.....	78
3.2.1.2 Composition chimique du noyau de datte	79
3.2.2 Ciments.....	80
3.2.2.1 Composition du ciment	80
3.2.2.2 Catégories et types de ciments	81
3.2.3 Sable normalisé (CEN).....	82
3.2.3.1 Caractéristiques du sable normalisé	82
3.2.3.2 Granulométrie.....	82
3.3 Techniques de préparation des échantillons des nanofibres cellulosique de noyau de palmier dattier (FND).....	83
3.3.1 Sélection et séchage de noyau de palmier dattier (FND)	83
3.3.2 Systèmes de broyage de noyau de palmier dattier (FND).....	83
3.3.2.1 Broyage Horizontal des particules fines (μm)	84
3.3.2.1.1 Los Angeles	84
3.3.2.1.2 Micro-Deval	85
3.3.2.2 Broyage Vertical des particules ultrafines (nm)	85
3.3.2.2.1 Fast-Mill 1,5	85
3.3.2.2.2 Micro-Broyeur Planétaire.....	85
3.3.3 Protocole d'élaborations des pastilles nanocomposites.....	86
3.3.3.1 Tamisage et Pesage	87

3.3.3.2 Homogénéisation et Pastillage	87
3.4 Procédures de caractérisation des nanofibres cellulosiques	88
3.4.1 Spectroscopies par diffraction des rayons X (DRX)	89
3.4.2 Spectroscopies Infra- Rouge à Transformée de Fourier (FT-IR)...	91
3.4.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)	92
3.4.4 Dispersions d'énergie des photons X (EDX)	94
3.5 Techniques de mesures	95
3.5.1 Mesures de la résistance thermique des nanomatériaux	95
3.5.1.1 Mesure de la conductivité thermique axiale et radiale.....	95
3.5.1.2 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et analyse thermogravimétrique (TGA)	96
3.5.1.3 Méthode des boîtes de mesure de la conductivité thermique	97
3.5.2 Mesures masse volumique, densité et porosité.....	98
3.5.3 Mesures de la résistance mécanique	101
3.5.3.1 Résistance à la traction par flexion	102
3.5.3.2 Résistance à la compression.....	103
Conclusion	104

CHAPITRE IV

INTERPRETATION DES RESULTATS DE CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE, STRUCTURALE, THERMIQUE ET MECANIQUE DU NANOMATERIAU

105	105
Introduction.....	105
4.1 Caractérisation morphologique et structurale	105
4.1.1 Diffraction des rayons X (DRX).....	105
4.1.1.1 DRX du nanofibres cellulosiques des noyaux de datte	105
4.1.1.2 DRX du ciment.....	107
4.1.1.3 DRX du sable normalisé CEN (sable normalisé ISO)	108
4.1.2 FT-IR noyaux de dattier.....	108
4.1.2.1 Nanopoudre des noyaux de datte (NFC).....	108
4.1.2.2 Poudre grise de ciment CPJ 42.5.....	111
4.1.2.3 Poudre de ciment dopée de 15% de nanofibre cellulosique	112
4.1.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)	113
4.1.3.1 Microstructure interne des nanofibres de noyaux du palmier de datte	113
4.1.3.2 Microstructure interne des composants de ciment CPJ 42.5	114
4.1.3.3 Microstructure interne du nanocomposite (ciment dopé avec 15% de nanofibre cellulosique de noyau de datte).....	116
4.1.4 Analyse spectroscopique à énergie dispersive (EDX).....	117
4.1.4.1 Analyse spectroscopique EDX des nanofibres de noyaux du palmier de datte	117
4.1.4.2 Analyse spectroscopique EDX des composants de ciment CPJ 42.5	119
4.1.4.3 Analyse spectroscopique EDX du nanocomposite (ciment dopé avec 15% de NFC de noyau de datte).....	120

4.2 Analyse des propriétés thermique.....	122
4.2.1 Comportement thermique des nanofibres cellulosique des noyaux de palmier dattier (NFCn).....	122
4.2.1.1 Analyse thermogravimétrique (ATG).....	122
4.2.1.2 Analyse calorimétrique différentielle (DSC).....	124
4.2.2 Conductivité thermique.....	126
4.2.2.1 Technique d'élaboration du nanomatériau (NFC _n).....	126
4.2.2.2 Mesure de la conductivité thermique.....	127
4.2.3 Diffusivité thermique.....	129
4.2.4 Chaleur spécifique volumique.....	131
4.2.5 Corrélation entre conductivité thermique et diffusivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres (NFCn).....	132
4.3 Analyse des propriétés mécaniques.....	134
4.3.1 Mesure de la résistance mécanique.....	134
4.3.1.1 Technique d'élaboration du matériau (Ciment & NFCn) ...	134
4.3.1.2 Résistance à la compression.....	135
4.3.1.3 Résistance à la traction par flexion.....	138
4.3.1.4 Corrélation entre compression, conductivité thermique et densité.....	140
4.3.1.5 L'effet de nanofibres cellulosique sur la masse des composites en fonction du temps.....	141
Conclusion.....	143
CHAPITRE V	
INVESTIGATION, INTERPRETATION ET SIMULATION.....	145
Introduction.....	145
5.1 Présentation du cas d'étude.....	145
5.1.1 Description technique des bâtiments à expérimenter.....	147
5.1.1.1 Appartement en système constructif (poteau – poutre).....	147
5.1.1.2 Appartement en béton préfabriqué (système tunnel).....	147
5.1.2 Forme et orientation des bâtiments.....	148
5.1.2.1 Système constructif.....	148
5.1.2.2 Caractéristiques thermique de l'enveloppe extérieure.....	150
5.1.3 Appareils de mesure.....	150
5.1.3.1 Station météo Vantage Pro 2.....	150
5.1.3.2 TROTEC BL30 enregistreur de température et d'humidité	151
5.1.3.3 Thermocouple électronique (Ebro TTX 100).....	152
5.1.3.4 Caméra thermique infrarouge avec vision nocturne.....	153
5.1.4 Conditions de déroulement des mesures.....	154
5.1.4.1 Mesure en période estivale sans ventilation naturelle entre 20-22 /8/2020.....	154
5.1.4.2 Mesures en période hivernale entre 29-31/12/2020.....	155
5.1.4.3 Vision nocturne des logements investigués.....	155
5.2 Interprétation des résultats in-situ.....	156
5.2.1 Période estivale sans ventilation naturelle entre 20-22/8/2020.....	156
5.2.1.1 Variations de température intérieure et humidité relative du logement en structure poteau poutre (PP).....	156

5.2.1.2	Variations température intérieure et humidité relative du logement en béton préfabriqué (BPF)	158
5.2.1.3	Étude comparative de la température intérieure des deux logements avec les seuils de confort d'été sans ventilation nocturne	159
5.2.2	Période hivernale entre 29-31décembre 2020	160
5.2.2.1	Variations températures intérieure et humidité relative du logement en structure poteau poutre (PP)	160
5.2.2.2	Variations températures intérieure et humidité relative du logement en béton préfabriqué (BPF) durant la période	161
5.2.2.3	Étude comparative de la température intérieure des deux logements avec les seuils de confort en hiver	162
5.3	Déroulement de simulation et comparaison entre température mesurées et simulées par TRNSys.....	163
5.3.1	Période estivale (sans ventilation naturelle)	163
5.3.1.1	Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) durant la période du 20 au 22 Aout 2020	164
5.3.1.2	Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (BPF) durant la période du 20 au 22 Aout 2020	164
5.3.2	Période hivernale	167
5.3.2.1	Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) durant la période du 29 au 31 décembre 2020	167
5.3.2.2	Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (BPF) durant la période du 29 au 31 décembre 2020	168
5.4	Etude des améliorations des performances énergétiques des deux appartements	170
5.4.1	Evaluation des performances énergétiques des deux appartements à l'état réel.....	170
5.4.2	Vérification des performances énergétiques du nanomatériau placé sur la face externe de l'enveloppe de l'appartement (PP).....	172
5.4.3	Vérification des performances énergétiques de l'isolation en nanomatériau placé sur la face externe de l'enveloppe de l'appartement (BPF).....	173
5.4.4	Vérification de la performance énergétique de l'enveloppe du logement (BPF) dopée en nanofibre (NFC) à différents ratios	174
5.4.5	Comparaison entre les différents cas d'amélioration en nanofibre cellulosique de noyau de dattier pour les deux types de logements (BFP &PP)	177
5.4.6	Etude de l'influence du matériau nano composite sur le confort thermique.....	179
5.4.6.1	variations de la température opérative de l'appartement PP durant la période estivale.....	179
5.4.6.2	variations de la température opérative de l'appartement BPF durant la période estivale.....	180

5.4.6.3 variations de la température opérative de l'appartement PP durant la période hivernale	181
5.4.6.4 variations de la température opérative de l'appartement BPF durant la période hivernale	181
Conclusion	183
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	185
BIBLIOGRAPHIE.....	192
LISTES DES ANNEXES	211

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Ralentissement de la croissance de la consommation mondiale d'énergie (+ 0,6%), bien en deçà de sa tendance historique 2019	13
1.2	Consommation de gaz & de l'électricité (TWh) de 1990 à 2019	14
1.3	Répartition de la consommation finale par secteur d'activité et par forme d'énergie 2017	15
1.4	Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie et par type de logement année 2017.....	16
1.5	Répartition de la consommation du secteur tertiaire par type d'énergie et par branche année 2017	16
1.6	De gauche à droite, laine de verre, laine de roche, et cellulose	21
1.7	Image de microscopie électronique à balayage de matrices de polystyrène sphérique (PS) (gauche), de petites particules de silice (médianes) revêtues autour d'un gabarit de PS sphérique et de nanosphères creuses de silice (à droite) après élimination de PS.....	21
1.8	Structure cellulaire du liège (a) sens transversal (b) sens longitudinal...	22
1.9	De gauche à droite, polystyrène EPS, polystyrène XPS, liège, et polyuréthane.....	22
1.10	Comparaison de la conductivité thermique de l'aérogel avec d'autres matériaux d'isolation thermique connus sur le marché.....	23
1.11	De gauche à droite, laine de mouton, liège et fibre de coco, ouate de cellulose, et chanvre.....	23
1.12	Balles de paille constituant le mur de remplissage de l'écocentre de Kerkenes	24
1.13	Noyau et fibres de noix de coco.....	25
1.14	Morphologie du palmier dattier	26
1.15	(Gauche) structure VIP typique montrant les principaux composants au milieu une comparaison de l'épaisseur de résistance thermique équivalente de l'isolation thermique traditionnelle et VIP. (Source : réadapter par auteur) et (à droite) Thermographie d'une façade VIP vue de l'extérieur.....	29
1.16	Gauche. Aérogels en combinaison avec des perles de verre opaques nano gel. Granulé nano gel translucide. À droite Échantillons transparents d'aérogel réalisés par séchage supercritique à haute température et séchage supercritique à basse température (bas)	30
1.17	Schématisation de la structure interne d'un aérogel	30
1.18	Micrographies de matériaux de changement de phase nano-encapsulés (MCP)	31
1.19	a) Modèle conceptuel d'un NIM à base de nanosphères creuses (à gauche), image TEM des nanosphères de silice creuses réelles (à droite). b) Le développement des VIP à NIM.....	32
1.20	Gauche Le développement du VIP au VIM et à droite Création envisagée d'un matériau d'isolation sous vide en tant que matériau à l'état solide se gonflant de l'intérieur pendant la formation et l'expansion ultérieure d'une structure de pore interne.....	32
1.21	Développement du panneau isolant de vide au matériel d'isolation de gaz.....	33
1.22	Procédés d'isolation interne, externe, interne, et répartie.....	35
1.23	Comportement thermique selon composition de l'enveloppe extérieure	36

1.24	Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment.....	38
2.1	Formes de nanorevêtement typiques.....	44
2.2	a) La photocatalyse aide l'auto-nettoyage et l'activité antibactérienne réduit les agents polluants dans l'air. b) Les revêtements minces de dioxyde de titane présentent une action photocatalytique et hydrophile	44
2.3	a) Plante Lotus avec son autonettoyant naturel. b) Distinction de comportement de la gouttelette d'eau en contact avec la surface conventionnelle et la surface rugueuse hydrophobe à effet de lotus	45
2.4	Revêtement en nanoparticule hydrophobe assurant la durabilité de la peinture blanche du musée Ara Pacis à Rome	46
2.5	Revêtement en nanoparticule hydrophobe assurant la durabilité de la peinture blanche d'un bâtiment commercial en Croatie	46
2.6	Revêtement en carreaux de céramiques assurant la durabilité de la façade photocatalytique d'un centre Ali MAC en USA	47
2.7	Revêtement photocatalytique en ciment blanc composé avec des nanoparticules de marbre et dioxyde de titane préservant l'aspect de l'enveloppe de l'église Dio Padre Misericordioso.....	47
2.8	Nano Concret est essentiellement un Nano-insulation-Materials (NIM) dont les propriétés de construction correspondent ou dépassent celles du béton source	49
2.9	a) Nanotubes de carbone (CNT) b) Feuille de graphite de nanotubes....	50
2.10	Seri Wawasan bridge, Putrajaya (Malaysia's administrative centre)	51
2.11	Façade d'une maison pour personnes âgées à Falveng en Suisse GLASS Crystal.....	52
2.12	Revêtement des façades avec des nanofibres et nanoclayes de carbone composites bois-plastique améliorent la rigidité	53
2.13	La nanotechnologie et son application sur les matériaux d'isolation thermique haute performance	54
2.14	Thermographie d'une façade extérieure d'un bâtiment isolé thermiquement par un (VIP) en Seitzstrasse à München.....	55
2.15	L'aérogel de silice possède une structure dendritique avec de petites particules sphériques de 2 à 5 nm fusionnées en groupe pour former une structure tridimensionnelle très poreuse avec des pores mesurant moins de 100 nm et une conductivité thermique est de l'ordre de $0,010W.m^{-1}.K^{-1}$	56
2.16	a) Comparaison entre la conductivité thermique de l'aérogel de silice et celle des isolants synthétique, b) Conductivité thermique de l'aérogel de silice en fonction de la masse volumique apparente.....	56
2.17	Application in situ du plâtre à base d'aérogel	58
2.18	Conductivité thermique des isolants thermiques courants.....	58
2.19	Classification des matériaux à changement de phase	59
2.20	Les MCPs microencapsulés : (a) état liquide et état poudre (b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules.....	59
2.21	Application in situ du plâtre à base d'aérogel	60
2.22	Nano-isolant à base de bois : Représentation schématique du phénomène de conduction thermique	62
2.23	Etude comparative sur l'aérogel entre le rapport de la conductivité thermique en fonction de la densité	62
2.24	Palmier dattier et Fibres de palmier dattier.....	63

2.25	Dessin schématique de (A) cellulose nanocristalline (NCC) et (B) cellulose nanofibrillée (NFC)	64
2.26	Conductivité thermique des isolants thermiques organiques.....	67
2.27	Contrainte-déformation obtenues à partir des essais de traction à base de l'ulve du palmier dattier et d'un latex de caoutchouc naturel (T = 25 °C)	68
2.28	Conductivité thermique des composites Diffusivité thermique des composites	68
2.29	Corrélation entre la conductivité thermique, la résistance mécanique et la densité de la maille DPF	69
2.30	Image MEB de l'échantillon amélioré par rapport à l'échantillon de base. (a) Mélange de béton de base, (b) Echantillon renforcé par 50/50 de graines de datte	70
2.31	Détermination du point de charge zéro des graines de palmier dattier...	71
2.32	Comparaison entre l'évolution expérimentale de la conductivité thermique en fonction du rapport de masse des fibres et de la conductivité thermique avec les modèles théoriques (modèles en série, parallèle, Krischer et Wily et Southwick).....	71
2.33	Pourcentage volumique de fibres et de la lignine dans la palme	72
2.34	Conductivité thermique et diffusivité thermique relative de différentes variétés de matériaux de palmier dattier : échantillons de pétiole (P) et bouquet (B) de Deglet-Noor (DN), Mechdeglet (MD) et Elghers (EG).	73
3.1	Carte de l'Algérie indiquant les différentes zones avec des palmiers dattiers.....	76
3.2	Production de dattes en Algérie 2000-2017.....	76
3.3	Présentation de la morphologie de datte	78
3.4	Noyau de dattes du palmier de dattier	78
3.5	Synoptique de la fabrication du ciment cas de Hamma Bouziane Constantine	82
3.6	Schéma du principe de broyage des poudres ; (a) : Fracture ; (b) : Soudage ; (c) : La poudre agglomérée	84
3.7	Schéma du broyage horizontal des fines (μm) et vertical des ultrafines(nm).....	86
3.8	Diagramme indiquant le processus de préparation de la poudre ultrafine des grains de datte.....	86
3.9	Affinement et miniaturisation de la taille des grains en fragment, puis en particules ensuite en poudre microscopique ultrafine $\leq 80 \text{ nm}$	87
3.10	Etapes de fabrication de diverses pastilles (monolithe pure et monolithe composé).....	88
3.11	Visualisation métallographique des pastilles	88
3.12	Observation par microscope optique des pastilles issues de ciment portland, noyaux de datte et de nanocomposite	89
3.13	Panalytical X Pert Pro diffractometer (λ) $\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$ (5° - 100°) ..	90
3.14	Principe du diffractomètre dans la géométrie de Bragg-Brentano	90
3.15	15 Diagramme des Rayons X du poudre de noyau de datte ultrafine $\leq 80\text{nm}$	91
3.16	Spectromètres infrarouge FT-IR - 6300 dispose une gamme spectrale de 12400 spectres et une résolution de 0.4 à 0.07 cm^{-1}	91
3.17	Schéma de fonctionnement de l'appareil FT-IR.....	92

3.18	Photographie de l'appareil FEI Magellan 400 XHR (SEM) équipé d'un détecteur EDS (80 mm ²) et une résolution optimum WD - 0.8 nm pour 15 kV et Schéma de principe d'un (MEB). b) Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur EDS.....	93
3.19	Images MEB de la microstructure d'une pastille de couleur Marron en nanofibre des noyaux de datte	93
3.20	Images MEB de la microstructure d'une pastille de couleur grise du ciment.....	94
3.21	Spectre EDX du nanofibre de datte	95
3.22	Montage expérimental sur la conduction thermique linéaire avec représentation graphique du profil de température : 1 dispositif de chauffage, 2 objets de mesure, 3 élément réfrigérant ; points de mesure x1-x3 et x7-x9	96
3.23	Mesure La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (TGA).....	97
3.24	Boîte pour mesures de conductivité et de diffusivité thermique	98
3.25	Etape de mesure de la masse volumique apparente d'une poudre de noyaux dattier	99
3.26	Processus de mesure de la densité en utilisant le pycnomètre et le bain thermostaté.....	100
3.27	Mesure de la porosité des éprouvettes composées en ciment et nanofibre cellulosique des noyaux de datte à l'aide d'un pycnomètre sous-vide Cooper 10L	101
3.28	Processus d'élaboration des éprouvettes selon la norme NF 196-1.....	102
3.29	Schéma pour le test de résistance à la traction par flexion de trois points	103
3.30	Schéma pour le test de la résistance à la compression.....	103
4.1	Cristallographie au rayon X (DRX) des constituants de la nanopoudre de noyau de palmier dattier.....	106
4.2	Diagramme des rayons X du Ciment portland CPJ-CEM I 42.5	107
4.3	DRX du Sable normalisé CEN	108
4.4	Spectre FT-IR des nanofibres cellulosique des noyaux de palmier dattier	110
4.5	Spectre FT-IR d'un ciment CPJ CM I synthétique.....	112
4.6	Spectre FT-IR d'un ciment CPJ CM I, dopé de 15% des nanofibres cellulosique de noyau dattier	113
4.7	Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure des constituants de nanofibre de noyau de palmier dattier à échelle égale à : (a) 100µ m, (b) 20 µm.....	114
4.8	Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure des constituants de poudre de ciment CPJ 42.5 à échelle égale à : (a) 30µ m, (b) 20 µm	116
4.9	Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure de 15% des constituants de nanofibre de noyau de palmier dattier dopés avec du ciment à échelle égale à : (a) 50µ m, (b) 100 µm	117
4.10	Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (Carbone et oxygène), de faible pics (calcium et silicium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium, clore, fer et l'aluminium)	118
4.11	Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (calcium et silicium), de faible pics (Carbone, oxygène, fer et	

	l'aluminium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium et chlore)	119
4.12	Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (calcium et silicium), de faible pics (Carbone, oxygène, fer et l'aluminium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium et chlore)	121
4.13	L'analyse thermogravimétrique (ATG) des nanofibres des noyaux de palmier dattier	124
4.14	L'analyse calorimétrique (DSC) des nanofibres des noyaux de palmier dattier	126
4.15	Ratio de dopage aux nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier avec une matrice de ciment	127
4.16	Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques.....	129
4.17	Evolution de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques (NFC _n).....	131
4.18	Evolution de la chaleur spécifique volumique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques (NFC _n)	132
4.19	Corrélation entre conductivité thermique et densité d'un nanocomposite en fonction de différentes concentrations nanofibres cellulosiques (NFC _n).....	133
4.20	Processus d'élaboration des éprouvettes en matrice cimentaire combinée avec différentes concentrations en nanofibres cellulosiques (NFC _n).....	135
4.21	Mesures expérimentales de la résistance à la compression élaborées par l'appareil hydraulique Matest	136
4.22	Résistance à la compression en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges	137
4.23	Mesures expérimentales de la résistance à la traction par flexion élaborées par le banc d'étude des structures ERM	138
4.24	Résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges.....	139
4.25	Diagramme thermomécanique illustre la corrélation entre conductivité thermique, résistance mécanique et densité.....	141
4.26	Evolutions de la masse en fonction de différentes concentrations en nanofibre cellulosiques	141
4.27	Perte de masse en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges	142
5.1	Plan d'aménagement de la nouvelle ville ALI MENDJELI	146
5.2	Plan masse échelle 1/500 des bâtiments à expérimenter	146
5.3	Plan logement dernier niveau (F4) en structure conventionnelle (PP) ...	147
5.4	Plan logement dernier niveau (F4) avec structure préfabriquée en béton (BPF).....	148
5.5	Détails constructifs de l'enveloppe extérieure et la terrasse des logements investigués.	149
5.6	Station météo Vantage Pro 2	151
5.7	TROTEC BL30 enregistreur de température et d'humidité.....	152
5.8	Thermocouple électronique des prises de mesures de températures surfaciques. (Ebro TTX 100).....	152

5.9	Façade principale et postérieure du logement en structure préfabriquée depuis la rue principale et le parking	153
5.10	Façade principale et postérieure du logement en structure conventionnelle depuis l'axé principale et le parking	153
5.11	Caméra thermique avec vision nocturne (TROTEC EC 020 040)	154
5.12	Thermographie à infrarouge au niveau des bâtiments diagnostiqués	156
5.13	Variation de la température de l'air intérieure et humidité relative du logement en structure poteau-poutre (PP) en période d'été (20-21-22, Aout 2020)	157
5.14	Variation de la température de l'air intérieure et humidité relative du logement en structure poteau-poutre (BPF) en période d'été (20-21-22, Aout 2020)	158
5.15	Comparaison des variations des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période (20-21- 22 aout 2020) entre l'appartement (PP) et (BPF)	160
5.16	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement PP.....	161
5.17	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement BPF.	162
5.18	Comparaison des variations des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 entre l'appartement (PP) et (BPF).	163
5.19	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 20-22 Aout 2020 pour l'appartement PP.	164
5.20	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 20-22 Aout 2020 pour l'appartement BPF. .	165
5.21	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement PP.	168
5.22	Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement BPF.	169
5.23	Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement PP (cas réel)	171
5.24	Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement BPF (cas réel).....	172
5.25	Comparaison des consommations mensuelles du chauffage et climatisation entre cas réel et cas amélioré (PP).....	173
5.26	Comparaison des consommations mensuelles du chauffage et climatisation entre cas réel et cas amélioré (BPF).	174
5.27	Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement BPF (Etat brut, 3 %,5%,10%,15% de nano composite).	177
5.28	Comparaison de la consommation mensuelle du chauffage et climatisation entre les différents cas d'amélioration en nanofibre cellulosique de noyau de dattier pour les deux types de logements (BPF & PP).....	179

5.29	Variation de la température opérative de pour le cas existant et réel de l'appartement PP pendant l'été	180
5.30	Variation de la température opérative de pour le cas existant et réel de l'appartement BPF pendant l'été	180
5.31	Variation de la température opérative de pour le cas existant et réel de l'appartement PP pendant l'hiver	181
5.32	Variation de la température opérative de pour le cas existant et réel de l'appartement BPF pendant l'hiver.....	182

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
3.1	Caractéristiques morphologiques des noyaux de dattes étudiés	79
3.2	Composition chimique de noyaux de dattes	79
3.3	Composition granulométrique du sable normalisé (CEN).....	82
3.4	Quantité des constituants en nanocomposants (g.mm ⁻³).....	96
3.5	Quantité du composite (kg.m ⁻³)	98
3.6	Condition d'essai.....	98
3.7	Quantité de composite (kg.m ⁻³).....	102
4.1	Taille et souche des constituants des nanofibres de noyaux de palmier dattier	106
4.2	Composition minéralogique du clinker du ciment utilisé	107
4.3	Principale bande d'absorption infra-rouge du nanofibres cellulosique du palmier dattier	110
4.4	Composition chimique des constituants des nanofibres de noyau de datte	118
4.5	Composition chimique des constituants de la poudre du ciment CPJ 42	120
4.6	Composition chimique des constituants de la poudre de noyau de datte	121
4.7	Compositions des échantillons relatives aux essaies mécaniques et thermiques	135
5.1	Matériaux constituant l'enveloppe des deux appartements et leurs caractéristiques.	150
5.2	Variation de la température (intérieure, surfacique intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement PP durant la période du 20 au 22 Aout 2020	167
5.3	Variations des températures mesurées et simulées des deux appartements (PP) et (BPF) en période hivernale 29-31 Décembre 2020	170

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviations

λ	Conductivité thermique	$W/m^{-1}.K^{-1}$
C	Capacité thermique	$J/m^3. K$
ρ	Masse volumique	kg/m^3
α	Diffusivité thermique	$(m^2/s).10^{-6}$
U	Coefficient de transfert thermique	$W/m^2 .K$
R	Resistance thermique	$m^2 K/ W$
M	Masse	g
e	Épaisseur	mm
T	Ratio	(%)
tmt	Température météo	$^{\circ}C$
te	Température air extérieure	$^{\circ}C$
tse	Température surfacique extérieure	$^{\circ}C$
ts _e	Température surfacique extérieure de toiture	$^{\circ}C$
ti	Température intérieure de l'air	$^{\circ}C$
ts _i	Température surfacique intérieure	$^{\circ}C$
ts _i	Température surfacique de toiture	$^{\circ}C$
MEB	Microscope Electronique de Balayage	
FT-IR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier	
EDX	Spectrométrie à Energie Dispersive	
DRX	Diffraction des rayons (X)	
ATG	Analyse Thermique Gravimétrique	
DSC	Calorimétrie Différentielle à Balayage	

RESUME

L'industrie des nanotechnologies est l'un des domaines technologiques les plus passionnants pour l'avenir de l'humanité. La recherche en nanotechnologie a ouvert des perspectives et des applications très sophistiquées en raison des caractéristiques nanométriques des matériaux. La disponibilité et l'économie des noyaux de palmier dattier semblent constituer un excellent potentiel pour apporter une réponse réelle aux nouveaux matériaux de construction durables. L'objectif de cette étude est de déterminer la faisabilité de l'utilisation de nanofibres cellulosiques produites à partir de noyaux de palmier dattier comme substitut de matériaux isolants dans le secteur de la construction. Nous entreprenons une étude de faisabilité pour examiner la viabilité de l'utilisation d'un nouveau nanomatériau biocomposite (NFC_n) comme isolant thermique pour les bâtiments.

Une première étape a consisté en des travaux réalisés au laboratoire pour développer des nanomatériaux composés de biomatériaux de nanofibres cellulosiques provenant de fibres de palmier dattier par le procédé de mécanosynthèse avec broyage planétaire, suivie de la caractérisation morphologique et structurale de ce type de nanomatériaux ainsi la détermination de la nanostructure et de la composition chimique. Des dispositifs scientifiques ont été utilisés pour cette expérience, tels que la spectroscopie infrarouge de Fourier (FT-IR), la microscopie électronique (MEB), la spectroscopie de dispersion d'énergie (EDX) et l'analyse par diffraction des rayons X (XRD).

La deuxième étape concerne le dopage de la matrice cimentaire par différents ratios (3-5-10-15 %) de nanofibres cellulosiques et vérifier leurs propriétés thermo physiques et mécaniques des nanofibres cellulosiques, puis l'évaluation de la faisabilité technique de l'incorporation de ce nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier pour constituer un matériau nanocomposite léger protégeant l'enveloppe extérieure des bâtiments des radiations solaires.

Ensuite des mesures in situ se sont déroulées sur deux périodes, l'une estivale et l'autre hivernale a permis de lire et de comparer la performance de l'enveloppe architecturale en béton armé et l'autre en brique creuse sans isolation. Puis une simulation par le biais de "TRNSys17" a permis de valider les résultats de terrain et de vérifier l'amélioration de leur performance en utilisant le nanomatériau comme isolant sur la face extérieure des deux bâtiments et d'évaluer l'effet du dopage de la matrice cimentaire de l'enveloppe architecturale en béton armé par différents ratios.

Les nanofibres de cellulose de palmier dattier présentent la meilleure efficacité énergétique lorsqu'elles sont utilisées comme additif à l'enveloppe extérieure en béton armé ou comme isolant thermique pour les deux enveloppes d'appartement. Les résultats ont confirmé les hypothèses établies à savoir la réduction de la conductivité thermique du nanocomposite et la réduction de consommation énergétique jusqu'à 75%. Enfin, nous soulignons que les nanofibres cellulosiques développées dans ce travail sont entièrement biosourcées et ont donc un potentiel important en termes d'isolation thermique, mais aussi pour une large gamme d'autres applications.

Mots-clés : Réhabilitation thermique ; Nanofibre cellulosique de noyau du palmier dattier ; caractérisation structurale et morphologique ; enveloppe nanotechnologique ; isolation thermique ; résistance mécanique ; Performance énergétique.

ABSTRACT

Nanotechnology is one of the most fascinating technical frontiers for humanity's future. Due to the nanometric properties of materials, nanotechnology research has opened up very complex viewpoints and applications. Date palm kernels' availability and economics seems to provide an outstanding opportunity to contribute to the development of new sustainable construction materials. The purpose of this research is to assess the feasibility of employing date palm kernel-derived cellulosic nanofibers as a replacement for insulating materials in the construction industry. We are doing a feasibility study to determine the possibility of employing a novel biocomposite material (NFCn) as a building thermal insulator.

A first step consisted of work carried out in the laboratory to develop nanomaterials composed of cellulosic nanofiber biomaterials from date palm fibers by the process of mechanosynthesis with planetary grinding, followed by the morphological and structural characterization of this type of nanomaterial as well as the determination of the nanostructure and chemical composition. Scientific devices were used for this experiment, such as Fourier Infrared Spectroscopy (FT-IR), Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDX), and X-ray Diffraction (XRD) analysis.

The second step involves doping the cementitious matrix with different ratios (3-5-10-15%) of cellulosic nanofibers and to verify their thermo-physical and mechanical properties of cellulosic nanofibers, followed by the assessment of the technical feasibility of the integration of these cellulosic nanofibers of date palm to constitute a lightweight nanocomposite material protecting the external envelope of buildings from solar radiation.

Furthermore, in-situ measurements were performed over two periods, one in summer and the other in winter, in order to read and compare the performance of the reinforced concrete architectural envelope and the other hollow brick without insulation. Afterwards, a simulation via "TRNSys17" enabled to validate the field results and to check the improvement of their performances through using the nanomaterial as an insulator on the exterior face of both buildings and to evaluate the impact of doping the cementitious matrix of the reinforced concrete architectural envelope with different ratios.

The date palm cellulose nanofibers show the best energy efficiency when used as an additive to the reinforced concrete outer shell or as thermal insulation for both apartment envelopes. The results confirmed the established hypotheses that the thermal conductivity of the nanocomposite would be reduced and the energy consumption would be reduced up to 75%. Finally, we emphasize that the cellulosic nanofibers developed in this study are fully biobased and therefore have significant potential in terms of thermal insulation, but also for a wide range of other applications.

Keywords: Thermal rehabilitation; nanocellulose fibers from date palm kernel; structural and morphological characterization; nanotechnology envelope; thermal insulation; mechanical strength; Energy performance.

ملخص

وفي الوقت الراهن، تزدهر البحوث في مجال تكنولوجيا النانو خصوصا في قطاع الطاقة. سوف تساهم في حل القضايا المناخية والبيئية من خلال تطوير المواد التي توفر الطاقة، تحد من النفايات، وانبعاثات الغازات المتسببة في الاحتباس الحراري. المواد النانوية التي تعزز واجهات المباني قادرة على التخفيف من آثار الظروف المناخية وزيادة كفاءتها في استخدام الطاقة. تسمح المكونات النانوية بتطوير أحدث المواد المستخدمة في البناء مثل العوازل الحرارية وطلاء التنظيف الذاتي. ونظرا لخصائصها الميكانيكية والحرارية وانخفاض كثافتها، أصبحت المواد النباتية الآن خيارا واعدة لإنتاج المواد النانوية نظرا لوفرة المعروض من المنتجات الثانوية لنخيل التمر، التي يمكن استخدامها لتعزيز المواد النانوية المركبة والعوازل النانوية.

الخطوة الأولى من العمل الذي تم تنفيذها في المختبر لتطوير المواد النانوية المستخلصة من ألياف النانو السلولوزية الحيوية من ألياف نواة التمر من خلال عملية التخليق الميكانيكي مع طحن الجزيئات، تليها التوصيف المورفولوجية والهيكلية بالإضافة إلى تحديد البنية النانوية والتركيب الكيميائي. تم استخدام الأجهزة العلمية لهذه التجربة، مثل مطيافية فورييه للأشعة تحت الحمراء (FT-IR)، الفحص المجهر الإلكتروني (MEB)، التحليل الطيفي المشتت للطاقة (EDX)، والتحليل باستعمال الأشعة السينية (XRD).

تشمل الخطوة الثانية إضافة نسب مختلفة من الألياف النانوية السلولوزية على التوالي (3-5-10-15 في المائة) في المصفوفة الأسمنتية والتحقق من خصائصها الحرارية الفيزيائية والميكانيكية للألياف النانوية السلولوزية، يليها تقييم جدوى تقنية دمج هذه الألياف النانوية السلولوزية من نوى نخيل التمر لتشكيل مادة نانوية خفيفة الوزن تحمي المغلف الخارجي للمباني من الإشعاع الشمسي.

وعلاوة على ذلك، أجريت قياسات ميدانية على مدى فترتين لكلتا الشقتين، إحداهما في الصيف والأخرى في فصل الشتاء، من أجل قراءة ومقارنة أداء المغلف المعماري الخرساني المسلح والاجور المجوف الآخر دون عزل. بعد ذلك، مكنت المحاكاة عبر "TRNSys17" من التحقق من صحة النتائج الميدانية وإثبات من تحسين أدائها من خلال استخدام المواد النانوية كعازل على الوجه الخارجي لكلا المبنىين وتقييم تأثير تركيز المصفوفة الأسمنتية للمغلف المعماري الخرساني المسلح بنسب مختلفة.

تظهر ألياف السليلوز النانوية لنواة نخيل التمر أفضل كفاءة في استخدام الطاقة عند استعمالها كمادة مضافة إلى الغلاف الخارجي للخرسانة المسلحة أو كعازل حراري لكل من الاغلفة الخارجية لكلتا الشقتين. أثبتت النتائج الفرضيات الراسخة بأن الموصلية الحرارية للمركب النانوي ستتناقص وسيتم تقليل استهلاك الطاقة حتى 75%. أخيرًا، نؤكد أن الألياف النانوية السلولوزية المطورة في هذه الدراسة تعتمد على أساس بيولوجي بالكامل وبالتالي لها إمكانات كبيرة من حيث العزل الحراري، وتشمل مجموعات واسعة من التطبيقات الانشائية الأخرى.

الكلمات المفتاحية: إعادة التأهيل الحراري؛ ألياف نانو سليلوز من نواة نخيل التمر؛ التوصيف البنيوي والمورفولوجي. مغلف النانو تكنولوجي؛ العازل الحراري؛ المقاومة الميكانيكية؛ كفاءة الطاقة.

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Introduction

Les ressources naturelles sont devenues plus précieuses et l'énergie est donc devenue un élément de plus en plus essentiel de la prospérité mondiale. Le monde de l'énergie traverse actuellement une série d'événements tumultueux. Bien sûr, la récente baisse significative du prix du pétrole, ainsi que les questions relatives à l'énergie nucléaire et au gaz de schiste, ont ajouté un élément intense au débat sur le réchauffement climatique, la transition énergétique et même le nucléaire.

Le constat de l'épuisement graduel des réserves pétrolières a incité au cours des dernières années les acteurs du secteur énergétique à abandonner les matériaux synthétiques au profit des matériaux issus de ressources renouvelables. Les recherches menées sur les matériaux innovants présentant des performances énergétiques accrues ont constitué une opportunité incontournable pour l'environnement, rapport du CSTB [1]. Par conséquent, il est nécessaire de faire émerger des alternatives durables pour réduire la consommation des énergies fossiles. L'un des principaux défis à relever dans le domaine de la durabilité environnementale et énergétique dans un avenir proche est la création de nouveaux matériaux de construction organiques n'ayant aucun impact sur l'environnement et présentant des propriétés thermiques et physiques similaires aux matériaux de construction industrialisés. Par ailleurs, l'amélioration des caractéristiques intrinsèques des matériaux composant l'enveloppe des bâtiments est un objectif clé pour la réduction de la consommation énergétique et celle des émissions de gaz à effet de serre.

Le développement durable dans le domaine de la construction est désormais devenu une problématique importante à l'heure actuelle. Dans un passé récent, la construction se limitait à l'utilisation de matériaux de construction régis par des exigences techniques propres au secteur et conformes aux caractéristiques techniques du projet. À l'heure actuelle, de nouveaux critères de base pour la gestion des projets de construction ont été imposés, notamment les conditions environnementales et les limites inhérentes à la gestion des déchets. Dans le secteur de la construction, la tendance actuelle est donc de préconiser et de privilégier les produits composites qui peuvent être utilisés à des fins et des applications diverses. Désormais, le fabricant vise non seulement la qualité des matériaux, mais vise également à améliorer les qualités thermiques des matériaux et leur impact sur l'environnement.

Le domaine de la construction est celui qui constitue le principal gisement d'économies d'énergie à vocation immédiate et devant les enjeux actuels, la valorisation des enveloppes bioclimatiques est indispensable par son insertion dans une approche de maîtrise de l'énergie. Il est essentiel de mieux appréhender la performance énergétique des différents composants de l'enveloppe et des différents systèmes afférents. Cette architecture bioclimatique se caractérise par sa capacité à limiter la demande importante liée à la consommation énergétique du bâtiment afin de minimiser les impacts néfastes sur l'environnement. Depuis plusieurs années, l'Algérie mène une réflexion sur l'évolution de la gestion des ressources énergétiques. Le secteur énergétique a connu un essor important ces dernières années, le plaçant au centre d'une problématique majeure, celle du développement durable. Confronté à une situation économique critique en raison de la chute des prix du pétrole, le gouvernement algérien a orienté sa politique vers la maîtrise de l'énergie en adoptant des démarches de financement concrètes et en instaurant le programme national des énergies nouvelles et renouvelables.

Généralement, la conception de l'enveloppe d'un bâtiment par les architectes répond à de nombreuses considérations, dont les plus importantes sont d'ordre structurel, contextuel, économique et esthétique. Avant la crise pétrolière de 1973, l'efficacité thermique de la façade des bâtiments n'était pas prise en compte comme un critère prioritaire dans la phase de conception d'un bâtiment. En revanche, des dispositions et des conditions ont été envisagées et sont en vigueur pour améliorer la performance thermique des matériaux composant l'enveloppe du bâtiment. L'amélioration du comportement thermique des enveloppes architecturales est impérative pour réduire la consommation d'énergie nécessaire aux nouvelles constructions et aux anciens bâtiments à rénover. Les solutions dites passives sont à privilégier dans cette perspective.

Depuis 1974, les réglementations thermiques (RT) se sont succédées en Europe. Ils ont réduit la consommation énergétique moyenne d'une maison neuve d'environ 370 kWh / m² / an à moins de 250 kWh / m² / an au cours des 30 dernières années. Ainsi, depuis 2012, la (RT) impose que toute construction neuve soit classée « Maison Basse Consommation » (BBC), avec une consommation de 50 kWh / m² / an ; Cette exigence actuelle doit d'abord être généralisée aux bâtiments existants d'ici 2020 [2].

Le document technique réglementaire (DTR) apporte une première solution aux difficultés liées à la performance thermique du bâtiment. La réglementation sur laquelle repose ce DTR est de limiter les déperditions thermiques des constructions en définissant la valeur limite à ne pas franchir. Le respect de ce seuil pourrait permettre des économies de 20 à 30 % sur la consommation de chauffage des bâtiments [3], sans sacrifier le confort des occupants. Afin de développer les futures dispositions réglementaires visant une efficacité énergétique d'environ 40 % [4], de nouveaux paramètres de référence devront être imposés.

La régulation thermique algérienne (DTR) se présente sous la forme de deux parties techniques réglementaires, la première traite des déperditions de chaleur en hiver, tandis que la seconde concerne les apports de chaleur en été. L'objectif est de mettre en place un code de calcul qui intègre les exigences de la réglementation thermique algérienne et vérifie la conformité d'un bâtiment à la réglementation thermique algérienne, ainsi que l'élaboration d'un bilan thermique qui détermine les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été, et les compare à des valeurs de référence.

La mise en œuvre de cette réglementation thermique devait inéluctablement aboutir à l'isolation thermique des nouveaux bâtiments. Cependant, à l'heure actuelle, ce règlement n'est pas encore entré en vigueur, à cause de l'inexistence d'organisme chargé de vérifier son application, mais aussi en raison du manque d'outils opérationnels permettant aux bureaux d'études d'intégrer les exigences de ce règlement dans la conception des bâtiments. Pour l'application des dispositions thermiques, il est indispensable de soumettre l'étude thermique à l'approbation des organismes de contrôle spécialisés dans le domaine, au même titre que l'étude de génie civil.

La réhabilitation énergétique des constructions passe désormais par le développement de nouveaux matériaux et composants aux performances thermiques supérieures à celles des matériaux actuels. Pour relever ce défi, de nombreux projets de recherche ont été initiés au niveau international, visant à harmoniser les normes et les performances des matériaux, comme dans le programme EBS (Energie pour le Bâtiment et les Sociétés) de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)). En outre, la réhabilitation thermique de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment ancien doit être effectuée après une évaluation approfondie de ses qualités thermiques. Dans le but de déterminer avec précision les économies d'énergie induites par la réhabilitation de l'enveloppe d'un bâtiment, des scénarios de simulation

horaire détaillés doivent être utilisés, car le transfert de chaleur dans les bâtiments est un phénomène relativement complexe reposant sur de multiples mécanismes.

Les nanotechnologies semblent être la technologie la plus passionnante pour l'humanité à l'avenir. La recherche sur les nanotechnologies ouvre de nouveaux horizons avec des applications jusqu'alors inimaginables en raison des propriétés uniques de la matière à l'échelle nanométrique. Actuellement, les recherches et le développement des nanotechnologies sont en plein essor dans le secteur de l'énergie. Elles peuvent contribuer à résoudre les problèmes climatiques et environnementaux en créant des matériaux et des processus plus ciblés qui permettent d'économiser l'énergie, de minimiser les déchets et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les nanotechnologies, qui s'appuient sur les nanosciences, visent à concevoir et à produire des structures de dimensions comprises entre 1 et 100 nanomètres, dotées de propriétés physiques et fonctionnelles fondamentales pouvant être traitées, manipulées, et ainsi déterminer les moyens à utiliser pour les élaborer, les modifier et les contrôler à l'échelle atomique et moléculaire. Le développement de nouvelles technologies, notamment des nanotechnologies, constitue un problème permanent pour ceux qui tentent de les rendre accessibles au grand public, transparentes dans leurs implications, et donc sujettes à débat. En réalité, il y a de plus en plus de produits à base de nanomatériaux à cause de leurs intérêts escomptés dans plusieurs secteurs tels que le textile, l'informatique, la construction, l'industrie automobile et la médecine. Néanmoins, les consommateurs et les utilisateurs professionnels manquent d'informations à leur sujet.

En effet, l'introduction des disciplines nanotechnologiques et leur intégration dans une grande variété de domaines ont contribué au développement de technologies telles que les ordinateurs et la microélectronique en augmentant la puissance et la capacité de stockage de très petits composants électroniques. En outre, l'industrie sanitaire bénéficie de meilleures technologies de diagnostic médical et de procédures thérapeutiques ciblées. Les nanotechnologies sont utilisées pour créer de nouveaux matériaux et accroître leur efficacité énergétique. Lorsqu'il est utilisé pour la gestion de l'énergie dans les bâtiments, ce type de nanomatériau de haute technologie présente des qualités physiques et thermiques très performantes.

Dans ce contexte, la contribution des matériaux de construction à l'influence de l'environnement bâti est de plus en plus importante. En conséquence, la qualité du matériau doit être augmentée pour satisfaire aux critères de l'écoconstruction [5]. L'utilisation de matériaux à faible énergie grise et/ou de matériaux de construction biosourcés pour atténuer les émissions de carbone sont deux possibilités pour réduire l'empreinte carbone des matériaux de construction [6]. En raison de leurs avantages environnementaux, de nouveaux matériaux biosourcés sont développés à une cadence accélérée. Pour mieux comprendre ce phénomène, prenons l'exemple du béton composé avec des fibres végétales. Récemment, une nouvelle voie de recherche a été empruntée dans le but de générer des matériaux organiques super-isolant à base de fibres cellulosiques [7]. En conséquence, la conception de bâtiments efficaces énergétiquement requiert des isolations adéquates.

Les éco-matériaux sont idéals s'ils proviennent de ressources renouvelables et de disponibilité locale. Ils permettent de maintenir le confort de l'intérieur du bâtiment en économisant de l'énergie grâce à leurs caractéristiques physiques et thermiques. Les produits polymères biosourcés dérivés de matières premières agricoles renouvelables et de la biomasse peuvent former la base d'une gamme de produits durables et éco-efficaces capables de concurrencer et de conquérir les marchés actuellement dominés par les matières dérivées du pétrole. L'utilisation de la paille de diverses plantes comme matériau de renforcement dans les matériaux de construction remonte aux premiers siècles. La paille contient entre 30 et 40 % de cellulose [8]. La cellulose joue un rôle essentiel en tant que matériau de renforcement dans la paille. En raison de leur rapport longueur/diamètre important, les nanofibres présentent une élasticité supérieure et une résistance à la traction accrue [9].

La compréhension des phénomènes physiques et thermiques impliqués dans l'enveloppe du bâtiment est fondamentale pour la mise en œuvre de solutions techniques simples et efficaces. Aujourd'hui, il existe un intérêt majeur pour l'utilisation de matériaux dérivés de nanomatériaux, tels que les aérogels organiques, les silices et les polymères [10]. Les nanomatériaux jouent un rôle de plus en plus important dans le domaine de la durabilité. Ces matériaux nanotechnologiques présentent des caractéristiques techniques originales très intéressantes qu'il convient désormais de comprendre dans le cadre des nouvelles règles de construction. Les nanotechnologies devraient donc permettre de mettre au point de nouvelles

techniques pour produire des matériaux présentant une meilleure efficacité thermique à l'avenir [11].

1.Problématique

L'Algérie dispose d'un système de logement public florissant. Le développement démographique, combiné à une accélération de l'exode rural, a entraîné une crise du logement et une explosion de logements sordides à la périphérie des grandes villes. Selon les prévisions, la pénurie de logements devrait dépasser le million d'unités. Pour combler ce déficit et assurer à la population un niveau de vie décent, le gouvernement algérien s'est lancé dans un vaste programme de construction ; 03 millions de logements sur 15 ans ; la construction de logements est devenue une priorité de la politique de développement du pays [12].

Entre 2010 et 2014, le secteur de l'habitat a bénéficié de plus de 3 700 milliards de dinars, soit 50 milliards de dollars, représentant 17,4 % du budget national pour le développement de l'habitat à travers le CSCP (programme complémentaire de soutien à la croissance) et les programmes spéciaux dans le Sud et les Hauts Plateaux [12]. Les politiques de mise en œuvre de l'Algérie ont vu se multiplier les projets de construction à grande échelle, dont aucun n'est soumis à une quelconque réglementation thermique ou de qualité énergétique. Les critères de conception architecturales sont fonctionnels, et l'aspect énergétique du projet est toujours négligé, ce qui donne lieu à des bâtiments peu attrayants et énergivores.

En Algérie, le secteur de la construction connaît un inconfort climatique considérable, ainsi que la non-adaptation des enveloppes des bâtiments au contexte climatique local, ce qui crée des conditions désagréables, ainsi qu'une utilisation excessive d'énergie au cours de l'année avec des conséquences environnementales néfastes. Le confort thermique est l'une des variables qui doivent être prises en compte lors de la conception de bâtiments pour assurer le bien-être des personnes. Il peut avoir un effet direct sur la température intérieure, ce qui a un impact sur la consommation d'énergie. Ce confort ne peut être garanti qu'en optimisant les enveloppes du bâtiment, critère d'inertie thermique, et bien sûr, en prenant en compte les paramètres de l'architecture bioclimatique dès la conception du bâtiment.

Le secteur du bâtiment en Algérie est le plus énergivore. Il représente plus de 42% de la consommation globale. Les ménages algériens consomment près de dix fois la quantité

d'électricité requise par les normes internationales et deux fois plus que la moyenne des régions du Maghreb, selon un responsable de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE). "Un ménage algérien consomme en moyenne 1 800 à 2 000 kilowattheures par an, contre 200 à 250 kilowattheures en Europe [13]. De plus, sa consommation est le double de celle d'un ménage dans les autres pays du Maghreb. Cette information a été divulguée en marge d'un séminaire sur l'efficacité énergétique des bâtiments qui s'est tenu à Alger le 2 février 2016. Selon les intervenants, cette utilisation excessive est à imputer au secteur de la construction ainsi qu'aux appareils de consommation énergivores.

Outre l'audit énergétique, qui est nécessaire pour garantir des économies d'énergie et financières, il est essentiel d'évaluer la manière dont le bâtiment est utilisé et le degré de réalisation des économies d'énergie et financières. Il s'agit donc d'un outil précieux pour faire les choix liés au projet de construction (pré diagnostic, audit énergétique, étude de faisabilité). L'audit est focalisé sur l'enveloppe du bâtiment, ce qui permet d'avoir une vision globale de l'ensemble des flux, des usages et des possibilités de modification tout en prenant en compte les aspects financiers. Ainsi, la simulation numérique permet de visualiser un large éventail de phénomènes complexes, y compris ceux dont les résultats sont nouveaux et variés, de même que des études de cas plus difficiles. Les chercheurs ne parviendront peut-être jamais à se libérer de cette technique, qui s'est incrustée dans leur quotidien. Il est difficile d'exclure totalement cette perspective.

L'enveloppe agit comme un bouclier thermique, produisant un microclimat à l'intérieur de la structure qui n'est pas affecté par les changements du climat extérieur. Les caractéristiques du filtre sont influencées par la composition de l'enveloppe. Comme les conditions internes du bâtiment ne répondent pas toujours aux exigences de confort des occupants, la réponse du bâtiment est corrigée par des systèmes de chauffage ou de climatisation.

Actuellement, le secteur de la construction comprend désormais un certain nombre de domaines techniques, dont le premier est sa structure. L'accent est mis sur les matériaux de l'enveloppe et, en particulier, sur les qualités que la nanotechnologie leur confère, le plus souvent en manipulant les caractéristiques des pores et des surfaces. Grâce à cette technologie de pointe, les nanomatériaux (NM) peuvent être intégrés dans un bâtiment à « faible consommation » ou à « énergie positive » de diverses manières, et à différente

l'échelle : individuelle, du quartier ou de la ville. L'intérêt pour les matériaux nanotechnologiques est aussi une préoccupation pour l'environnement. D'une part, les nanomatériaux légers sont d'excellents isolants thermiques grâce au volume d'air qu'ils confinent, ce qui permet de réaliser d'importantes économies d'énergie ; d'autre part, l'utilisation de granulats végétaux comme le bois contribue à une démarche de développement durable en utilisant une matière première renouvelable, par opposition aux granulats de carrière dont les ressources s'épuisent, et permet ainsi de réduire les émissions de dioxyde de carbone.

Les matériaux composites sont souvent vantés comme uniques et innovants, mais le monde naturel comprend déjà une grande variété de matériaux naturels, y compris des coques, qui sont rigides mais légères, et du bois, qui est flexible mais durable. Les nanocomposites de fibres naturelles ouvrent de vastes perspectives aux produits agricoles tout en permettant le développement de matériaux biosourcés et de technologies respectueuses de l'environnement. Par conséquent, l'intégration du bâtiment dans son sens climatique est essentielle pour activer une approche intégrée et judicieuse dans une architecture consciente des problèmes énergétiques. Le comportement thermique du bâtiment est influencé par de nombreux paramètres, par exemple, l'idée que l'enveloppe du bâtiment est une exigence et une rentabilité. La vision la plus objective du spectre des solutions d'amélioration thermique des bâtiments sera donnée par le matériel nanotechnologique.

Bien que ce domaine soit récent, les scientifiques reconnaissent aujourd'hui la révolution que les nanotechnologies ont apportée à la science, même si les motivations décrites précédemment restent d'actualité. Les préoccupations relatives à l'efficacité énergétique, à la réduction des gaz à effet de serre, à la préservation des ressources naturelles, au recyclage et à la recyclabilité, à la conservation et à la protection de la biodiversité ont dépassé ou du moins complété les soucis précédents. Les obstacles techniques qui existaient auparavant ont disparu, ce qui a permis l'émergence de nouvelles opportunités.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'amélioration du comportement thermique et l'économie d'énergie possible des enveloppes des bâtiments par l'utilisation de nouveaux procédés nanotechnologiques qui contribuent à l'amélioration de la performance énergétique des constructions.

Vu ce qui précède plusieurs questions se posent :

- Les enveloppes nanotechnologiques contribuent-elles à améliorer la performance énergétique des bâtiments ?
- La réhabilitation énergétique des bâtiments nécessite-t-elle des nanomatériaux pour atteindre une efficacité énergétique optimale ?

Ces questions permettent d'élaborer les hypothèses suivantes :

- L'utilisation des enveloppes nanotechnologiques pour les bâtiments, constitue une stratégie tangible dans l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments.
- La réhabilitation énergétique du parc immobilier existant par les nanomatériaux contribue à l'amélioration de la performance énergétique et participe à la réduction de la consommation énergétique.

2. Objectifs

L'objectif de cette recherche est de développer des bio-nanomatériaux (biosourcés) qui constituent l'enveloppe nano-tech du bâtiment, en vue d'évaluer la contribution de ces procédés à l'optimisation de la performance énergétique du bâtiment, et d'étudier leur impact sur la consommation d'énergie effective.

Dans cette perspective, les objectifs visés par la présente étude sont les suivants :

- Mettre en exergue la contribution de l'intégration des nanomatériaux dans les enveloppes de bâtiments anciens ou nouveaux à la réduction de la consommation d'énergie pendant les saisons d'hiver et d'été de la ville de Constantine.
- Déterminer les procédés de nanomatériaux les plus efficaces à préconiser pour améliorer les performances énergétiques.

3. Méthodologie et outils de recherche

Cette recherche présente donc l'opportunité d'évaluer l'effet des enveloppes nanotechnologiques sur la réduction de la consommation énergétique et déterminer les besoins énergétiques réels des bâtiments.

Une première partie qui consiste en une recherche bibliographique dont l'objectif est la prise de connaissance de la politique énergétique et la mise en évidence de l'importance des enveloppes nanotechnologiques dans la réduction de la consommation énergétique.

La deuxième partie concerne un travail expérimental effectué au laboratoire de science technologique à Oum el Bouaghi dont le but est consacré à l'examen du processus d'élaboration de nanofibres de cellulose à partir de noyaux de dattes ainsi qu'aux dispositifs permettant de caractériser leur morphologie et leur structure. Cette partie met également en évidence les nanofibres cellulosiques utilisées comme renforts dans un nanocomposite à base de matrice cimentaire, dont les propriétés techniques sont importantes.

Puis, une investigation in situ, qui consiste en une campagne de mesure des paramètres physiques et environnementaux dans deux appartements neufs situés dans la ville de Constantine afin d'évaluer leur degré de confort.

Ensuite, le programme de simulation (TRNSys 17) est utilisé pour vérifier l'efficacité des matériaux à l'état brut lorsqu'ils sont utilisés comme isolant sur la face extérieure de l'enveloppe des deux appartements (PP & BPF), Ce programme de modélisation intervient également sur le mur en béton du bâtiment (BPF) en le dopant avec des fibres de nanocellulose (NFC) avec différents ratios.

4. Structure de la thèse

La thèse est structurée dans sa présentation formelle en cinq chapitres, plus une introduction et une conclusion générale dont le contenu est le suivant :

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique axée sur la compréhension de la stratégie énergétique et environnementale entourant la production d'isolants synthétiques, organiques et nanomatériaux, elle développe notamment la structure et les propriétés thermiques et mécaniques de ces types d'isolants.

Le deuxième chapitre présente une analyse exhaustive de la littérature sur les différents types de matériaux d'isolation thermique, leurs propriétés et leurs applications, dans le but de comparer leur efficacité thermique à celle des nouveaux nanomatériaux qui seront utilisés dans la construction.

Le troisième chapitre traite de la formulation de nanomatériaux d'isolation thermique à partir de ressources renouvelables et de déchets organiques. Il s'agit principalement du processus de préparation tel que l'opération de treillage, de séchage et de mécanosynthèse des fibres de noyau de palmier dattier en utilisant différentes techniques de broyage planétaire jusqu'à l'obtention d'une finesse finale de moins de 80 nm, puis de l'élaboration d'un nanomatériau entièrement composé de biomatériaux en nanofibre cellulosique.

Le quatrième chapitre est consacré aux travaux expérimentaux dont l'objectif est la caractérisation structurelle de ce type de nanomatériaux et la détermination de la nanostructure, de la composition chimique et des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des nanofibres cellulosiques, puis l'évaluation de la faisabilité technique de l'incorporation de nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier présentant des propriétés techniques significatives dans une matrice de ciment pour constituer un matériau nanocomposite léger protégeant l'enveloppe extérieure des bâtiments des radiations solaires.

Le cinquième et dernier chapitre traite de la campagne de mesure comparative menée entre deux appartements inoccupés. L'objectif est d'établir lequel d'entre eux présente la meilleure performance thermique qui servira comme référence. Enfin, les résultats sont validés à l'aide de la simulation TRNSys 17, afin d'évaluer l'influence du nanocomposite sur la réduction de la consommation d'énergie et ses besoins énergétiques réels.

En conclusion générale, outre la synthèse et la validation des hypothèses formulées, les contraintes et les perspectives de recherche sont énoncées.

CHAPITRE I : EFFICACITE ENERGETIQUE ET ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS

Introduction

Le concept de durabilité adopté dans le processus de conception architecturale a incité les scientifiques à concevoir des matériaux d'isolation thermique en intégrant des composants organiques naturels issus de la biomasse. Les matériaux dérivés de la pétrochimie sont souvent utilisés pour isoler les bâtiments, comme le polystyrène, ou les matériaux naturels dont la transformation nécessite d'importantes ressources énergétiques, comme la laine de verre et la laine de roche. Cependant, ces matériaux ont des impacts néfastes significatifs sur l'environnement, principalement dus à leurs cycles de production. Dans une perspective de développement durable, le critère de sélection des matériaux d'isolation thermique ne doit pas se focaliser uniquement sur la performance thermique du matériau. Compte tenu de la rentabilité des matériaux de construction verts, biodégradables, durables et respectueux de l'environnement, la demande de matériaux de construction verts est en pleine expansion, notamment les composites d'isolation thermique dérivés de matières premières organique renouvelables.

Actuellement, l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments sont évaluées sur la base de multiples critères, qui ne se limitent pas à l'épaisseur de l'isolation thermique et à la consommation de chauffage et de climatisation, mais aussi à la consommation d'énergie primaire, à la réduction des émissions de dioxyde de carbone et aux caractéristiques environnementales des matériaux de construction. Il convient de privilégier les matériaux renouvelables issus de sources naturelles disponibles localement, aisément récupérables, renouvelables, valorisables, et conformes aux prescriptions environnementales en raison de leur bilan écologique. En se référant à l'architecture vernaculaire qui date de milliers d'années, il apparaît que les matériaux d'isolation naturels ont été couramment employés dans les constructions. La prise de conscience des enjeux environnementaux incite à envisager l'évaluation exhaustive des matériaux d'isolation destinés à la construction des bâtiments.

1.1 Contexte énergétique

1.1.1 Aperçue de la situation énergétique dans le monde

Le monde connaît un dynamisme économique, démographique et urbain de plus en plus soutenu, adressant un défi aux acteurs de la politique d'efficacité énergétique en termes de capacité à soutenir cette dynamique, dans une optique de rationalisation de l'utilisation des ressources énergétiques et de limitation des déperditions. Les mesures de l'efficacité

énergétique interpellent toute la chaîne de valeur, depuis la production jusqu'à l'utilisation de l'énergie. En effet, outre ses autres dimensions énergétique et environnementale, l'efficacité énergétique est perçue comme étant un puissant moteur pour la croissance économique.

La croissance de la consommation mondiale d'énergie a commencé à régresser en 2019 (+0,6%) contre une moyenne de 2%/an sur la période 2000-2018 dû en partie à une conjoncture économique paresseuse. La consommation d'énergie s'accroît modérément contrairement aux années antérieures en Chine (+ 3,2%), premier consommateur mondial depuis 2009, en Russie (+ 1,8%) et en Inde (+ 0,8% seulement). En revanche, la consommation d'énergie est amortie quasiment dans les pays de l'union européenne (-1,9%), les États-Unis (-1%), le Japon, le Canada et la Corée du Sud (-1,4%). La consommation est restée dynamique en Indonésie et en Algérie, a continué d'augmenter en Arabie saoudite, au Nigéria et en Afrique du Sud. Mais, elle a rétrogradé en Amérique latine, à un état stationnaire au Brésil et en léger déclin au Mexique [14]. (Voir Figure 1.1).

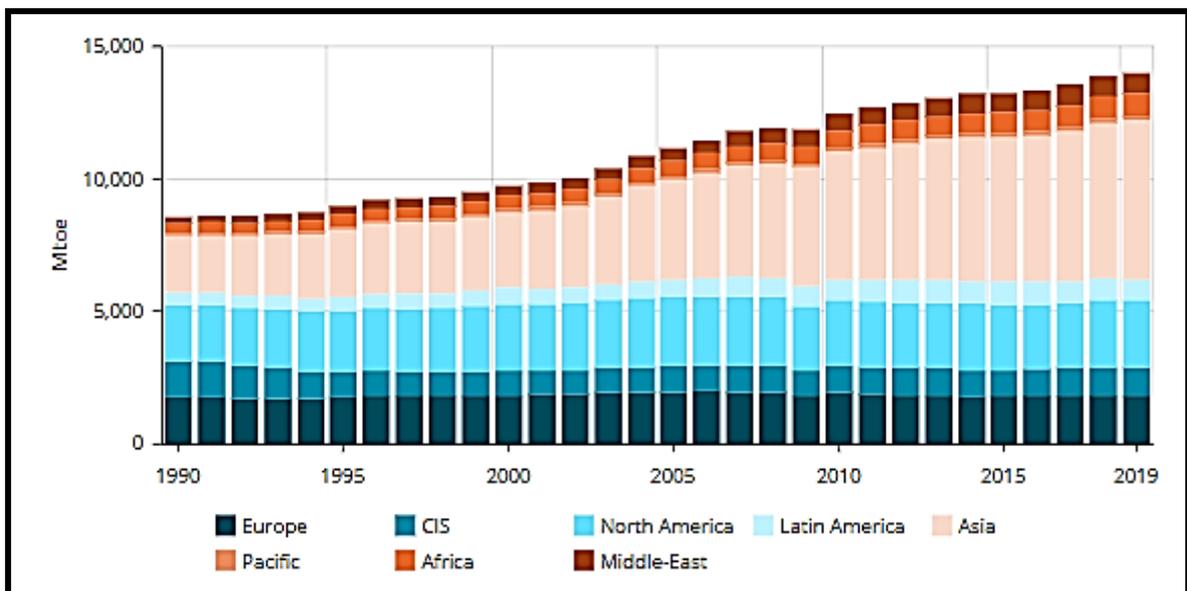


Figure 1.1 Ralentissement de la croissance de la consommation mondiale d'énergie (+ 0,6%), bien en deçà de sa tendance historique 2019 [14].

1.1.2 Contexte et situation énergétique en Algérie

En Algérie l'efficacité énergétique est une thématique d'actualité, ce qui l'obligeait à accordé un intérêt particulier aux énergies par l'adoption des mesures de financement et par le lancement du programme national des énergies nouvelles, renouvelables, et de l'efficacité énergétique. De plus instauré une démarche d'économie d'énergie grâce à la création de

l'agence « APRUE » et du centre « CDER », cette démarche adoptée reflète la prise de conscience des pouvoirs publics à cause de l'épouvantable crise économique dû à la chute des cours du pétrole sur le marché international durant cette décennie.

1.1.3 Etude comparative entre la consommation de gaz et de l'électricité en Algérie durant 20 ans.

L'énergie est devenue une ressource indispensable dans tous les secteurs de l'activité humaine. La consommation énergétique en Algérie ne cesse de croître, et tôt ou tard les réserves d'énergie fossile seront épuisées. La consommation de l'électricité et du gaz a augmenté de 1990 à 2019, est contenue de progresser à un rythme de plus en plus soutenu avec une triple croissance pour le gaz et quadruple pour l'électricité. Il est constaté d'après la figure (1.2) que la consommation électrique représentée entre 2010-2019 est relativement élevée à celle du gaz. Cette évolution rapide de la consommation énergétique signifie en réalité que le mode de vie de la population en Algérie est en nette amélioration et que l'utilisation des appareils d'appoints comme le chauffage et la climatisation pour le secteur résidentiel et tertiaire a contribué ainsi activement à cette prodigieuse augmentation.

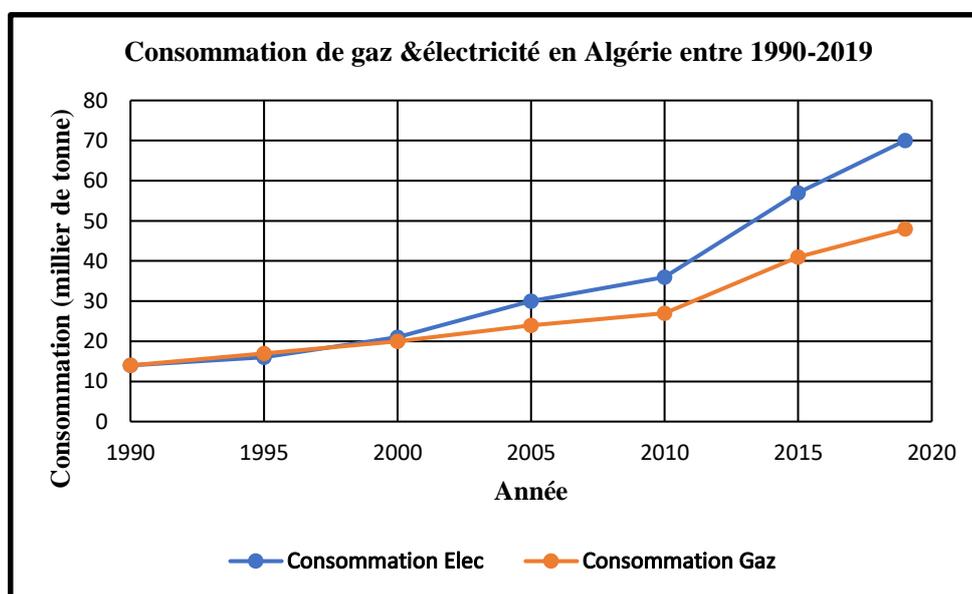


Figure1.2 Consommation de gaz & de l'électricité (TWh) de 1990 à 2019 [14] et réadaptée par auteur.

1.1.4 Politique d'efficacité énergétique en bâtiment

La politique énergétique fait face aujourd'hui à un épineux défi, le secteur du bâtiment grands chantiers par excellence, vise à remodeler son visage pour l'efficacité énergétique. Ce secteur consomme plus de 43% d'énergie en Algérie [15]. En particulier le secteur

résidentiel, en l'occurrence les logements qui sont qualifiés comme énergivores et véritables passoires thermiques, et qui accroissent la demande d'énergie, en raison de l'absence d'intégration des techniques thermiques permettant de limiter la consommation énergétique.

La production d'électricité primaire est passée de 783 à 835 GWh en 2019, tirée par une hausse de 30%. Durant la période 2000-2017 la consommation finale a crue avec un tcam de 6.4%/an par secteur d'activité, le secteur résidentiel 7.4%/an est le secteur où la consommation d'énergie qui a crû le plus rapidement par rapport aux autres (secteur tertiaire 7%/an, suivi de l'agriculture 6.4%, (btp+mines+eau) 6.5%/an, transport 6.3%/an, et l'industrie manufacturière 4.4%/an). La structure de la consommation finale reste dominée par le secteur des « Ménages & autres » 43%, suivi par le transport 33% et enfin le secteur de « l'industrie » avec une part de 22% [16], comme illustré dans le graphe ci-après :

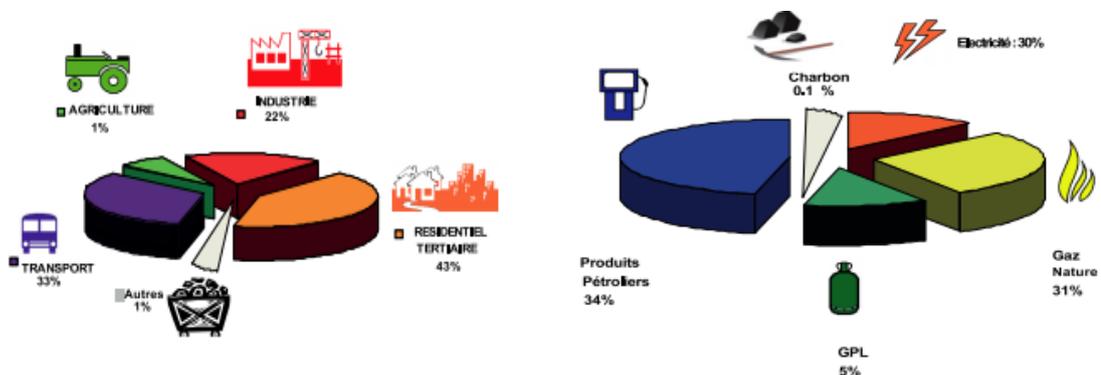


Figure 1.3 Répartition de la consommation finale par secteur d'activité et par forme d'énergie 2017 [16].

1.1.4.1 Secteur du bâtiment

La construction évolue inexorablement et posera des défis importants au cours des prochaines décennies. Le défi actuel consiste à maintenir le confort des utilisateurs tout en réduisant la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Pour y parvenir, il est important d'intégrer l'efficacité énergétique dans la conception des projets, de créer de nouveaux produits et d'évaluer les systèmes constructifs. En effet, l'attente engendrée par cette récente prise de conscience était que les architectes et leurs nombreux collaborateurs finissent par voir le côté architectural du processus de conception jusqu'à l'exécution du projet. Le parc immobilier construit s'élève à plus de 8 548 080 unités, dont 70 % sont situées dans des zones urbaines. Le taux d'occupation moyen (TOL) de cinq personnes par logement. La consommation d'électricité résidentielle a dépassé les 2139 Ktep. Elle consomme 43% de

l'électricité totale. La consommation énergétique annuelle moyenne d'un logement est de 3262 KWh/ménage [16].

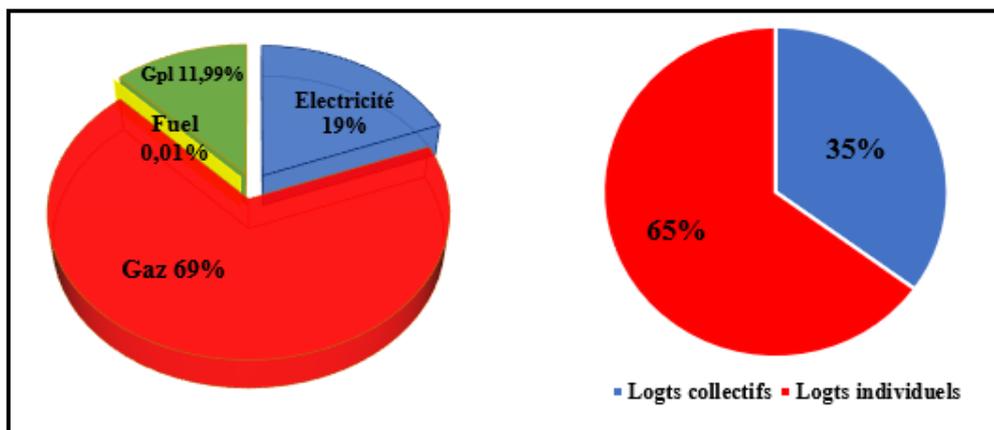


Figure 1.4 Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type d'énergie et par type de logement année 2017 [16].

Entre 2007 et 2017, la consommation finale du secteur tertiaire a augmenté de 6,6 % par an. Ainsi, l'électricité, le gaz naturel, le GPL, le diesel et le charbon ont permis cette évolution à des taux respectifs de 6,3 %, 5,1 %, 0,9 %, 10,3 % et 5,3 %/an. En termes de consommation électrique par personne, l'éclairage et la climatisation représentent près de 90 % de la consommation d'électricité, tandis que le chauffage et la cuisson représentent environ 60 % de la consommation de gaz naturel [16]. La consommation dans le secteur tertiaire est répartie par produit, l'électricité et le gaz naturel étant les plus consommés. Ce résultat est la conséquence d'une demande accrue pour le chauffage, la climatisation et les équipements de bureau et informatiques. Les perspectives de croissance du secteur laissent présager que la demande d'électricité demeurera importante.

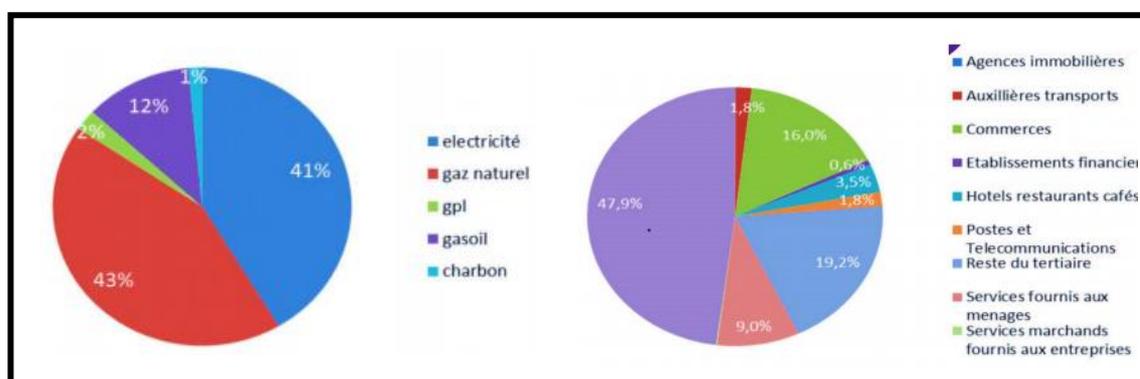


Figure 1.5 Répartition de la consommation du secteur tertiaire par type d'énergie et par branche année 2017 [16].

1.1.4.2 Instruments de la politique d'efficacité énergétique déployés dans le secteur de bâtiments

La politique algérienne d'efficacité énergétique, axée sur le secteur du bâtiment, se manifeste par l'action de quelques entités, comme l'APRUE, qui bénéficie de financements du Fonds national de maîtrise de l'énergie (FNME) et du Programme national de maîtrise de l'énergie (PNME), en coordination avec les centres de recherche liés au secteur du bâtiment tels que le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER), le Centre national d'études et de recherches sur le bâtiment (CNERIB), ainsi que le Ministère de l'énergie et des mines. L'efficacité énergétique se concrétise essentiellement par la mobilisation de cinq types d'instruments distincts, à savoir :

- Cadres institutionnels pour le développement de programmes et de stratégies d'économie d'énergie, comprenant les activités de sensibilisation, de communication et de formation ;
- Lois régissant l'efficacité énergétique ;
- Cadres de financement de programmes d'efficacité énergétique dans le domaine de la construction ;
- Promouvoir les méthodes d'économie d'énergie auprès de toutes les parties prenantes, des différents secteurs de la construction, et soutenir le développement local des technologies permettant de créer des logements économes en énergie ;
- Collaboration entre les secteurs public et privé pour faire progresser la promotion de la construction de bâtiments à haute performance énergétique.

Il serait judicieux de réaliser une combinaison de mécanismes pour répondre à des problèmes énergétiques spécifiques afin d'évaluer cette configuration d'instruments et les possibilités d'amélioration de leur conception. Pour garantir la performance des instruments, il semble nécessaire de combiner plusieurs modèles de dispositifs. L'adoption d'une approche méthodologique et interdisciplinaire est fondamentale à cet égard.

1.1.4.3 Stratégie nationale de la maîtrise de l'énergie en bâtiment

L'Algérie a mis en place de nombreux cadres législatifs pour promouvoir les économies d'énergie dans l'habitat dans les années 1990. Le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme a lancé des documents techniques réglementaires (DTR) en 1997, suite à une réflexion menée en 1995 sur la consommation des logements neufs. Ces DTR traitent de la gestion thermique des bâtiments neufs conformément à la loi sur la maîtrise de l'énergie, adoptée le 28 juillet 1999 [17]. Les mesures relatives à l'enveloppe du bâtiment ont pour but de contraindre les opérateurs à fournir des produits répondant à des exigences minimales d'efficacité thermique. Le programme ECO-BAT vise à améliorer le confort thermique et à réduire la consommation d'énergie dans les logements en mobilisant les acteurs du bâtiment autour de la question de l'efficacité énergétique et également en mettant en œuvre une action démonstrative démontrant la faisabilité des projets à haute performance énergétique en Algérie.

Le programme d'efficacité énergétique prévoit l'installation d'une isolation thermique dans les logements, ce qui permet de diminuer d'environ 40% l'énergie utilisée par un logement. Les 600 logements prévus à cet effet sont répartis sur 11 wilayas sélectionnées, englobant toute la région climatique du pays. A cela s'ajoute l'isolation de 1500 logements, soit une moyenne de 500 logements rénovés par an [17]. Cependant, au cours des deux dernières décennies, la demande de logements a été énorme. Mais, le potentiel et l'opportunité de corriger la situation et de faire respecter la réglementation thermique comme condition à la mise en place de projets de logements n'ont pas été pleinement exploités, limitant les efforts de ces organismes aux textes et à quelques initiatives.

L'APRUE a développé un réseau de relations à travers ses actions dans le cadre de la coopération internationale MED-ENEC, démontrant comment le véritable intérêt d'une telle opération n'a pas réussi à générer des projets clés en main et a incité les gouvernements locaux à initier de telles initiatives, comme en témoigne le projet pilote avec l'efficacité énergétique à (CNERIB) [4], dont l'objectif principal est de stimuler l'introduction de ces technologies. Ce projet se distingue par l'utilisation d'un système de maçonnerie chaînée et d'un matériau de construction disponible localement, à savoir le béton de terre stabilisé (BTS).

1.1.5 Centre d'intérêt du laboratoire ABE - (rétrospective d'expériences)

Un large éventail de possibilités d'avancées scientifiques dans le domaine de la construction, notamment en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique. De nombreux matériaux et solutions d'isolation seront utilisés aujourd'hui et dans un avenir proche, conformément aux directives recommandées qui précisent leurs exigences techniques. De multiples études scientifiques ont été menées et supervisées par l'ensemble des chercheurs du laboratoire ABE- afin de préparer tous les doctorants aux éventuelles avancées techniques. Les études sont axées sur l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment pour réduire la consommation d'énergie et préserver le confort thermique. Ces expériences ont cerné les relations de cause et effets relatifs à différents facteurs et éléments de bâtiment tel que l'orientation et l'enveloppe végétalisée cadré par Pr. S. Abdou, les stratégies de rafraîchissement passifs cadré par Pr. Y. Bouchahm et la relation microclimat des bâtiments performant par le Pr.F. Bourbia. Plusieurs recherches sur les enveloppes des bâtiments ont été menées, dont les résultats obtenus sont résumés comme suit :

1.1.5.1 Végétation grimpante

La recherche élaborée en magistère par l'étudiante **Benhalillo. K**, [18] portait sur les stratégies et les techniques naturelles qui contribuent au rafraîchissement passif des résidences en améliorant le microclimat à leurs intérieures. Il s'agit d'utiliser des plantes grimpantes près ou sur l'extérieur du bâtiment pour le protéger des rayons du soleil en réduisant les radiations solaires directes et en produisant un microclimat propice au confort thermique, ce qui implique une diminution de la consommation d'énergie.

1.1.5.2 Isolation thermique

L'isolation thermique est le premier pas vers une utilisation plus efficace de l'énergie. Elle contribue de manière significative aux économies d'énergie en été comme en hiver et augmente le confort thermique interne. Dans le cadre de son magistère de recherche, **Belili. H**, [19] a étudié l'effet d'un isolant synthétique performant en polyuréthane, revêtu sur la façade extérieure d'un bâtiment réhabilité dont sa conductivité thermique est de $0,029 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Les résultats in situ des monitoring effectués en été et en hiver indiquent que l'isolation extérieure a un effet significatif sur le confort thermique de l'occupant et la consommation d'énergie du bâtiment. En effet, l'isolation thermique par l'extérieur demeure une solution alternative qui consiste à l'appliquer pour atténuer drastiquement l'échange thermique entre l'ambiance intérieure et celle de l'extérieur.

1.1.5.3 Inertie thermique

La recherche scientifique produite par le Dr. **Medjelakh. D.**, [20] qui consiste à examiner l'impact de l'inertie thermique sur le confort hygrométrique et la consommation énergétique du bâtiment, avait pour but de déterminer l'épaisseur idéale de la masse thermique qui garantit le confort à l'intérieur du bâtiment. À travers les résultats obtenus, l'inertie thermique de la paroi a permis de réduire la consommation d'énergie et donc de maintenir un bon niveau de confort thermique intérieur.

En conclusion, toutes les recherches dirigées et mises en œuvre par l'équipe du laboratoire « ABE » de l'Université de Constantine³ sont orientées vers une vision prospective afin de contribuer aux objectifs clés du développement de la politique d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

1.2 Catégories et caractéristiques des matériaux d'isolation thermique

1.2.1 Matériaux d'isolation thermique conventionnels

Les matériaux d'isolation thermique classiques sont plus souvent employés en vue de leur bonne performance thermique et de leur coût abordable. Ils comprennent notamment les laines minérales et les isolants synthétiques tels que le polystyrène ou le polyuréthane. Ces matériaux se caractérisent par une conductivité thermique relativement basse. Actuellement, la plupart des matériaux d'isolation traditionnels présentent des pores ou des cavités de l'ordre du millimètre ou du micromètre. Ces catégories d'isolation thermique sont succinctement décrites ci-dessous.

1.2.1.1 La laine minérale

La laine minérale correspond à la laine de verre (fibre de verre) et à la laine de roche, produite normalement sous forme de plaques et de rouleaux, mais parfois aussi sous forme de matériau de remplissage. Les panneaux de laine minérale légers et flexibles sont appliqués dans la construction et d'autres structures comportant des vides. Les plaques de laine minérale à densité massique élevée, plus dures et massives, sont destinées à soutenir les charges, comme sur les planchers ou les toitures. La conductivité thermique de la laine minérale est comprise entre 0.030 et 0.040 W/mK [21]. Elle varie en fonction de la température, de la teneur en humidité et de la densité de la masse.



Figure 1.6 De gauche à droite, laine de verre, laine de roche, et cellulose [22].

1.2.1.2 Polystyrène expansé et extrudé ((EPS - XPS)

Le polystyrène expansé (EPS) est produit à partir de petites sphères de polystyrène (pétrole brut) avec un adjuvant expansif appelé Pentane C₆H₁₂, qui enflé par réchauffement avec de la vapeur d'eau. Concernant le polystyrène extrudé (XPS) est élaboré à partir de polystyrène liquide (pétrole brut) par adjonction de gaz expansif, HFC, CO₂ ou C₆H₁₂, ce qui entraîne l'extraction de la densité massique par le biais du déclencheur à pression atmosphérique qui induit son développement. Ces valeurs standard de conductivité thermique sont comprises entre 0,030 et 0,040 W/(mK) [23].

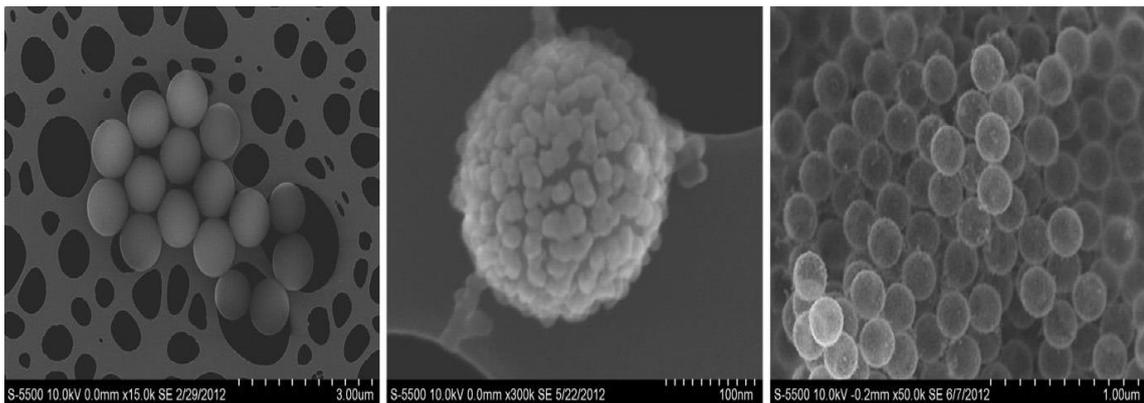


Figure1.7 Image de microscopie électronique à balayage de matrices de polystyrène sphérique (PS) (gauche), de petites particules de silice (médianes) revêtues autour d'un gabarit de PS sphérique et de nanosphères creuses de silice (à droite) après élimination de PS [24].

1.2.1.3 Polyuréthane (PUR)

Le polyuréthane (PUR) est obtenu suite à la réaction d'isocyanates et de polyols d'alcools comportant divers hydroxyles. Au cours du processus de transformation, des pores fermés sont pleins de gaz d'expansion, HFC, CO₂ ou C₆H₁₂. Les valeurs typiques de conductivité thermique du PUR varient entre 20 et 30 mW/(mK), ces valeurs sont nettement plus faibles que celles de la laine, du polystyrène, de la cellulose et des produits minéraux. Ce facteur de conductivité thermique varie en fonction de la température, du taux d'humidité et de la

densité ; il peut croître de 25 W/(mK) à 46 W/(mK) [25] avec l'augmentation corrélative du taux d'humidité de 0 % à 10 % en volume. Le polyuréthane est l'un des isolants thermiques les plus efficaces, avec des capacités thermiques exceptionnelles.



Figure 1.8 De gauche à droite, polystyrène EPS, polystyrène XPS, liège, et polyuréthane [26].

La conductivité thermique est une caractéristique physique intrinsèque de chaque matériau qui permet de mesurer sa capacité à transmettre de la chaleur. Elle désigne la quantité de chaleur qui se transmet par conduction thermique. Plus la conductivité thermique est importante, plus le matériau conduit la chaleur et plus elle est basse, plus le produit a un caractère d'isolation thermique. La performance des isolants thermiques est donc évaluée par la conductivité (λ). Plus la valeur λ est faible, plus le matériau est isolant. Il y a une corrélation étroite entre la conductivité de l'isolant et son épaisseur. Une conductivité thermique inférieure à 0,07 W / (m.K) est considérée comme un matériau d'isolation thermique. La super isolation est déterminée par une conductivité thermique inférieure à celle de l'air, c'est-à-dire que la conductivité thermique doit être inférieure à 0,025 W / (m.K) [27].

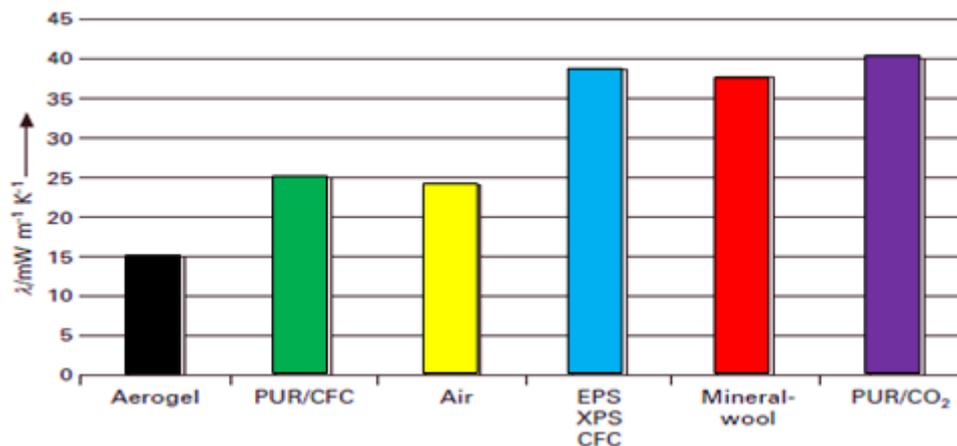


Figure 1.9 Comparaison de la conductivité thermique de l'aérogel avec d'autres matériaux d'isolation thermique connus sur le marché [28].

1.2.2 Matériaux d'isolation thermique non conventionnels "verts", naturels et écologiques

Une analyse bibliographique a été menée sur les matériaux non conventionnels disponibles tels que les feuilles de pommier, la paille de blé, la paille de riz, la balle/coque de riz, la fibre de coco, la bagasse, la fibre de palmier dattier, la rafle de maïs et la laine de mouton. Ces matériaux, à l'exception de la laine de mouton, sont des déchets agricoles et sont souvent incinérés après leur récolte. Des investigations ont été effectuées sur ces matériaux en vue de leur application comme matériau d'isolation thermique. La présente description contient des informations sur les valeurs de conductivité thermique des matériaux mentionnés. Les critiques adressées aux matériaux organiques reposent essentiellement sur la vulnérabilité au feu, à l'humidité et à la présence de vermine. Cependant, ces reproches sont de jour en jour remis en cause par de récentes découvertes et des précautions prises lors de la mise en œuvre.

1.2.2.1 Liège

L'isolation thermique à base de liège est fabriquée à partir de chêne-liège, qui provient à la fois du matériau de remplissage et des planches. Les valeurs caractéristiques de la conductivité thermique du liège sont comprises entre 0,040 et 0,050 W/(mK) [25]. Il est possible de poinçonner, couper et monter l'isolation thermique en liège sur place, sans dégrader la résistance thermique.

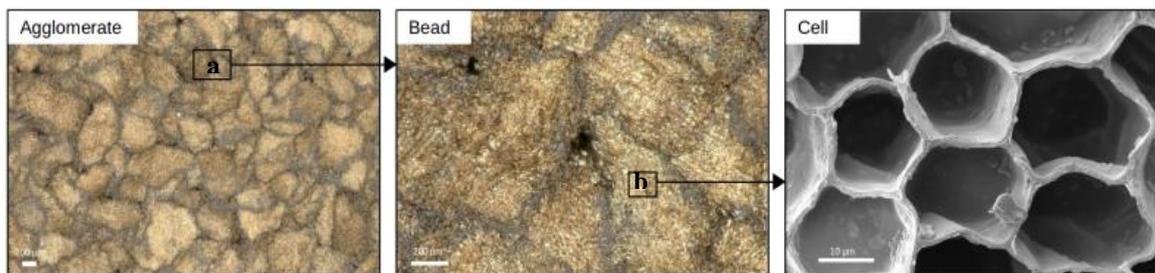


Figure 1.10 Structure cellulaire du liège (a) sens transversal (b) sens longitudinal [29].



Figure 1.11 De gauche à droite, laine de mouton, liège et fibre de coco, et ouate de cellulose [27].

1.2.2.2 Paille de blé

La paille, issue de la production agricole de la filière céréalière, disponible en grande quantité dans de nombreux pays, est l'un des principaux matériaux de construction des bâtiments écologiques. La paille, dérivée du blé récolté, est l'une des alternatives écologiques au développement durable dans la construction. Actuellement, l'exploitation de cette ressource est restreinte à des constructions éparses dans les campagnes [30]. Auparavant, les agriculteurs ont utilisé la paille comme litière pour bétail ou l'ont brûlée en raison des difficultés inhérentes au stockage. Les experts en construction écologique affirment que la paille est un efficace matériau de construction et que ses inconvénients sont compensables. Les balles de paille peuvent être intégrées dans la structure porteuse ou dans le mur de remplissage. Goodhew S et Griffiths R ont calculé la conductivité thermique d'échantillons de bottes de paille de 360 mm sur 615 mm avec une densité de 60 kg/m³. Les résultats montrent que les balles de paille présentent des valeurs d'isolation thermique avantageuses de 0,067 W/mK [31].



Figure 1.12 Balles de paille constituant le mur de remplissage de l'écocentre de Kerkenes [32].

1.2.2.3 Enveloppe de riz

La balle de riz, qui est l'enveloppe extérieure du grain de riz, protège les ingrédients internes contre les attaques extérieures des insectes et des bactéries. Ces déchets organiques sont généralement brûlés après la récolte, ce qui pose des problèmes environnementaux. La conductivité thermique des enveloppes de riz, reçues d'une usine de transformation, a été mesurée dans deux laboratoires. Des équipements conçus conformément à la norme ASTM C 518 et des châssis expérimentaux de 305 × 305 × 51 mm ont servi à recueillir des échantillons de matériaux. La densité des éprouvettes a été de 144,3, 139,4, 155,4 et 147,5

kg/m³. Les expériences menées dans deux laboratoires ont montré que la conductivité thermique de la balle de riz est comprise entre de 0,046 à 0,057 W/m. K [33].

1.2.2.4 Fibre de noix de coco

Les noix de coco prolifèrent dans les régions tropicales. La fibre de coco est extraite de l'enveloppe extérieure de la noix de coco. Il existe deux types de fibres de noix de coco : les fibres brunes extraites des noix de coco matures et les fibres blanches extraites des noix de coco immatures. Ces différents types de fibres ont des applications diverses en fonction des besoins. Du point de vue de l'ingénierie, la structure de base des fibres de noix de coco comprend de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Cette composition altère les propriétés des fibres de coco, notamment les propriétés des composites lorsque les fibres sont prétraitées. La fibre de coco est un composant naturel qui contribue à maintenir un environnement bâti sain.

Ce matériau est recyclable et peut être introduit comme matériau d'isolation thermique dans les bâtiments. La conductivité thermique minimale du matériau préparé à partir de noix de coco a été estimée à environ 0,05 W/m. K [34]. Ces noix de coco ont été collectées dans les zones côtières mexicaines. Des échantillons de fibres cylindriques horizontales et verticales de 6 mm d'épaisseur et de 15 mm de diamètre, d'une densité de 174 kg/m³. L'appareil d'échantillonnage monobloc à thermostat a été utilisé conformément aux recommandations de la norme ASTM C518 pour les tests [35]. Sans recourir à des composants chimiques, la balle de noix de coco peut devenir matériaux d'isolation thermique.



Figure 1.13 Noyau et fibres de noix de coco [36].

1.2.2.5 Fibre de palmier dattier

Les palmiers dattiers sont cultivés dans de nombreuses régions du monde, notamment dans les zones arides. Les résidus du palmier dattier, tels que les feuilles, les pétioles et les grappes, sont généralement considérés comme des déchets. Les quatre types de fibres du palmier dattier sont composés de structures fibreuses, notamment des fibres de feuilles dans la tige, des fibres de baste dans la tige, des fibres de bois dans le tronc et des fibres de surface situées dans le tronc. Les fibres de palmier dattier sont illustrées à la figure 1.14. Oushabi A et al [37] ont mené une étude sur la conductivité thermique. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF ISO 88941 avec le dispositif CT mètre. Les fibres du palmier dattier ont été séparées en fibres individuelles et les mesures ont été effectuées à 25°C. Les résultats de cette étude indiquent que la conductivité thermique la plus basse de la fibre de palmier dattier est de 0,041 W/mK.

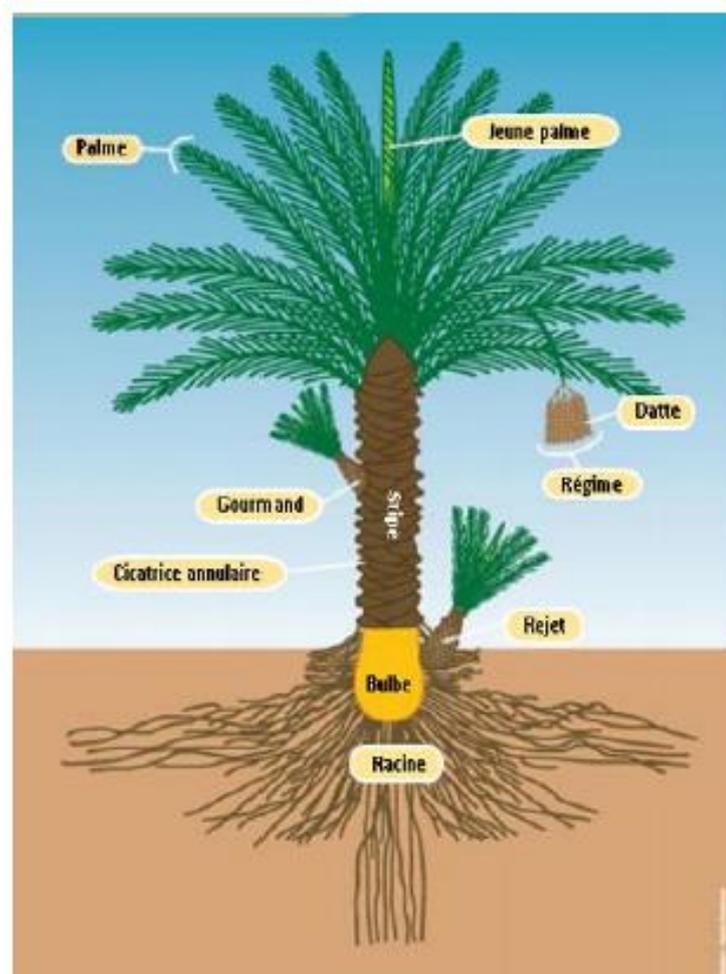


Figure 1.14 Morphologie du palmier dattier [38].

1.2.2.6 Isolants thermiques à fibres cellulosiques organiques

L'utilisation de nanofibrilles de cellulose (CNF) constitue un nanomatériau naturel et renouvelable réunissant à la fois la faible densité, la haute résistance et la flexibilité, l'inertie chimique et la capacité de moduler les propriétés chimiques superficielles. Ces propriétés les rendent intéressants pour une large gamme d'applications, notamment dans le domaine de l'isolation thermique et des dispositifs destinés à la production d'énergie [39]. Des études récentes de Illera et al. [40] ont illustré le potentiel de l'architecture poreuse et les propriétés des mousses d'aérogels à base de nanoparticules de cellulose pour les applications d'isolation thermique.

1.2.2.6.1 Nanocellulose

Les applications et la synthèse de la nanocellulose ont récemment gagné du terrain comme renforcement polymérique en vue de produire des biocomposants de haute performance. Les molécules de cellulose comprenant une dimension nanométrique (1-100 nm) sont connues sous le nom de nanocellulose [41]. La motivation majeure qui explique l'intérêt accru porté aux nanomatériaux réside dans la capacité à obtenir des matériaux homogènes dont les propriétés mécaniques sont optimisées lorsque les proportions des fibres cellulosiques diminuent de manière significative [42]. En raison de sa nature biodégradable, ce matériau est considéré comme durable. Les caractéristiques de la nanocellulose, telles que la cristallinité, la surface et les capacités mécaniques, dépendent des techniques de traitement et d'extraction [43]. La nanocellulose (NFC) a une faible conductivité thermique, ce qui rend les matériaux à base de cellulose utiles pour l'isolation thermique. De nombreux chercheurs ont prouvé que la conductivité thermique des mousses et des aérogels de nanocellulose est inférieure à 0,025 W/(m.K), ce qui permet de les classer dans la catégorie des matériaux superisolants [44].

1.2.2.6.2 Nanofibrilles de cellulose

Les nanofibrilles de cellulose (CNF) sont de longues fibrilles entrelacées (μm) d'un diamètre de l'ordre du nanomètre. Les CNF sont produits en broyant une suspension de pâte de cellulose sous haute pression pour former des structures fortement croisées de nanofibrilles [45]. Contrairement aux CNC, qui ont une cristallinité presque parfaite (environ 90%), les CNF contiennent à la fois des domaines de cellulose amorphe et cristalline dans des fibres individuelles [46]. L'extraction de CNF à partir de fibres cellulosiques peut être

obtenue par trois types de procédés : (1) les traitements mécaniques (par exemple, l'homogénéisation, le broyage et la mouture) ; (2) les traitements chimiques (par exemple, l'oxydation TEMPO) ; et (3) une combinaison de traitements chimiques et mécaniques [47]. Les méthodes actuellement connues de délaminage de la membrane des fibres et de séparation des NFC sont l'homogénéisation et le broyage. Cette méthode permet à ces fibres de subir des chocs et des impacts qui défibrent la cellulose. A ce stade du traitement, les nanofibres obtenues ont des diamètres inférieurs à 100 nm. Les CNF ont également généré un grand intérêt pour servir de support lors de la préparation des aérogels [48].

1.2.3 Isolation thermique à haute performance (super isolation)

Aujourd'hui, les réglementations et les standards internationaux relatifs à l'efficacité énergétique des bâtiments sont de plus en plus exigeants. L'objectif prioritaire consiste à atténuer la transmission de la chaleur à travers les murs. Il est possible d'y parvenir soit en augmentant l'épaisseur de l'isolation thermique des parois, soit en optimisant les performances des matériaux d'isolation thermique. Afin de répondre aux exigences de performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment, il existe une variété de matériaux disponibles pour améliorer la résistance thermique des murs. En effet, ces isolants thermiques jouent généralement le rôle de barrière thermique et non structurelle.

Le principe de ces isolants est identique, il consiste à utiliser un matériau à forte porosité et à petit diamètre de pores. Les matériaux et les solutions d'isolation thermique pour les bâtiments contemporaines. En d'autres termes, il s'agit des matériaux qui composent les matériaux d'isolation thermique des bâtiments dont la conductivité thermique est actuellement plus faible, ou ceux qui sont constitués de matériaux d'isolation thermique innovants principalement formés de matériaux poreux comportant des nanoparticules.

1.2.3.1 Panneaux isolants sous vide (VIP)

Le panneau d'isolation sous vide, également connu sous le nom de (VIP), constitue une nouvelle génération de matériau d'isolation thermique dans le secteur de la construction, satisfaisant à des normes thermiques optimales. Cet isolant sous vide à haute performance (VIP) est composé d'un noyau rigide poreux de silice pyrogène recouvert de multicouches laminées dans un film hermétique de qualité optimale enveloppé de gaz sous vide. La combinaison de ce matériau avec son noyau et son vide spécifiques garantit des performances sensiblement meilleures en comparaison avec les procédés d'isolation

conventionnels. À ce stade de technologie avancée, la conductivité thermique du panneau médian est comprise entre 2 et 4 mW/(mK) [49]. Selon la composition de l'enveloppe (VIP), la conductivité thermique obtenue après 50 et 100 ans de vieillissement sera légèrement plus élevée. Cette augmentation inéluctable de la conductivité thermique constitue l'inconvénient majeur de tous les VIPs [50].

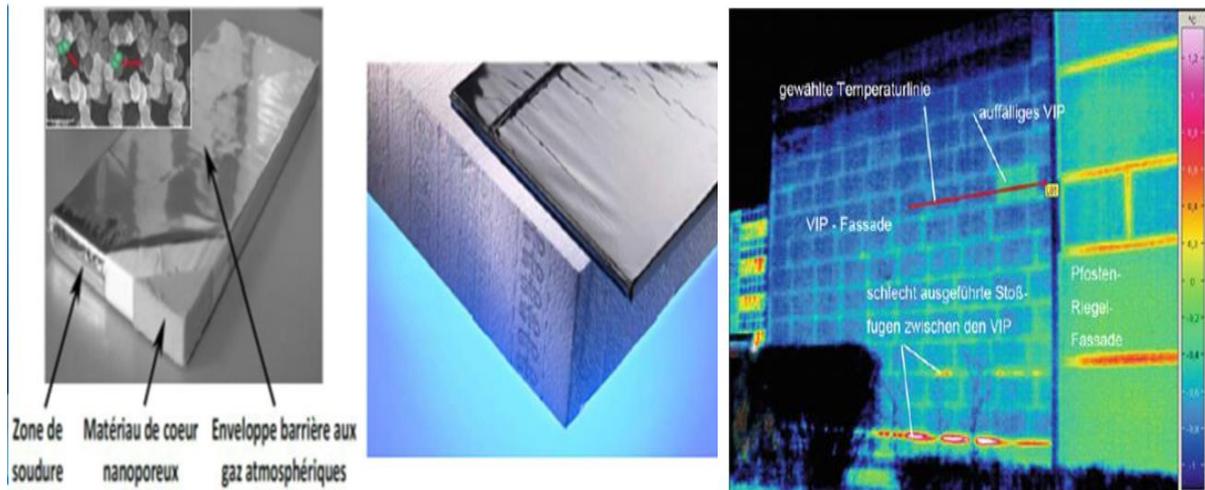


Figure 1.15 (Gauche) structure VIP typique montrant les principaux composants au milieu une comparaison de l'épaisseur de résistance thermique équivalente de l'isolation thermique traditionnelle et VIP. (Source : réadapter par auteur) et (à droite) Thermographie d'une façade VIP vue de l'extérieur [51].

1.2.3.2 Aérogels

L'aérogel est un produit nanostructuré similaire à un gel, dont le composant liquide remplace le gaz. En conséquence, l'aérogel devient un matériau solide dont la densité est très faible. Les caractéristiques des aérogels comme isolants thermiques sont exceptionnelles. En affichant une conductivité thermique comprise entre 0,012 et 0,015 watt par mètre et par kelvin [52-53], l'aérogel de silice est une solution idéale pour une isolation thermique bien plus performante que celle actuellement proposée par les produits traditionnels. Les aérogels présentent un grand intérêt, car ils peuvent être développés sous différentes présentations (opaques, translucides ou transparentes), ce qui ouvre un large éventail de solutions techniques possibles dans le secteur de la construction.

La résistance à la compression des aérogels est relativement élevée, mais ils sont très fragiles en raison de leur très faible résistance à la traction [54] voir la structure des pores et des agrégats dans la figure 1.16. En effet, le développement des aérogels comme revêtement d'isolation thermique pour des applications opaques ou translucides suppose une réduction

significative des coûts. Actuellement, l'aérogel représente le potentiel le plus prometteur sur le marché des produits de construction et de rénovation pour les bâtiments existants et en cours de réalisation.

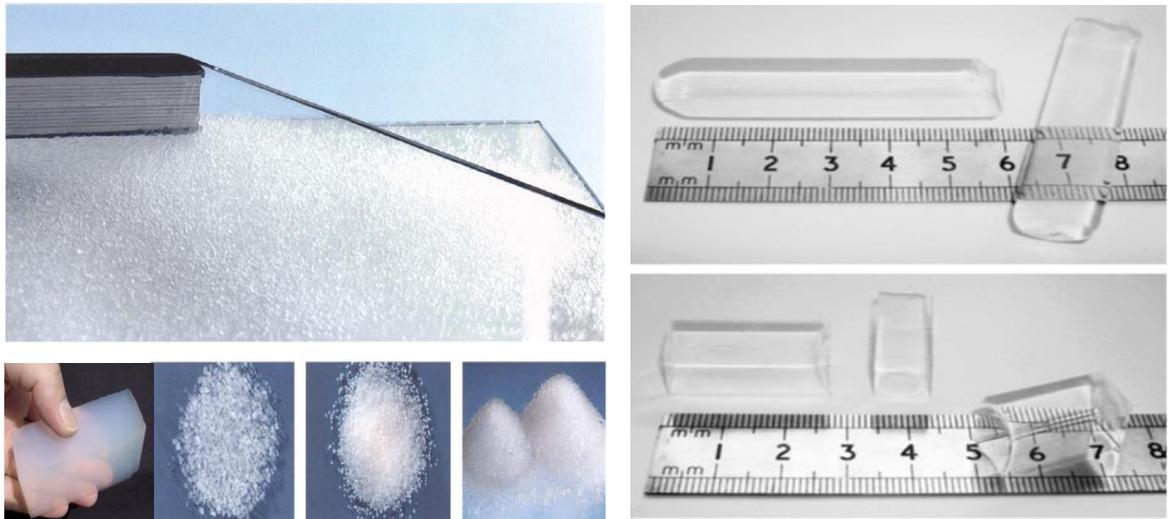


Figure 1.16 Gauche. Aérogels en combinaison avec des perles de verre opaques nano gel. Granulé nano gel translucide. À droite Échantillons transparents d'aérogel réalisés par séchage supercritique à haute température et séchage supercritique à basse température [55].

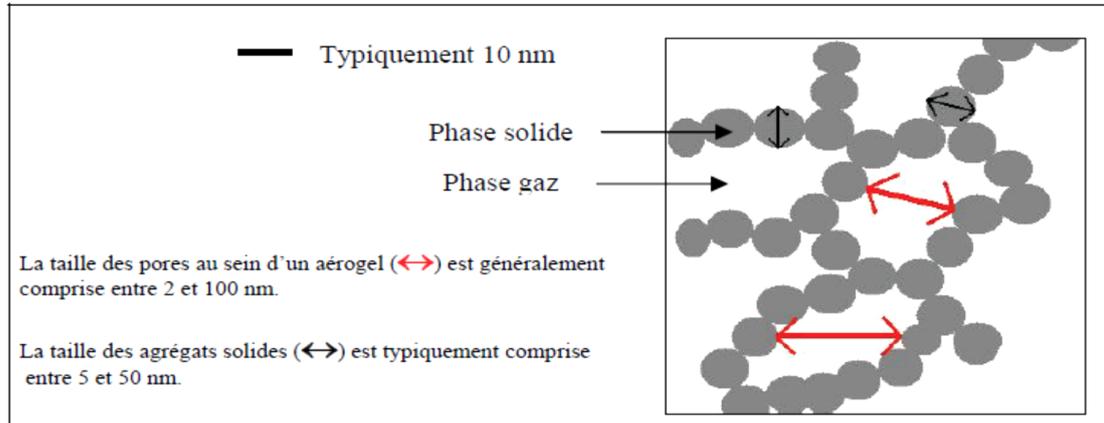


Figure1.17 Schématisation de la structure interne d'un aérogel [56].

1.2.3.3 Matériaux à changement de phase (PCM)

L'isolation thermique issue des nanomatériaux pour les bâtiments à haute performance énergétique, ce type de circuit à changement de phase permet de stabiliser la température interne du bâtiment et de réduire les besoins en chauffage et climatisation. Les différentes formes de particules de paraffine illustrent parfaitement les caractéristiques physiques des matériaux à changement de phase. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux d'isolation thermique, mais comme ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment,

ils présentent des avantages pour les applications de construction durable. Les MCP se changent de phase solide en phase liquide quand ils sont chauffés, en absorbant l'énergie lors du processus endothermique. Lorsque la température environnante chute à nouveau, les MCP liquides se reconvertissent en matériaux solides, en restituant la chaleur accumulée auparavant dans la paroi exothermique [57].

L'objectif de la combinaison de MCP dans les vitrages ou les volets est de tirer profit de leur chaleur latente de dissolution importante afin de réduire les charges thermiques produites par les fenêtres en amortissant les apports de chaleur avant leur pénétration dans l'espace intérieur. Sous un angle purement thermique, les fenêtres MCP agissent comme des parois de Trombe visuellement transparentes ou translucides. Elles se composent de panneaux de verre conventionnels simples ou multicouches, incorporés dans une enveloppe de polymère de polycarbonate transparent ou translucide.

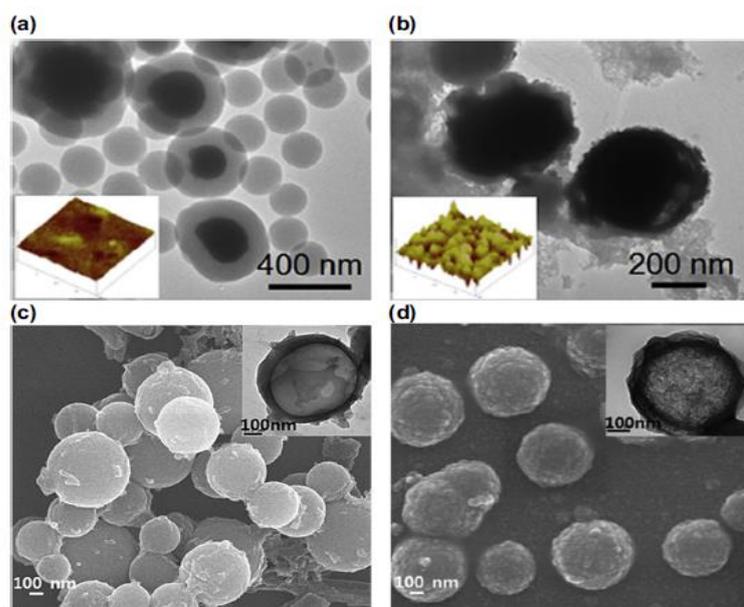


Figure 1.18 Micrographies de matériaux de changement de phase nano-encapsulés (MCP) [58].

1.2.3.4 Les nanotechnologies, futures perspectives d'isolation thermique des bâtiments

Les futures perspectives de recherche dans le domaine des nanomatériaux de construction et des solutions d'isolation thermique sont susceptibles de produire des matériaux d'isolation thermique innovants et performants, répondant aux attentes de demain et à l'avenir du secteur de la construction. Dans un proche avenir, la nanotechnologie peut être considérée comme une méthode d'application scientifique utile pour la production de matériaux d'isolation thermique efficaces. La recherche en nanotechnologie se focalise sur la maîtrise de la matière

des particules, dont les dimensions sont comprises entre 0,1 nm et 100 nm, à l'échelle atomique et moléculaire.

1.2.3.4.1 Matériaux de nano-isolation (NIM)

La figure 1.19 illustre la mutation du VIP vers les matériaux nano-isolants (NIM). Ces matériaux nano-isolants, dont la taille des pores internes est réduite à moins de 40 nm, permettent d'obtenir une conductivité thermique globale inférieure à 4 mW/(mK) à l'état brut [59]. Ainsi, le NIM est constitué d'un matériau homogène avec des structures nanoporeuses fermées ou ouvertes de taille réduite. Le système de maillage des NIM est identique à celui des VIM et des GIM, ce qui empêche la pénétration d'air et d'humidité dans la structure des pores pendant leur durée de vie d'au moins 100 ans. Par effet Knudsen, le NIM garantit une faible conductivité thermique sans appliquer de vide sur les pores.

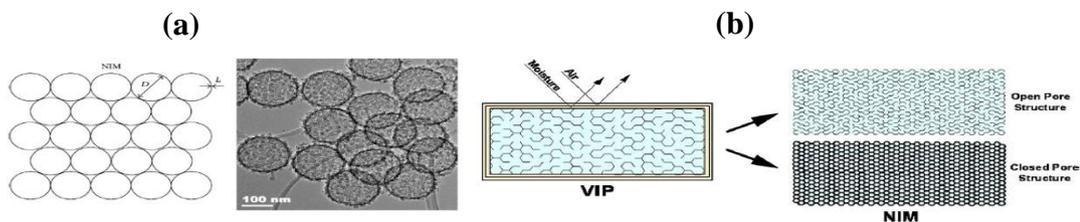


Figure 1.19 a) Modèle conceptuel d'un NIM à base de nanosphères creuses (à gauche), image TEM des nanosphères de silice creuses réelles (à droite). **b)** Le développement des VIP à NIM [60].

1.2.3.4.2 Matériaux d'isolation sous vide (VIM)

Le matériau d'isolation sous vide (VIM) est constitué d'un matériau homogène avec une structure cellulaire de porosité compacte, remplie sous vide, caractérisée par une conduction thermique inférieure à 4 mW/(mK) [61]. (Voir figure 1.19).

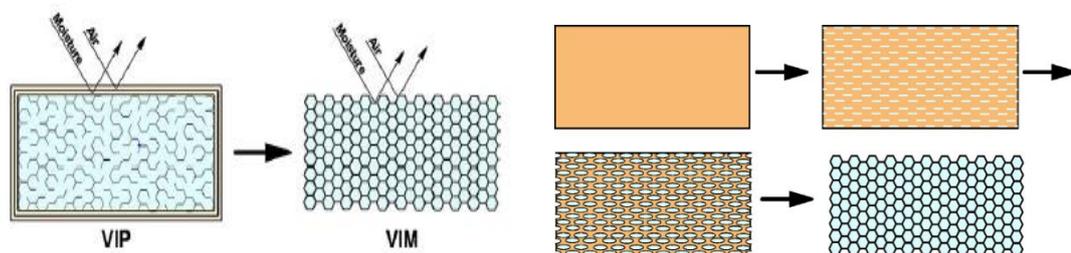


Figure 1.20 Gauche Le développement du VIP au VIM et à droite Création envisagée d'un matériau d'isolation sous vide en tant que matériau à l'état solide se gonflant de l'intérieur pendant la formation et l'expansion ultérieure d'une structure de pore interne [62].

1.2.3.4.3 Matériaux d'isolation au gaz (GIM)

Le matériau isolant à base de gaz (GIM) est un matériau homogène dont la structure étanche à l'air est constituée de microspores remplies de gaz à faible conductivité tels que l'argon (Ar), le krypton (Kr) ou le xénon (xénon), et sa conductivité thermique est inférieure à $4 \text{ mW}/(\text{mK})$ [63].

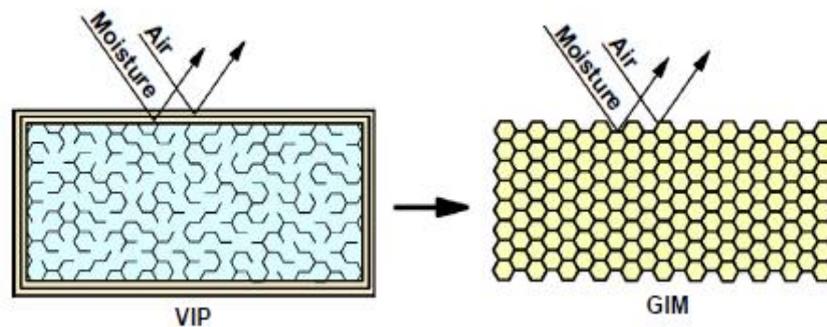


Figure 1.21 Développement du panneau isolant de vide au matériel d'isolation de gaz [62].

1.2.3.4.4 Matériaux d'isolation dynamique (DIM)

Le matériau d'isolation dynamique (DIM) est un matériau dont la conductivité thermique peut être contrôlée dans une plage de tolérance admissible. La régulation peut être obtenue grâce à la capacité de modifier la conductivité thermique dans des proportions déterminées et maîtrisées par rapport aux exigences techniques.

1.2.3.4.5 Matériaux d'isolation en Nano béton (Nano Conc)

Dans un contexte économique caractérisé par la diminution de la conductivité thermique des matériaux isolants, de nouvelles solutions doivent être recherchées pour les éléments porteurs de l'enveloppe du bâtiment. Lors de l'utilisation du béton, il faut envisager de le mélanger avec des NIM (nanomatériau d'isolation), afin de réduire la conductivité thermique du béton, qui représente un volume important dans la structure des bâtiments, tout en préservant l'essentiel de ses capacités de résistance mécanique. En effet, comme le béton, qui se caractérise par une conductivité thermique élevée ($1700\text{-}2500 \text{ mW} / (\text{mK})$, avec ou sans ossature), l'enveloppe d'un bâtiment en béton utilise toujours des matériaux d'isolation thermique de natures distinctes afin d'obtenir un faible coefficient de transmission thermique (U) [64].

1.3 Méthodes et techniques d'isolation thermique

Le processus d'isolation thermique des parois opaques peut être assuré par la pose d'une couche isolante sur la structure porteuse de la construction (isolation rapportée), ou par la mise en œuvre d'éléments porteurs et isolants (isolation répartie). L'isolation rapportée est plus utilisée que l'isolation répartie. Elle permet de distinguer les deux fonctions sur chantier, à savoir l'isolation structurelle et l'isolation thermique. Quant à l'isolation répartie, elle est conçue pour les logements individuels et les bâtiments à usage collectif de quelques niveaux auxquels ce dispositif est recommandé pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment et aux besoins thermiques des occupants.

1.3.1 Isolation thermique des parois

L'isolation thermique peut être positionnée à l'intérieur ou à l'extérieur des murs. Elle peut être posée sur la face du mur incluse dans son épaisseur entre les ossatures dans le cas de murs à structure bois ou métallique. En outre, elle peut être mise en œuvre, entre autres, par un matériau porteur tel que la terre cuite ou le béton cellulaire. En plus des dispositifs classiques, il existe également d'autres procédés d'isolation adaptés, notamment le coffrage isolant, qui permet de réaliser l'isolation par l'intérieur et par l'extérieur après le coulage du béton.

1.3.1.1 Isolation thermique des parois intérieures

Le système d'isolation par l'intérieure présente l'avantage de la rapidité de mise en œuvre. En effet, le matériau isolant peut être fixé au mur par adhérence ou par scellement mécanique. Ce système d'isolation permet de positionner le gros œuvre à l'extérieur, ce qui réduit l'inertie thermique du bâtiment. Il crée ainsi une rupture d'isolation au niveau des liaisons, notamment avec les parois intérieures entre murs, planchers et cloisons. Les ponts thermiques générés par cette interruption constituent des lieux privilégiés de déperdition thermique et des sources de désordres dus aux écarts thermiques et aux condensations surfaciques. Dans les nouvelles réalisations, les ponts thermiques entre le mur et le plancher peuvent être pris en charge à l'aide de rupteurs thermiques insérés dans les raccords avant le coulage du béton.

1.3.1.2 Isolation thermique des parois extérieures

La technique d'isolation thermique par l'extérieur consiste à envelopper le bâtiment avec un revêtement à caractère isolant. Actuellement, dans le domaine du bâtiment, le recours à

L'isolation thermique par l'extérieur est souvent préconisée en cas de rénovation ou de réhabilitation totale des façades du parc immobilier existant. Ce procédé d'isolation génère des économies sur les coûts énergétiques. Ce processus d'isolation thermique par l'extérieur est plus onéreux que celle de l'isolation thermique intérieure, le revêtement d'isolation thermique est appliqué à la surface des façades par collage ou par fixation mécanique. L'isolation thermique extérieure est recouverte d'un parement ou d'un revêtement extérieur assurant sa protection contre les intempéries. Cette méthode positionne le gros œuvre dans le volume chauffé offrant à l'enveloppe de la construction une meilleure inertie thermique. L'isolation thermique par l'extérieur se distingue en trois catégories fondamentales.

1.3.1.3 Isolation thermique répartie

Les parois sont composées simultanément de blocs isolants et de blocs porteurs. Le montage à joints amincis procure de meilleures performances thermiques. Ces blocs sont réalisés en béton cellulaire, en béton de granulats légers, ou encore en terre cuite multi-alvéolaire, etc. Le traitement des ponts thermiques est favorisé par la forte épaisseur de blocs. Cette conception d'isolation répartie permet la combinaison de l'isolation et de l'inertie thermique.

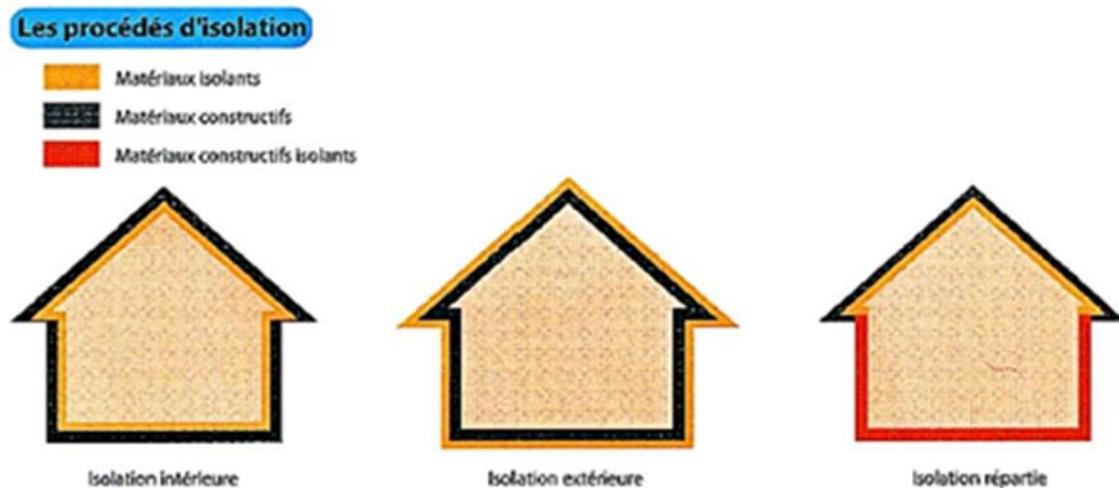


Figure 1.22 Procédés d'isolation interne, externe, interne, et répartie [65].

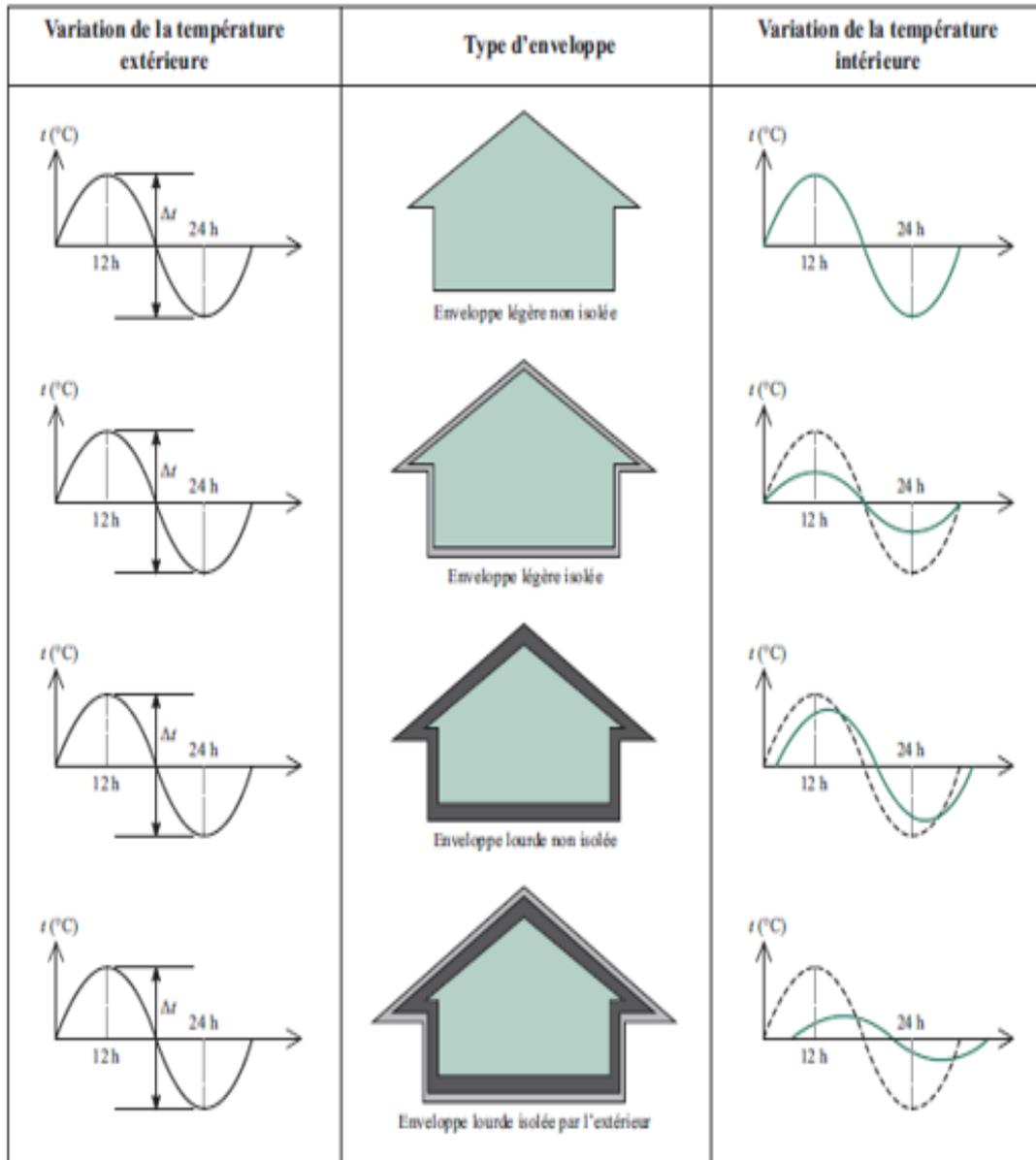


Figure 1.23 Comportement thermique selon composition de l'enveloppe extérieure [65].

1.4 Réhabilitation énergétique des constructions

Le secteur de la construction dispose d'une capacité intéressante pour améliorer la performance de l'énergie en s'appuyant sur des dispositifs énergétiques économiques et des isolations performantes. En ce qui concerne les constructions anciennes, leur réhabilitation thermique est une priorité éminente pour plusieurs pays, puisqu'elles génèrent un pourcentage considérable de l'énergie consommée et restent disponibles, sur le plan conceptuel, pour le siècle à venir. Selon des études (Verbeeck 2005, Enkvist 2007, EEW 2013), la réponse la plus effective pour maîtriser la consommation énergétique dans le

secteur du bâtiment (bâtiments anciens et neufs) consiste à réduire les déperditions d'énergie en optimisant l'isolation thermique par l'extérieur.

L'amélioration des performances thermiques des enveloppes des bâtiments est essentielle pour réduire la demande énergétique requise par la construction. Pour les rénovations et même pour les bâtiments neufs, la question de l'épaisseur des couches d'isolation extérieure et intérieure est devenue préoccupante. Aujourd'hui, l'utilisation de matériaux dits super-isolant, à haute performance énergétique comme les aérogels, suscite un intérêt majeur. En effet, cette dernière possède des propriétés originales qui sont très avantageuses et qui méritent d'être incluses dans les normes en vigueur du secteur de la construction. En effet, par leur transparence optique et leur très faible conductivité thermique, les aérogels sont aptes à être intégrés dans l'isolation de façades opaques et transparentes.

1.4.1 Les approches novatrices d'isolation thermique

L'isolation des bâtiments existants, dont l'enveloppe est responsable de la plupart des déperditions thermiques, a sensiblement réduit leur consommation d'énergie. Ce type de rénovation a conduit à la conception de bâtiments dont les besoins en chauffage et en climatisation ont été diminués de moitié en comparaison avec les bâtiments sans isolation thermique. Cependant, les techniques traditionnelles d'isolation thermique deviennent de moins en moins efficaces pour les ambitieux et les objectifs fixés pour les années à venir. Il est par conséquent devenu nécessaire de recourir à des pistes de recherche complémentaires ou à des dispositifs plus performants, du point de vue méthodologique et technologique. Les bâtiments anciens accordent une attention particulière à la question de la réhabilitation thermique. D'une part, leur composition et la forme urbaine dans laquelle ils s'inscrivent leur confèrent des caractéristiques particulières en matière de comportement thermique. D'autre part, la discussion contemporaine est fortement influencée par une tension entre la préservation du patrimoine historique et le développement urbain durable.

1.4.2 Transition de la performance thermique à la performance énergétique dans les bâtiments

La capacité du bâtiment à minimiser la consommation d'énergie à l'intérieur est définie par sa performance énergétique, également appelée comportement thermique. Ces critères sont le résultat d'un ensemble d'éléments liés au bâtiment, notamment les aspects urbains, architecturaux et sociaux. Il est possible de distinguer les facteurs qui contribuent aux

apports thermiques d'un bâtiment, tels que l'absorption de chaleur due à l'orientation et la perte de chaleur dissipée par les personnes et les équipements. En revanche, certaines caractéristiques favorisent la diminution de ces apports, comme la forme urbaine, les procédés et les matériaux de construction. En effet, le bâtiment est qualifié d'efficace grâce à son enveloppe, sa composition et ses matériaux, qui contribuent à l'isolation thermique et, par conséquent, réduisent la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation.

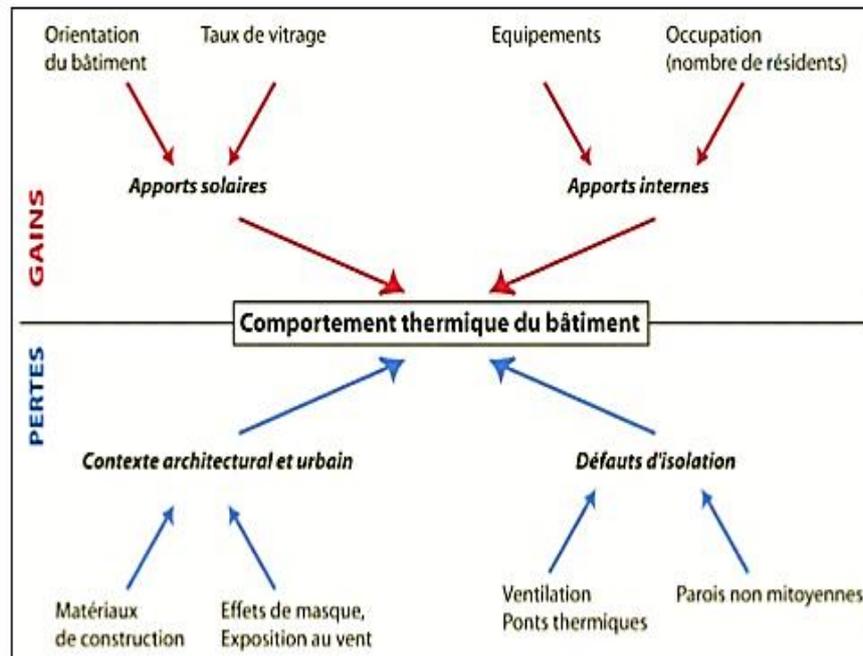


Figure 1.24 Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment [66].

1.4.3 Perspectives d'isolation thermique alternative

Plusieurs méthodes de recherche sont explorées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Elles se déclinent en deux grands domaines : une recherche axée sur les équipements énergétiques des bâtiments, et une autre plus axée sur les questions d'enveloppe. La recherche sur les équipements est consacrée à l'amélioration des performances des dispositifs auxiliaires, tels que le chauffage et la climatisation, afin de réduire les dépenses liées à la consommation d'énergie. En ce qui concerne l'enveloppe, une grande partie de la recherche se concentre sur l'évolution des solutions d'isolation traditionnelles et la transition vers des techniques d'isolation alternatives. Cela implique le développement de matériaux et de solutions d'enveloppe avec des capacités d'isolation hautes performances pour une épaisseur minimale et une très faible conductivité thermique.

Ces solutions comprennent les super-isolant, notamment l'isolation sous vide (VIP) et les aérogels, capables de garantir une conductivité thermique de l'ordre de $0,005 \text{ W / (mK)}$. Ce matériau d'isolation est envisagé pour la réhabilitation thermique des bâtiments dans lesquels les limites de l'espace habitable sont souvent évoquées. Cependant, la question de la durabilité et des performances thermiques de ce type de matériau détermine actuellement l'horizon de ses applications dans le domaine de la construction.

Conclusion

La consommation d'énergie due aux besoins de chauffage ou de refroidissement est souvent influencée par les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment. La bonne sélection des composants de la conception et de l'enveloppe en fonction de l'environnement local est essentielle pour réduire les besoins en chauffage et en refroidissement. L'isolation, en général, est une approche efficace pour réduire la consommation d'énergie dans ce secteur. Par conséquent, l'épaisseur appropriée de l'isolation et le type de matériaux isolants sont les variables déterminantes de l'étude. L'isolation thermique des matériaux de construction couramment utilisés doit être choisie après un examen approfondi de leurs propriétés. En outre, des variables autres que la conductivité thermique ont un impact sur leur sélection. Ces contraintes sont susceptibles de restreindre ou de compromettre les caractéristiques thermiques de l'isolation choisie. Il est conseillé de procéder à une réhabilitation énergétique des structures ou d'en construire de nouvelles.

Les avantages et les inconvénients des matériaux de construction et des procédures d'isolation thermique sont souvent testés et certifiés par des laboratoires homologués avant leur application effective sur le chantier. Les recherches des scientifiques ont également révélé que la performance énergétique d'un bâtiment est tributaire d'un certain nombre d'éléments liés à l'isolation thermique. Outre l'isolation des murs, des facteurs tels que l'orientation, la forme, le volume et la couleur des murs extérieurs, leurs matériaux, leur épaisseur, la taille et l'emplacement des ouvertures, ainsi que de nombreuses autres caractéristiques de la construction, jouent un rôle déterminant dans l'efficacité thermique du bâtiment. Les défis du futur proche sont incontestables et imposent une coopération plus soutenue entre la communauté scientifique, les entreprises et les pouvoirs publics.

Les matériaux d'isolation conventionnels appliqués dans le bâtiment, tels que la laine minérale, le polystyrène, le polyuréthane et même le liège, sont bon marché mais moins efficaces ($0,030$ à $0,050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). De plus, ils ne sont plus adaptés aux enjeux énergétiques actuels en raison de leurs épaisseurs trop importantes. Les matériaux et composants de super-isolation thermique, tels que les panneaux d'isolation sous vide (PIV) ou les aérogels de silice, ont récemment fait une apparition réussie sur le marché, mais leur coût reste prohibitif par rapport aux solutions classiques d'isolation thermique. Cependant, en raison de leurs performances thermiques, ces super isolants peuvent s'imposer dans le temps et devenir ainsi économiquement avantageux.

Au fil du temps, les performances des matériaux d'isolation thermique sont susceptibles de diminuer. En revanche, des matériaux et procédés récemment découverts peuvent apporter une solution aux défis thermiques de demain, ce qui nécessite d'envisager l'avenir de ces isolants en termes de développement et de renforcement grâce aux technologies actuelles des nanoparticules. Ces nanoparticules sont sélectionnées pour leurs propriétés thermiques, physiques et mécaniques afin de répondre aux besoins futurs des bâtiments d'aujourd'hui.

En général, le matériau ou le dispositif d'isolation thermique utilisé dans une construction doit être conforme à diverses normes techniques, notamment celles relatives à la mise en œuvre, à la durabilité et au processus de fabrication. Les fibres naturelles sont de plus en plus employées comme composants de renforcement dans les composites polymères légers et rentables. Les fibres naturelles présentent de nombreuses caractéristiques attrayantes, notamment leur légèreté, leur économie, leur faible densité et leur caractère renouvelable. De plus, vers la fin du cycle de vie d'un bâtiment, le recyclage est aisé. Ces matériaux sont plus respectueux de l'environnement que les matériaux de construction conventionnels. De nombreux efforts ont été entrepris dans le but de réduire la conductivité thermique en combinant des nanocelluloses et des composants nanométriques.

Afin de développer des matériaux de construction alternatifs durables ainsi que des méthodes peu coûteuses permettant des constructions plus économiques et durables, la communauté scientifique a consenti des efforts considérables pour se conformer aux normes de confort thermique requises aujourd'hui. Les réponses apportées par le domaine de la construction peuvent donc être adaptées par le secteur industriel, induisant une stratégie de développement durable. En effet, le secteur du bâtiment est également confronté à cette problématique. Par conséquent, lorsque le recours à ces matériaux naturels est accru, cela se traduit par la réduction des dépenses liées à la production. Pour les besoins du secteur de la construction, l'utilisation de nouveaux matériaux isolants performants devient un enjeu incontournable, non seulement d'un point de vue environnemental, mais aussi d'un point de vue économique. Par conséquent, la recherche évolue dans le développement de matériaux d'isolation super-thermique innovants qui répondent aux normes requises pour le développement durable.

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART

Introduction

Les nanomatériaux sont un sous-domaine de la science des matériaux qui implique l'application de la nanotechnologie. Elle est particulièrement stimulée par les matériaux nanométriques aux caractéristiques morphologiques, notamment ceux dont les propriétés varient en fonction de leur taille. Bien que le mot « nanomatériau » soit parfois utilisé pour désigner des matériaux inférieurs à un micromètre, il se réfère en fait à une substance inférieure à un dixième de micromètre. Les polymères à base de pétrole ne sont pas biodégradables et proviennent de ressources non renouvelables. Des alternatives à ces matériaux sont essentielles pour résoudre les problèmes de gestion des déchets et assurer une plus grande durabilité. Les matériaux composites biopolymères sont écologiques, durables et rentables. En raison de leur abondance dans la nature, des fibres cellulosiques à haute résistance peuvent être utilisées à cet égard. Les propriétés des nanofibres, supérieures à celles des microfibrilles, contribuent à la consolidation des composites polymères et à l'amélioration des propriétés thermiques.

2.1 Impact de la Nanotechnologie sur la conception architecturale (nano architecture)

2.1.1 NanoArchitecture

Les techniques de construction seront bouleversées à mesure que la recherche progressera au niveau moléculaire. La nano-architecture permet aux architectes de concevoir des projets qui correspondent davantage aux attentes des habitants. L'expérience de ce style d'architecture semblerait plus authentique, plus adaptable et plus polyvalente que les conceptions architecturales actuelles. Pour les chercheurs et les concepteurs, la nanotechnologie peut être une source de solutions alternatives à plusieurs problèmes cruciaux d'aujourd'hui. Les progrès les plus significatifs qui ont entraîné un changement de l'approche architecturale sont liés à la miniaturisation des composants (nanotechnologie). La capacité à appréhender et à manipuler la matière à une échelle de cent milliardièmes de mètre a permis des avancées majeures dans les matériaux et les processus de construction. Cependant, la question demeure de savoir si ces réformes, qui pourraient avoir un impact significatif sur la pratique architecturale à l'avenir, sont prêtes à être envisagées.

2.1.2 Nanomatériau en architecture

La nanotechnologie a consacré énormément d'efforts à la conception, à la recherche et à la validation de ces matériaux innovants qui révolutionneront le fonctionnement des bâtiments. Comme les matériaux intelligents permettent une plus grande interaction et conversion des propriétés, les architectes doivent concevoir leur intégration significative dans l'environnement bâti. Il est important que les architectes comprennent certains des principes technologiques fondamentaux par lesquels la nanotechnologie peut modifier les matériaux et leurs actions.

2.1.3 Vers une vision adaptative de la nano architecture

À l'heure actuelle, les architectes sont censés disposer d'une polyvalence innovante grâce à la combinaison inégalée des nanotechnologies et de la conception. Les nanomatériaux tels que les revêtements photocatalytiques, les revêtements hydrophobes et l'isolation thermique, par exemple, peuvent être intégrés pour concevoir des matériaux de construction autres que le bois, le béton et le verre. Cette véritable révolution libère le génie créatif de l'architecte des contraintes et restrictions technologiques, lui permettant de surmonter les obstacles techniques et de stimuler son imagination.

2.2 Revêtements de nanomatériaux

Les revêtements à base de nanomatériaux sont un domaine important de la science des nanotechnologies. Son travail est principalement composé de béton, de verre et d'acier. L'essentiel des travaux implique le dépôt chimique en phase vapeur, le trempage, la projection et le revêtement au plasma pour déposer des couches minces sur un matériau de base afin d'améliorer ses propriétés de surface ou de préserver son aspect. Les revêtements utilisés pour augmenter les performances, les qualités d'usure et la résistance à la corrosion sont inclus dans ces conceptualisations. De plus, ils peuvent être utilisés pour modifier les propriétés d'adhérence, de couleur et de réflexion des matériaux [67].

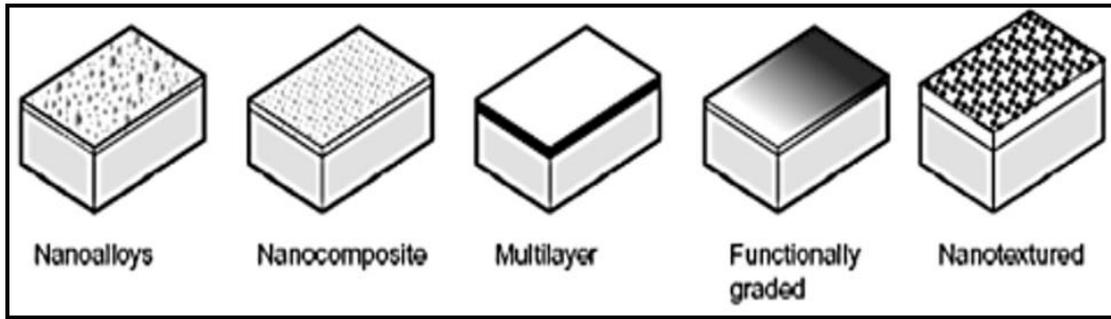


Figure 2.1 Formes de nanorevêtement typiques [67].

2.2.1 Auto nettoyage (photo catalytique)

Grâce aux revêtements photocatalytiques, il est désormais possible d'obtenir des surfaces contenant des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2). Ces nanoparticules déclenchent la photocatalyse, un processus dans lequel la saleté est décomposée et éliminée par les rayons ultraviolets du soleil. Les surfaces autonettoyantes sont désormais fabriquées en appliquant un film mince de nanoparticules sur la surface ou en injectant des nanoparticules dans la couche superficielle d'un matériau de substrat (Voir la figure 2.2) [67]. Des revêtements minces de dioxyde de titane présentent un photo-comportement catalytique et hydrophile lorsqu'ils sont exposés à la lumière ultraviolette. Le mécanisme de la photocatalyse dégrade les particules étrangères lorsqu'elles sont tamisées.

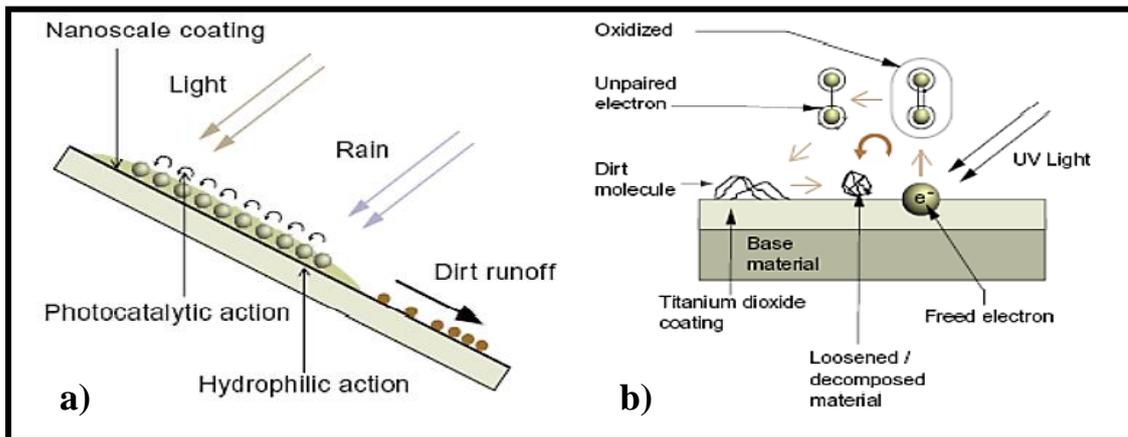


Figure 2. 2 a) La photocatalyse aide l'auto-nettoyage et l'activité antibactérienne réduit les agents polluants dans l'air. b) Les revêtements minces de dioxyde de titane présentent une action photocatalytique et hydrophile [67].

2.2.2 Effet Lotus (autonettoyant)

Les recherches sur les surfaces autonettoyantes ont été menées dans les années 1970 par Wilhelm Barthlott, botaniste à l'Université de Heidelberg en Allemagne. Il a examiné la capacité d'auto-nettoyage des feuilles de lotus oriental, ainsi que de la capucine européenne, du chou américain et du myrte d'euphorbe d'Afrique du Sud. La présence d'une surface hydrophobe microscopiquement rugueuse, recouverte de pointes pour réduire la quantité de contact de surface avec laquelle l'eau coule, est une caractéristique commune. L'imitation de l'effet lotus sur les surfaces des matériaux réduit considérablement le besoin de nettoyage, notamment sur les surfaces régulièrement exposées à une quantité suffisante d'eau, comme les eaux pluviales. Les avantages sont évidents : une meilleure apparence et des besoins d'entretien considérablement réduits. [68].

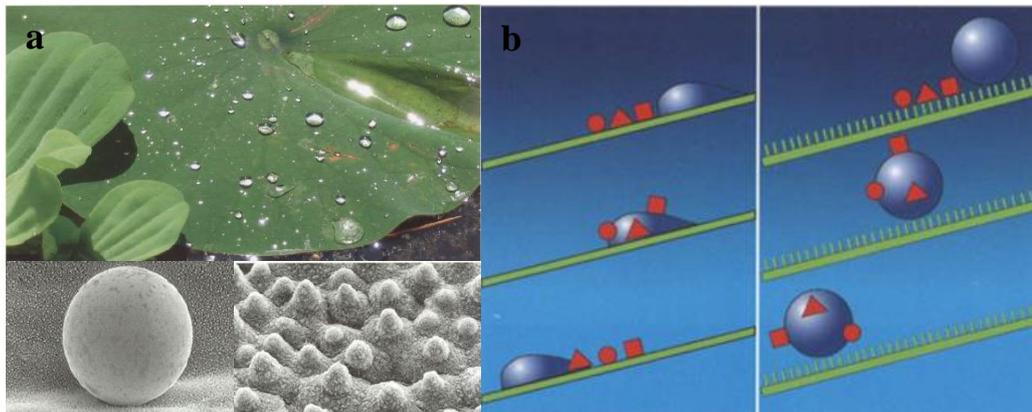


Figure 2.3 a) Plante Lotus avec son autonettoyant naturel. b) Distinction de comportement de la gouttelette d'eau en contact avec la surface conventionnelle et la surface rugueuse hydrophobe à effet de lotus [68].

2.2.3 Intégration des nanomatériaux hydrophobes dans les constructions

Le musée Ara Pacis, conçu par Richard Meier et inauguré par l'empereur Auguste, est situé sur le site archéologique le plus prestigieux de Rome. De fines nanoparticules sont appliquées sur ses surfaces extérieures pour améliorer l'esthétique et les performances environnementales. La structure se distingue par de grands blocs de travertin, typiques de Rome, et par des surfaces badigeonnées à la chaux. Le revêtement autonettoyant a été finement intégré pour préserver la couleur des surfaces blanchies. (Voir la figure 2.4).



Figure 2.4 Revêtement en nanoparticule hydrophobe assurant la durabilité de la peinture blanche du musée Ara Pacis à Rome [68].

Ce bâtiment commercial situé en Croatie a été conçu par les architectes Andrija Rusan et Pula. La pureté du cube blanc attire le regard par un jeu subtil de lumière naturelle éclairée par des couleurs vives. Les façades blanches et épurées sont recouvertes d'une enveloppe hydrophobe (effet lotus). En effet, le nettoyage par la pluie est un excellent moyen de se débarrasser de la poussière sur une surface rugueuse. Ce produit autonettoyant est garanti pour au moins cinq ans, jusqu'à son renouvellement. (Voir la figure 2.5).



Figure 2.5 Revêtement en nanoparticule hydrophobe assurant la durabilité de la peinture blanche d'un bâtiment commercial en Croatie [68].

Le bâtiment MAC du Muhammad Ali Center aux États-Unis d'Amérique est entièrement composé de carreaux de céramique avec des émaux de différentes couleurs, disposés selon un motif unique sur une grille de 30 x 60 cm. Les carreaux ont une surface photocatalytique autonettoyante. Des tests in situ ont montré qu'une façade photo catalytique de 1000 mètres carrés a le même impact que 70 feuillus de taille moyenne. (Voir la figure 2.6).



Figure 2.6 Revêtement en carreaux de céramiques assurant la durabilité de la façade photocatalytique d'un centre Ali MAC en USA [68].

L'enveloppe extérieure de l'église Dio Padre Misericordes a été enduite de ciment blanc fabriqué par la société Italcementi. Le crêpe utilisé dans cette structure a une consistance cimentaire supérieure et une durabilité esthétique ; leur couleur blanche est obtenue par incorporation de marbre de Carrare et de dioxyde de titane. Lorsque l'action photocatalytique est activée, elle élimine les différents contaminants qui entrent en contact avec la surface du béton, les transformant en substances non toxiques. En utilisant les propriétés photocatalytiques de la structure, cette méthode permet de conserver l'aspect esthétique d'origine de la structure dans le temps (Voir la figure 2.7).



Figure 2.7 Revêtement photocatalytique en ciment blanc composé avec des nanoparticules de marbre et dioxyde de titane préservant l'aspect de l'enveloppe de l'église Dio Padre Misericordioso [68].

2.3 Champ d'application de la nanotechnologie dans les matériaux de construction

La nanotechnologie peut être appliquée aux processus de conception et de construction dans de nombreux domaines, car les produits générés par la nanotechnologie ont de nombreuses caractéristiques qui peuvent réduire considérablement les barrières actuelles à la construction, modifiant ainsi les exigences du processus de construction. Cette catégorie comprend des éléments tels que :

- Composites structurels plus légers et plus solides ;
- Revêtement à faible entretien ;
- Amélioration des techniques d'assemblage des matériaux ;
- Meilleures propriétés des matériaux cimentaires ;
- Optimisation de la performance thermique des matériaux isolants.

2.3.1 Nano-béton

Dans le domaine de la construction, le béton est l'un des matériaux les plus polyvalents et les plus couramment utilisés. La compréhension de la micro/nanostructure et du comportement du béton permettra de consolider ses propriétés et de le protéger contre la dégradation au fil du temps et des manipulations humaines. L'incorporation de nanoparticules de silicium (SiO_2) contenant des cendres volantes dans la matrice de ciment améliore la structuration et la porosité à l'échelle nanométrique, ce qui se traduit par une compression accrue du béton. L'amélioration de la résistance à la ségrégation dans le béton autocompactant par la dispersion de nano silice amorphe en suspension dans l'eau et l'augmentation simultanée de la résistance à la compression et à la flexion en incorporant 1% de carbone en poids [69].

Les constructions en béton, avec ou sans armature, ont une conductivité thermique importante qui peut être comprise entre 1,70 et 2,50 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [69]. L'enveloppe extérieure en béton d'un bâtiment nécessite l'utilisation de divers matériaux d'isolation thermique afin de réduire le taux de transmission thermique (valeur U). En d'autres termes, il est souvent accordé souvent une importance disproportionnée à l'épaisseur totale de l'enveloppe du bâtiment, en particulier lorsqu'il s'agit de répondre aux exigences des maisons passives ou

des bâtiments à énergie zéro. Le nano béton est une substance homogène avec des nanopores fermés ou ouverts et une conductivité thermique inférieure à $0,04 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [70]. Par conséquent, il possède des propriétés structurelles critiques comparables à celles du béton (figure 2.8).

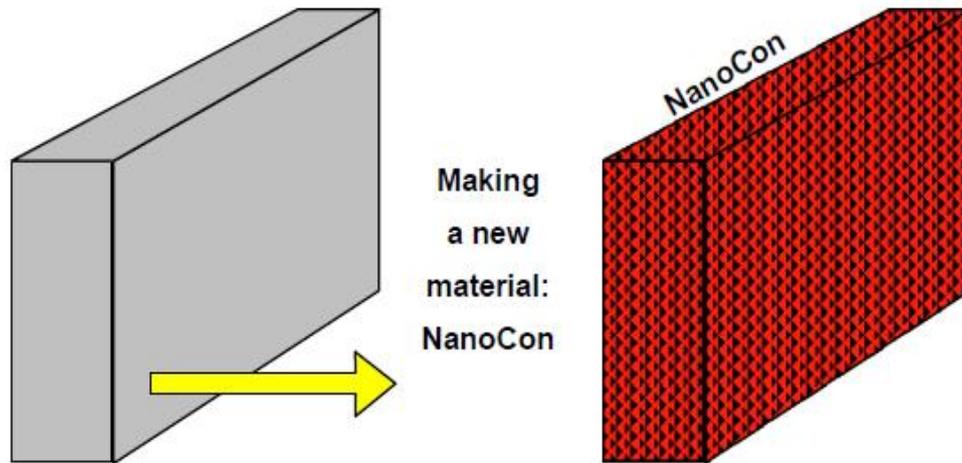


Figure 2.8 Nano Concret est essentiellement un NanoInsulation-Material (NIM) dont les propriétés de construction correspondent ou dépassent celles du béton source [70].

2.3.1.1 Nanotubes de carbone (CNT)

La figure 2.9 (a-b) illustre des nanotubes enveloppés de graphène et intégrés dans un cylindre avec un alignement unique d'anneaux hexagonaux [71]. La structure nanométrique de matériaux tels que le béton modifie fondamentalement la composition de ces matériaux et leur utilisation comme composants structurels. Les nouvelles propriétés des matériaux ont un impact sur les mesures de résistance et de rigidité, ainsi que sur la conception et l'exécution des projets de construction.

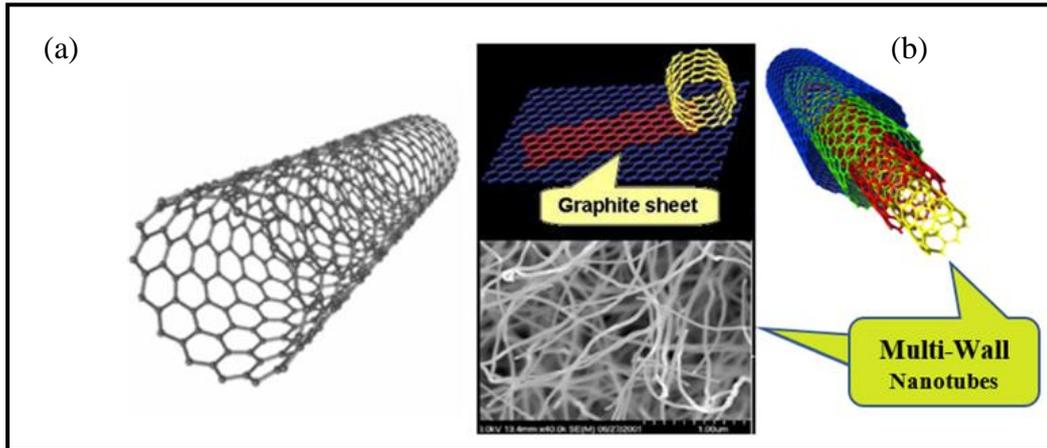


Figure 2.9 a) Nanotubes de carbone (CNT) b) Feuille de graphite de nanotubes [71].

2.3.1.2 Oxyde de titane (TiO₂)

Le dioxyde de titane sous forme de nanoparticules est un pigment blanc courant en raison de sa brillance. Il peut être utilisé comme revêtement réfléchissant et pour catalyser la dégradation des contaminants organiques, des composés organiques volatils et des membranes bactériennes ; il est donc intégré dans les peintures, les ciments, les verres, les carreaux et d'autres produits à des fins de stérilisation et d'antisalissure. Lorsqu'il est incorporé aux matériaux de construction extérieurs, les concentrations de polluants atmosphériques sont fortement réduites. L'ajout de dioxyde de titane (TiO₂) au béton améliore ses propriétés thermiques et mécaniques tout en maintenant sa blancheur, car les rayons ultraviolets rendent le revêtement de TiO₂ plus hydrophile et autonettoyant.

2.3.2 Nanotechnologie et Acier

L'ajout de nanoparticules de cuivre atténue les irrégularités à la surface de l'acier, ce qui réduit le nombre de colonnes de contraintes croissantes et donc les fissures de fatigue. En outre, l'amélioration nanométrique de la phase acier-ciment a permis d'obtenir des câbles plus résistants. Les câbles en acier à haute résistance sont utilisés dans la construction de ponts, notamment les ponts suspendus, où les câbles sont acheminés d'une extrémité à l'autre de la travée. Plus les câbles sont résistants, plus la durée de vie de la construction est longue. Les nanoparticules de magnésium et de calcium augmentent l'épaisseur des grains affectés thermiquement dans les tôles d'acier, améliorant ainsi la ténacité du brasage (figure 2.10).



Figure 2.10 Seri Wawasan bridge, Putrajaya (Malaysia's administrative centre) [72].

2.3.3 Nanotechnologie et Verre

De nombreux nouveaux matériaux pour le vitrage ont été inventés grâce aux nanotechnologies. Les nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2) sont intégrées dans le vitrage car elles sont stérilisantes et antifouling. La dégradation des composés organiques volatils et des membranes bactériennes permet aux particules de TiO_2 de catalyser de puissantes réactions [73]. Aujourd'hui, il existe des verres autonettoyants sur le marché (voir Figure 2.11).

La technologie du dioxyde de titane est hydrophile et son attraction avec l'eau génère des gouttes de pluie qui éliminent ensuite les particules de poussière décomposées au cours du processus ;

La nanotechnologie est également utilisée dans la production de verre ignifuge. Pour obtenir ce résultat, il suffit de prendre en sandwich entre deux feuilles de verre une couche intumescence transparente, une couche intermédiaire composée de nanoparticules de silice fumée (SiO_2) qui se transforme, lorsqu'elle est chauffée, en un pare-feu rigide et opaque ;

Le contrôle de la quantité de lumière et de chaleur qui pénètre dans un bâtiment à travers son vitrage.



Figure 2.11 Façade d'une maison pour personnes âgées à Falveng en Suisse GLASS Crystal [68].

Il existe trois méthodes innovantes issues de la nanotechnologie capables d'empêcher la lumière et la chaleur de pénétrer par les fenêtres du bâtiment.

- Des revêtements à couches minces et surfaces sensibles pour le verre des fenêtres afin de filtrer les fréquences infrarouges indésirables de la lumière et de réduire le gain de chaleur dans les bâtiments.
- Des technologies thermochromiques qui résistent à la température et fournissent une isolation thermique assurant une protection contre les surchauffes tout en maintenant un éclairage adéquat.
- Des technologies photochromiques qui réagissent aux variations d'intensité du rayonnement lumineux en augmentant l'absorption.

2.3.4 Nanotechnologie et Bois

Le bois est un leader dans l'application de la recherche interdisciplinaire et des techniques de modélisation qui ont déjà donné des résultats dans divers domaines (voir figure 2.12). Il est constitué de nanotubes ou de nanofibrilles de matière lignocellulosique. Il est important de distinguer les fibres végétales utilisées comme renfort mécanique dans les composites de ciment et les agrégats végétaux utilisés pour produire des bétons légers biosourcés et des isolants appelés " agrobétons " [74] De nombreuses études sur l'isolement de nanofibres à partir de diverses sources cellulosiques, notamment la biomasse d'huile de palme [75,76], la

pulpe de bois [77], le kenaf [78], le bambou [79], le lin [80] et la paille de riz [81], ont été menées au fil des années.

En récoltant ces nanofibrilles et en intégrant leur production et leur utilisation dans un cycle renouvelable et biodégradable, nous pouvons construire un nouveau paradigme pour des écoconstructions durables. Selon certains auteurs, les nanoparticules ajoutées aux surfaces lignocellulosiques à l'échelle nanométrique peuvent permettre le développement de nouveaux types de surfaces auto stérilisantes et d'auto-réparation interne. Le développement de nanobiocomposites à partir de sources renouvelables enrichies en nanocellulose est un domaine de recherche passionnant qui a donné lieu à plusieurs études sur les (CNF) avec des applications potentielles dans les matériaux de revêtement. [82-83].

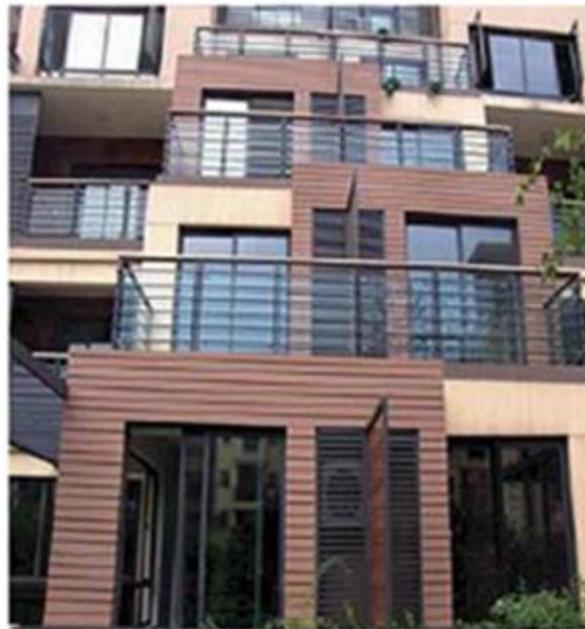


Figure 2.12 Revêtement des façades avec des nanofibres et nanoclayes de carbone composites bois-plastique améliorent la rigidité [82].

2.4 Contribution de la Nanotechnologie au développement des matériaux d'isolation à haute performance thermique

La nanotechnologie s'intéresse à la manipulation de la matière, généralement des particules à l'échelle atomique et moléculaire, dont les dimensions vont de 0,1 à 100 nm. Cependant, lorsque la nanotechnologie est appliquée à la production de matériaux d'isolation thermique, l'accent est mis sur les nanopores plutôt que sur les particules. Ces aspects sont illustrés dans la figure 2.13, où les caractéristiques thermiques et physiques des aérogels

peuvent être élaborées dans des matériaux opaques, translucides ou transparents, ce qui permet une gamme diversifiée d'applications potentielles dans le secteur du bâtiment.

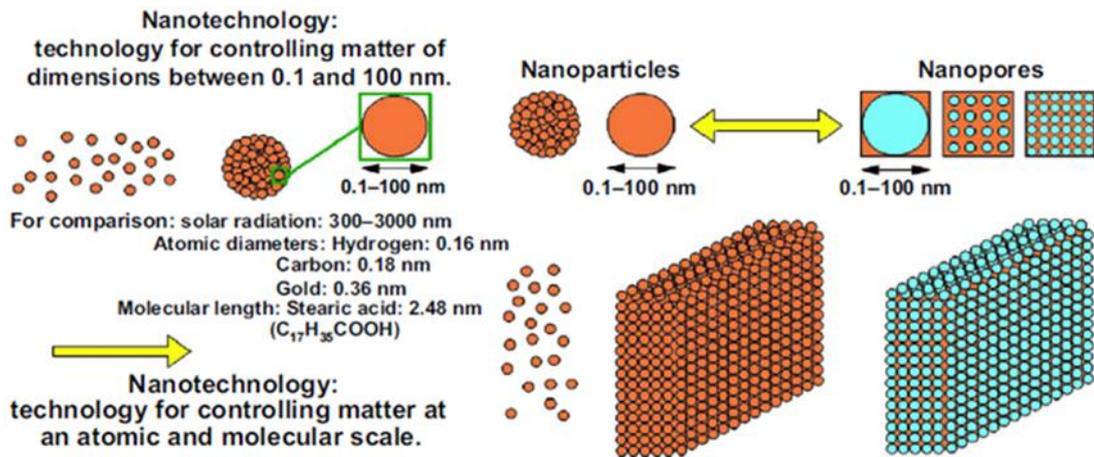


Figure 2.13 La nanotechnologie et son application sur les matériaux d'isolation thermique haute performance [84].

2.4.1 Isolation thermique des bâtiments à base de nanomatériaux

2.4.1.1 Les panneaux sous vides (PIV)

Les panneaux d'isolation sous vide (VIP) sont idéalement conçus pour fournir une excellente isolation thermique avec une couche mince d'isolant. Leur conductivité thermique est jusqu'à dix fois inférieure à celle des matériaux d'isolation conventionnels tels que le polystyrène et le polyuréthane, et peut atteindre $0,002 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [85]. Ce type d'isolation est constitué de deux composants : le corps central, qui forme le noyau du matériau nanoporeux, et l'enveloppe supplémentaire, qui isole le matériau et empêche la pénétration des gaz atmosphériques en maintenant le vide du panneau et en assurant la résistance des matériaux microporeux.

Le bâtiment Seitzstrabe à Munich est le premier à être entièrement isolé à l'aide de panneaux sous vide économiquement viables qui consomment très peu d'électricité. L'épaisseur de l'isolation a été divisée par deux en combinant un VIP de 2 cm avec un système d'isolation enduit de polyuréthane. Le VIP a été utilisé sur les toits-terrasses et même entre les murs, résultant en une façade extrêmement économe en énergie. Le bâtiment a reçu le prix allemand Bauphysikpreis, le prix bavarois de l'énergie et le prix Dena (Agence allemande de l'énergie). La thermographie montre que les panneaux sous vide (VIP)

enveloppant la façade extérieure du bâtiment ont contribué à l'élimination des déperditions thermiques par ponts thermiques et qu'aucun des panneaux n'a été endommagé (Voir figure 2.14).



Figure 2.14 Thermographie d'une façade extérieure d'un bâtiment isolé thermiquement par un (VIP) en Seitzstrasse à München[68].

Les panneaux d'isolation sous vide (PIV) sont constitués d'une silice poreuse ouverte de type fumée à noyau enveloppée de plusieurs couches de polymère métallisé. Plusieurs auteurs, dont Li et al. (2015) et Kalnaes (2014), ont étudié divers aspects des PIV, notamment les ponts thermiques, la conductivité et l'humidité, ainsi que le contrôle de la qualité des PIV utilisés dans la construction de bâtiments. Les conductivités thermiques des panneaux d'isolation sous vide (PIV) sont 5 à 10 fois inférieures à celles des matériaux d'isolation thermique conventionnels tels que la laine minérale et le polystyrène, ce qui sera essentiel pour répondre à la norme requise pour les maisons passives et les bâtiments à énergie zéro. Ainsi, même si les PIV ne sont pas la solution ultime pour l'avenir, ils pourraient être la meilleure solution thermique pour une variété d'enveloppes de bâtiments aujourd'hui et dans un avenir proche, en termes de consommation d'énergie.

2.4.1.2 Les aérogels

Le développement de la technologie des matériaux d'isolation thermique à haute performance devient un objectif sérieux pour le secteur des high-technologies. L'aérogel est l'un des matériaux innovants les plus prometteurs, détenant 15 records dans le livre Guinness pour des propriétés telles que la plus faible densité solide et l'isolation thermique la plus efficace, car ils empêchent presque trois modes de transfert de chaleur (convection, conduction et radiation) [86]. La taille nanométrique est essentielle car les molécules d'air

piégées dans les minuscules nanopores, dont le diamètre ne mesure en moyenne que 20 nm, ne peuvent pas se déplacer, ce qui confère à l'aérogel ses excellentes propriétés d'isolation thermique (Voir figure 2.15). En raison de la résistance thermique très élevée, le coefficient de conductivité thermique est extrêmement faible, ne mesurant que $0,018 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [87]. (Voir figure 2.16). L'aérogel contribue aux économies d'énergie grâce à ses propriétés d'isolation thermique supérieures. Il s'agit d'un isolant à haute performance qui n'a été introduit que récemment sur le marché.

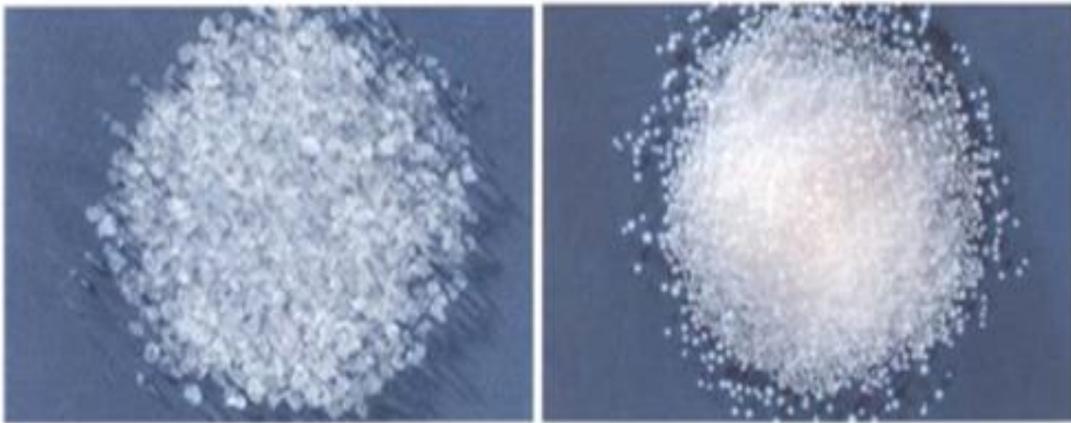


Figure 2.15 L'aérogel de silice possède une structure dendritique avec de petites particules sphériques de 2 à 5 nm fusionnées en groupe pour former une structure tridimensionnelle très poreuse avec des pores mesurant moins de 100 nm et une conductivité thermique est de l'ordre de $0,010 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [68].

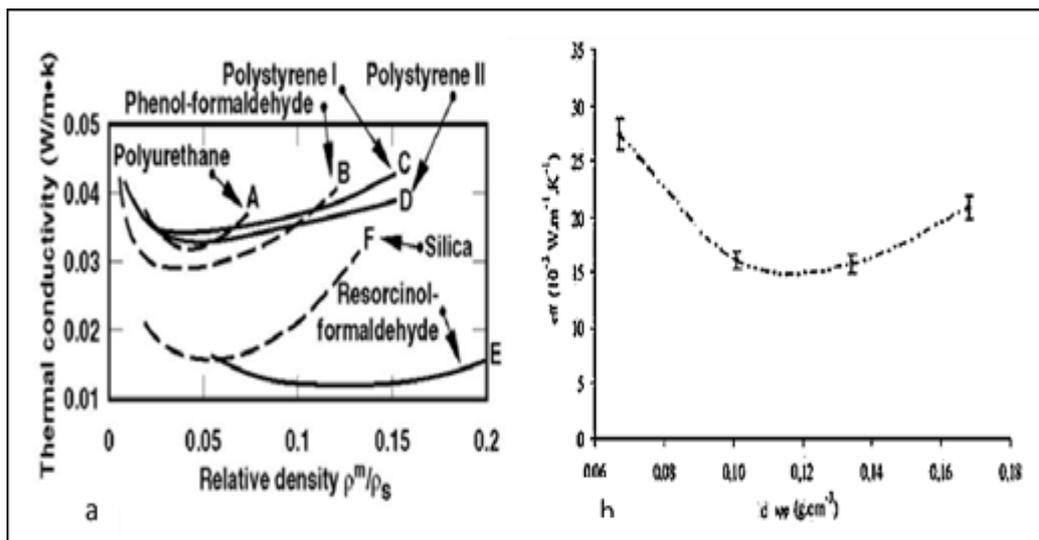


Figure 2.16 a) Comparaison entre la conductivité thermique de l'aérogel de silice et celle des isolants synthétique, b) Conductivité thermique de l'aérogel de silice en fonction de la masse volumique apparente [87].

Les recherches de He et Xie, et He et al. [88,89] indiquent que les aérogels deviennent une solution alternative plus rapide pour déterminer un matériau d'isolation thermique en raison de leur conductivité thermique ultra-basse. Les aérogels durables ont une résistance et une rigidité plus élevée obtenus en sélectionnant correctement les précurseurs de silane et en construisant les réseaux inorganiques de silice qui est mélangé avec différents polymères organiques ou différents réseaux de fibres [90]. Ces nanoparticules peuvent être incorporées dans les peintures et les revêtements pour les utilisés dans l'isolation thermique des bâtiments. Le coût élevé des aérogels est dû essentiellement aux matières premières et au processus de fabrication [91].

Inspiré de la structure du nid de l'oiseau, un nouvel aérogel en composite de céramique fibreux a été créé par He et al. [92]. Le composite de céramique a été préparé par des fibres de mullite polycristallines comme squelette et des aérogels $ZrO_2 - SiO_2$ comme remplissage. La résistance à la compression jusqu'à 1,05 MPa, soit environ le double de celle de la fibre de mullite et dix fois plus élevée que celle des aérogels purs. Cependant la conductivité thermique devient plus basse que $0,0524 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, en température ambiante, et $0,082-0,182 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [92] dans la plage de température de $500 \text{ }^\circ\text{C} - 1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Par conséquent, ce composite aérogels / céramique fibreuse à très faible conductivité thermique à haute résistance peut être appliqué comme matériau d'isolation thermique dans les domaines de construction et de l'aérospatiale.

Bien que d'autres propriétés d'isolation soient affectées, la nature hydrophobe de l'aérogel limite l'absorption d'eau. Les particules d'aérogel incorporées dans le béton empêchent l'absorption d'eau et sa surface devient imperméable, ce qui la rend plus respirante que les revêtements traditionnels, qui peuvent modifier la composition volumétrique finale du mélange. Buratti et al. [93] ont indiqué que les propriétés thermiques et acoustiques des systèmes d'isolation composés d'aérogel de silice granulaire mélangé en diverses proportions avec du plâtre naturel peuvent être utilisées comme revêtements de construction. La conductivité thermique est réduite d'environ 97% ($0,014 - 0,016 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) par rapport au plâtre naturel sans aérogel, dont la conductivité thermique est de $0,50 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [93]. La pulvérisation directe sur la maçonnerie est extrêmement simple, même sur des murs aux géométries complexes. Enfin, le composite peut être utilisé pour réduire la consommation énergétique pendant la construction. (Voir la figure 2.17).



Figure 2.17 Application in situ du plâtre à base d'aérogel [93].

D'après la figure 2.18, les isolants thermiques VIP et aérogel ont des conductivités thermiques comprises entre $0,004$ et $0,0607 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. L'aérogel de silice est une substance très transparente composée d'une chaîne de SiO_2 nanostructure qui présente une porosité pouvant atteindre $99,8 \%$ et une très faible conductivité thermique. Ainsi, les aérogels de silice sont intéressants comme matériau isolant dans les fenêtres [94] et les capteurs solaires [95] en raison de leur transmission visuelle élevée. Les aérogels ont démontré une résistance supérieure à la compression. Par conséquent, ils sont souvent utilisés dans des structures sandwich entre deux feuilles de verre [96].

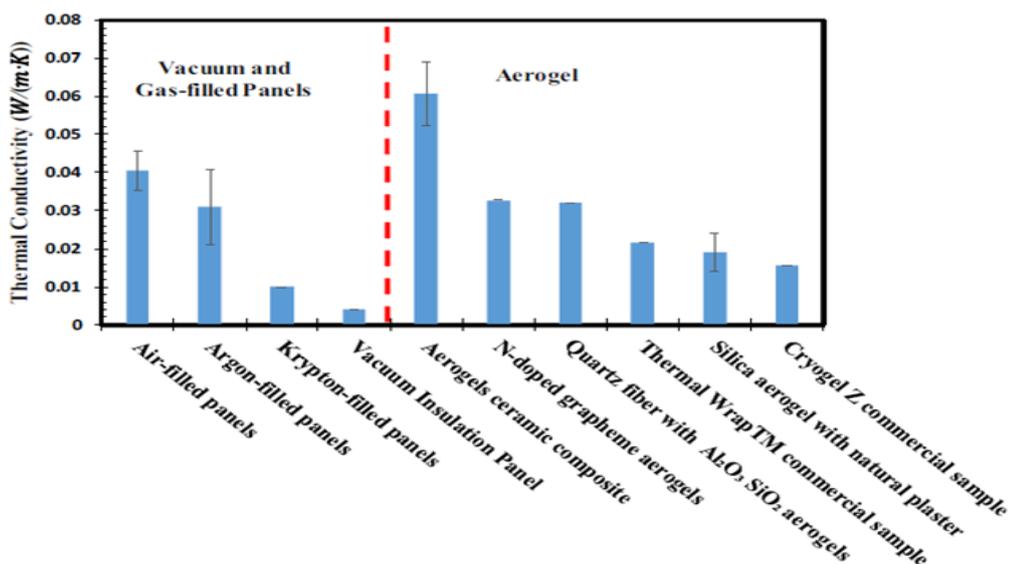


Figure 2.18 Conductivité thermique des isolants thermiques courants [97].

2.4.1.3 Matériaux à changement de phase (MCP)

Les MCP, également appelés matériaux à changement de phase, sont des substances qui stockent la chaleur latente pendant le processus de fusion et la libèrent pendant la solidification, tout en maintenant une température stable [98, 99]. Les MCP fondent et se solidifient sur une large gamme de températures, ce qui les rend adaptés à une grande variété d'applications. Il existe plusieurs MCP solides-liquides [100]. Ils sont classés en fonction de leur point de fusion, de leur chaleur latente de changement de phase et de leurs propriétés thermo physiques. Ces matériaux doivent posséder un point de fusion latent élevé. Afin de favoriser et accélérer les cycles de charge et de décharge, il est avantageux de choisir une conductivité thermique élevée. Les MCP peuvent être classés en trois grands groupes en fonction de leur composition chimique :



Figure 2.19 Classification des matériaux à changement de phase [100].

Les MCP peuvent être enveloppés dans des billes de plastique microscopiques et combinés avec du plâtre ou du béton, ou ils peuvent être imprégnés dans les pores d'un matériau porteur (figure 2.20). La micro-encapsulation est une technique dans laquelle le MCP est contenu à l'intérieur de sphères de diamètre micrométrique, sphériques ou cylindriques longitudinales. L'intégration de MCP sous forme de capsules dans les surfaces augmentera la capacité de stockage d'énergie de l'enveloppe du bâtiment [101].

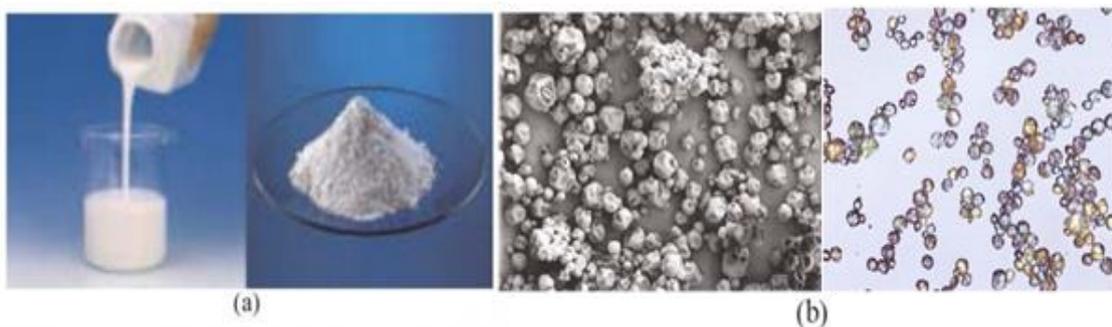


Figure 2.20 Les MCPs microencapsulés : (a) état liquide et état poudre (b) image microscopique électronique à balayage de nombreuses capsules [101].

L'intégration du MCP dans l'enveloppe du bâtiment augmente l'inertie thermique de l'enveloppe. De nombreuses études sur les applications des MCP dans les bâtiments ont établi que ces matériaux sont capables de stocker et de libérer d'importantes quantités de chaleur pendant le processus de changement de phase. L'enveloppe du bâtiment présente une grande surface, ce qui constitue une excellente opportunité pour le stockage de l'énergie thermique [102]. L'intégration d'un MCP adapté aux murs, plafonds et sols des bâtiments permet de capter directement l'énergie solaire, ce qui permet d'absorber de grandes quantités d'énergie thermique à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment.

Le béton est le matériau le plus fréquemment utilisé dans l'industrie mondiale de la construction. Par conséquent, la technologie MCP a été incorporée au béton pour créer une matrice composée de béton et de MCP. L'importante masse thermique du béton permet de retenir l'énergie thermique pendant la journée et de la restituer la nuit. Il en résulte une diminution de la demande de climatisation et de chauffage. Le MCP peut être ajouté au béton pour augmenter sa capacité de stockage thermique. Zhang et al. [103] et Bentz et al. [104] ont étudié une autre méthode d'intégration du MCP dans le béton. Ils ont utilisé des agrégats légers à haute porosité comme matrice. Bentz et al. [104] ont étudié l'utilisation d'un mortier de stockage thermique composé de granulats légers de schiste expansé et de paraffine ou de polyéthylène glycol pour améliorer le transfert de chaleur entre le MCP et le béton (Voir figure 2.21).



Figure 2.21 Application in situ du plâtre à base d'aérogel [68].

2.5 Révolution nanotechnologique dans les composites à base de nanofibre cellulosique

Les panneaux d'isolation sous vide, les panneaux d'isolation au gaz, les matériaux à changement de phase et l'aérogel sont des exemples de matériaux nano-isolants. L'aérogel est un matériau poreux de faible densité dont la taille des pores varie de 2 à 50 nanomètres. L'isolation des bâtiments à base d'air est actuellement à l'étude. De nombreux scientifiques ont étudié l'utilisation de la cellulose, de la pectine et de l'amidon comme super isolants thermiques. Plusieurs additifs, tels que des nanoparticules, de l'argile, du graphène et des polymères spéciaux, peuvent être utilisés comme agents de renforcement dans les aérogels à base de nanofibres naturelles pour améliorer leurs propriétés thermiques et mécaniques, ainsi que pour réduire leur inflammabilité et leur fragilité [105].

Selon les auteurs, la conductivité thermique de l'aérogel dépend de sa teneur en matières solides, de sa teneur en humidité, de sa densité et de la taille de ses pores. Pour une densité de $11,9 \text{ k.g.m}^{-3}$, la conductivité thermique optimale était de $0,0255 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [93] (Voir figure 2.23). L'étude de la conductivité thermique des aérogels est principalement destinée à l'isolation thermique des bâtiments à haute énergie. Li et al [92] ont également étudié des matériaux isolants anisotropes, légers et super isolants en nanowood.

Le nanomatériau d'isolation thermique à base de bois a révélé quatre aspects principaux expliquant les performances de la super isolation thermique. Plus précisément, la porosité du nano bois a été portée à 91 %, contre 60 % pour le bois naturel [106]. L'interaction des fibrilles dans la paroi cellulaire diminue la conductivité thermique sur la face externe (Figure 2.22). Plusieurs auteurs ont montré comment diminuer la conductivité thermique du nano-bois en abaissant la taille des pores en dessous du libre parcours moyen de l'air. Cela réduit principalement la conductivité thermique des nanomatériaux d'isolation.

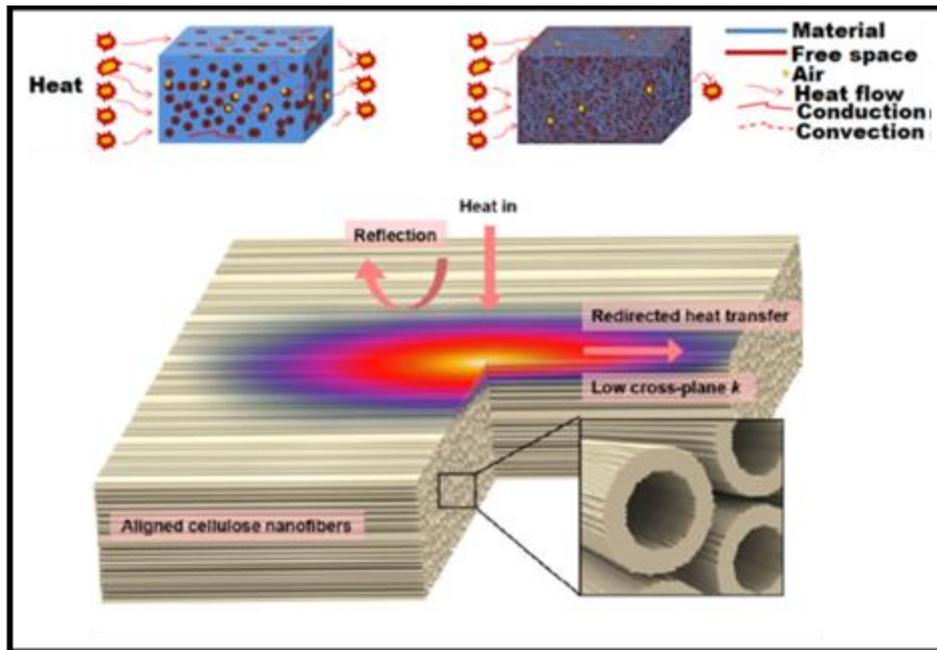


Figure 2.22 Nano-isolant à base de bois : Représentation schématique du phénomène de conduction thermique [106].

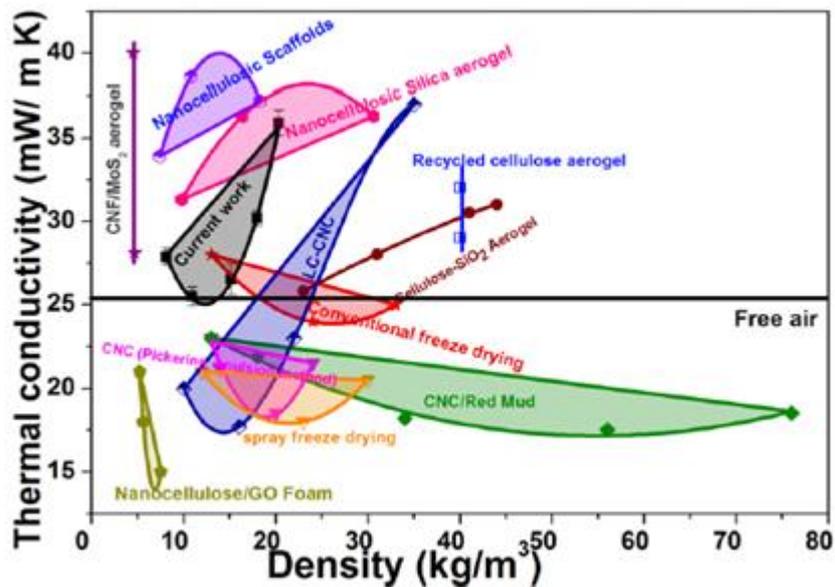


Figure 2.23 Etude comparative sur l'aérogel entre le rapport de la conductivité thermique en fonction de la densité [107].

2.5.1 Fibre de palmier dattier

Le palmier dattier est cultivé dans de nombreuses régions du monde, en particulier les zones arides. Les résidus du palmier dattier, tels que les feuilles, les pétioles et les grappes, sont communément considérés comme des déchets. Avec quatre types de fibres, les palmiers dattiers sont constitués d'une structure fibreuse : fibres de feuilles dans le pédoncule, fibres

de baste dans la tige, fibres de bois dans le tronc et fibres de surface situées dans le tronc [108]. Une étude expérimentale a été menée sur la conductivité thermique de la fibre de palmier dattier. Les fibres naturelles, collectées dans la région d'Errachidia au Maroc, ont été séchées à l'étuve à 60 ° C après lavage. La conductivité thermique des fibres naturelles a été réalisées selon NF ISO 88941, en utilisant le CT mètre. Les résultats de l'étude montrent que la conductivité thermique la plus basse des fibres de palmier dattier est de 0,040 W. m⁻¹K⁻¹ [109]. L'utilisation de ces matériaux dans différents secteurs, particulièrement la fabrication des matériaux composites pour les éléments d'isolation. Les fibres de palmier dattier sont présentées à la (figure 2.24).



Figure 2.24 Palmier dattier et Fibres de palmier dattier [110].

2.5.1.1 Nanofibrilles de cellulose (NFC)

La nanocellulose dérivée de plantes ou de résidus agricoles se divise en deux types : la cellulose nanofibrillée (NFC) et la cellulose nanocristalline (NCC). La NFC est un réseau long, polyvalent et enchevêtré d'un diamètre d'environ 1 à 100 nm qui est composé d'une alternance de domaines cristallins et amorphes [111]. De plus, le NFC est appelé MFC en raison de sa longueur, qui peut dépasser les micromètres. Simultanément, la NCC présente des formes cristallines lisses en forme de bâtonnets et un faible rapport hauteur/largeur, avec un diamètre typique de 5 à 20 nm. La longueur varie de 100 à 500 nm, avec une cristallinité comprise entre 54 et 88 % [112,113]. Les morphologies des NFC et des NCC sont représentées schématiquement (Voir figure 2.25).

Les nanocristaux de cellulose (NCC) et les nanofibres de cellulose (NFC) sont également appelés celluloses nanofibrillées (CNF), celluloses microfibrillées et microfibrilles de cellulose (MFC). En raison de la terminologie disparate utilisée pour caractériser les nanomatériaux de cellulose, plusieurs comités et organismes scientifiques (ISO TC 6 et TC 229 ; TAPPI et CSA Z5100-14) ont entamé le processus de normalisation des différentes formes de nanocelluloses [114].

Par effet de cisaillement, les substances nanocellulosiques deviennent hautement fluidifiées, ce qui est avantageux pour une variété d'applications de revêtement de nature différente [115]. Les régions cristallines des polymères semi-cristallins, comme la cellulose, sont imperméables aux gaz. De plus, le rapport résistance/poids de la cellulose cristalline est huit fois supérieur à celui de l'acier inoxydable ; elle possède donc des propriétés mécaniques supérieures et peut être utilisée dans de nombreuses applications de revêtement [116]. Les traitements chimiques, enzymatiques et mécaniques peuvent être utilisés pour isoler et caractériser la cellulose nanofibrillée à partir de matériaux cellulosiques. En général, les fibres de cellulose sont combinées à l'aide de plusieurs méthodes pour obtenir les caractéristiques de fibrillation et les performances souhaitées de la NFC.

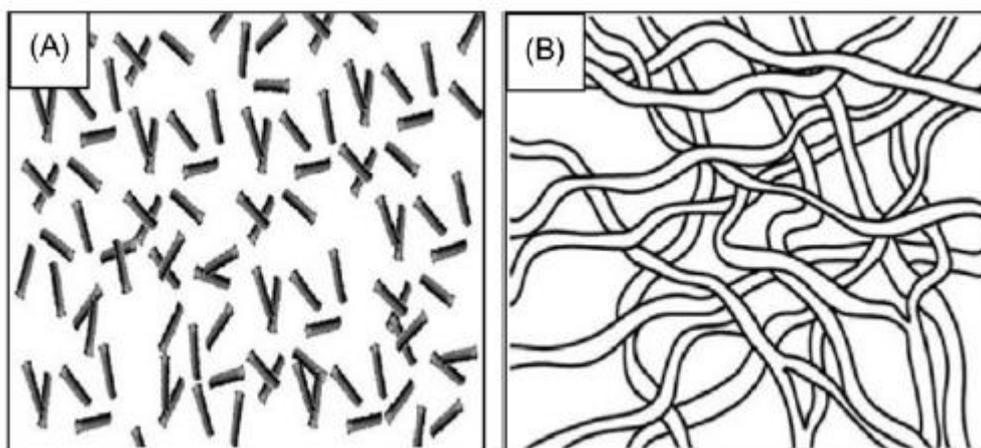


Figure 2.25 Dessin schématique de (A) cellulose nanocristalline (NCC) et (B) cellulose nanofibrillée (NFC) [116].

2.5.1.2 Nanocristaux de cellulose (NCC)

Il y a deux décennies, l'analyse des nanofibres cellulosiques comme procédé de renforcement dans les nanocomposites a commencé (Dufresne, 2010 ; Eichhorn et al., 2010) [117]. Parmi celles-ci, on trouve les "nanofibres" et les "nanocristaux". Malgré leurs dimensions nanométriques, ces cristallites sont souvent appelées "microcristallites".

Le terme "moustaches" désigne des nanoparticules cristallines allongées en forme de bâton, tandis que le terme "nanofibrilles" désigne des nanoparticules longues et flexibles composées d'un arrangement alterné de chaînes cristallines et amorphes.

L'autre catégorie importante de nanoparticules cellulosiques est celle des nanocristaux de cellulose. Les nanocristaux de cellulose sont formés par l'hydrolyse acide de la cellulose native, qui détruit les composants amorphes. Ils sont séparés par des répulsions électrostatiques causées par des fonctions sulfate à leur surface. Les monocristaux, également appelés trichites de cellulose à l'échelle nanométrique ou moustaches de cellulose, sont les particules qui en résultent. Il est bien connu que la taille des nanocristaux de cellulose dépend de la source de cellulose et que des longueurs variables peuvent être obtenues selon la source de cellulose [118]. En raison des procédés de fabrication distincts utilisés pour créer les nanocristaux et les nanofibres de cellulose, leurs formes varient.

2.5.2 Bionanomatérial issu de déchets agricoles

Le développement de bionomatériaux dérivés de la biomasse lignocellulosique progresse à un rythme rapide, avec la création de nanofibrilles et de nanoparticules de cellulose. Grâce à leur durabilité, leur faible densité, leurs propriétés mécaniques élevées, leur faible dilatation thermique et leur biodégradabilité, ces deux types de matériaux nanocellulosiques sont utilisés dans diverses applications [119-120]. Des méthodes de traitement mécanique, biologique et chimico-mécanique sont utilisées pour fabriquer la nanocellulose [121-122]. Une modification et une caractérisation appropriées de la nanocellulose ont le potentiel d'étendre de manière significative l'utilisation des polymères biosourcés dans une variété d'industries.

De nombreuses études ont été menées sur l'incorporation de la biomasse lignocellulosique dans les composites polymères, notamment la fibre de noix de coco [123], la fibre de bagasse dans les composites thermoplastiques [124], les composites polyéthers renforcés par des fibres de sisal nanocellulosiques [125], des coques de graines de jatropha carbonisées dans des biocomposites d'ester vinylique [126], des fibres de nanocellulose carbonatées dans des composites polyformés (acétate de vinyle) [127], et des nanoparticules de coque de palmier à huile. En raison de sa structure en réseau interconnecté par l'hydrogène, c'est un élément de renforcement idéal dans les composites polymères.

La morphologie, l'échelle, la cristallinité et la chimie de surface de la nanocellulose jouent toutes un rôle essentiel dans son application finale. Outre la fibre de bois, une variété de biomasse cellulosique a été utilisée pour extraire la nanocellulose, notamment le palmier à huile, le chanvre, la paille de riz, le bambou, la bagasse et l'ananas [128,129,130]. La biomasse cellulosique est sélectionnée en fonction de la disponibilité des fibres dans une région, des composants chimiques nécessaires à son application et de considérations économiques [131]. Bien que la cellulose soit le biomatériau cellulosique le plus abondant sur Terre, sa transformation en nanostructures n'a reçu une attention considérable que récemment. Au cours des dernières décennies, la biomasse lignocellulosique a attiré un grand nombre de scientifiques et de chercheurs intéressés par l'utilisation des biomatériaux pour extraire la nanocellulose afin de l'utiliser dans la production d'une variété de matériaux performants.

Les composites polymères sont couramment utilisés dans une grande variété d'applications. Ces caractéristiques les rendent attrayants pour une variété d'applications, notamment l'isolation et l'inertie thermique. Les travaux récents de Akil et Mazuki [131] et Chaker et al. [132] montrent comment l'architecture poreuse et les propriétés des mousses et aérogels à base de nanocellulose peuvent être modifiées pour servir de support d'isolation thermique. La faible conductivité thermique de la cellulose en fait un excellent matériau d'isolation thermique. De nombreux chercheurs ont montré que les mousses et aérogels à base de nanocellulose peuvent fonctionner à des températures aussi basses que $0,025 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui les classe parmi les matériaux super-isolant [133-134]. Selon Wu et Radovic [135], les nanoparticules de carbone incorporées dans une matrice époxy améliorent les propriétés thermiques, mécaniques, chimiques et physiques (voir figure 2.26).

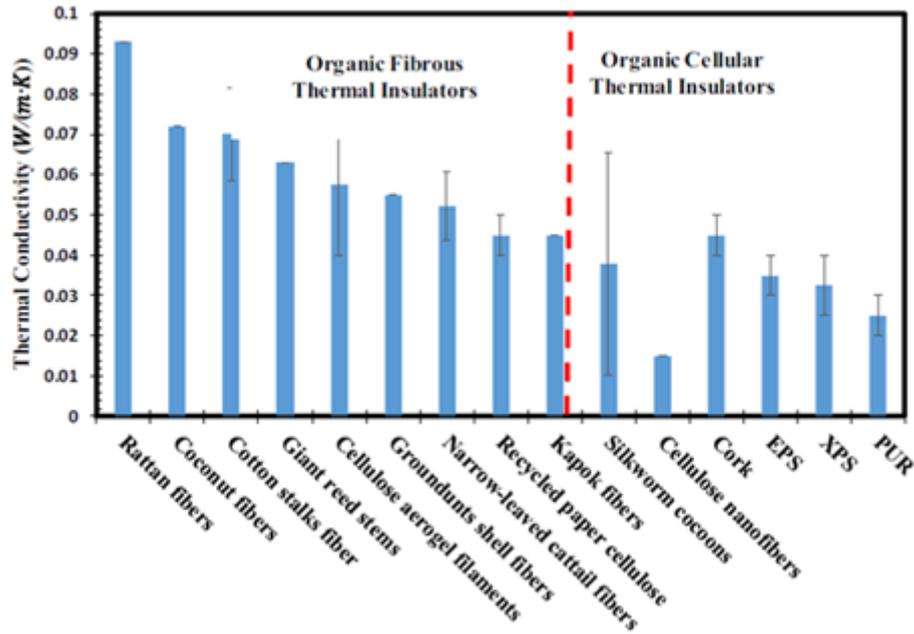


Figure 2.26 Conductivité thermique des isolants thermiques organiques [98].

2.5.3 Synthèse des travaux réalisés sur les matériaux nanobiocomposite

Les matériaux biosourcés sont une source de produits verts et biodégradables qui ont commencé à émerger et à être exploités dans le domaine du bâtiment ces dernières décennies. Ces fibres naturelles ont fait l'objet de diverses études scientifiques en vue de caractériser leurs performances physico-thermiques et mécaniques, dont le recours à des nanocomposites en combinaison avec des matériaux organiques pour créer des polymères adaptés aux applications d'isolation thermique dans la construction.

A. Bendahou et al. ont étudié la microstructure et la composition chimique des folioles et de l'épine du palmier *Phoenix dactylifera* [136]. Ce dernier a étudié les propriétés mécaniques de l'ulve du palmier dattier et du latex de caoutchouc naturel (Voir figure 2.27). Il est à noter que lorsqu'elle est chargée à 15%, la matière plastique concentrée sur la fibre broyée présente un module Yong supérieur. De plus, des interactions avantageuses entre la matrice polymère et les nanoparticules cellulosiques ont été discutées.

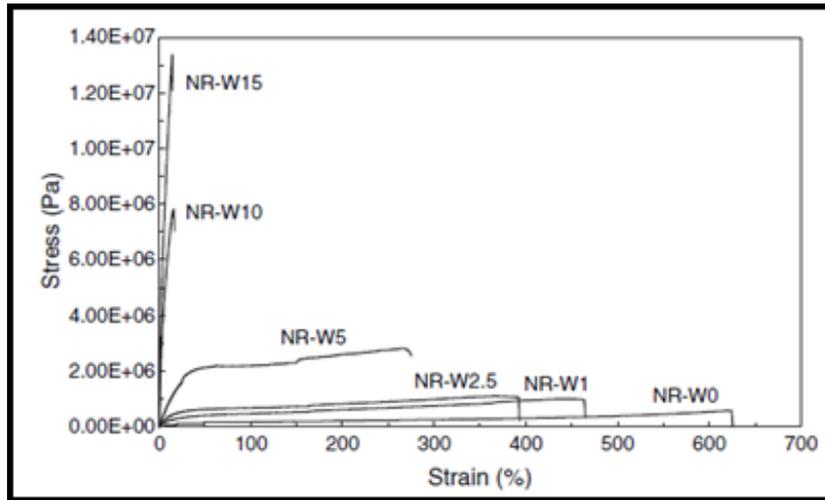


Figure 2.27 Contrainte-déformation obtenues à partir des essais de traction à base de l'ulve du palmier dattier et d'un latex de caoutchouc naturel ($T = 25\text{ C}$). [136].

M. LAHOUIOUI et al. [137] ont étudié la faisabilité technologique de l'incorporation de déchets de palmier à l'état brut et après traitement chimique dans une matrice de ciment afin de créer un nouvel éco-composite de faible poids et à haute isolation thermique. Lorsque la fraction massique des fibres dans les composites augmentait, la conductivité et la diffusivité thermique diminuaient progressivement, accompagnées d'une perte des propriétés mécaniques et d'une diminution de la densité. Les fibres à faible teneur en matières grasses ont des propriétés mécaniques moins fragiles que les fibres brutes. Il est utile d'envisager des formulations de béton aux propriétés thermiques améliorées, et l'ajout de poudre de pétiole de palmier dattier semble être une option plus efficace pour l'isolation thermique des bâtiments (Voir figure 2.28).

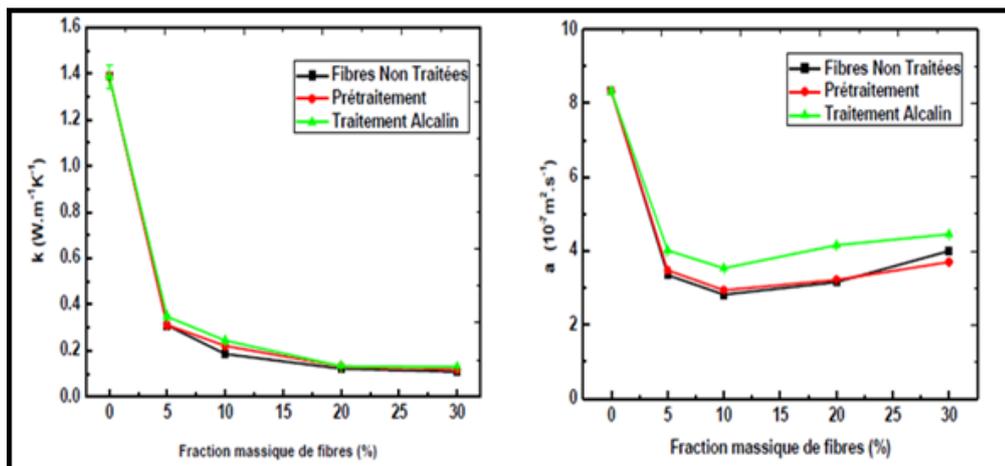


Figure 2.28 Conductivité thermique des composites Diffusivité thermique des composites [137].

Boumhaout et al [138] ont mené une étude expérimentale à Marrakech sur les propriétés thermo physiques et mécaniques du mortier renforcé par des fibres de palmier dattier (DPF) provenant de déchets de palmiers (Maroc). Les propriétés thermomécaniques des matériaux composites mortier-DPF testés ont été déterminées en adaptant les résultats expérimentaux. Les résultats suggèrent que ce matériau composite présente d'excellentes propriétés thermomécaniques. En augmentant la quantité de fibres DPF dans le mortier, son potentiel isolant est augmenté jusqu'à 70%. Les propriétés d'amortissement thermique sont améliorées car la propagation thermique est réduite jusqu'à 52% et la chaleur effusive est augmentée de 56%. De plus, la fibre de palmier dattier (DPF) réduit la densité du mortier jusqu'à 39%. Le diagramme thermomécanique illustre graphiquement la corrélation entre la conductivité thermique, la résistance mécanique et la densité (Voir la figure 2.29).

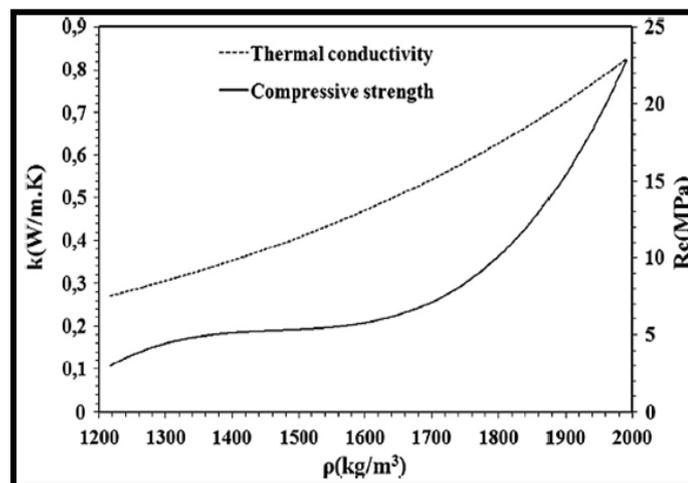


Figure 2.29 Corrélation entre la conductivité thermique, la résistance mécanique et la densité de la maille DPF [138].

F. O. Abas [139] a présenté les résultats de ses recherches sur la manipulation et l'amélioration des propriétés de vieillissement des composites de béton fabriqués à partir de déchets de palmier dattier. Le travail expérimental implique l'utilisation de différents ratios de mélange de noyaux de dattes (50/50, 30/70 et 70/30) pour étudier les propriétés physico-chimiques et l'amélioration de la résistance à l'érosion d'un composite biodéchets-béton soumis à une température constante de 50 °C pendant 25 jours. Les meilleurs résultats en matière de résistance à l'érosion ont été observés dans la granulométrie de 250 m lorsque les échantillons ont été renforcés avec des déchets de palmier dattier dans un rapport de 50/50 par rapport aux échantillons de référence. De plus, la diminution des pores entre les particules augmente la compatibilité de la réaction du composite, ce qui améliore toutes les

propriétés physiques et chimiques du matériau, comme le montrent les clichés MEB (Voir Figure 2.30).

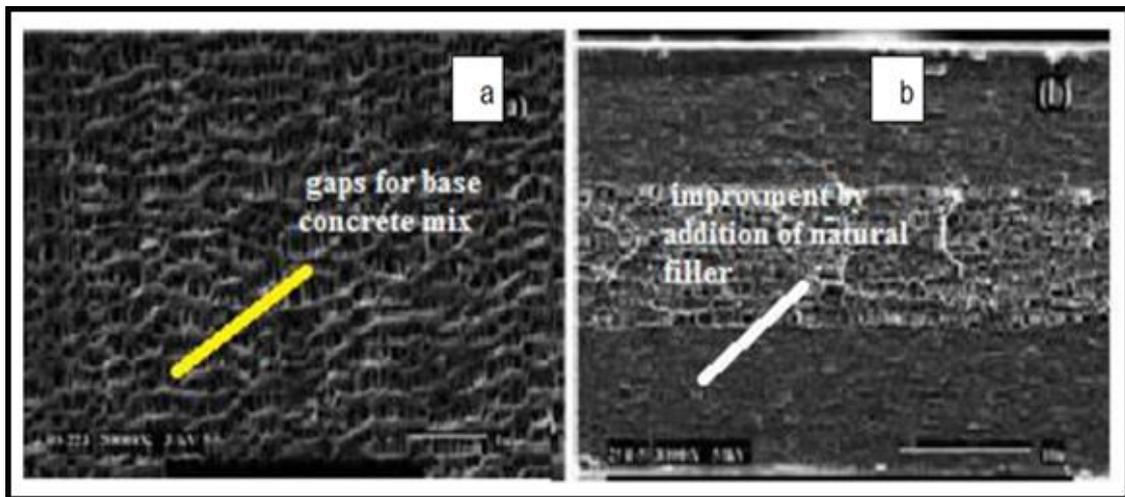


Figure 2.30 Image MEB de l'échantillon amélioré par rapport à l'échantillon de base. (a) Mélange de béton de base, (b) Echantillon renforcé par 50/50 de graines de datte [139].

S. Çetintaş et al [140] ont étudiés les grains de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) comme biosorbant servent à éliminer les ions de plomb Pb (II), qui ont un effet toxique sur l'environnement. Un processus de sorption par lots a été appliqué. L'optimisation de la biosorption de Pb (II) sur les grains de palmier a été réalisé avec succès en utilisant la méthodologie de surface. Les effets des variables du procédé, telles que le pH, la concentration initiale de Pb (II) et la masse du biosorbant sur la quantité adsorbée de Pb (II) ont été étudiés en utilisant la conception de Box Behnken. La fonction de réponse du second ordre a montré que le pH et la concentration initiale de Pb (II) ont des effets positifs, tandis que la masse du biosorbant a montré un impact négatif. La concentration initiale de Pb (II) est le facteur le plus significatif qui a affecté l'élimination du Pb (II). L'absorption maximale de Pb (II) prédite par les graphiques d'optimisation (Voir figure.) égale à 24,07 mg / g à pH 5, la concentration initiale de Pb (II) est de 100 mg / L et la masse de biosorbant est de 0,100 g (Voir figure 2.31).

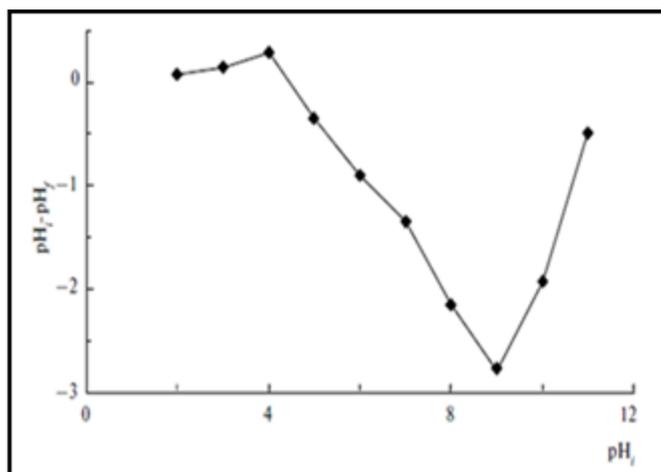


Figure 2.31 Détermination du point de charge zéro des graines de palmier dattier [140].

D'après la figure (2.32), I. Amara et al. [141] déterminent que le renforcement du plâtre avec des fibres de palmier diminue rapidement la conductivité thermique et la diffusivité, en fonction du matériau des fibres. Ainsi, les résultats des mesures de conductivité thermique et les comparaisons avec les modèles théoriques (modèle série, modèle parallèle, Krischer et Willy, et Southwick) indiquent que les valeurs obtenues pour les différents matériaux sont admissibles par rapport aux valeurs DICO. Les isolants originaux en fibres de palmier dans une matrice de plâtre ont des propriétés et des valeurs généralement équivalentes à celles des isolants synthétiques.

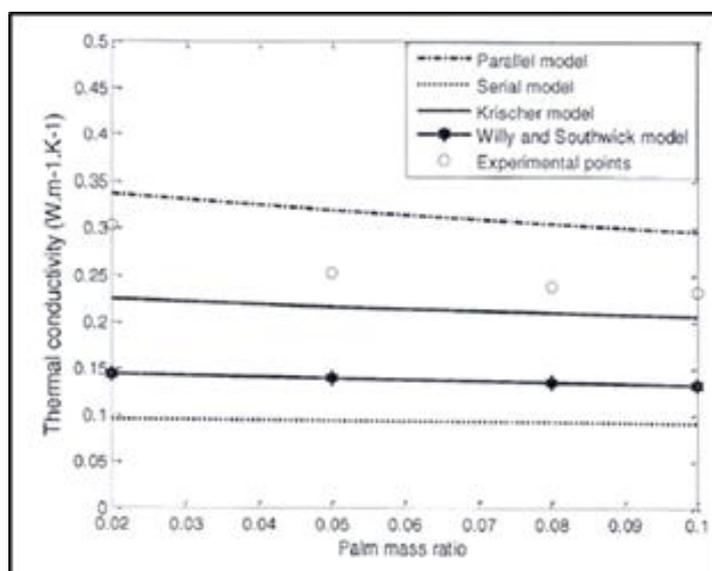


Figure 2.32 Comparaison entre l'évolution expérimentale de la conductivité thermique en fonction du rapport de masse des fibres et de la conductivité thermique avec les modèles théoriques (modèles en série, parallèle, Krischer et Willy et Southwick) [141].

T. Djoudi et al [142] montrent l'influence du bois fibreux et des fibres extraites des deux parties de la palme après le séchage sur les propriétés physico-mécaniques. La figure 1.38 présente le pourcentage volumique des fibres et celui de la matrice végétale (lignine) suivant la longueur de la palme. La forme des courbes obtenues montre que le pourcentage volumique des fibres dans la partie pétiolaire (BP) comprise entre 5 à 30 cm de la longueur, est faible, entre 10 et 20% environ, et que le taux de la matrice végétale (lignine) dans cette partie est considérable et atteint 90 %. Pour les parties les plus éloignées, le taux de la matrice végétale (lignine) diminue rapidement jusqu'à 56% et devient pratiquement constant selon la longueur de la palme. Dans cette partie du rachis (BR), le pourcentage de fibres atteint 44 %. Ils ont permis également de situer ce type de bois fibreux et ces fibres parmi d'autres résultats de la littérature scientifique et d'envisager de les utiliser dans la mise en œuvre des matériaux composites et dans des éléments d'isolation (Voir figure 2.33).

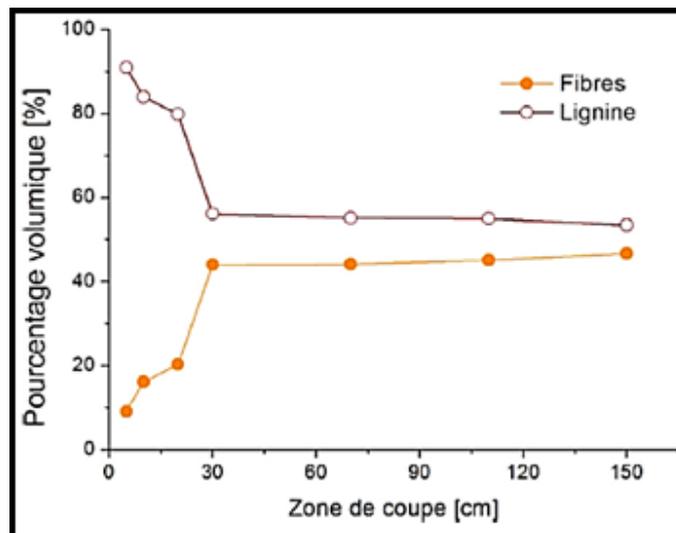


Figure 2.33 Pourcentage volumique de fibres et de la lignine dans la palme [142].

Agoudjil et al. [143] ont signalé que les déchets de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) de l'oasis de Biskra en Algérie, peuvent être utilisés comme composant d'un matériau isolant pour réduire les pertes de chaleur dans les bâtiments. La figure (2.34) démontre que la variation observée des valeurs de conductivité thermique relative entre les différentes variétés et sections de bois de palmier dattier est due en partie à la quantité d'eau et d'impuretés présentes dans le bois de palmier. Cette constatation a été vérifiée lors de la comparaison avec la conductivité thermique d'autres matériaux isolants d'origine naturelle. Les déchets de palmier dattier sont donc un excellent candidat pour le développement de matériaux isolants efficaces en énergie et respectueux de l'environnement. En effet, le

développement d'un matériau composite renforcé par ce type de déchets peut être une excellente solution environnementale.

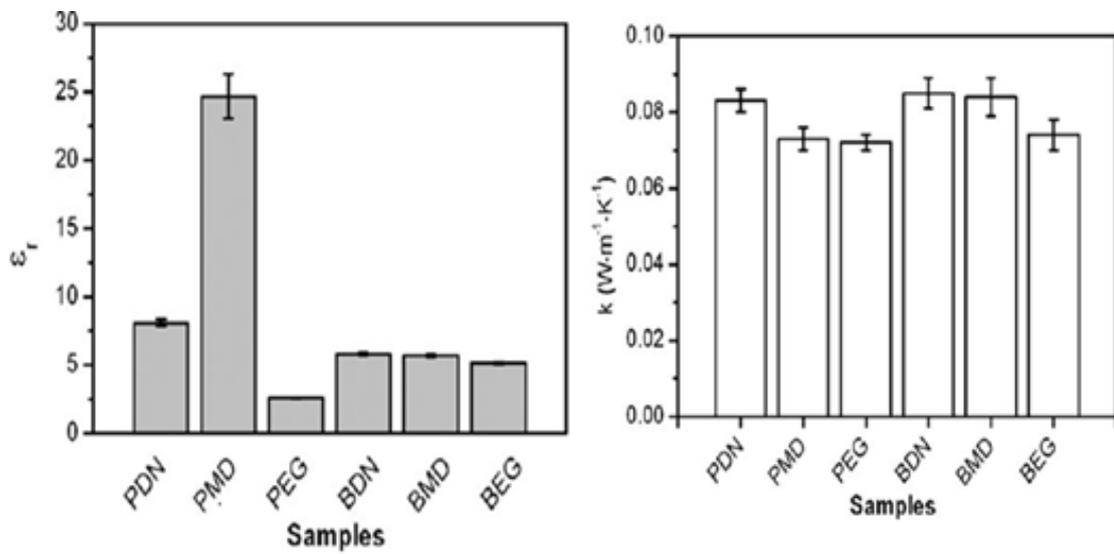


Figure 2.34 Conductivité thermique et diffusivité thermique relative de différentes variétés de matériaux de palmier dattier : échantillons de pétiole (P) et bouquet (B) de Deglet-Noor (DN), Mechdeglet (MD) et Elghers (EG) [143].

Conclusion

Ce chapitre de synthèse bibliographique présente un état de l'art sur la valorisation des nanomatériaux d'isolation thermique tels que les panneaux d'isolation sous vide (VIP), les aérogels et la nanocellulose. Il existe des conceptions innovantes pour les matériaux d'isolation, ainsi que pour les ressources renouvelables et les déchets dans le domaine des matériaux d'isolation thermique et de leur production dans le secteur du bâtiment. En outre, une analyse exhaustive de la littérature sur les différentes formes de matériaux d'isolation thermique, les procédés de fabrication, les propriétés et les méthodes d'intégration dans les constructions a été réalisée.

L'éco-conception et l'efficacité énergétique sont deux termes qui font référence à la nécessité de remplacer les matériaux d'isolation conventionnels par des matériaux modernes plus respectueux de l'environnement et permettant de réaliser des économies d'énergie. Des études récentes prévoient que, grâce aux progrès de la technologie de fabrication des aérogels et de la production de matériaux nanocellulosiques, les produits d'isolation en aérogel deviendront plus compétitifs par rapport aux matériaux d'isolation traditionnels. Toutefois, les données empiriques indiquent que plusieurs points difficiles méritent d'être approfondis et analysés.

En outre, l'une des stratégies modernes les plus intéressantes est l'utilisation de nanocelluloses dérivées de la biomasse ligneuse dans les processus d'isolation thermique. En raison de leurs propriétés mécaniques, thermiques et de faible densité, les matériaux dérivés des plantes offrent désormais une alternative prometteuse pour la production de matériaux composites biosourcés. L'offre abondante de sous-produits durables du palmier dattier indique qu'ils pourraient être utilisés comme renfort dans les matériaux composites et les systèmes d'isolation thermique.

Les bionocomposites sont un nouveau concept axé sur le développement de composites thermiques et mécaniques à haute résistance, avec une large gamme d'applications, qui utilisent des biomatériaux à l'échelle nanométrique comme renfort. On peut en déduire que la nanocellulose (CNF) dérivée de la fibre de palmier dattier est un facteur déterminant qui explique l'aptitude d'un nanocomposite à diverses applications dans l'ingénierie des matériaux et des nanostructures.

CHAPITRE III : ELABORATION D'UN NANOCOMPOSITE A BASE DE NANOFIBRES CELLULOSIQUES ET DU CIMENT

Introduction

La culture du palmier est de plus en plus répandue dans le monde en raison de son exploitation dans diverses industries de transformation. Le palmier peut être utilisé de manière très variée, de la racine aux noyaux ; ces résidus disposent également d'un éventail diversifié de caractéristiques avantageuses, ce qui leur permet d'être valorisés dans divers domaines. Face à ces enjeux énergétiques et environnementaux majeurs, le secteur de la construction est contraint de s'adapter à l'évolution des besoins et des exigences, en privilégiant la conception durable. Le label « maison biosourcée » encourage la valorisation des matériaux naturels et locaux pour l'isolation thermique des bâtiments, notamment la paille de chanvre, le lin, le coton cellulose et la laine de mouton, tout en contribuant au stockage temporaire du carbone pendant le cycle de vie du bâtiment. Un intérêt croissant s'est manifesté ces dernières décennies pour le retour à des méthodes de construction associant des matériaux d'origine végétale à un liant minéral. Ce chapitre est consacré au processus de création de nanofibres cellulosiques à partir de noyaux de palmier dattier, ainsi qu'à la procédure de vérification de leurs performances physiques et thermiques.

3 Matériaux et méthode expérimentale

3.1 Palmiers dattier une ressource innovante

3.1.1 Gisement et applications

La culture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une pratique économiquement, socialement et écologiquement importante pour les communautés vivant dans des environnements arides et semi-arides. Les palmiers dattiers sont plantés et cultivés dans plusieurs oasis du sud de l'Algérie, où le climat est chaud et sec. Le terme « oasis » désigne des lieux de vie qui ont été construits au milieu d'un grand espace ouvert avec la présence d'une source d'eau. En fonction de la géographie de l'Algérie, il est possible d'identifier un ensemble de régions dédiées à la culture du palmier dattier (figure 3.1). Il existe différents types d'oasis variant en fonction de la disponibilité et de la qualité de l'eau, du type de sol et de la topographie.



Figure 3.1 Carte de l'Algérie indiquant les différentes zones avec des palmiers dattiers [144].

3.1.2 Croissance durable du potentiel agronomique

La production de dattes en Algérie varie d'année en année en fonction des pratiques agricoles, des aléas climatiques et des surfaces cultivées. Entre 2000 et 2017, la production a augmenté de 289%, passant de 3800000 à près de 11000000 quintaux. Selon les statistiques, la production de dattes est principalement concentrée dans le sud-est, qui fournit la part du lion de la production totale du pays, 76%. La ville de Biskra arrive en tête avec près de 31% de la récolte, suivie d'El Oued (27%), Ouargla (27%), (18%). Le reste de la production se situe dans le sud-ouest (15%) et le sud du pays (9%) [145]. (Voir figure 3.2).

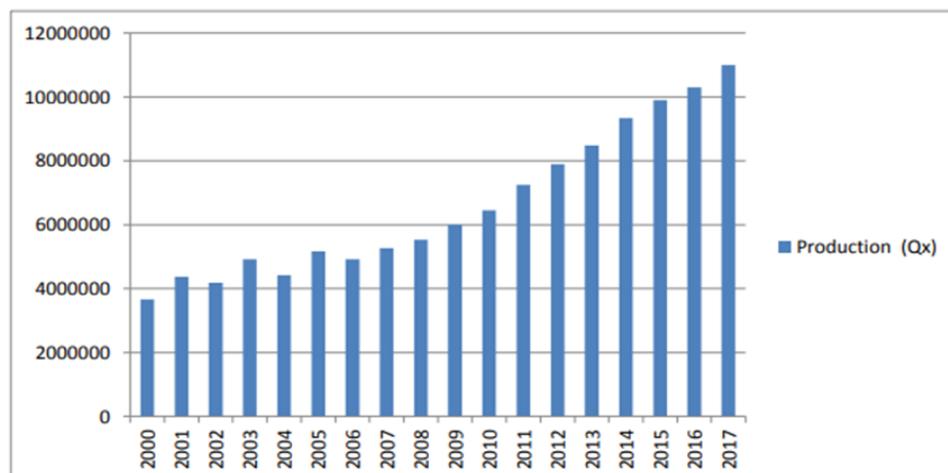


Figure 3.2 Production de dattes en Algérie 2000-2017 [145].

3.1.3 Enjeu socio-économique

Le palmier dattier est une composante importante de l'écosystème oasien des régions semi-arides d'Algérie. Il propose une large gamme de matériaux pour l'artisanat, le traitement et la production d'énergie. Il sert également de paravent, protégeant les oasis des agressions du désert et instaurant un microclimat favorable au développement local. Le traitement des dattes fait partie intégrante de l'agriculture nationale. Les sous-produits du palmier dattier sont variés et les agronomes peuvent les utiliser de différentes manières, y compris l'artisanat, la transformation et la production d'énergie. Le palmier peut être utilisé de la racine au noyau. De plus, ces déchets possèdent une large gamme de propriétés intéressantes qui leur permettent d'être utilisés dans un grand nombre d'applications.

3.2 Matériaux

3.2.1 Nanofibres cellulosique de palmier (noyaux de datte) ND

Le fruit du palmier dattier est composé d'un péricarpe charnu et d'un noyau. Le poids moyen de la pierre à dattes varie entre 10% et 15% du poids des dattes [146.147]. Il se compose de deux parties, une partie, formée par le noyau de la datte non comestible, de consistance fibreuse et dure [148], l'autre partie appelée chair consommable est constituée d'un fin péricarpe ou enveloppe de cellulose appelée peau, un mésocarpe généralement charnu, de consistance variable en fonction de sa teneur en sucre et de sa couleur soutenue, également une teinte plus claire et une texture fibreuse, parfois réduite à une membrane de parchemin entourant le noyau. [149]. Les mensurations de la datte varient, de 2 à 6 cm de longueur et un poids de 2 à 8 grammes selon la variété voir (Figure 3.3). Sa couleur va du blanc jaunâtre au noir, en passant par l'ambre, le rouge et le brun plus ou moins foncé [150].

Le noyau est enveloppé dans un parchemin allongé, plus ou moins volumineux, à surface lisse ou avec des arêtes ou des palmures latérales, avec un sillon ventral ; son embryon est dorsal, sa consistance est dure et (Figure 3.4), [151]. Les parties du noyau sont constituées d'un endosperme dur avec un embryon dorsal minuscule par rapport à l'albumen (2 à 3 mm) [152].



Figure 3.3 Présentation de la morphologie de datte.

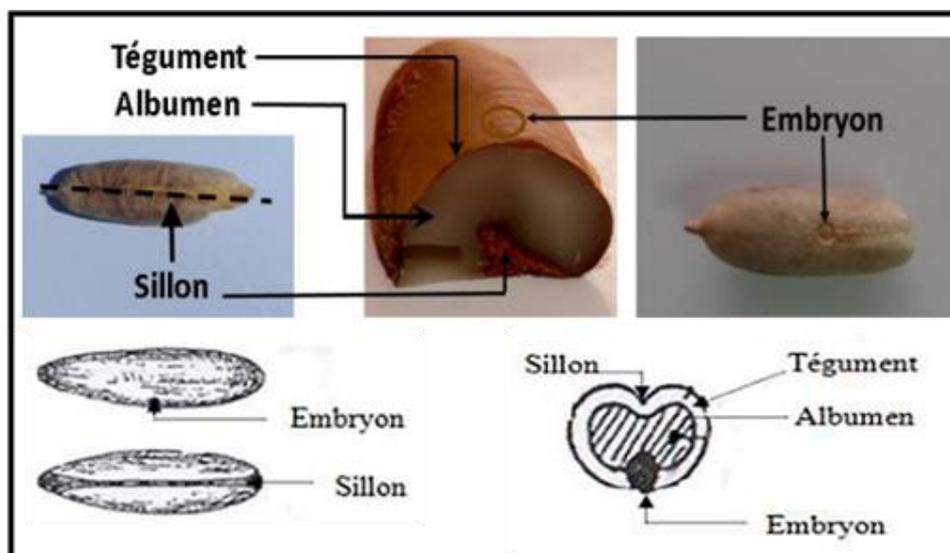


Figure 3.4 Noyau de dattes du palmier de dattier [153].

3.2.1.1 Caractéristiques morphologiques des noyaux de dattes

Il existe une différence significative entre les palmiers sur le diamètre, le poids, la longueur du noyau même si les palmiers considérés proviennent de la même plantation. Le tableau 2.1 présente les résultats détaillés des propriétés morphologiques des noyaux de dattes de la variété Dégelât-Nour. Pour effectuer les mesures des différents échantillons de noyaux de datte, le pied coulissant permet d'identifier les différentes distances et les dimensions intérieures ou extérieures, en manipulant le coulisseau pour presser entre les deux becs du corps à mesurer. La molette fixée au sommet du gabarit permet de caler le calibre sur la règle. Il est essentiel également de bien préparer les échantillons et de traiter

les résultats avec soin. Les solutions de pesage de précision et de dimensionnement fournies des valeurs concrètes.

Tableau 3.1 Caractéristiques morphologiques des noyaux de dattes étudiés.

Dattes	Poids (g)		Longueur (mm)		Largeur (mm)	
1	1,10	± 0,1	18	± 0,1	07	± 0,1
2	1,06	± 0,1	21	± 0,1	05	± 0,1
3	1,08	± 0,1	20	± 0,1	06	± 0,1
4	1,10	± 0,1	20	± 0,1	05	± 0,1
5	1,04	± 0,1	18	± 0,1	07	± 0,1
6	1,28	± 0,1	20	± 0,1	05	± 0,1
7	0,80	± 0,1	20	± 0,1	06	± 0,1
8	1,36	± 0,1	19	± 0,1	05	± 0,1
9	1,07	± 0,1	18	± 0,1	06	± 0,1
10	1,03	± 0,1	19	± 0,1	07	± 0,1

3.2.1.2 Composition chimique du noyau de datte

La masse moyenne du noyau d'une datte varie aux alentours d'un gramme. Il représente 10 à 15% du poids de la datte. Il est constitué d'un albumen, de consistance dure et protégée par une enveloppe cellulosique. Le tableau (3.2) représente la composition chimique des noyaux de dattes. La teneur en humidité est un paramètre de référence qui permet d'évaluer la teneur en humidité de la pierre dattier et fournit des informations sur la résistance du mélange aux risques de détérioration liés au vieillissement. La teneur en eau de la poudre de noyau de datte est de $(3 \pm 0,02\%)$. Cette valeur est cohérente avec celle trouvée par M. Al-Farsi et al [154] 5,19% et S. Devshony et al [155] pour les autres variétés (4,22 - 4,78%). En conséquence, les noyaux de dattes sont susceptibles d'être classés, en fonction de leur teneur en humidité, parmi les graines et les grains connus pour être pauvres en eau.

Tableau 3.2 Composition chimique de noyaux de dattes.

Composé	Taux (%)
Humidité	3–8
Protéines	4–6
Huiles	5–12
Fibre Brute	15–30

3.2.2 Ciments

En raison de l'abondance de nanofibres cellulosiques provenant de noyaux de dattes connus pour leur haute résistance fibrillaire. Il est essentiel de trouver des alternatives à ces nanocomposites pour résoudre les problèmes de gestion des déchets organiques et assurer une plus grande durabilité. Nous avons décidé de combiner des nanofibres de cellulose écologiques, durables et efficaces avec une matrice de ciment afin de formuler des matériaux de construction dotés de propriétés thermiques et mécaniques essentielles pour la production de matériaux nanocomposites biopolymères. De nombreux matériaux sont nécessaires pour la construction des bâtiments, en particulier le ciment, qui est un matériau essentiel dans diverses filières. Le ciment est une poudre minérale qui se transforme en liant ou en pâte lorsqu'elle est hydratée. Le principal constituant du ciment est le clinker, qui est obtenu par la fusion partielle d'un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile dit « cru » à une température de cuisson d'environ 1450 degrés Celsius.

3.2.2.1 Composition du ciment

Après le broyage de roches calcaires et argileuses, on obtient une poudre dite « cru ». Ensuite, ce cru est soumis à la cuisson à 1450 degrés pour se transformer en clinker. Le processus de production du ciment se déroule en quatre stades différents :

Le processus de creusement consiste à extraire de la carrière, à l'aide d'explosifs et de bulldozers, les matières premières telles que le calcaire à un taux de 70 à 80 % et l'argile à un taux de 20 à 25 %. Elles sont ensuite transportées vers l'atelier de concassage par des tombereaux. Les blocs rocheux sont acheminés directement vers les ateliers de concassage. Le concassage est la technique la plus communément employée pour fracturer les roches calcaires qui sont relativement plus dures que les roches argileuses. Le processus d'homogénéisation consiste à établir un mélange cohérent afin d'obtenir une composition reproductible dans le temps. Un échantillonnage systématique permet d'utiliser les quantités nécessaires des différents compléments (oxyde de fer, alumine et silice) [156] et rend les dérivés rocheux sensibles à la cuisson.

Les phases de séchage et de broyage ont pour but d'initier des réactions chimiques et d'augmenter leur réactivité avant la cuisson au four. Dans ces installations, la phase de séchage se déroule en même temps que le broyage des matières. Ces dispositifs fonctionnent

en association avec un séparateur d'air et un séchoir. Des moulins à cru sont utilisés pour sécher et broyer les composites jusqu'à l'obtention d'une farine brute dont le résidu de tamisage est de 160 m [157]. Le broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, qui sont des machines à filer cylindriques avec des bols en acier. Le broyage intensif produit les clinkers les plus fins. Enfin, la dernière opération consiste à utiliser un refroidisseur à grille pour refroidir le clinker. La plupart des cimenteries utilisent des ventilateurs puissants pour refroidir le clinker. Le cylindre pivotant incliné, à partir duquel l'eau est pulvérisée à travers un canal de drainage, est interposé entre le four rotatif et le refroidisseur à grille (Voir figure 3.5).

3.2.2.2 Catégories et types de ciments

La composition chimique de la matière première, la finesse des matériaux, les ajouts éventuels de constituants complémentaires lors du broyage déterminent les propriétés de ces ciments (charge calcaire, pouzzolane, cendres, laitier et gypse). Les groupes de ciment sont présentés et classés conformément à la norme EN 197-1. Cinq formes de ciment sont normalisées comme « CEM ».

Le ciment Portland CEM I (CPA) est constitué d'au moins 95 % de clinker et de 5 % de constituants secondaires. Cette forme de ciment est conçue pour les travaux de béton à haute pression.

Le CEM II (CPJ) est un ciment composé de 65 % de clinker et de 35 % de composé secondaire. Il est utilisé pour décrire une variété de ciments, dont les plus connues sont le "ciment Portland composé", le "ciment Portland Calcaire", le "ciment Portland Laitier" et le "ciment Portland à fumée de silice".

Les ciments CEM III sont des ciments de type "ciment de haut fourneau" composés de clinker et de laitier de haut fourneau, en proportions alternatives. Les ciments CEM IV sont des ciments de type "pouzzolanique" et les ciments CEM V sont des ciments "composés".

Dans notre cas d'étude, le choix du ciment s'est porté sur la catégorie CEMII (CPJ) car il se décline en plusieurs variétés et ces composants sont destinés à une large exploitation pour divers travaux.

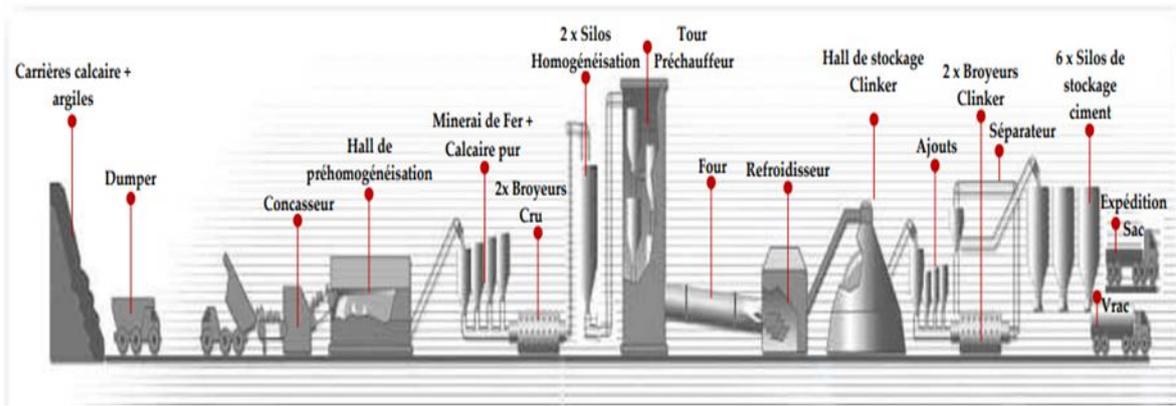


Figure 3.5 Synoptique de la fabrication du ciment cas de Hamma Bouziane Constantine.

3.2.3 Sable normalisé (CEN)

Le sable retenu pour notre cas d'étude est un sable naturel normalisé CEN (Standard Sand), et accrédité par l'ISO 679 conformément à la norme EN 196-1.

3.2.3.1 Caractéristiques du sable normalisé

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel composé principalement de particules siliceuses. Il est propre, avec des grains généralement isométriques et arrondis. Il est séché, calibré et préparé dans des ateliers qui garantissent la composition et la régularité du sable.

3.2.3.2 Granulométrie

La composition granulométrique définie par tamisage est conforme aux prescriptions de la norme EN 196-1.

Tableau 3.3 Composition granulométrique du sable normalisé (CEN).

Ouverture des mailles du tamis (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99
016	87
0.50	67
1.00	33
1.60	7
2.00	0

3.3 Techniques de préparation des échantillons des nanofibres cellulosique de noyau de palmier dattier (NFD)

Depuis des années, les nanomatériaux suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés souvent supérieures à celles des matériaux solides de composition similaire. La taille nanométrique des cristallites et le grand volume des interfaces confèrent au matériau des propriétés physicochimiques et thermiques uniques, ouvrant ainsi de nouveaux champs d'application. Compte tenu de la compacité et de la dureté des noyaux de palmier dattier, il est essentiel d'affiner et de miniaturiser la distribution granulométrique à l'aide de plusieurs dispositifs de broyage et de concassage à différents stades afin de réduire la taille des particules à de petites particules, puis à des poudres fines et ultrafines.

3.3.1 Sélection et séchage de noyau de palmier dattier (FND)

Les noyaux de dattes broyés sont transformés en une poudre ultrafine afin de garantir une composition physico-chimique relativement homogène. Le choix des noyaux de dattes est basé sur un certain nombre de facteurs, notamment le microclimat de l'oasis, la composition du sol, le poids, la taille et la couleur. La collection provient de la même palmeraie de Deglet-Nour et est conditionnée dans l'unité de conditionnement biodégradable de grande capacité de la wilaya de Tolga à Biskra. Les opérations de triage sont effectuées manuellement et le séchage se fait à l'air libre durant la période estivale où la température moyenne est de 36°C.

3.3.2 Systèmes de broyage de noyau de palmier dattier (FND)

Le broyage à haute énergie et les collisions qui s'ensuivent piègent et écrasent les grains de poudre entre les billes et les parois des cocottes, où ils sont successivement aplatis, soudés, fendus et ressuscités sous l'effet de la pression, le processus s'accompagnant d'un durcissement et d'une surchauffe locale pouvant déclencher des transformations de phase.

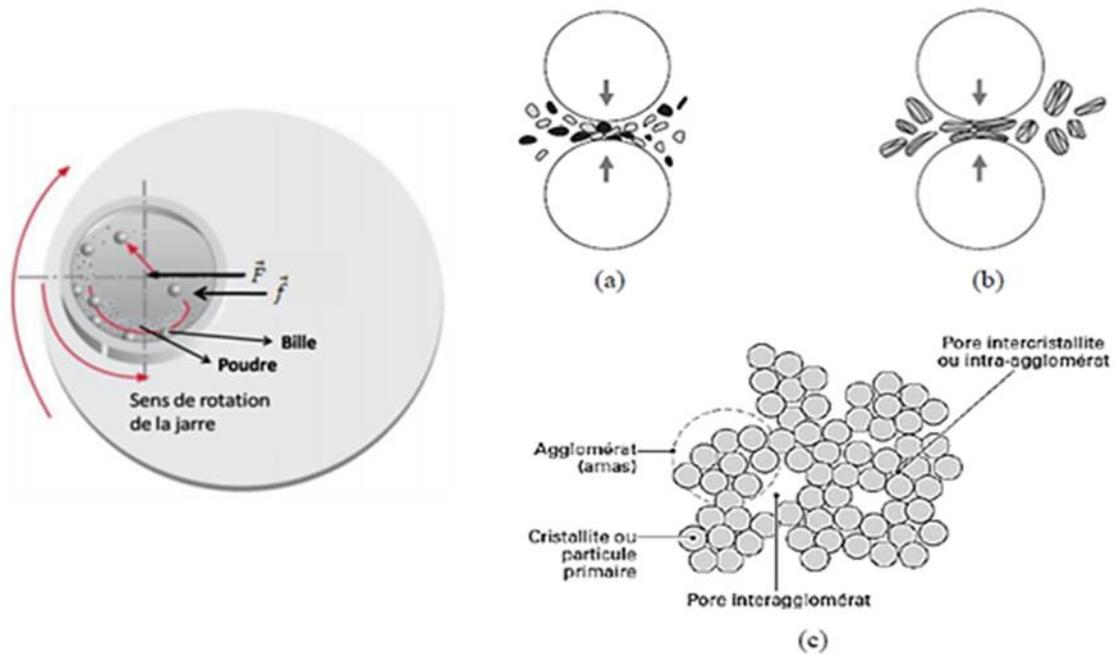


Figure 3.6 Schéma du principe de broyage des poudres ; (a) : Fracture ; (b) : Soudage ; (c) : La poudre agglomérée [158].

Les solides broyés peuvent développer une structure d'équilibre métastable et des propriétés remarquables lorsqu'ils sont soumis à des chocs répétés. De nombreuses méthodes ont été utilisées pour synthétiser des nanomatériaux, notamment les réactions chimiques, la congélation du sol, la solidification rapide et la synthèse mécanique. L'avantage de cette dernière, qui s'est développée en pratique par rapport à d'autres méthodes de synthèse, réside dans sa simplicité de mise en œuvre et dans la possibilité de préparer de grandes quantités de poudres à l'état solide et à température ambiante.

La stratégie de synthèse par broyage mécanique est une méthode très efficace pour synthétiser des poudres nanostructurées métastables à partir d'un mélange de poudres élémentaires [146] et [147]. Par rapport à la synthèse mécanique « directe », le broyage mécanique consiste à confiner des poudres pures de composition stœchiométrique pour obtenir un matériau nanostructuré.

3.3.2.1 Broyage Horizontal des particules fines (μm)

3.3.2.1.1 Los Angeles

Le processus de raffinage et de broyage des grains a été réalisé avec rapidité et précision par la machine de Los Angeles, constituée d'un cylindre creux en acier de $12 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$

d'épaisseur, fermé aux deux extrémités, d'un diamètre inférieur à $711 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et d'une longueur inférieure à 508 mm . Le cylindre est soutenu par deux axes horizontaux fixés sur ses deux parois latérales. La charge de billes est constituée de billes sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et pesant entre 420 et 445 g en acier. Un moteur qui assure au tambour de la machine une vitesse de rotation constante comprise entre 30 et 33 tours/minute.

3.3.2.1.2 Micro-Deval

Les particules ont été broyées par le biais d'un dispositif Micro-Deval comprenant 1 à 4 cylindres d'essai en acier inoxydable (200×154) mm, équipés d'un moteur capable de maintenir, à l'aide de roulements à billes, une vitesse de rotation constante de 100 tours par minute.

3.3.2.2 Broyage Vertical des particules ultrafines (nm)

3.3.2.2.1 Fast-Mill 1,5

Les particules ont été broyées à l'aide d'un broyeur FAST-MILL, un appareil compact et modulaire conçu pour broyer les échantillons de granulats jusqu'à une finesse de $0,1$ à $0,5 \text{ mm}$, suffisamment petite pour passer à travers un tamis de $100 \mu\text{m}$ (selon la dureté du matériau). C'est l'un des dispositifs utilisés pour obtenir des particules qui passent à travers un tamis de $100 \mu\text{m}$ conformément à la norme ASTM C289.

3.3.2.2.2 Micro-Broyeur Planétaire

Le nanobroyage est réalisé à sec sur un microbroyeur planétaire haut de gamme PULVERISETTE 7 premiums à température ambiante pendant deux heures à une vitesse de 400 tours par minute, après le cycle 11. Les particules de poudre sont transformées et broyées sous la limite du micron lors d'un broyage à haute énergie et à chaque frottement jusqu'à une finesse finale de 100 nm . (Voir figure 3.7)

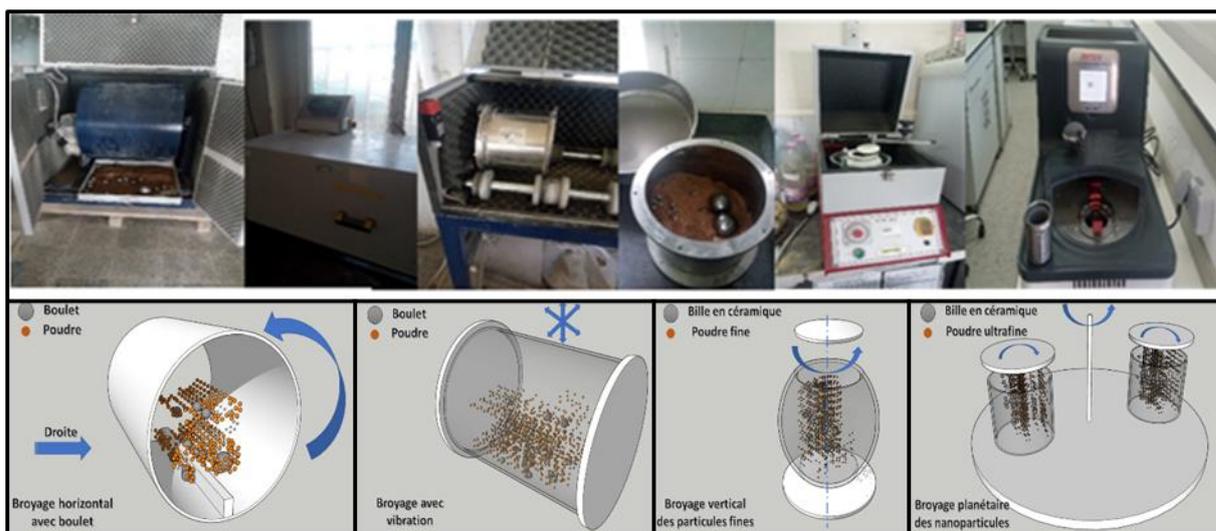


Figure 3.7 Schéma du broyage horizontal des fines (μm) et vertical des ultrafines (nm).

3.3.3 Protocole d'élaborations des pastilles nanocomposites

La poudre ultrafine utilisée est extraite de noyaux de palmiers dattiers récupérés dans la province de Tolgoua à Biskra, en Algérie. Leur préparation requiert les processus physiques décrits dans (Figure 3.8).

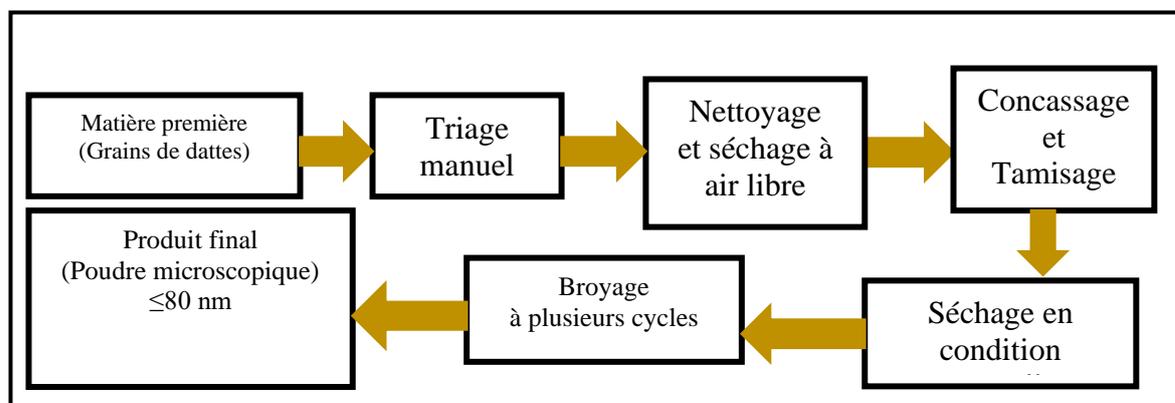


Figure 3.8 Diagramme indiquant le processus de préparation de la poudre ultrafine des grains de datte.

Le broyage avec des billes est un processus écologique et rentable pour modifier la structure cristalline des matériaux tels que les alliages et les polymères par friction, collision, cisaillement ou autre comportement mécanique [159]. En raison de la compacité et de la dureté des noyaux de palmier dattier, l'affinage de la granulométrie et la miniaturisation impliquent l'utilisation de plusieurs types de broyeurs à différents stades du broyage afin de minimiser la granulométrie des particules en fragments, puis en poudres fines et ultrafines. Le concassage est effectué par un microbroyeur planétaire à température ambiante pendant

8 heures avec une vitesse de 400 tours par minute, cycle 11. Le temps de séjour du matériau est d'environ 08 heures. Pendant le broyage à haute énergie et à chaque collision, les grains de poudre sont affinés et broyés en dessous de la limite du micron.



Figure 3.9 Affinement et miniaturisation de la taille des grains en fragment, puis en particules ensuite en poudre microscopique ultrafine ≤ 80 nm

3.3.3.1 Tamisage et Pesage

La sélection de la matière première (MN) passe par plusieurs étapes de miniaturisation avec le processus de mécanosynthèse et l'opération de tamisage. Ainsi, le broyat passe par de très petits trous pour séparer les particules de différentes tailles, afin de préparer la poudre ultrafine et d'éviter la contamination du produit par des corps étrangers. Les nanoparticules de noyaux de dattes sont séchées à 60°C dans l'étuve. La phase suivante comprend le dopage d'un gramme de ciment brut dans des valeurs de pourcentage distinctes par des nanoparticules en (ND) à l'aide d'une balance analytique qui sert à évaluer la pesée sur le plateau de la balance dont la précision varie de $1\mu\text{g}$ à 0.1 mg avec une plage de 1g à 10g.

3.3.3.2 Homogénéisation et Pastillage

L'étape ultérieure, consiste à obtenir un effet d'homogénéisation de pointe offrant des résultats de qualité supérieure sur les dispersions en nanocomposite par l'assistance technique apportée par un homogénéisateur à vibration. La pression exercée doit être proportionnée à la dureté du matériau à analyser afin de produire un échantillon condensé. La capacité de pression atteint jusqu'à 25 bars et les moules sont de tailles variables 3mm, 5mm, 8mm, 10mm et 20mm. (Voir figure 3.10). Enfin, sous pression hydraulique, une solution appropriée pour la préparation de granules de nanoparticules est utilisée pour formuler des monolithes de diamètre suffisant. Ces monolithes doivent être d'apparence

compacte, de petit diamètre et de près d'un millimètre d'épaisseur pour permettre aux techniques de spectroscopie infrarouge (IR), fluorescence (XRF) et de diffraction des rayons X (DRX) de capter des radiations uniformes à différents rayons et de déterminer ainsi la phase de cristallisation des nanoparticules de noyau de datte.



Figure 3.10 Etapes de fabrication de diverses pastilles (monolithe pure et monolithe composé).

3.4 Procédures de caractérisation des nanofibres cellulosiques

Les analyses granulométriques sont des techniques qui utilisent deux méthodes distinctes pour déterminer la répartition, le poids et la taille des grains minéraux ou végétaux : le tamisage mécanique ou l'analyse d'images. Deux autres méthodes existent pour caractériser les agrégats biosourcés : l'analyse vidéo par granulométrie (VDG 40) et la méthode alpine (méthode de l'image). Dans le cadre de notre étude de cas, nous avons opté pour la microscopie optique et électronique.



Figure 3.11 Visualisation métallographique des pastilles.

Afin de bien mettre en évidence ou de compléter l'explication des résultats obtenus par les différentes techniques mentionnées ci-dessus, des observations par microscopie électronique sont nécessaires. Nous avons utilisé un microscope électronique à balayage (MEB), afin de révéler la morphologie de la surface à observer, et d'obtenir une image très informative sur la topographie de l'échantillon. Les images présentées dans la figure 3.12 sont réalisées par un microscope optique.



Figure 3.12 Observation par microscope optique des pastilles issues de ciment portland, noyaux de datte et de nanocomposite.

3.4.1 Spectroscopies par diffraction des rayons X (DRX)

A présent, la diffraction des rayons (x) complète et diversifie les sujets de recherche actuels et constitue un appoint incontournable aux observations microscopiques ou spectroscopiques. Il s'agit d'une technique permettant de déterminer les compositions inorganiques et organiques des matériaux cristallisés. Cette méthode de caractérisation permet de connaître la structure cristalline des matériaux à éclairer (par exemple, la texture et la cristallinité). La localisation des pics de diffraction permet de distinguer les structures ou phases cristallographiques présentes et donc la composition cristallographique de l'échantillon analysé. Cependant, ce procédé ne peut servir à classer les composés amorphes. (Comme le montre la figure 3.13).



Figure 3.13 Panalytical X Pert Pro diffractometer (λ) $\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$ (5° - 100°).

La cristallinité des noyaux de dattes après différents traitements a été déterminée par diffraction des rayons X. L'échantillon de poudre broyée a été monté sur le porte-échantillon et mis à niveau pour assurer une exposition continue aux rayons X. Les échantillons ont été examinés avec un diffractomètre à rayons X (D8-Advance Bruker AXS GmbH) à température ambiante (RT) en utilisant une source de rayonnement monochromatique de cuivre avec une longueur d'onde $\lambda_{\text{CuK}\alpha}$ de 0,1539 nm en mode de balayage de phase avec un angle de 2θ à 100° , un pas de 0,04 degré et un temps de balayage de 5,0 minutes. Pour classer la cristallinité des échantillons individuels, l'indice de cristallinité CrI a été calculé en utilisant la méthode de Segal et al. [160]. L'analyse du profil des lignes de diffraction permet de décrire la taille et la forme des grains cristallisés (Voir figure 3.14).

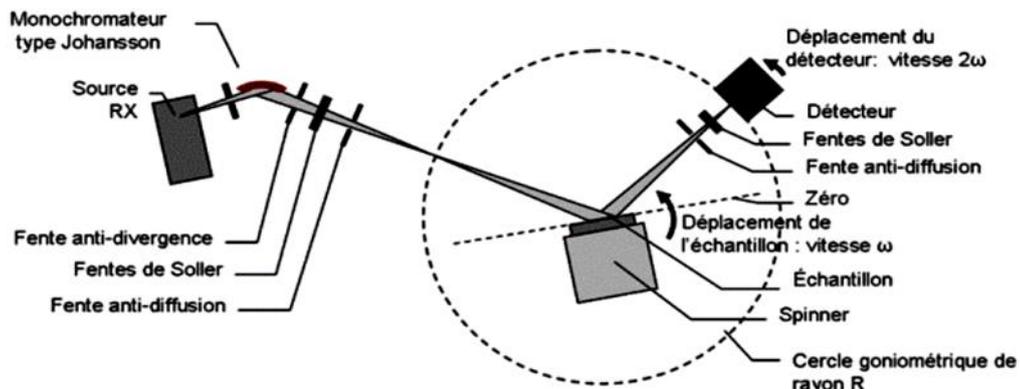


Figure 3.14 Principe du diffractomètre dans la géométrie de Bragg-Brentano [161].

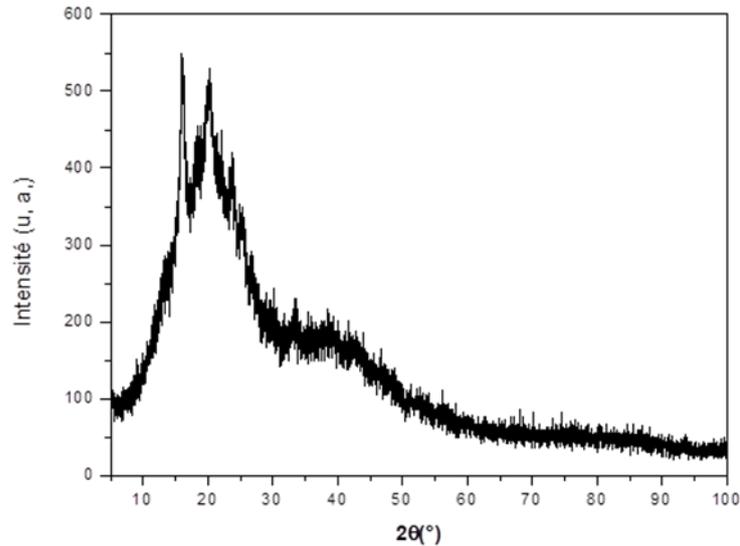


Figure 3.15 Diagramme des Rayons X du poudre de noyau de datte ultrafine $\leq 80\text{nm}$.

3.4.2 Spectroscopies Infra- Rouge à Transformée de Fourier (FT-IR)

La spectroscopie infrarouge est une technique permettant d'obtenir un accès direct à la connaissance des molécules, à la structure des liaisons chimiques et à l'organisation structurale des matériaux étudiés. Elle peut également être utilisée pour identifier des composés. L'absorption par l'échantillon d'un rayonnement électromagnétique infrarouge compris entre 1 et 50 μm est à la base de cette technique (micromètre). Le milieu infrarouge est utilisé pour distinguer les molécules organiques, ce qui permet de conserver une empreinte digitale. Du fait de l'interaction, la bande spectrale du rayonnement infrarouge est divisée en longueurs d'onde du proche infrarouge (1 à 2,5 μm) et de l'infrarouge (2,5 à 50 μm). Par conséquent, chaque nanomatériau possède une collection distincte de bandes d'absorption qui peuvent être utilisées pour le distinguer.



Figure 3.16 Spectromètres infrarouge FT-IR - 6300 dispose une gamme spectrale de 12400 spectres et une résolution de 0.4 à 0.07 cm^{-1} .

Lors de l'acquisition du spectre, un miroir mobile glisse régulièrement provoquant un motif d'interférence qui est enregistré par le détecteur en fonction de la différence de fonctionnement. Le signal collecté par le spectrophotomètre est ensuite transformé à l'aide d'un logiciel approprié en un spectre d'absorption par traitement mathématique (transformation de Fourier). La figure (3.17) montre un diagramme du fonctionnement du dispositif FT-IR.

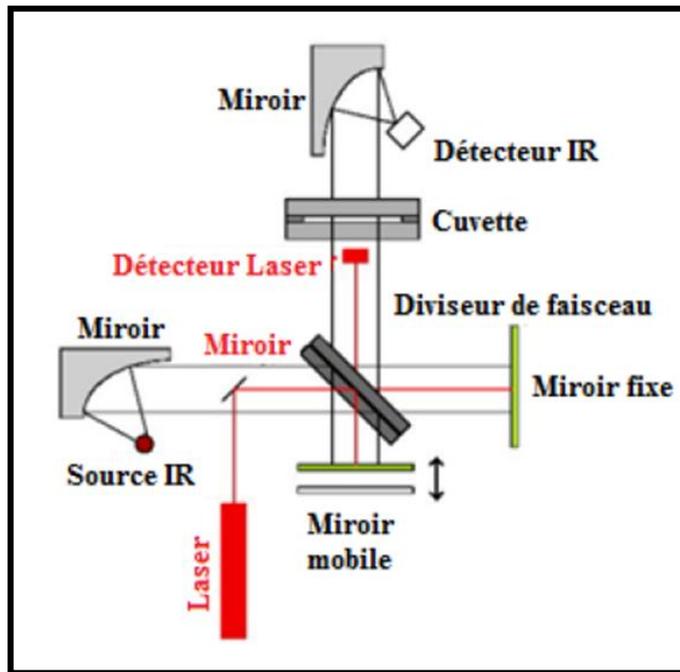


Figure 3.17 Schéma de fonctionnement de l'appareil FT-IR[162].

3.4.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Le MEB (microscopie électronique à balayage) est une méthode d'étude de la topographie des surfaces. Elle fournit non seulement des détails sur la structure et la texture d'un échantillon, mais aussi sur la taille et la forme de particules ou de composants élémentaires, en fonction du grossissement souhaité. En outre, elle s'avère être une excellente méthode pour détecter les défauts de surface, notamment les porosités ou les fissures, même lorsque les données recueillies ne représentent pas avec précision tous les paramètres de densité associés aux anomalies sous-jacentes au champ d'étude.

Il est basé sur la détection d'électrons secondaires émergeant en surface sous l'impact d'un très fin faisceau d'électrons primaires monocinétiques qui balaye toute la surface de l'échantillon où des interactions électron-matière sont générées dans une zone désignée sous

le nom de poire d'interaction, captée par un senseur qui contrôle la luminosité d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons. Les électrons réémpruntés se présentent sous de nombreuses formes.

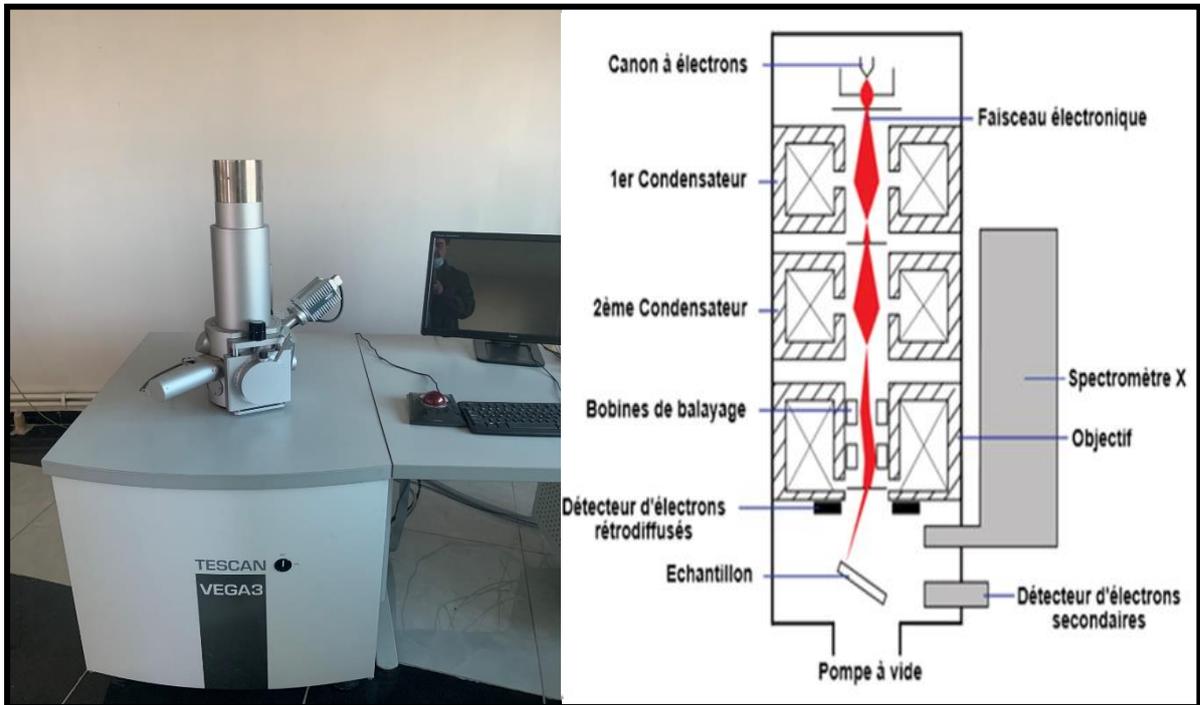


Figure 3.18 a) Photographie de l'appareil FEI Magellan 400 XHR (SEM) équipé d'un détecteur EDS (80 mm²) et une résolution optimum WD - 0.8 nm pour 15 kV et Schéma de principe d'un (MEB). b) Schéma d'un MEB équipé d'un détecteur EDS [163].

Image MEB de la microstructure d'un nanofibre cellulosique de noyau dattier

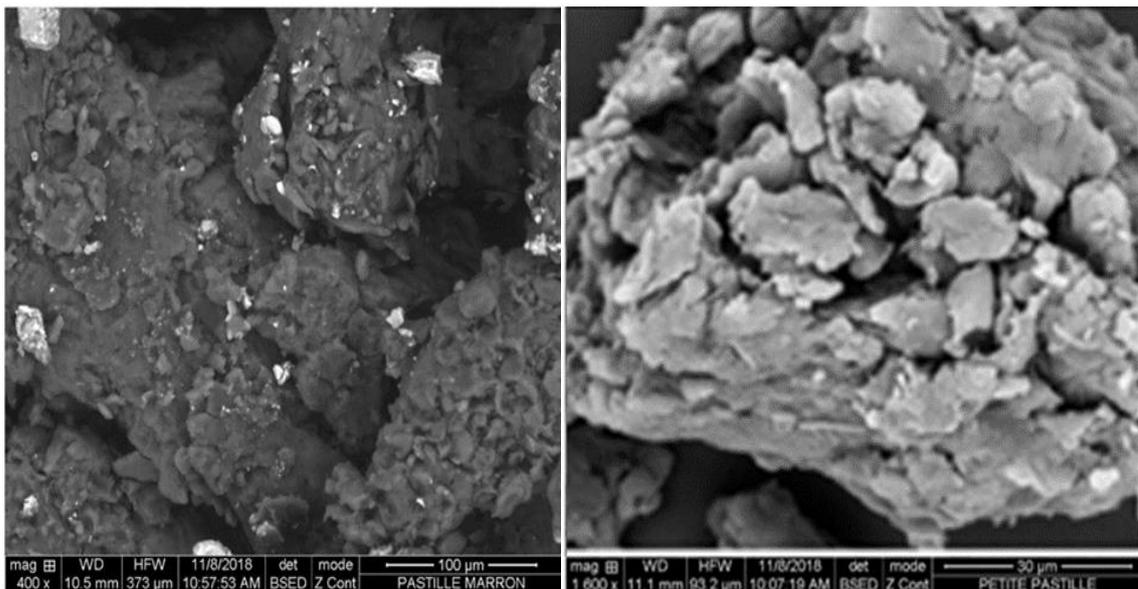


Figure 3.19 Images MEB de la microstructure d'une pastille de couleur Marron en nanofibre des noyaux de datte.

Image MEB de la microstructure d'un ciment CPJ 45

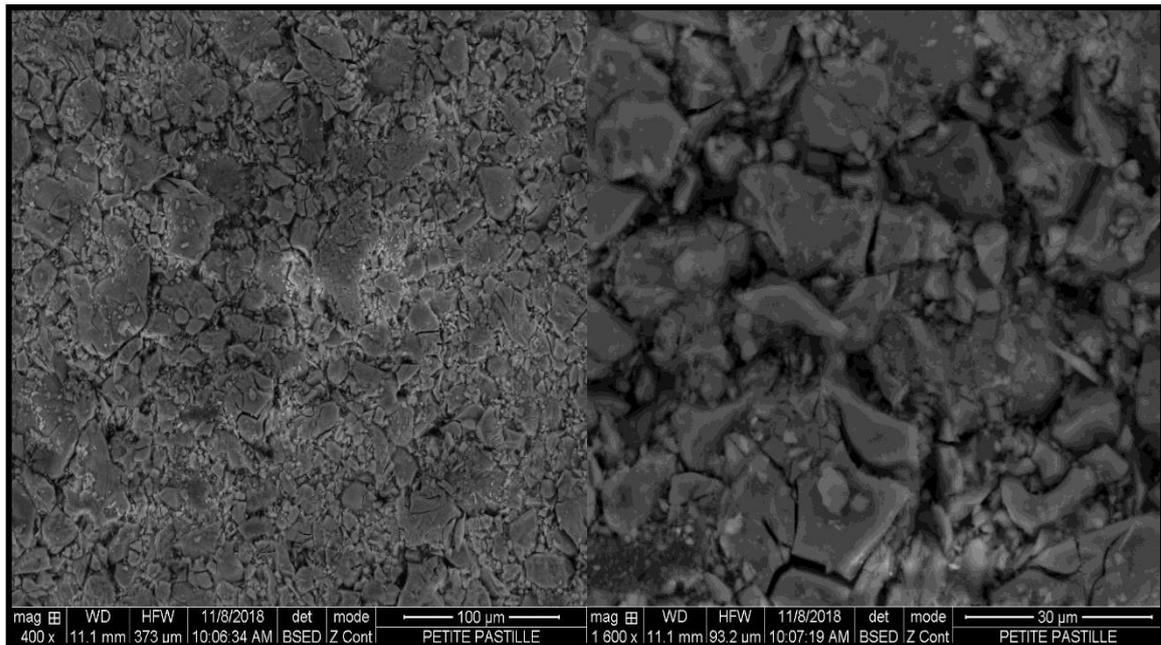


Figure 3.20 Images MEB de la microstructure d'une pastille de couleur grise du ciment.

3.4.4 Dispersions d'énergie des photons X (EDX)

La technique de microanalyse par rayons X à dispersion d'énergie, EDX, associée à un microscope électronique à balayage, permet l'analyse qualitative et quantitative d'échantillons de très petite taille, jusqu'à 10 µm de diamètre, et la caractérisation chimique de matériaux étrangers. Les observations par microscopie électronique à balayage ont été réalisées à l'aide d'un microscope FEI Quanta 400. L'analyse des échantillons de déchets et des matériaux stabilisés/solidifiés est effectuée à l'état solide (pastille) en vue de soumettre la totalité de la couche superficielle aux électrons incidents. L'objectif de cette forme de spectroscopie est d'étudier la distribution des ions calcium à la surface d'une portion de fibre de palmier dattier. L'analyse EDX révèle que la surface examinée a une composition chimique élémentaire de 36, 73 pour le calcium (Ca) et le silicium (Si) ; ces composés se retrouvent dans la majorité des nanofibres cellulosiques utilisées dans notre étude.

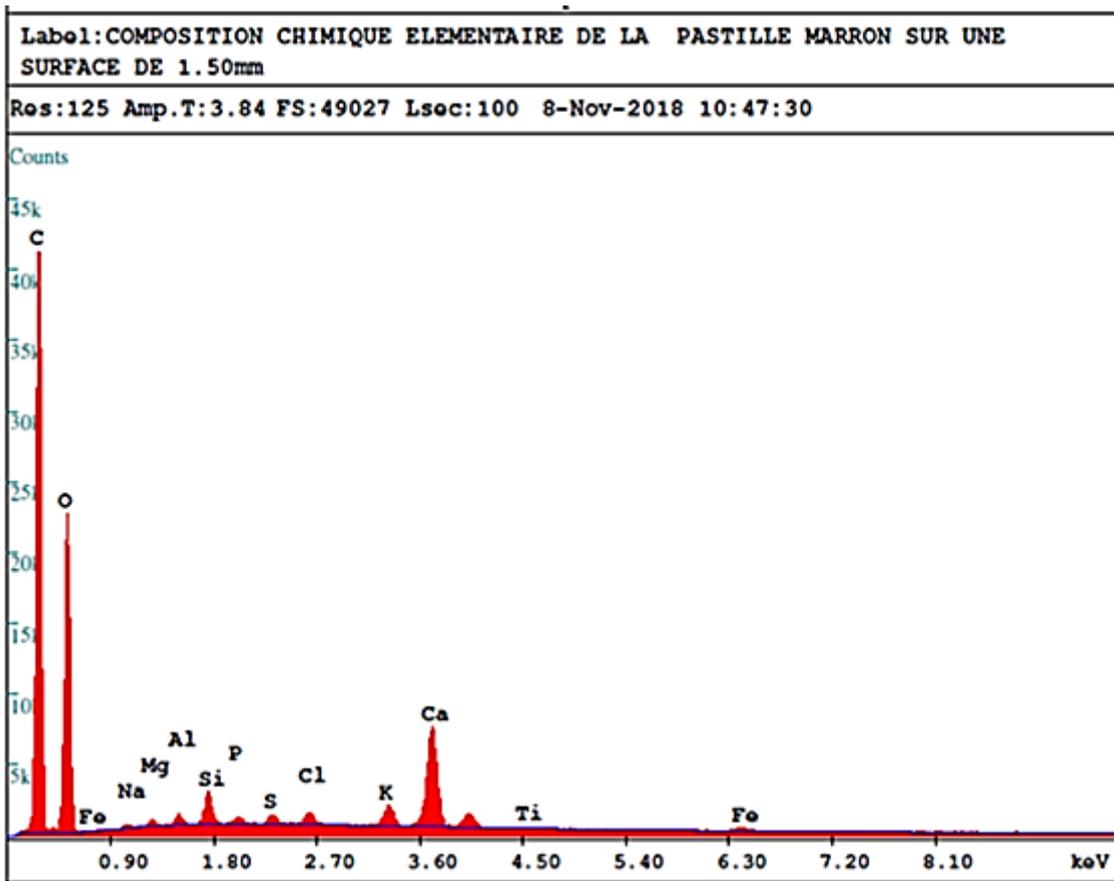


Figure 3.21 Spectre EDX du nanofibre de datte.

3.5 Techniques de mesures

Les mesures de propriétés telles que la densité, la masse volumique, la porosité, la résistance mécanique et la conductivité thermique sont des critères de qualité importants tant pour les matières premières que pour les produits finis. Différentes techniques permettent de déterminer avec précision les propriétés des matériaux solides, visqueux et liquides.

3.5.1 Mesures de la résistance thermique des nanomatériaux

3.5.1.1 Mesure de la conductivité thermique axiale et radiale

Les mesures de la conductivité thermique (λ) et de la diffusivité (α) des nanocomposites sont effectuées en utilisant l'appareille WL 372. Elle comprend un montage expérimental linéaire et autre radiale. Un ratio de dopage aux nanofibres cellulosique de noyaux de datte optée est choisie respectivement (3% - 5% - 10% - 15 %) par rapport à la masse de la matrice cimentaire(1.gm).

Ce composite est pesé dans une balance de précision (kern) puis malaxé pour assurer son homogénéité avec un malaxeur à vibration, en suite formulé à sec en monolithe à l'aide d'une pastilleuse, leur dimension finale est de l'ordre de 10mm pour le diamètre (Φ) et 1mm d'épaisseur. C'est pastilles sont placés au milieu d'un cylindre dotés d'un élément chauffant et autre réfrigérant reliés avec des capteurs qui enregistrent les températures à tous les points pertinents. Un dispositif de chauffage (objets de mesure et élément réfrigérant) et profil de mesure (points de mesure x1-x3 et x7-x9) sont représentés dans la figure (3.22).

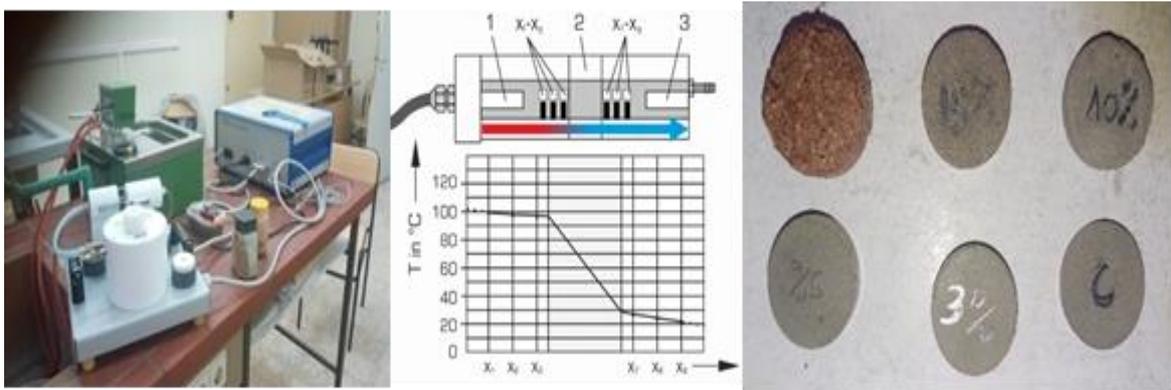


Figure 3.22 Montage expérimental sur la conduction thermique linéaire avec représentation graphique du profil de température : 1 dispositif de chauffage, 2 objets de mesure, 3 élément réfrigérant ; points de mesure x1-x3 et x7-x9.

Tableau 3.4 : Quantité des constituants en nanocomposants ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$).

Quantité de constituants ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)				
Type de ciment CPJ CEM I 42.5 MPa	Teneur en fibre (%)	Ciment (g)	Fibre (g)	Pastille (Φ)mm
M0	0	1	0.00	10
M1	3	0.97	0.03	10
M2	5	0.95	0.05	10
M3	10	0.90	0.10	10
M4	15	0.85	0.15	10
M5	100	0	1	10

3.5.1.2 Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et analyse thermogravimétrique (TGA)

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (TGA) ont été réalisées dans la plage de température de 21 à 320 degrés Celsius avec une vitesse de

chauffage de 10 K/min. Les mesures ont été effectuées sous atmosphère d'azote avec un débit de 20 ml/min. Les propriétés thermiques des nanomatériaux préparés ont été étudiées en utilisant le calorimètre NETZSCH Jupiter STA 449 F3 (NETZSCH, Selb, Allemagne) (voir Figure 3.23).



Figure 3.23 Mesure La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (TGA).

3.5.1.3 Méthode des boîtes de mesure de la conductivité thermique

Les essais de la caractérisation thermique s'est réalisés avec des éprouvettes prismatiques 27 cm x 27cm x 4cm adaptées à l'appareil de mesure. La fabrication d'un carreau plaqué de nanofibres cellulosique des noyaux des dattes a les dimension 270 x 270 x 40 mm³. Les mesures de la conductivité et de la diffusivité thermique selon la méthode de boîte est l'objectif de la confection de ce procédé. Le principe de mesure de la conductivité thermique d'un matériau de taille entière ou de petite taille, est basé sur la réalisation de façon permanente d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers un échantillon placé dans la boîte de la cellule EI700 (Voir figure3.24), Le réglage de l'émission de chaleur est fait de telle façon que la température à l'intérieur de la boîte B1 ; la température TB soit légèrement supérieure à la température extérieure qui est la température ambiante Ta.

Tableau 3.5: Quantité du composite (kg.m⁻³)

Quantité des constituants (kg.m ⁻³)						
Type de ciment CPJ CEM I 42.5 MPa	Teneur en fibre (%)	Ciment (g)	Sable(g)	Fibre (g)	Eau (g)	E/L
Mo	0	450	1350	0,00	225	0,50
M1	5	427,50	1350	22,50	225	0,50
M2	10	405,00	1350	45,00	225	0,50
M3	15	382,50	1350	67,50	225	0,50
M4	100	-	-	1000,00	-	0,50

* Rapport Eau / Liant

Le système de caisson est une méthode de régime permanent qui se caractérise par l'établissement d'un flux thermique unidirectionnel traversant l'échantillon du matériau à examiner, puis des mesures sont prises. Avant de procéder au calcul de la conductivité thermique, nous avons étalonné au préalable les diverses sondes de la cellule EI700 en définissant la valeur correspondante à la perte calorifique de la boîte B1. Les conditions de l'essai sont précisées dans le tableau 3.6. Lorsque le régime permanent est fixé, les gradients de température de part et d'autre de l'échantillon sont enregistrés. Les conditions d'essai pour la mesure de la conductivité thermique sont décrites dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Condition d'essai

Tension (V)	Résistance (Ω)	E (mm)	S (mm ²)
50	1737.8	40	72900



Figure 3.24 Boîte pour mesures de conductivité et de diffusivité thermique.

3.5.2 Mesures masse volumique, densité et porosité

La masse volumique d'une particule est une caractéristique essentielle pour décrire les dosages des constituants ; elle est calculée en divisant la masse d'un corps par son volume, l'unité étant exprimée en kilogrammes par mètre cube. La détermination de la masse

volumique s'effectue notamment à l'aide d'un entonnoir suspendu sur un trépied, d'un récipient calibré, d'une règle à raser et d'une balance. Cette forme de matériel permet de peser l'opération en mesurant d'abord 1dm³ vide (M₀), puis en versant la poudre de noyaux de dattes dans l'entonnoir jusqu'à son rejet, et enfin en nivelant et en pesant le contenu (M₁). La masse volumique apparente peut être calculée à partir des résultats obtenus en fonction de la masse de la poudre et du volume du récipient calibré en utilisant la formule suivante : $M_1 - M_0$ (Voir figure3.25). La variation de la masse volumique d'une matière première suggère une mutation de la matière qui peut affecter le bon fonctionnement ou la qualité du produit fini. La pureté des matériaux peut être réglée en mesurant la densité des matières premières.



Figure 3.25 Etape de mesure de la masse volumique apparente d'une poudre de noyaux dattier.

La densité d'un liquide est importante car elle détermine si le liquide flotte ou s'écoule dans un autre liquide. L'expérience du pycnomètre de Gay-Lussac a été utilisée pour déterminer la densité des nanoparticules. Ce test permet de déterminer la densité des mélanges d'eau et des nanoparticules. Les pycnomètres sont des récipients en forme de poire qui contiennent le matériau à mesurer. Le volume du pycnomètre est déterminé en le remplissant d'un liquide de densité connue (par exemple de l'eau). Par exemple, si la densité de l'eau est de 1, toute substance de densité supérieure s'écoulera dans le liquide. En revanche, toute substance de densité inférieure flotte. (Voir la figure 3.26).

En raison de la présence de pores dans les matériaux qui composent les grains, avec des espaces entre eux, la densité doit être exacte. (Porosité inter- et intergranulaire), leurs pores

(s'ils sont poreux), ou la matière solide dépourvue de pores. Ainsi, la densité réelle et apparente peuvent être distinguées de la densité absolue. Cette dernière est la dénomination la plus couramment utilisée pour désigner les agrégats et la densité de leurs constituants. En conséquence, la densité peut donc être calculée en utilisant la relation suivante : $d(\text{substance}) = \rho(\text{substance}) / \rho(\text{eau})$.



Figure 3.26 Processus de mesure de la densité en utilisant le pycnomètre et le bain thermostaté.

Le pycnomètre à vide Normes EN12697-5, EN13108, ASTM D2041, est utilisé pour déterminer la densité maximale théorique et la densité des mélanges de matériaux. Le pénétromètre à vide est utilisé ainsi que le dispositif d'étouffement, la pompe à vide et la mesure du vide pour compléter l'ensemble des tests. Il peut également être utilisé pour l'évacuation rapide du pourcentage d'air occlus d'un mélange de matériaux compacts et la quantité d'eau absorbée par les composites peut ainsi être calculée. Le pycnomètre à vide est fabriqué en plastique transparent et complet, fourni avec un piège à eau et un tube en caoutchouc.

Les pycnomètres à vide conformes aux normes EN12697-5, EN13108, et ASTM D2041, sont utilisés pour déterminer la densité maximale théorique et la densité des mélanges de contenu. Le pénétromètre à vide est utilisé pour remplir les essais conjointement avec le kit de vibration, la pompe à vide et la mesure du vide. Il sert également à évacuer rapidement le pourcentage d'air occlus d'un mélange de matériaux compacts, ce qui permet de calculer la

quantité d'eau absorbée par les composites. Le pycnomètre à vide est confectionné en plastique transparent et est accompagné d'un purgeur d'eau et d'un tuyau en caoutchouc.

En utilisant des éprouvettes composées de ciment et enrichies de nanofibres cellulosiques de noyaux de dattes à différentes concentrations (5, 10, 15%), un protocole expérimental a été développé pour déterminer la porosité du béton de ces échantillons par rapport à une cible de référence (éprouvette sans fibres). Pour déterminer la porosité, les éprouvettes sont séchées dans un étuveur et pesées sur une balance analytique, puis trempées dans l'eau contenue dans un dispositif appelé pycnomètre sous-vide, puis extraites par aspiration à l'aide d'un moteur aspirant l'air contenu dans les pores, et enfin ces éprouvettes sont pesées à nouveau pour déterminer les pourcentages en porosité. (Voir la figure 3.27).



Figure 3.27 Mesure de la porosité des éprouvettes composées en ciment et nanofibre cellulosique des noyaux de datte à l'aide d'un pycnomètre sous-vide Cooper 10L.

3.5.3 Mesures de la résistance mécanique

Le mortier doit être composé d'une part de ciment, de trois parts de sable normalisé et de la moitié d'eau (le rapport eau/ciment est de 0,50). Chaque gâchée pour trois éprouvettes d'essai doit comporter $450 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ de ciment, $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de sable et $225 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ d'eau. Les mortiers sont fabriqués conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1. Il s'agit des éprouvettes prismatiques dont les dimensions sont de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Excepté le témoin composé uniquement de ciment et sable avec un rapport eau sur ciment $E/C = 0,5$, l'analyse est réalisée sur quatre formulations avec des additions de nanofibres de 5%, 10%, 15% et 20% par rapport à la masse de ciment (Voir figure 3.28). Les composants du constituant

correspondant à 1m³ de matériau sont mentionnés dans le tableau 3.4 pour chaque teneur en fibres.



Figure 3.28 Processus d'élaboration des éprouvettes selon la norme NF 196-1

Tableau 3.7 Quantité de composite (kg.m⁻³)

Quantity of constituents (kg.m ⁻³)						
Cement type CPJ CEM I 42.5 MPa	Fiber content (%)	Cement (g)	Sand (g)	Fiber (g)	Water (g)	W/C
M0	0	450	1350	0,00	225	0,50
M1	5	427,50	1350	22,50	225	0,50
M2	10	405,00	1350	45,00	225	0,50
M3	15	382,50	1350	67,50	225	0,50
M4	20	360,00	1350	90,00	225	0,50

* Rapport Eau/ Ciment.

3.5.3.1 Resistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction par flexion est réalisée à l'aide d'une presse de flexion et de pression « MATEST » munie d'un dispositif de flexion par trois points comme illustré sur la figure 2.29 et une vitesse de charge des échantillons égale à 100 N / s. La résistance à la flexion est calculée comme suit,

$$R^f = (1.5 \times F_f \times l) / b \quad (1).$$

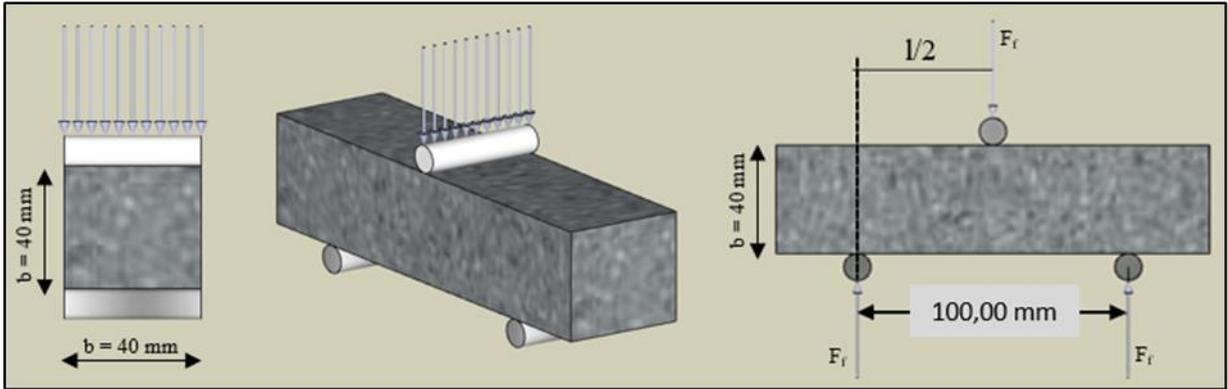


Figure 3.29 Schéma pour le test de résistance à la traction par flexion de trois points.

3.5.3.2 Résistance à la compression

Les tests sont réalisés conformément à la norme NFP 15-451. Les demi-primés ont été écrasés en compression à l'aide d'une presse hydraulique "MATEST" illustrée sur les figures 3.30. La résistance est déterminée selon la formule suivante :

$$R_c = F_c / S \quad (2).$$

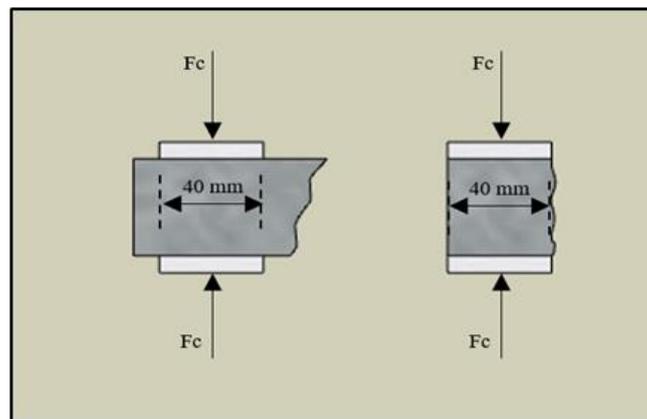


Figure 3.30 Schéma pour le test de la résistance à la compression.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de développer un nouveau matériau ultrafin et poreux à base de nanoparticules de fibres cellulosiques, et de comprendre les modes de préparation et les relations liant leurs structures, leurs propriétés thermiques et mécaniques.

À la suite de la mécanosynthèse, il a été démontré que la structuration multi-échelle favorise la création de particules méso et/ou nanoporosites. Les fibres cellulosiques les plus grosses favorisent le développement de porosités par les fibrilles plus petites. Par conséquent, par agitation homogène des nanoparticules de cellulose, il est possible d'obtenir une structuration multi-échelle relativement ultra-mince.

Les caractérisations réalisées par MEB ont confirmé la maîtrise des dimensions micro et nanométriques des fibrilles avec les procédés de broyage mécanique utilisés. Le développement de structures nanocellulosiques à différentes échelles est favorisé par des méthodes peu coûteuses. Il est possible d'améliorer la structuration de ces matériaux en optimisant la qualité et la dispersion des nanoparticules de cellulose et l'incorporation de nanoparticules minérales comme la silice.

Nous avons tenté de composer un nanomatériau biosourcé présentant une bonne tenue thermique et mécanique en exploitant l'organisation structurale des chaînes de nanofibres cellulosiques. La compatibilité alimentaire, la non-toxicité et la biodégradabilité des nanomatériaux à base de nanocellulose ouvrent également de nouvelles opportunités dans le domaine de la construction, notamment pour les matériaux d'isolation thermique, ce qui n'est pas possible avec la grande majorité des nanoparticules actuellement disponibles.

Notre étude, ainsi que d'autres études antérieures, ont maintenant montré que les nanomatériaux biosourcés, y compris leur principal composant, la nanofibre de cellulose, peuvent être évalués différemment des fibres isolantes ordinaires. On prévoit que la nanocellulose remplacera l'utilisation de polymères organiques dans un avenir proche, et qu'elle sera utilisée pour produire de nouveaux matériaux dotés de meilleures propriétés thermiques et mécaniques, en raison ainsi de ses caractéristiques qui répondent aux critères environnementaux actuels.

CHAPITRE IV : INTERPRETATION DES RESULTATS DE CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE, STRUCTURALE, THERMIQUE ET MECANIQUE DU NANOMATERIAU

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons examiné l'élaboration de nanofibres cellulosiques à noyau de dattes et les processus de caractérisation de leur morphologie et de leur structure. Ce chapitre s'intéresse également aux nanofibres de cellulose utilisée comme renforts dans un nanocomposite à base de matrice cimentaire. Ces ressources végétales représentent un potentiel naturellement biodégradable et possèdent plusieurs propriétés techniques substantielles. Elles sont caractérisées comme un procédé permettant de substituer des fibres industrielles aux fibres naturelles en raison de leurs propriétés thermiques et mécaniques supérieures et de leur faible densité.

4.1 Caractérisation morphologique et structurale

4.1.1 Diffraction des rayons X (DRX)

4.1.1.1 DRX du nanofibres cellulosiques des noyaux de datte

Les fibres cellulosiques de dattes sont broyées jusqu'à une taille de particule ultrafine de moins de 100 nm, puis comprimées sous forme de pastille dans une matrice de 10 mm de diamètre et sous une pression de 10 MPa. Un diffractogramme typique de nanofibres (NFC) est représenté sur la figure (4.1). La région contenant les pics de diffraction est représentée pour des angles de Bragg 2θ entre 10 et 40 degrés. Les indices de lentilles indiqués (I_c) permettent une analyse détaillée des quantités de nanofibres cellulosiques cristallines. L'intensité des rayons est également déterminée par la structure cristallographique de la phase et la famille de plans cristallographiques impliqués.

La figure 4.1 illustre les rayons de diffraction X traversant les constituants nanoparticulaires du noyau du palmier dattier. En raison de l'échelle submicronique des particules dans la poudre de noyau de datte, l'observation empirique des pics de diffraction a révélé de très faibles élargissements.

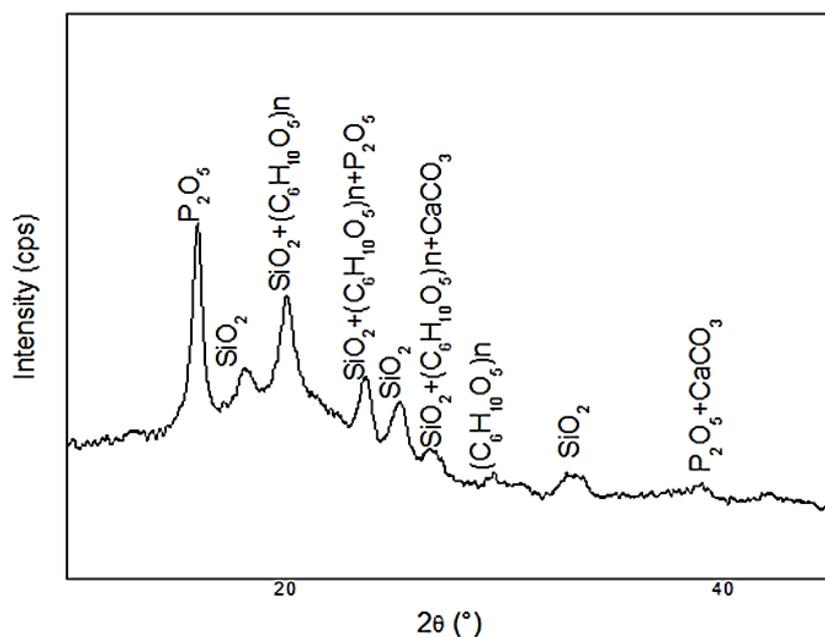


Figure 4.1 Cristallographie au rayon X (DRX) des constituants de la nanopoudre de noyau de palmier dattier.

Les pics du spectre DRX ont été ajustés par le biais de fonctions gaussiennes. Selon la formule de Scherrer, les nanoparticules ont une taille comprise entre 3,4 et 6,3 nanomètres. On dénombre neuf pics la gamme à $2\theta = 15,82, 18,04, 20,05, 23,29, 25,10, 26,56, 29,92, 33,11$ et $38,62$. (Voir figure .4.1). La valeur de ces pics reflète la composition nanocellulosique de la nanopoudre de noyau de datte, qui est constituée de SiO_2 , $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, CaCO_3 et P_2O_5 (carte JCPD n° 46-1045, 47-2462, 23-1302 et 41-1475). Il ressort du tableau 4.1 que les pics des constituants du noyau de la datte qui pèsent moins de 1% sont indétectables.

Table 4.1: Taille et souche des constituants des nanofibres de noyaux de palmier dattier.

N°	2θ	D [Å]	Crystallite size [nm]	Lattice strain [%]	Constituents of date palm
1	15,82	5,60	3,8	6,818	P_2O_5
2	18,04	4,91	5,3	0,254	SiO_2
3	20,05	4,42	5,2	4,019	$\text{SiO}_2, (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$
4	23,29	3,81	5,2	3,447	$\text{SiO}_2, (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n, \text{P}_2\text{O}_5$
5	25,10	3,53	6,3	0,050	SiO_2
6	26,56	3,32	3,4	0,051	$\text{SiO}_2, (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n, \text{CaCO}_3$
7	29,92	2,70	15	0,152	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$
8	33,11	2,33	5,3	2,390	SiO_2
9	38,62	2,14	5,4	2,027	$\text{P}_2\text{O}_5, \text{CaCO}_3$

4.1.1.2 DRX du ciment

L'objectif de cette méthode est de déterminer les distances interarticulaires, de classer les principales phases cristallisées présentes dans la poudre de ciment, et de caractériser les agencements des chaînes cristallines. Les résultats obtenus par diffraction des rayons X sont présentés dans la figure 3.2 et le tableau 3.2. En fonction du spectre DRX enregistré pour le ciment. Les pics DRX présentés dans la figure 3.2 sont identiques à ceux décrits dans les travaux rapportés par Serne et al [164]. Les principaux composants du ciment sont détectés à différentes valeurs d'angle de diffraction :

- ♦ C₂S à 2 Θ = 32.601°, 34.351°,38.740°,41.301°,51.723° et 56.464°.
- ♦ C₃S à 2 Θ = 32.599°, 34.349°,41.300° et 56.464°.
- ♦ C₃A à 2 Θ = 32.207° et 38.742°.
- ♦ C₄AF à 2 Θ = 32.206°,38.741° et 67.388°.

Tableau 4.2 : Composition minéralogique du clinker du ciment utilisé.

Constituants	Teneur massique (%)
C3S	48.8
C2S	22.4
C3A	9.1
C4AF	8.7

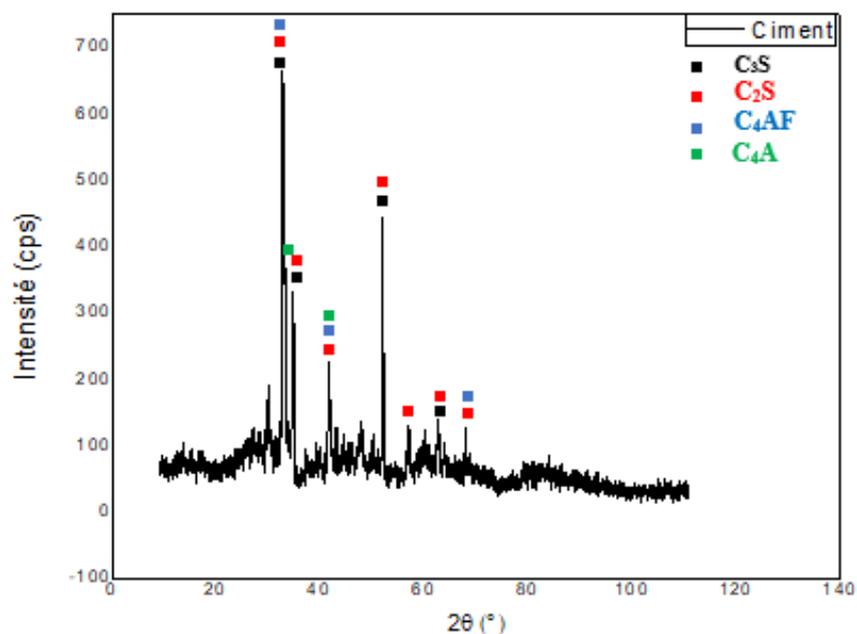


Figure 4.2 Diagramme des rayons X du Ciment portland CPJ-CEM I 42.5.

4.1.1.3 DRX du sable normalisé CEN (sable normalisé ISO)

La lecture des spectres a permis d'identifier les 21 pics qui sont déterminés par la diffraction des rayons X du sable normalisé. Les résultats obtenus par diffraction des rayons X sont présentés dans la figure 4.3. Les principaux constituants du sable CEM sont la silice et le calcaire, qui sont détectés dans le diagramme RX du sable à différents angles de diffraction :

SiO₂ à $2\theta = 20.83, 26.75, 40.07, 46.30, 55.29, 65, 69.15, 80.34, 84.58, 91.91, 104.19, 106.58$.

CaCO₃ à $2\theta = 29.40, 36.01, 43.25, 50.70, 60.60, 76.20, 97.69, 114.03$

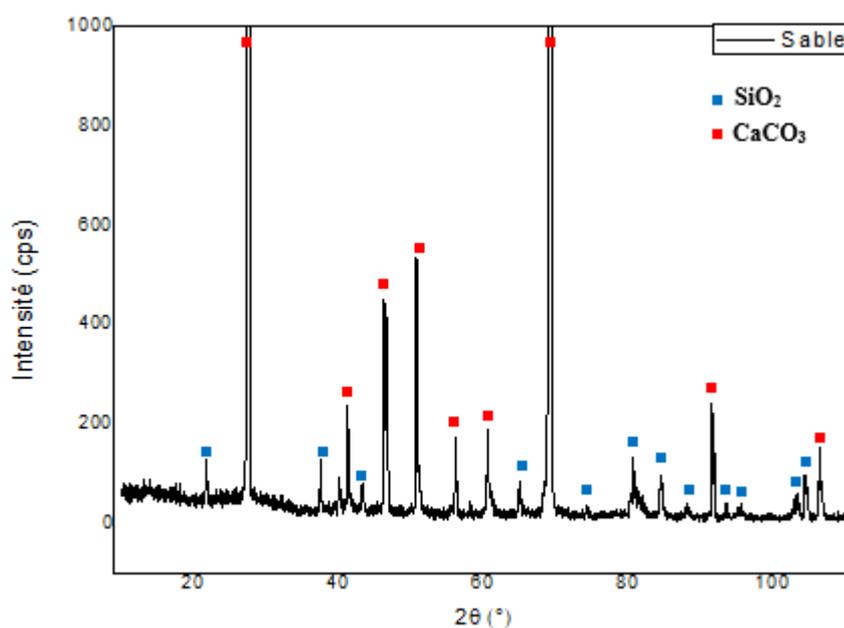


Figure 4.3 DRX du Sable normalisé CEN.

4.1.2 FT-IR noyaux de dattier

4.1.2.1 Nanopoudre des noyaux de datte (NFC)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) est une technique efficace et rapide pour classer les résidus organiques en groupes de compositions chimiques très comparables. En général, la présence d'échantillons peut être déterminée en les comparant aux spectres de référence de substances de référence connues. La morphologie, la structure et les liaisons hydrogène des nanofibres de cellulose broyée par mécanosynthèse à billes ont été caractérisées à l'aide de rayons infrarouges.

La large bande d'absorption observée entre 3100 et 3700 cm⁻¹ est attribuable à la vibration d'étirement du groupe hydrogène OH interconnecté, indiquant une liaison hydrogène

intermoléculaire à O (6) HA-O (2) et une liaison hydrogène intramoléculaire à O (3) HA-O. (5). Le pic à $2923,34\text{ cm}^{-1}$ est classé comme un polysaccharide appartenant au groupe CH, des résultats comparables ont été énoncés par Rosa et al [165]. Le pic à $1743,85\text{ cm}^{-1}$ est en corrélation avec la vibration d'étirement C-O des groupes acétyle et ester uronique dans la nanofibre de noyau de palmier dattier. Ces groupes ont été trouvés dans la lignine et l'hémicellulose et sont considérés comme présents dans la pectine, l'hémicellulose, et/ou la liaison ester du groupe carboxylique des acides féruliques [166,167,168].

La bande de $1607,01\text{ cm}^{-1}$ pour la nanofibre de cellulose résulte de l'extension d'un cycle aromatique par CH₂ et de l'étirement de la liaison éther C-O. Le pic à $1516,58\text{ cm}^{-1}$ est en corrélation avec l'étirement C-C du cycle aromatique de la lignine [167]. La bande à $1428,58\text{ cm}^{-1}$ est adaptée à la déformation des groupes C-H dans le plan et à la vibration aromatique des pectines, des lignines, des hémicelluloses et des pectates de calcium. Le pic à $1243,76\text{ cm}^{-1}$ est synonyme de cycle C-O aliphatique. La liaison de la cellulose qui interagit avec les molécules d'eau génère l'effet hydrophile [169,170].

Le pic élevé autour de $1032,64\text{ cm}^{-1}$ est attribué à la vibration d'étirement de C - O - C (allongement antisymétrique) Cellulose, hémicelluloses dans la pyranose de l'anneau squelettique, comme cela a également été rapporté par Sun et al [171]. Les spectres des nanofibres de cellulose et des fibres de cellulose sont parfaitement uniformes, ce qui confirme que la structure moléculaire de la cellulose reste stable malgré le processus de broyage. Ce résultat a été vérifié en déplaçant la bande de $2800\text{ à }2900\text{ cm}^{-1}$ vers une longueur d'onde plus élevée accompagnée d'une diminution d'intensité. La découverte des échantillons de nanofibres de cellulose démontre clairement que l'absorption du spectre de bandes est relativement forte. Enfin, le spectre d'absorption montre une bande de $874,84\text{ cm}^{-1}$ correspondants à des groupements carbonates CO₃²⁻, susceptibles de se développer à la surface des microfibrilles [172] et celles situées de l'ordre de $740\text{ à }840\text{ cm}^{-1}$ sont liées aux aromatiques de l'alcool.

Les résultats de l'étude FT-IR suggèrent que la structure moléculaire des nanofibres de cellulose ne subit pas d'altération. Le tableau 4.3 illustre les bandes d'absorption infrarouge correspondantes. Les spectres révèlent une gamme de pics, indiquant la complexité des nanofibres du palmier dattier. Ces mutations de bandes ont montré que la nanofibre de palmier dattier englobe trois grandes bandes d'absorption à $3324,58$, $2924,34$ et $1428,58\text{ cm}^{-1}$

¹ correspondants aux groupes OH et CH aliphatiques. La synthèse des études de spectrométrie infrarouge des nanofibres de cellulose est présentée dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Principale bande d'absorption infra-rouge du nanofibres cellulosique du palmier dattier.

	Bande (cm ⁻¹)	Attribution majeure	Source
1	3324.58	Liaison O-H Polysaccharides	Polysaccharides
2	2923.34	C-H (élongation symétrique)	Polysaccharides
3	2853.84	CH ₂ (élongation symétrique)	Graisses
4	1743.85	Groupe ester C=O (élongation symétrique)	Xylanes (hémicelluloses)
5	1607.01	Etirement CH ₂	-
6	1516.58	C=C cycle aromatique (élongation symétrique)	Lignines
7	1428.58	Déformation dans le plan de groupes C-H et vibration aromatique	Pectines, lignines, hémicelluloses, pectates de calcium
8	1243.76	C-O cycle aliphatique	Cellulose
9	1032.64	C-O-C (élongation antisymétrique)	Cellulose, hémicelluloses
10	874.84	C-OH de déformation	Cellulose
11	805.25	Groupement carbonyle insaturé C=O	Alcool aromatique
12	766.89		

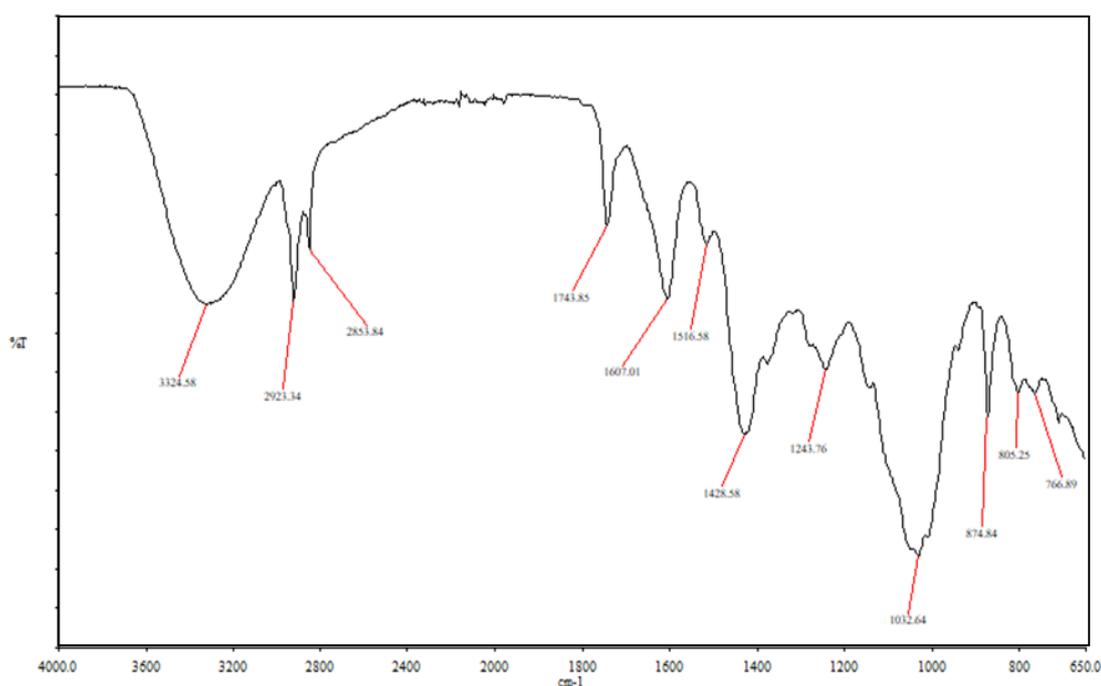


Figure 4.4 Spectre FT-IR des nanofibres cellulosiques des noyaux de palmier dattier.

4.1.2.2 Poudre grise de ciment CPJ 42.5

La FT-IR est une technique analytique qui répond à la nécessité d'un diagnostic rapide et précis. Cette approche permet de reconstituer la composition chimique des constituants en définissant des bandes d'absorption qui correspondent au mode vibratoire d'une liaison chimique entre deux atomes. Le ciment Portland est composé principalement de clinker et d'argile, avec des résidus de constituants secondaires fréquemment présents [173]. Le clinker est traité pour séparer sa structure en quatre composés stables : deux phases de silicate (silicate bicalcique C2S et silicate tricalcique C3S) et deux phases d'aluminate (aluminate tricalcique C3A et aluminé ferrite tétracalcique C4AF) [174,175]. La figure 3.5 illustre la manière dont les bandes d'absorption infrarouges du clinker sont comprises et interprétées.

La bande 927 cm^{-1} a une forme large et intense due à la liaison interatomique Si-O, qui est attribuée au composant des silicates. Le pic $661,11\text{ cm}^{-1}$ correspond à une forme de bande moyenne liée à la liaison interatomique -Si-O-Si (C2S et C3S). Le pic $1428,27\text{ cm}^{-1}$ ν C-O présente une configuration de bande variable, indiquant qu'il est composé de carbonates de calcium. Le pic $883,40\text{ cm}^{-1}$ C-O, avec une bande d'épaulement spécifiquement conçue pour le constituant (CaCO_3). Ces spectres présentent une large bande d'absorption à 927 cm^{-1} , suivie d'une bande à $661,11\text{ cm}^{-1}$, qui correspondent respectivement aux modes de vibration de valence des phases silicatées et aux déformations de liaison Si-O des phases siliceuses. En effet, comme les phases silicates représentent 80% du clinker et les phases aluminates 20%, la bande d'absorption des silicates se détache nettement et occulte l'absorption de toutes les autres liaisons interatomiques.

L'épaulement de $883,40\text{ cm}^{-1}$ avec une bande de faible intensité de $1428,27\text{ cm}^{-1}$ représente les modes de vibration des liaisons C-O après une carbonatation mineure du clinker. Le pic de 3640 cm^{-1} est constitué d'une liaison interatomique ν - OH, une forme de bande étroite avec les constituants $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et des caractéristiques spécifiques à la formation de la portlandite. La teneur en eau est représentée par la bande 1477 cm^{-1} , ν - OH, dont la forme est moyennement accentuée. Le motif de $1113,90\text{ cm}^{-1}$ σ -S-O s'accorde bien avec les constituants du sulfate. La confirmation de la présence de calcite et son interprétation est démontrée par une variété de bandes différentes.

Le pic à $1428,27\text{ cm}^{-1}$ et le pic à $883,40\text{ cm}^{-1}$ correspondent aux vibrations d'allongement de la liaison C-O dans le carbonate de calcium (CaCO_3), résultant de la carbonatation

naturelle du liant. Les traces de gypse ont disparu en conjonction avec la présence d'une bande à $1113,90\text{ cm}^{-1}$ qui provient d'ettringite. Le changement de 927 cm^{-1} à $883,40\text{ cm}^{-1}$ est dû à la mutation de la liaison chimique Si-O dans l'environnement (C3S en C-S-H). Le spectre FT-IR est soigneusement dépouillé pour mettre en évidence l'existence de trois groupes minéraux prédominants : l'ettringite, la calcite et la portlandite, ainsi que des particules de ciment hydraté. Le spectre infrarouge montre que toutes les bandes caractéristiques du ciment CPJ — CEM I sont distinguées et apparaissent dans la gamme de dosage spécifiée par la norme NF P 15-301.

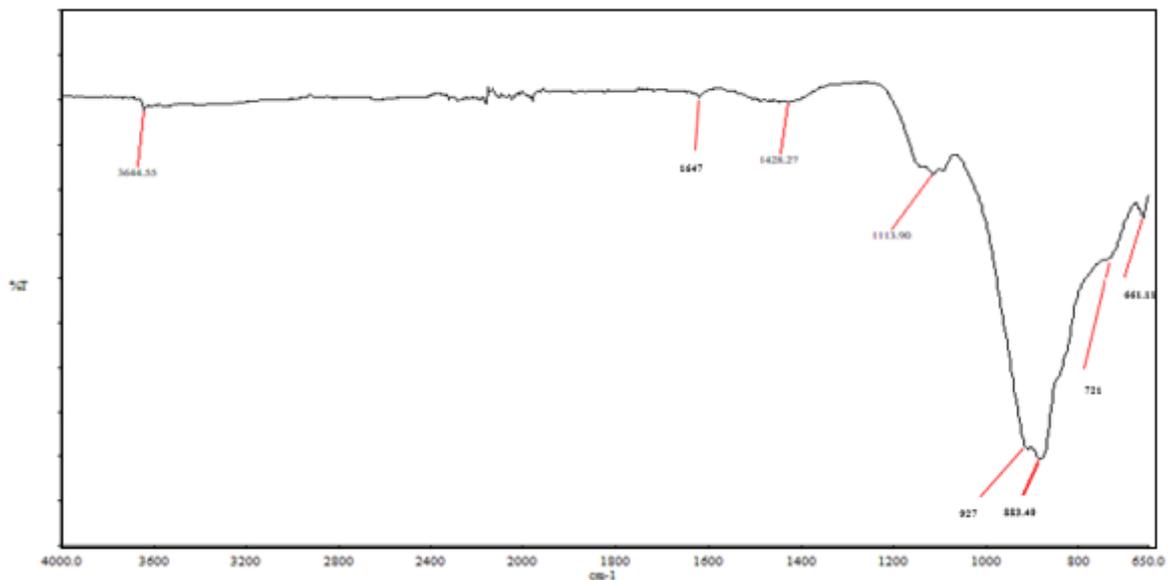


Figure 4.5 Spectre FT-IR d'un ciment CPJ CM I synthétique.

4.1.2.3 Poudre de ciment dopée de 15% de nanofibre cellulosique

L'analyse FTIR de la pastille de ciment dopée avec 10 % de nanofibres cellulosiques montre que le pic de l'échantillon est presque identique à celui de la poudre de ciment, ce qui signifie que l'ajout de 15 % de nanofibres de palmier dattier ne modifie pas la composition chimique de la matrice de ciment. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier de l'échantillon C (15 %) révèle l'absorption de CO_3 , dont le pic est situé à environ 1055 cm^{-1} [176]. Ce spectre d'absorption reflète la présence de carbonate de calcium (CaCO_3) [177]. La bande d'absorption autour de 970 cm^{-1} (ν Si-O) correspond aux modes de vibration de valence de la liaison Si-O des phases de silice C2S et C3S [177]. Enfin, les deux bandes de l'eau apparaissent à 1645 cm^{-1} et 796 cm^{-1} [178].

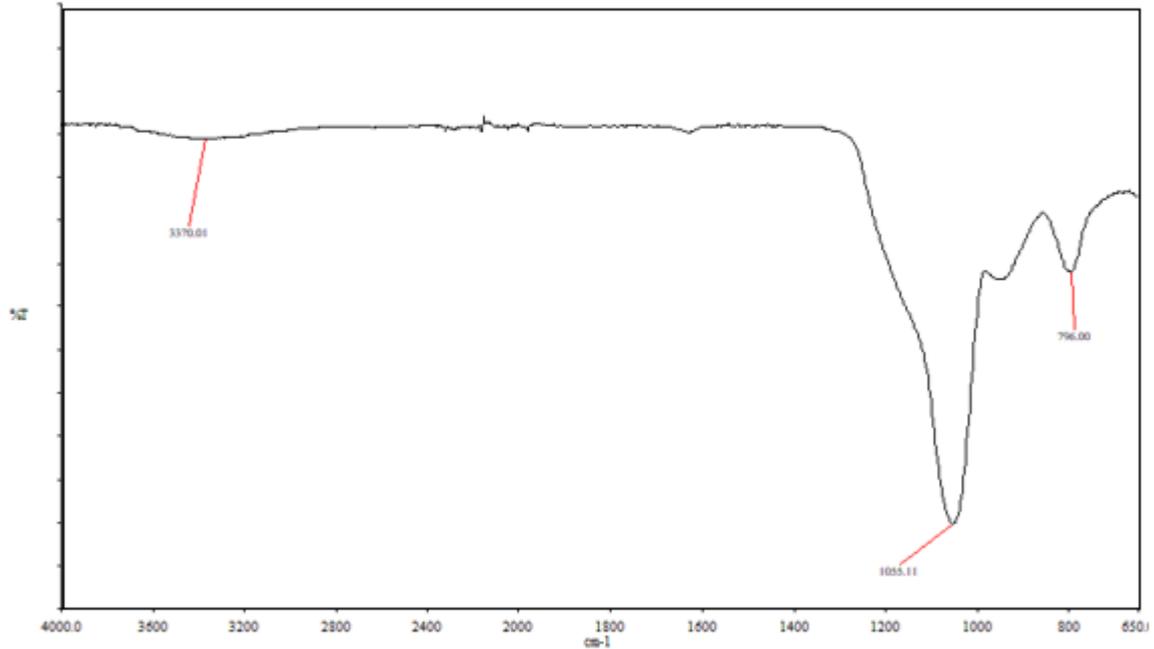


Figure 4.6 Spectre FT-IR d'un ciment CPJ CM I, dopé de 15% des nanofibres cellulose de noyau dattier.

4.1.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

4.1.3.1 Microstructure interne des nanofibres de noyaux du palmier de datte

Le microscope électronique à balayage (MEB) est l'une des techniques d'analyse utilisées dans de nombreux domaines, notamment la biotechnologie et l'industrie. Cette méthode de traitement permet d'étudier des surfaces et des substrats, puis de procéder à la synthèse chimique de matériaux micro et nano dimensionnels. Les analyses MEB sont souvent classées en catégories microscopiques et spectroscopiques, la première étant consacrée à la classification des phases, des particules et de la morphologie, la seconde à l'analyse chimique des couches externes des surfaces. La micrographie électronique à balayage facilite la visualisation de photographies informatives de la topographie et de la surface de l'échantillon avec une résolution jusqu'à l'échelle nanométrique.

La visualisation d'échantillons complexes prend d'abord la forme de la composition des pastilles de nanofibres de palmier dattier sans altérer leur structure. Ensuite, la métallisation de l'échantillon permet de l'observer au microscope électronique à balayage (MEB). Les monolithes sont montés dans une chambre d'ionisation et exposés à un spray cathodique par effet de brillance ; la capture du cliché permet de visualiser la topologie de surface des nanoparticules. Les images montrent l'existence de grands réseaux microporeux de

nanocellulose interconnectés par des nanoparticules poreuses variant en taille de 20 à 80 nm. La porosité des parois observée est très probablement due à la transition réversible des nanofibres de la phase amorphe à la phase cristallite, conduisant à la formation de nanocristaux lors de la mécanosynthèse des particules celluloses des noyaux de dattes, créant ainsi la compacité des nanofibres celluloses.

Les micrographies MEB de la figure 4.7 (a) - (b) montrent des différences de masse proportionnelles entre les morphologies des nanofibres de cellulose des noyaux de palmier dattier. L'amplification par projection progressive des micrographies MEB nous a permis de visualiser les structures géométriques cristallisées des microfibrilles, qui ont un aspect intra-fibrillaire distinct et ont des épaisseurs et des diamètres compatibles. Les structures observées dans les nanofibres de cellulose sont caractérisées comme des galets et sont poreuses avec des diamètres visibles, permettant une large zone d'interactions chimiques, physiques et thermiques. Cependant, les images MEB de la nanofibre de cellulose de noyaux de datte (figure 4.7) montrent des structures granuleuses avec une longueur et un diamètre précis et mesurable.

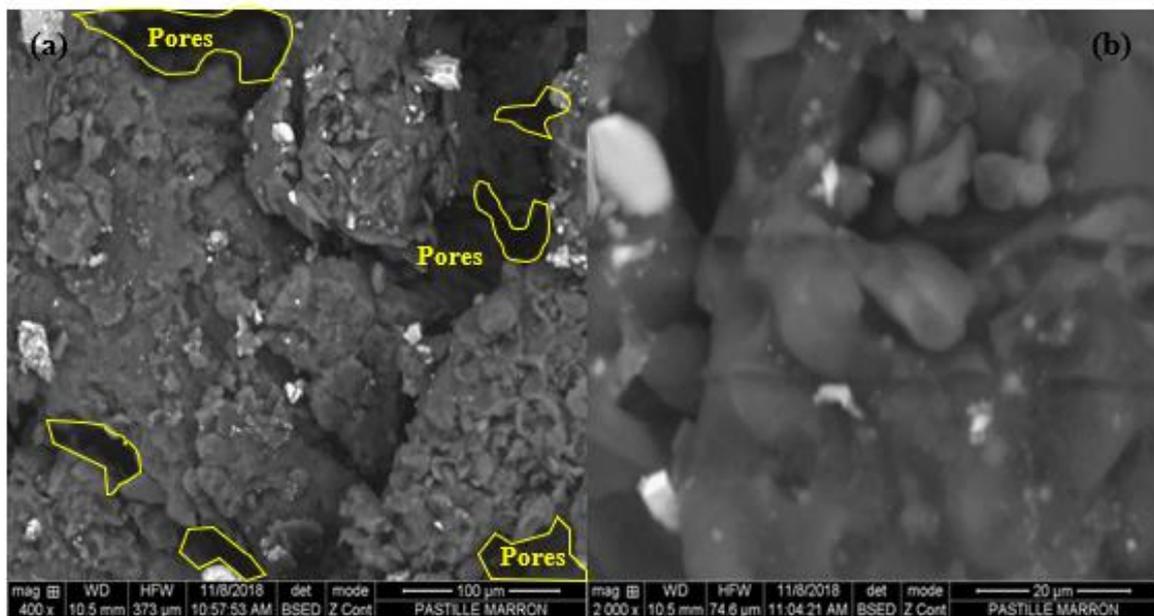


Figure 4.7 Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure des constituants de nanofibre de noyau de palmier dattier à échelle égale à : (a) 100µ m, (b) 20 µm.

4.1.3.2 Microstructure interne des composants de ciment CPJ 42.5

Le ciment Portland CPJ 42.5 CMI est l'une des compositions les plus complexes à caractériser en termes de composition chimique, de structure cristalline et de morphologie

en phase solide. La microscopie électronique à balayage a été utilisée pour étudier la morphologie des CSH. Viehland et al. [179] ont démontré la coexistence de deux profils morphologiques distincts, l'un amorphe et l'autre nanocristallin et isotrope.

L'analyse des images prises au microscope électronique à balayage à l'intérieur des granules de ciment a permis de déterminer les textures morphologiques. La microstructure des particules de ciment a été visuellement améliorée, avec des interfaces plus densifiées et riches en CSH. Ces derniers sont de nature alvéolaire (nid d'abeille) et ont une morphologie épaisse [180]. Comme plusieurs auteurs l'ont observé dans le cas des matrices minérales stabilisées [181,182], ces agrégats sont de conformation floculaire. Cette détection montre que la matrice cimentaire est constituée d'un enchevêtrement de particules, avec une superposition de couches et des caractéristiques distinctes de la kaolinite (voir figure 4.8).

En outre, l'analyse chromatographique révèle l'existence de grains d'argile qui enrobent et structurent l'enveloppe des particules. Des amas de particules, très probablement originaires des Portlands, ont été observés. La formation d'hydrates de ciment conduit à la formation de porosités de remplissage dans les particules élémentaires. En revanche, plusieurs auteurs [183,184] affirment que la résistance mécanique dépend entièrement de l'augmentation de la porosité capillaire, qui se traduit par une croissance microstructurale et des hydrates de carbone répartis de manière hétérogène dans la matrice cimentaire. L'exploration du MEB démontre le recouvrement des particules de quartz à travers les phases cimentaires qui assurent la cohésion entre les différents constituants.

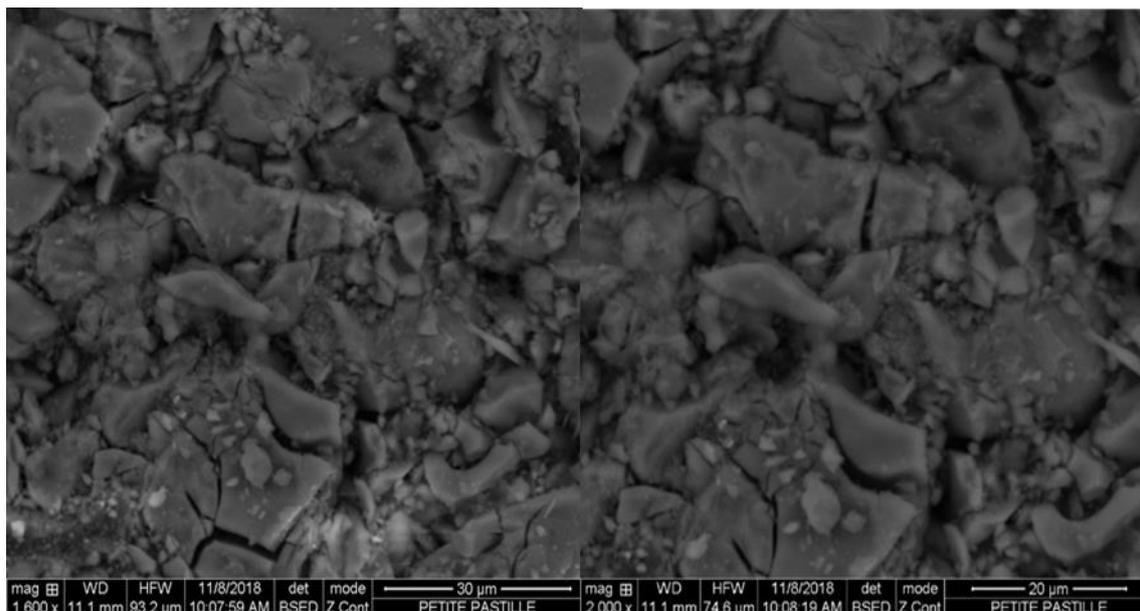


Figure 4.8 Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure des constituants de poudre de ciment CPJ 42.5 à échelle égale à : (a) 30µ m, (b) 20 µm.

4.1.3.3 Microstructure interne du nanocomposite (ciment dopé avec 15% de nanofibre cellulosique de noyau de datte)

Les observations de microscopie électronique à balayage (SEM) sont utilisées pour caractériser la microstructure ultrafine. Les particules à faible expansion avec des structures compactes sont illustrées à la figure (4,9). Les constituants de la poudre broyée entrent en contact les uns avec les autres et forment des macrospores dont la taille est comprise entre 25 et 35 35 µm.

Les figures 4.9 (a) — (b) montrent des images MEB d'un composite de nanofibres de ciment et de cellulose provenant de noyaux de palmier dattier. L'examen des images a révélé que les nanofibres cellulosiques dérivées de la biomasse de palmier dattier présentent des formes et des distributions homogènes de microfibrilles avec des entrelacs morphologiques étroits de nanocomposites. Cependant, l'existence d'agglomérats nodulaires à leur surface a été détectée. Ces agglomérats nodulaires ont également été observés sur des images MEB obtenues par Alawar et al [185], qui caractérisaient les fibres de palmier dattier traitées pour être utilisées comme renfort de composites. Néanmoins, aucun de ces agglomérats nodulaires n'a été visualisé par Ovando-Medina et al [186], qui ont synthétisé un composite α -cellulose utilisé pour éliminer le colorant rouge réactif d'une solution aqueuse. Les images MEB rapportées par ces chercheurs suggèrent des sources de matériel similaire.

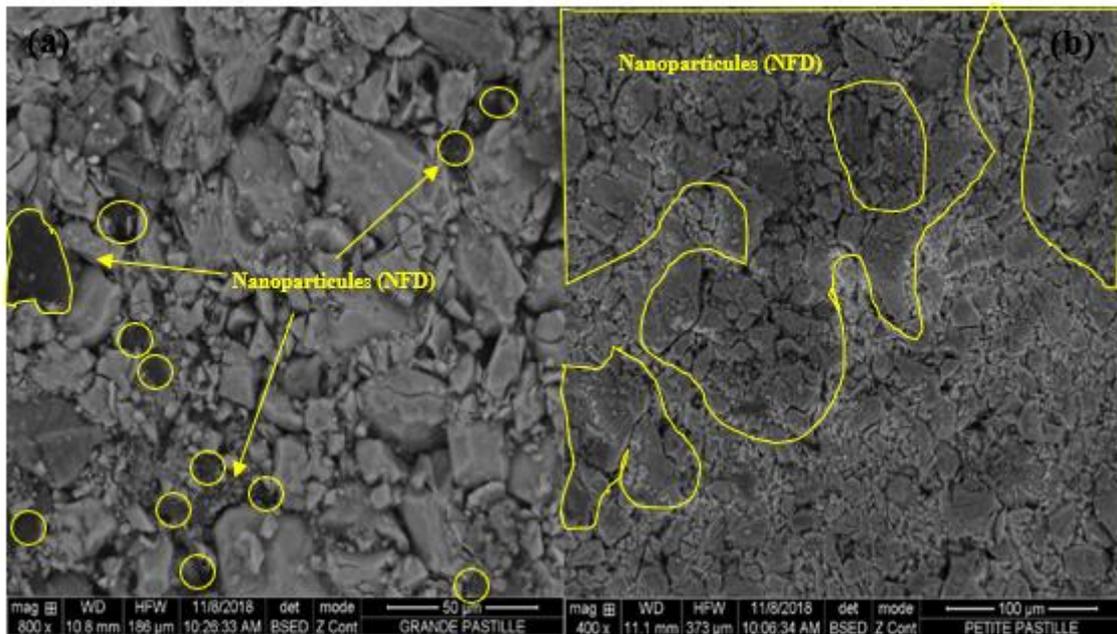


Figure 4.9 Micrographie MEB montrant la morphologie et la structure de 15% des constituants de nanofibre de noyau de palmier dattier dopés avec du ciment à échelle égale à : (a) 50 μ m, (b) 100 μ m.

4.1.4 Analyse spectroscopique à énergie dispersive (EDX)

Le système EDX fonctionne sur le concept d'émission dirigée d'un faisceau d'électrons, qui produit une série de signaux à la surface d'échantillons solides et de nanoparticules. Les impulsions de tension sont mesurées par le processeur à rayons X, et les rayons X émis par l'échantillon sont interceptés par le détecteur ; les énergies de ces rayons X définissent l'identité des éléments et leurs concentrations dans l'échantillon. L'ordinateur interface les informations sous la forme d'un spectre via le logiciel EDX, qui peut identifier automatiquement la composition chimique.

4.1.4.1 Analyse spectroscopique EDX des nanofibres de noyaux du palmier de datte

Les résultats des études EDX donnés dans le tableau 4.4 indiquent les compositions élémentaires des différentes particules obtenues par électrodéposition C — O en pourcentages atomiques. L'existence de carbone et d'oxygène est mise en évidence à la lecture des données. Ces compositions se distinguent par leurs teneurs élevées (58,76 et 39,14 w.). Le carbone représente 50,17 % du total, tandis que l'oxygène représente 44,52 %. Elnajaar et al. [187] ont observé un schéma similaire, que Riahi et al. [188] ont confirmé. Le tableau suivant résume la composition fondamentale des nanofibres de noyaux de dattes.

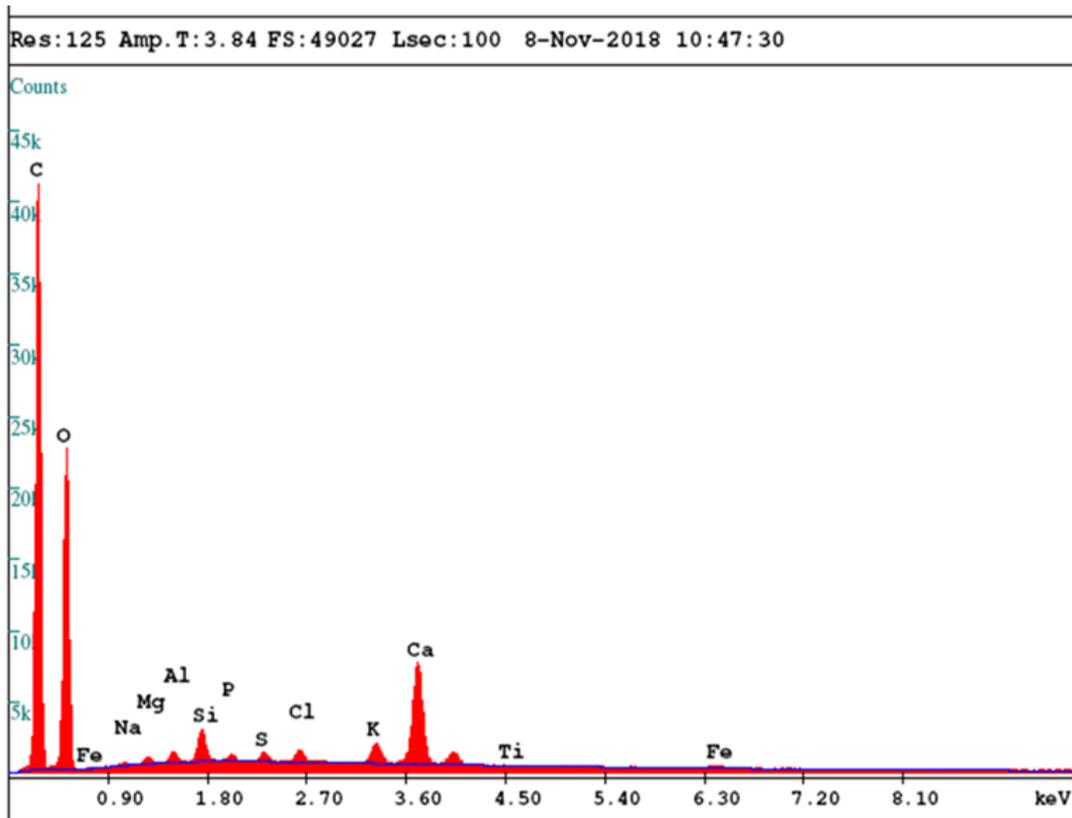


Figure 4.10 Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (Carbone et oxygène), de faible pics (calcium et silicium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium, clore, fer et l'aluminium).

Tableau 4.4 Composition chimique des constituants des nanofibres de noyau de datte

Elément	Poids %	Atom%	Intensité
C	50.17	58.76	1692.38
O	44.52	39.14	948.63
Na	0.12	0.08	11.41
Mg	0.16	0.09	22.87
Al	0.24	0.12	43.83
Si	0.60	0.30	133.42
P	0.15	0.07	33.09
S	0.18	0.08	44.26
Cl	0.28	0.11	65.06
K	0.49	0.18	106.60
Ca	2.89	1.02	590.63
Fe	0.20	0.05	19.06
Total	100.00	100.00	/

4.1.4.2 Analyse spectroscopique EDX des composants de ciment CPJ 42.5

Les valeurs EDX du tableau (4.5) indiquent les compositions atomiques élémentaires des nanoparticules. Ces résultats suggèrent que les cristaux lamellaires hexagonaux examinés par EDX sont entièrement composés de carbone, d'oxygène, de magnésium, de calcium, de silicium, de potassium, d'aluminium et de fer. L'échantillon se distingue par des niveaux élevés de calcium, de silicium, d'oxygène et de carbone, comme le montrent les pourcentages du tableau (19,19, 7,69, 60,85 et 6,57 %). Ces pourcentages ont été définis dans une recherche précédente [189]. La microanalyse aux rayons X du ciment est utilisée pour des investigations qualitatives ou quantitatives. Les spectres peuvent être obtenus à partir de monocristaux ou de zones d'échantillonnage qui contiennent une variété de formes cristallines. Cette étude traite de la technique de comptage de points EDX, qui consiste à enregistrer des spectres EDX à une résolution plus élevée.

Les pics du spectre ont été interprétés comme des particules de calcium et de silicium, car la source d'un pic fort à 3,7 keV et d'un pic plus petit à 4,0 keV est corrélée aux rayons X alpha et bêta du Ca K, qui ont fréquemment ces intensités. De même, le pic à environ 1,7 keV est dû au silicium ; il est composé de deux pics, le Si K alpha à 1,74 keV et le Si K bêta à 1,83 keV, mais le détecteur les combine en un seul pic. Alors que l'échantillon contenait de l'oxygène, le détecteur est sensible aux éléments légers des rayons X, qui correspondent au pic lié à l'oxygène dans le spectre.

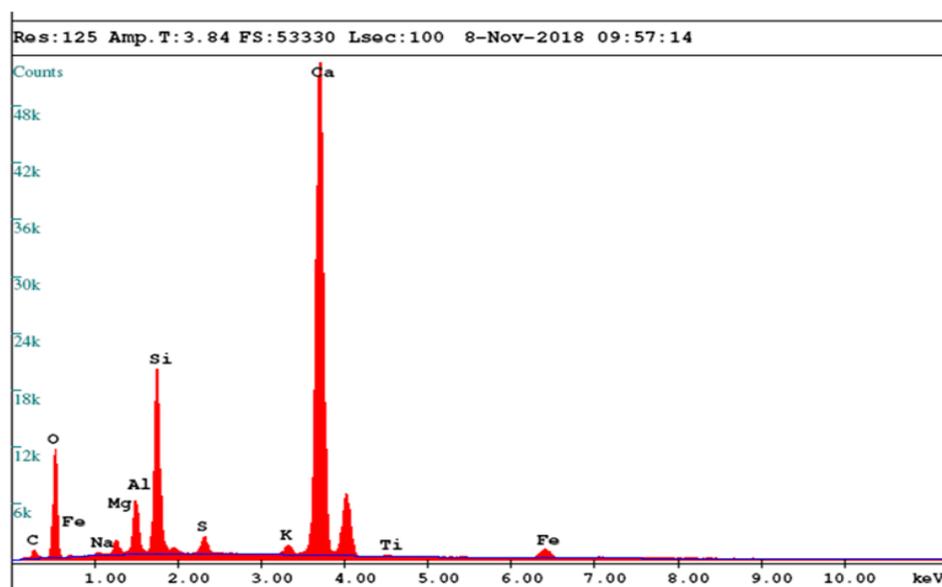


Figure 4.11 Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (calcium et silicium), de faibles pics (Carbone, oxygène, fer et l'aluminium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium et chlore).

Tableau 4.5 Composition chimique des constituants de la poudre du ciment CPJ 42.5

Elément	Poids %	Atom%	Intensité
C	3.57	6.57	39.28
O	44.00	60.85	487.33
Na	0.37	0.36	19.57
Mg	1.11	1.01	90.79
Al	3.35	2.75	362.71
Si	9.77	7.69	1241.50
S	0.91	0.63	126.09
K	0.55	0.31	81.02
Ca	34.76	19.19	4645.93
Ti	0.11	0.05	10.02
Fe	1.51	0.60	96.21
Total	100.00	100.00	/

4.1.4.3 Analyse spectroscopique EDX du nanocomposite (ciment dopé avec 15% de NFC de noyau de datte)

La spectroscopie de dispersion d'énergie (EDX) est une technique analytique permettant de déterminer la composition chimique d'une substance en calculant et en diagnostiquant l'énergie des rayons X émis par ses particules et interagissant avec ces particules. L'objectif de cette étude est de déterminer la distribution des ions des particules de ciment sur la surface des nanofibres cellulosiques de noyaux de palmier dattier. Le tableau 4.6 contient les résultats des tests EDX réalisés sur une pastille composée contenant 15 % de poudre de nanofibres et 90 % de ciment.

La composition atomique fondamentale en pourcentage des différentes particules d'électrodéposition est C-Si-O. La lecture des données montre l'existence de carbone, de silicium, de calcium et d'oxygène. Ces compositions se distinguent par leurs concentrations relativement élevées (12,19, 54,74, 7,13 et 20,28 % en poids). Le carbone représente 6,62 %, l'oxygène 39,58 %, le calcium 36,76 % et le silicium 9,05 %. Le tableau suivant résume la composition élémentaire des nanofibres de noyaux de dattes.

L'origine des nanofibres a un effet sur les propriétés chimiques et physiques du nanocomposite et sur la couche de paroi [190, 191]. De plus, les conditions climatiques et le

processus de mécanosynthèse ont un impact sur les propriétés physiques et chimiques des nanofibres [192,193]. En apportant des modifications et des caractérisations appropriées, la nanocellulose pourrait être adoptée par une variété d'industries pour bénéficier des applications des polymères biosourcés, tels que les films transparents [194], les renforts composites intégrés dans les matrices de polymères [195]. En conséquence, la cellulose à l'échelle nanométrique garantit la rigidité des nanocomposites. En raison de leurs structures maillées reliées par des liaisons hydrogène, les composites polymères présentent un mécanisme de consolidation important.

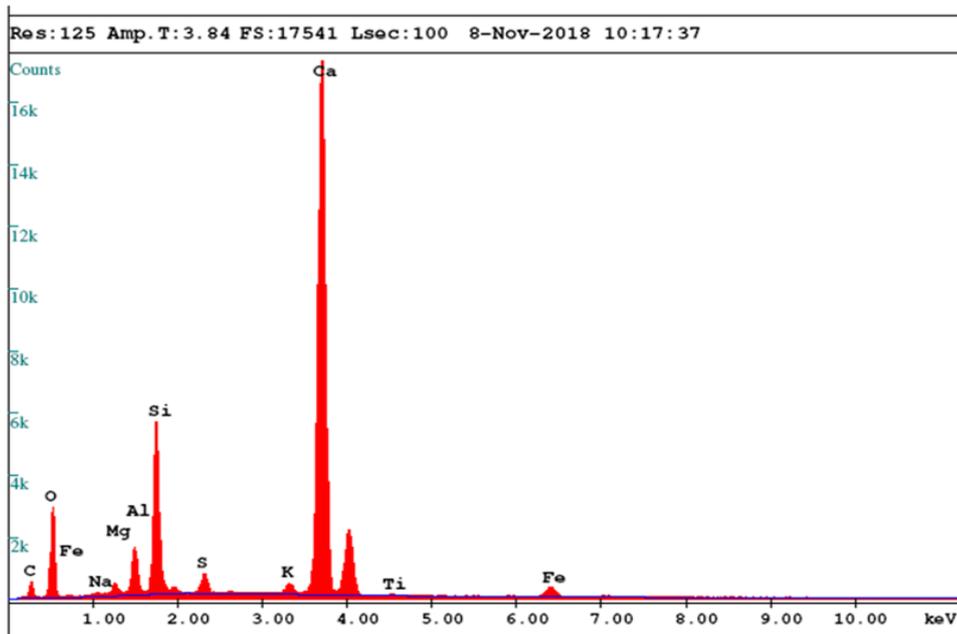


Figure 4.12 Spectre EDX de nanofibre de palmier dattier montrant de forts pics (calcium et silicium), de faibles pics (Carbone, oxygène, fer et l'aluminium) et de très faibles pics (magnésium, potassium, sodium et chlore).

Tableau 4.6 Composition chimique des constituants de la poudre de noyau de datte.

Elément	Poids %	Atom%	Intensité
C	6.62	12.19	22.87
O	39.58	54.74	124.60
Na	0.52	0.50	8.43
Mg	0.99	0.90	24.73
Al	2.97	2.44	98.35
Si	9.05	7.13	354.55
S	1.05	0.73	45.22
K	0.66	0.37	29.94
Ca	36.73	20.28	1507.52
Ti	0.14	0.06	3.70
Fe	1.70	0.67	32.93
Total	100.00	100.00	/

La morphologie, la structure, la taille, la cristallinité et la composition chimique de la nanocellulose aident à déterminer son application finale. Outre la fibre de bois, des biomasses cellulosiques telles que le palmier, le chanvre, la paille de riz, le bambou, la bagasse et l'ananas ont été utilisées pour extraire la nanocellulose à utiliser dans le secteur de la construction sous forme de nanocomposite avec des polymères de ciment [196, 197]. Au cours des dernières décennies, la biomasse lignocellulosique a attiré l'attention des scientifiques pour son utilisation potentielle comme biomatériaux nanocellulosiques pour la production d'une variété de nouveaux matériaux technologiques.

En résumé, EDX est une technique très efficace qui ajoute une nouvelle dimension critique lorsqu'elle est utilisée en conjonction avec MEB. La majorité des recherches sur les nanomatériaux implique l'utilisation d'un dispositif EDX, qui est essentiellement nécessaire pour déchiffrer leur composition chimique. Les rayons X ont une signature énergétique unique aux atomes des nanoparticules. La spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX) mesure les rayons X libérés par l'échantillon pour déterminer la composition élémentaire du volume.

4.2 Analyse des propriétés thermique

4.2.1 Comportement thermique des nanofibres cellulose des noyaux de palmier dattier (NFC_n)

4.2.1.1 Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'objectif de cette étude est de déterminer les plus hautes températures auxquelles les nanofibres de palmier dattier peuvent être exposées sans être endommagées et d'étudier les phénomènes thermiques au sein de l'échantillon. L'analyse thermique par gravité (ATG) et l'analyse thermique différentielle (DSC) sont les techniques les plus appropriées à cet effet. L'analyse thermogravimétrique est une forme d'analyse thermique qui décrit la mesure de la quantité et du taux d'expansion de la masse d'un échantillon en fonction de la température et du temps. En outre, elle peut être utilisée pour évaluer toute modification de la masse ou du processus d'un matériau qui se produit pendant la dégradation, la déshydratation ou l'oxydation.

En effet, il est question dans cette étude d'examiner les nanofibres de noyaux de palmiers dattiers exposés à la température et à la pression. Dans ce contexte, une analyse

thermogravimétrie a été utilisée pour évaluer les propriétés et le degré de dégradation des nanofibres cellulosiques. La figure 4.13 illustre la courbe ATG pour les nanofibres. La période endothermique des échantillons étudiés est comprise entre 50 et 250 degrés Celsius. Cela équivaut à une perte de masse d'air comprise entre 2,90 et 3,50 % pour les nanofibres. Comme le montre la figure, les nanofibres ont commencé à se déformer et à se décomposer à 250 degrés Celsius, ce qui suggère que le matériau testé montre une amélioration thermique.

La stabilité des nanofibres par rapport aux fibres lignocellulosiques est relativement équilibrée, démontrée ainsi par Khiari. R et al [198]. Cela est dû à la faible teneur en lignine et en hémicellulose, en particulier par rapport aux fibres naturelles. La capacité de ces nanofibres à s'associer à des constituants ou polymères capables de résister à des températures élevées les qualifie pour le développement de matériaux aux propriétés physiques, chimiques et thermiques améliorées. La figure 4.13 illustre la perte de masse de l'échantillon en fonction de la température. Les quatre phases ont été élucidées lorsque la température a été augmentée de 200 degrés Celsius. Ce résultat est similaire à celui révélé par Budrugaec. P et al [199]. Le début des phases de séchage et de déshumidification a été observé à l'intérieur des nanoparticules.

Malgré sa stabilité thermique, le composant hémicellulosique se décompose régulièrement entre 280 et 400 degrés Celsius. Ce résultat est similaire à celui rapporté par Ouajai.S et al [200]. L'augmentation de l'inclinaison de la partie centrale de la courbe est un indicateur clair de la transition cinétique et chimique. Entre 400 et 500 degrés Celsius, les nanofibres de cellulose reviennent à leur état de dégradation initial. De même, la lignine se dégrade à des températures supérieures à 450 degrés Celsius, ce qui entraîne une cinétique d'hydrolyse plus lente que d'autres composés. Cette évolution est en parfaite adéquation avec celle des résultats obtenus par Yang .H et al [201]. Cependant, le changement se produit sur une large plage de températures facilement observable par ATG (Perkin Elmer Instruments, Buckinghamshire, Angleterre). Le processus de dégradation commence lorsque la température atteint 600 degrés Celsius.

Le processus de séchage a débuté à 250°C et a été suivi d'une perte de poids d'environ 3,5 % due à la déshydratation de l'humidité. À une température de chauffage de 200°C, les composés volatils sont libérés et les étapes de décomposition et de perte de masse

commencent. Pour évacuer l'énergie dans la deuxième étape, la plage de température de 200 à 600 degrés Celsius a été conservée, ce qui a entraîné une perte de poids de plus de 80,45 %. Ce processus peut être subdivisé en deux régions en fonction du pic, l'une représentant les protéines et les glucides entre 200 et 325 degrés Celsius, ce qui correspond à une perte de poids de 38,64 %. L'étape finale de l'hydrolyse solide (carbonatation) entraîne une perte de poids d'environ 12,50 %. La courbe ATG a montré qu'entre 220 et 450 degrés Celsius, le taux de perte de poids le plus élevé est dû aux résidus de matériaux.

V. Strezov et al. [202] ont découvert que l'hydrolyse de l'hémicellulose se produit à 320 degrés Celsius, ce qui est nettement inférieur aux 400 degrés Celsius attendus pour la cellulose et aux 470 degrés Celsius pour la lignine, tandis que S. Ouajai et al. [200] ont constaté que l'hémicellulose ou la pectine se dépolymérise entre 250 et 320 degrés Celsius, tandis que la cellulose se dégrade entre 390 et 400 degrés Celsius. Selon H. Yang et al. [201], la dégradation de la lignine se produit sur une large gamme de températures, entre 160 et 900 degrés Celsius.

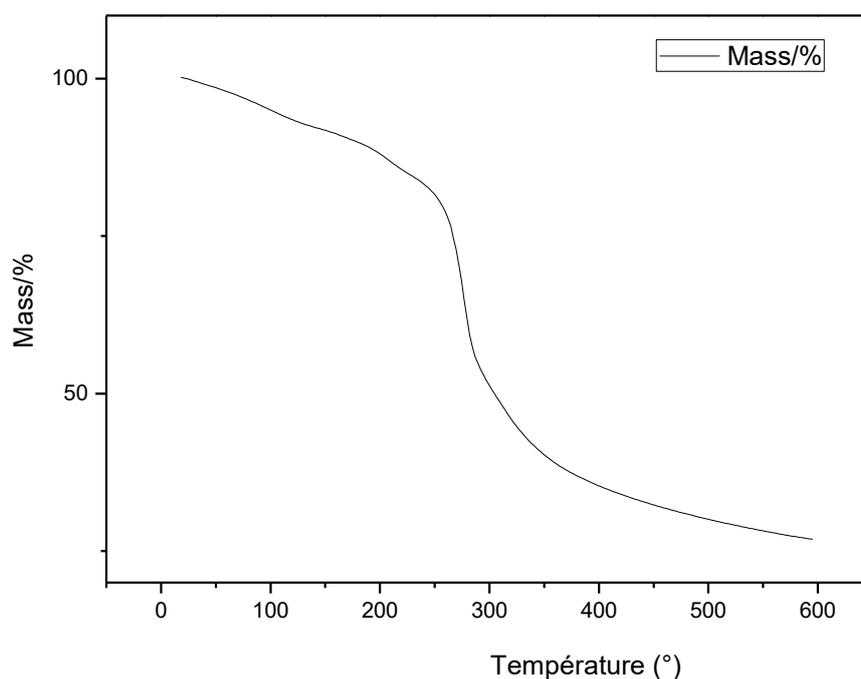


Figure 4.13 L'analyse thermogravimétrique (ATG) des nanofibres des noyaux de palmier dattier.

4.2.1.2 Analyse calorimétrique différentielle (DSC)

La figure 4.14 représente la courbe DSC pour la première étape de l'échantillon, qui présente deux propriétés exothermiques. La première allure est clairement évidente, et elle

est située à une température de 340 degrés Celsius. Cependant, la seconde allure exothermique, qui se produit à 425°C, est difficile à distinguer. Comme mentionné précédemment, la première courbe concerne la décomposition de certains éléments structurels et la réorganisation de la structure de divers constituants, tandis que la seconde concerne la création de liaisons chimiques supplémentaires associées au recyclage aromatique des déchets à base de carbone [200, 203]. Par conséquent, la décomposition des nanofibres dérivées des noyaux de palmier dattier se produit à des températures supérieures à 340 degrés Celsius. Les résultats sont comparables à ceux rapportés dans la littérature [204, 205] pour les résineux et les céréales.

L'analyse des données du thermogramme DSC des nanofibres de palmier dattier, plus précisément des noyaux de palmier dattier comprenant diverses chaînes de fibres naturelles, indique que le premier pic exothermique correspond à la décomposition des nanoparticules à 340°C. Ce résultat est très proche de la température de dispersion du chanvre, qui est de 350°C [206,207], ce qui est significativement plus élevé que la température de dispersion de la noix de coco [208]. La troisième étape est caractérisée par un faible taux de perte de masse, ce qui est approprié pour des températures entre 450 et 600 degrés Celsius et correspond à la destruction et à la carbonisation des résidus de matière organique pendant la deuxième étape.

De plus, comme observé et démontré par Mansouri et al. [209] et Khayari et al. [210], ce phénomène confère à la matrice de déchets de palme la présence d'une zone cristalline qui est influencée par l'ajout de lignoparticules. Ainsi, la composition chimique de la charge confirme l'absence de liaison chimique entre la matrice et la charge du fait de la grande différence de température entre les deux composés, mais son influence sur la solubilité des nanofibres est toujours observée. Ce type de comportement est efficace et avantageux pour les applications concrètes du procédé, car les constituants des nanofibres offrent la polyvalence requise même lorsque la charge massique est élevée.

Enfin, la réorganisation et l'orientation des cristaux à l'intérieur de la cellulose agissent pour augmenter la température au début de la dégradation des cristaux, ce qui est cohérent avec les résultats de Li et al. [211]. Les variations de la composition de la surface extérieure des particules nanocristallines, notamment l'existence de groupes sulfates, modifient le comportement de dégradation thermique des nanocelluloses, ce résultat est similaire à celui rapporté par Wang.N et al [212]. Herrera et al. [213] affirment que l'hydrolyse de la

nanocellulose dissout non seulement les régions amorphes, mais aussi certaines régions cristallines, les rendant plus sensibles à la dégradation à des températures élevées.

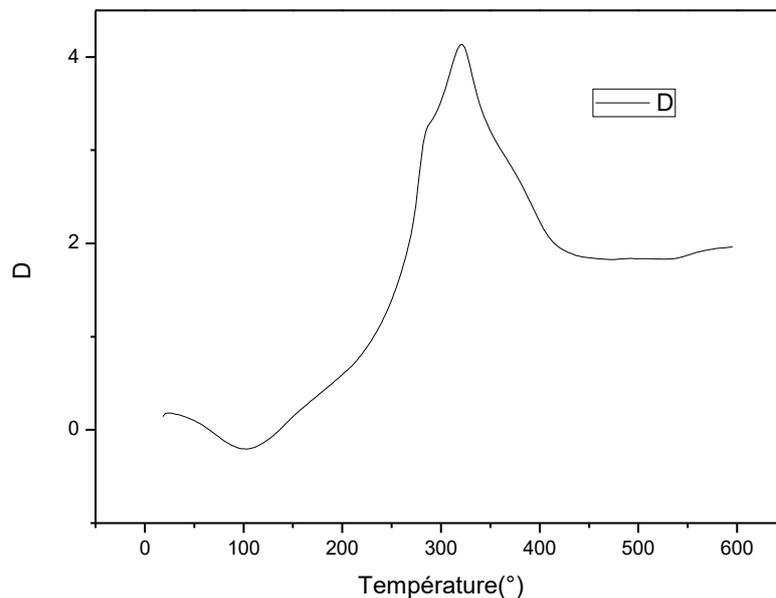


Figure 4.14 L'analyse calorimétrique (DSC) des nanofibres des noyaux de palmier dattier

4.2.2 Conductivité thermique

4.2.2.1 Technique d'élaboration du nanomatériau (NFC_n)

La préparation de six pastilles de la même masse (1g) de ciment Portland et de concentrations distinctes de nanofibres de noyau de dattes comme suit : (NFC0, NFC3, NFC5, NFC10, NFC15 et NFC100). La conductivité thermique des six échantillons présentés dans la Figure 4.15 est déterminée à l'aide d'un instrument automatisé de mesure des propriétés thermiques. La détermination thermique des nanomatériaux, telle que définie par la norme internationale ISO 22007-2, implique le déploiement d'un système à partir d'une source horizontale transitoire. Ce système est capable de caractériser thermiquement des échantillons d'un diamètre de 10 à 20 mm et des composants isolants d'une épaisseur maximale de 1 mm. Ainsi, le dispositif est configuré pour déterminer la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité de chaleur spécifique des monolithes.

La conductivité thermique des nanocomposites est déterminée expérimentalement à l'aide de WL 372. Un ensemble expérimental linéaire et radial est intégré. Ces pastilles sont montées au centre d'un cylindre horizontal équipé d'un élément chauffant et d'un élément de refroidissement, tous connectés à des capteurs de température qui enregistrent les températures en tous les points pertinents pour les échantillons.

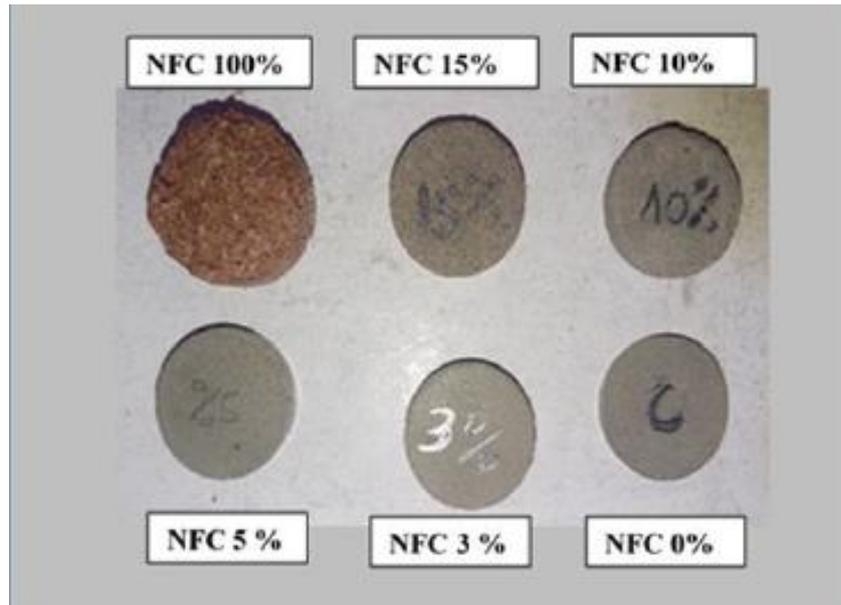


Figure 4.15 Ratio de dopage aux nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier avec une matrice de ciment.

4.2.2.2 Mesure de la conductivité thermique

La conductivité thermique est l'une des propriétés les plus importantes des matériaux de construction. L'erreur de mesure moyenne relative de tous les échantillons est d'environ 2,4 %. La figure 4.16 illustre l'influence de l'incorporation de différentes concentrations de nanofibres de noyau de palmier dattier dans une matrice de ciment sur l'évolution de la conductivité thermique du matériau nanocomposite. La valeur de la conductivité thermique de la pastille élaborée avec les nanofibres de noyau de palmier dattier NFC (100) est de $0,042 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, relativement très faible par rapport à la pastille de ciment Portland NFC (0) qui est de $0,186 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La conductivité thermique du nanocomposite NFC (0) passe de $0,186 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $0,168 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 3% de masse de nanofibres et à $0,0732 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à une concentration de 15% de NFC. Il est observé que la conductivité thermique diminue progressivement avec l'augmentation du ratio en nanofibres. Ce résultat est similaire à celui rapporté par Agoudjil et al.[214].

De plus, la courbe suit une tendance quasi linéaire avec la température associée à la porosité des nanofibres interconnectées, bien que l'augmentation de la concentration en nanofibres et de la porosité des constituants se traduise par une diminution de la conductivité thermique. La faible densité peut être attribuée à la combinaison de nanofibres naturelles et de substances cimentaires, produisant un nanocomposite léger. Ce résultat est en accord avec

celui obtenu dans les travaux rapportés par les auteurs Benazzouk et Taoukil al. [215,216] qui ont évalué l'effet de l'ajout de copeaux de bois et de laine sur les propriétés thermiques du béton, ainsi que l'impact des fibres naturelles sur l'amélioration des propriétés isolantes du béton (Voir figure 4.16).

Ainsi, l'évolution de la conductivité thermique est proportionnelle à la densité et à la porosité. Selon Khedari et al.[217], cette corrélation entre la matrice minérale du ciment Portland et les fibres végétales est souvent confirmée. De plus, la diminution de la conductivité thermique lorsque le rapport nanofibre/liant (NFC/L) augmente est due à une conductivité thermique plus faible de la phase solide de la nanofibre cellulosique par rapport à la phase solide de la matrice cimentaire, et à une masse volumique apparente du nanocomposite qui décroît lorsque le ratio NFC/L augmente.

Il est important de noter que la conductivité thermique du NFC (100) est comprise entre 0,042 et 0,048 W. m⁻¹. K⁻¹ à une température d'environ 29 °C. Compte tenu des propriétés d'isolation thermique obtenues, le nanomatériau élaboré peut être utilisé pour isoler l'enveloppe extérieure des bâtiments. La conductivité thermique des nanofibres de noyau de palmier dattier est relativement inférieure à celle de la feuille de palmier dattier (pétiole) (0,083 W. m⁻¹. K⁻¹) démontrée par Cherian et al. [218], de la paille de riz (0,051-0,053 W. m⁻¹. K⁻¹) vérifiée par Wei et al. [219] et de la fibre de coco (0,057 W. m⁻¹. K⁻¹) révélée par Manohar et al. [220].

Les résultats ont révélé que la diminution de la conductivité thermique du matériau nanocomposite de la matrice de ciment CNF (n) est concrètement liée à l'augmentation de la concentration en nanofibres de palmier dattier. Cette évolution est en parfaite adéquation avec celle des résultats obtenus par Hernandez et al [221]. Ils ont présenté que les fibres de liège composées de plâtre ont de bonnes propriétés d'isolation thermique. Cependant, l'effet des concentrations élevées du composé nanofibres et de la matrice de ciment sur les caractéristiques mécaniques doit également être pris en compte. Les études rapportées par Taoukil et Benmansour al. [216,222], se focalisent toujours sur l'amélioration des caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux composites renforcés de fibres végétales dans un environnement naturel rude.

Les résultats obtenus dans notre cas d'étude sont inférieurs aux normes recommandées par la classification RILEM [223]. La conductivité thermique du nanocomposite

cellulosique à matrice cimentaire semble être valable pour des applications d'isolation thermique dans le domaine de la construction, ainsi que pour des bétons légers répondant aux exigences d'isolation thermique préconisées par cette classification et dont la conductivité thermique est inférieure à $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. La microstructure tridimensionnelle de type squelette fibrillaire avec des domaines mésoporeux favorise l'effet Knudsen. En effet, la nanostructure des pores piège les molécules d'air à l'intérieur. Par conséquent, pour améliorer les propriétés thermiques des nanocomposites, il est nécessaire de réduire la taille des pores et d'augmenter la densité des nanofibres afin d'obtenir l'effet Knudsen et d'améliorer les propriétés thermiques des nanocomposites.

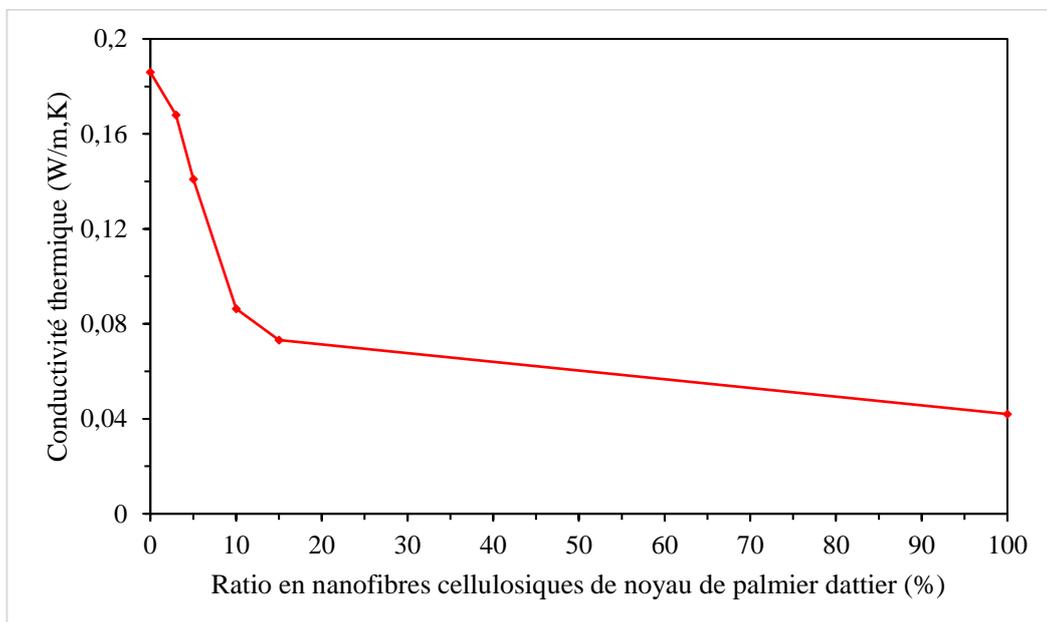


Figure 4.16 Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques.

4.2.3 Diffusivité thermique

La figure 4.17 illustre l'évolution de la diffusivité thermique des nanocomposites avec l'ajout de différentes quantités de nanofibres de noyau de palmier dattier (NFC) à la matrice de ciment CPj 42.5. L'augmentation du ratio de nanofibres a conduit à une diminution de la diffusivité thermique. L'ajout de 3% de nanofibres réduit la valeur de la diffusion thermique de $0,315 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à $0,291 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,273 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ pour une teneur de 5%. Pour une concentration de 10% à 15% la diffusion thermique diminue de $0,214 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement à $0,205 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, à titre d'exemple, 15% de remplacement de nanofibres

naturelles a donné un abattement de diffusion thermique d'environ 65% inférieur au matériau de référence.

La figure 4.17 montre que la microstructure tridimensionnelle de la maille fibrillaire cohérente (NFC) a un effet notable sur l'amortissement de la diffusion thermique dans le nanocomposite. L'ajout de nanofibres au ciment réduit la diffusion thermique du nanocomposite jusqu'à 47 %. L'effet atténuant de la diffusivité thermique est dû à l'augmentation de la porosité du nanocomposite et à la structure alvéolaire des nanofibres, qui se caractérisent par leur interception et leur opposition aux voies de circulation de la chaleur. Par conséquent, plus le composant conserve son réseau structurel pour (NFC), plus la vitesse de propagation de la chaleur est lente. Ce résultat peut être considéré comme important dans les domaines de l'isolation thermique. Car l'une des caractéristiques d'un bon matériau isolant n'est pas seulement sa faible conductivité thermique, il doit également avoir la capacité de ralentir la diffusion de la chaleur.

Plus la valeur de la diffusion thermique des nanocomposites est faible, plus la chaleur se propage lentement. Plus la valeur de la diffusion thermique est faible, plus la chaleur met du temps à pénétrer dans les nanoparticules, et donc plus l'intervalle de temps entre le moment où la chaleur arrive d'un côté du nanocomposite et celui où elle atteint l'autre est long. La diffusion, en particulier, a un impact sur la température de surface des constituants nanométriques.

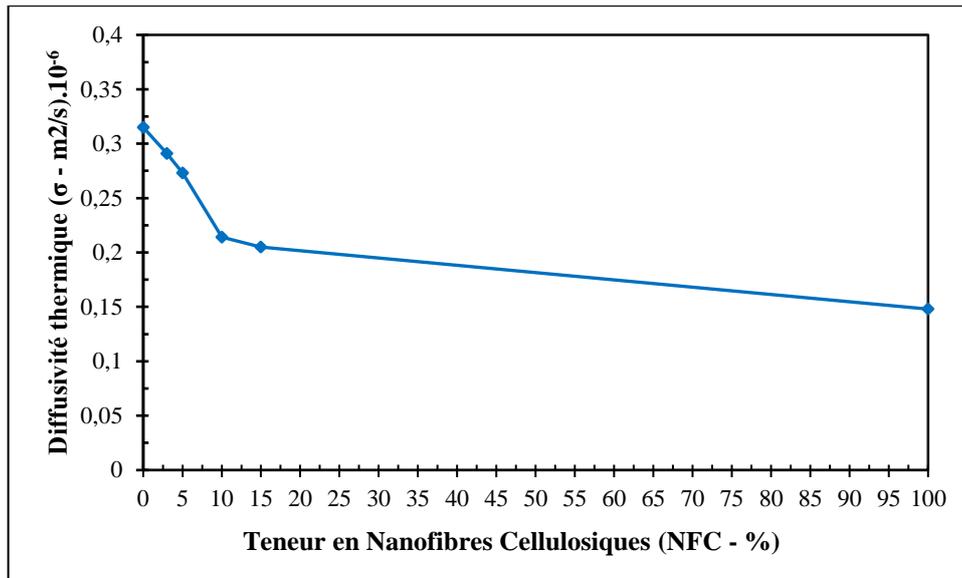


Figure 4.17 Evolution de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques (NFC_n).

4.2.4 Chaleur spécifique volumique

Le paramètre de capacité thermique volumétrique composite est une mesure de l'inertie des matériaux de construction. Il affiche directement les mesures de conductivité thermique et de diffusivité et mesure indirectement la chaleur volumique spécifique du matériau à l'aide de l'équation (1) ci-dessous. La figure 4.18 illustre les améliorations de la capacité thermique volumétrique des nanocomposites, indiquant une réduction relativement mineure de 36 % de la capacité volumétrique due aux effets combinés de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique. Il en résulte une diminution de la conductivité thermique allant jusqu'à 70 %, ce qui est supérieur à la diffusivité thermique estimée à 52 % pour la concentration maximale dans les nanofibres (NFC).

$$\lambda (\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}) = \alpha (\text{m}^2.\text{s}^{-1}) \cdot C_p (\text{J.m}^{-3}.\text{K}) \quad (1)$$

Par ailleurs, la disproportion apparente entre la chaleur spécifique du ciment [0,590 J. m⁻³, K⁻¹] et celle de la nanofibre de palmier dattier [0,283 J. m⁻³. K⁻¹] exprime un impact significatif sur la capacité du nanocomposite, ce résultat correspond à ce que cherki et Chikhi [224,225] qui ont étudié le composite de liège granulaire plâtré. Cependant, les nanofibres de noyau de palmier dattier permettent d'améliorer la chaleur volumique spécifique du nanocomposite et de l'équilibrer avec l'effet de conductivité thermique. Ainsi, ce résultat est vérifié pour les fibres composées avec une matrice de ciment comme rapporté par Khedari et al [226].

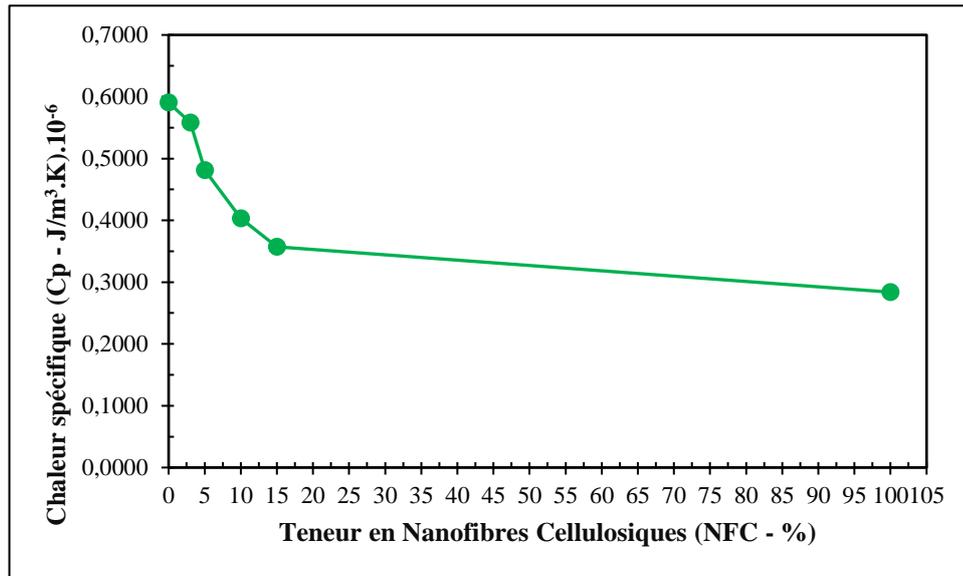


Figure 4.18 Evolution de la chaleur spécifique volumique en fonction de la teneur en nanofibres cellulosiques (NFCn).

4.2.5 Corrélation entre conductivité thermique et diffusivité thermique en fonction de la teneur en nanofibres (NFC_n)

La densité apparente des composites élémentaires est un paramètre critique pour déterminer leur efficacité d'isolation thermique. Une réduction de la densité modifie les propriétés de transfert de chaleur des particules et augmente leur porosité. Après séchage à l'étuve, la conductivité thermique du nanocomposite est estimée à $0,042 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui correspond à une faible densité de 157 kg/m^3 . Ce résultat est comparable à celui des copeaux de bois de Cetiner, I. et Oushabi, A. et al. [227,228]. La faible densité du nanocomposite est due principalement à la nanostructure alvéolaire et à la porosité des nanofibres qui croît au fur et à mesure de l'incorporation des fractions (NFC). Cela fait spécifiquement référence à la déshydratation de grandes quantités de molécules d'eau consommées par les nanofibres hydrophiles, ce qui entraîne une densité plus faible des nanocomposites NFC.

La figure 4.19 montre l'évolution de la conductivité thermique et de la densité en fonction du pourcentage massique de nanofibres. On constate que l'augmentation de la quantité de ces nanofibres diminue simultanément la conductivité thermique et la densité des nanocomposites. La conductivité thermique du nanocomposite passe de $0,186 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $0,114 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à une teneur en nanofibres de 5% et à $0,073 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à une teneur en nanofibres de 15%. En incorporant de plus en plus de fractions de nanofibres, les nanocomposites deviennent nettement plus isolants. D. Taoukil et al. [229], ont étudié

l'impact des copeaux de bois et de la laine de bois sur les propriétés thermiques du béton et ont également conclu que les fibres naturelles améliorent les propriétés isolantes des mortiers.

Lorsque des nanofibres sont ajoutées à une matrice de ciment, la densité du matériau change de manière significative. Plus la proportion de nanofibres dans le nanocomposite est importante, plus sa densité est faible. Lorsque la teneur en nanofibres passe de 0 à 15 %, la densité de l'échantillon passe de 560 à 290 kg/m³, soit une diminution de 52 %. Une concentration plus élevée de ces nanofibres se traduit par un nanocomposite plus léger. Ces propriétés, selon la réunion internationale des laboratoires et experts en matériaux (RILEM), remplissent les conditions requises pour être un matériau isolant.

Par ailleurs, la figure 4.19 illustre clairement la courbe descendante de la conductivité thermique en fonction de la densité ; une subordination souvent étudiée pour les composites à base de fibres végétales d'après Khedari et al. [230] avec une matrice en ciment Portland. Les mesures de conductivité thermique effectuées sur des nanofibres de cellulose (0,042 W /m⁻¹ K⁻¹ à 29 °C) sont équivalentes à celles effectuées au niveau des murs des bâtiments. Les fibres naturelles présentent une variété de caractéristiques intéressantes, ainsi que des propriétés durables qui leur confèrent un intérêt dans le domaine de l'isolation des bâtiments.

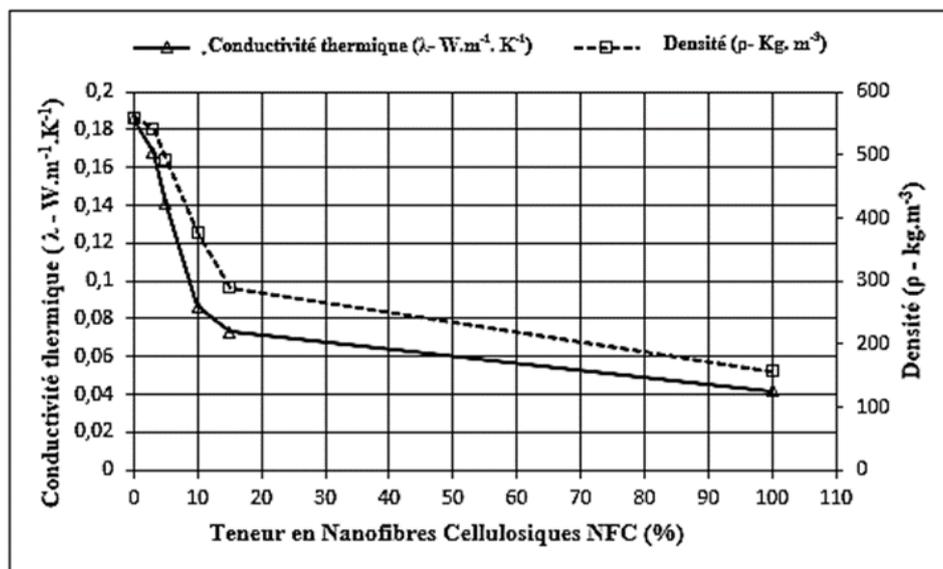


Figure 4.19 Corrélation entre conductivité thermique et densité d'un nanocomposite en fonction de différentes concentrations nanofibres cellulosiques (NFCn).

4.3 Analyse des propriétés mécaniques

Cette partie du chapitre est consacrée à la caractérisation mécanique des nanocomposites produits. L'analyse des propriétés mécaniques s'appuie sur la réalisation d'essais en compression et en traction. L'essai de la résistance mécanique permet d'interpréter l'évolution de la courbe des contraintes de compression et de traction par flexion en fonction de la déformation. A partir de ces résultats, les valeurs des contraintes de déformation obtenues sont évaluées. Ces essais permettent d'évaluer la résistance des différentes formulations testées et l'influence du rapport nanofibres cellulosique de noyau de palmier dattier sur le liant, ainsi que la densité et la perte de masse des nanocomposites.

4.3.1 Mesure de la résistance mécanique

4.3.1.1 Technique d'élaboration du matériau (Ciment & NFC_n)

D'abord, les éprouvettes de ciment ont été préparées à un rapport constant eau/ciment (E/L) de 1/2 avec cinq fractions différentes de NFC (0%, 3%, 5%, 10% et 15%). La fraction NFC_n a été calculée en fonction du poids des NFC_n par rapport au poids des particules de ciment. Les particules de ciment et la suspension NFC_n ont été ajoutées à un mélangeur et malaxé à une vitesse de 500 tr/m pendant 120 s. Le mélange s'est arrêté pendant 15 secondes pour racler la paroi et le fond du bol en vue d'homogénéiser la pâte. Le processus de pétrissage a été poursuivi à nouveau pendant 120 secondes à 600 tr/min.

En outre, les pâtes de ciment frais ont été versées dans des moules prismatiques en acier d'alliage dont leurs dimensions sont de (40 × 40 × 160) mm³ et puis ont été vibré mécaniquement dans une table de choc pendant deux minutes 120 chocs /seconde afin d'éliminer les bulles d'air et réduire les vides. Les échantillons de ciment ont été scellés à 20 ± 1 ° C et 50% d'humidité relative pour le durcissement. Après 24 heures de vieillissement, les échantillons prismatiques ont été démoulés et retournés à l'environnement (Voir figure 4.20).

Enfin, les mesures de la résistance à la compression et de la résistance à la traction par flexion des prismes triangulaire sont effectuées expérimentalement à l'aide d'une machine d'essai MATEST avec double portée de mesure. Les délais prévisionnels pour effectuer ces essais sont déterminés par la norme NF196-1 comme suit : (7 ;14 et 28 jours), Autrement dit, la durée de durcissement des échantillons.



Figure 4.20 Processus d'élaboration des éprouvettes en matrice cimentaire combinée avec différentes concentrations en nanofibres celluliques (NFCn).

4.3.1.2 Résistance à la compression

Dans le bâtiment, il est nécessaire de trouver un compromis entre l'isolation thermique et les propriétés mécaniques, en fonction du type de construction. Les matériaux de construction sont généralement sollicités en compression. La figure 4.21 montre la résistance à la compression des composites de mortier renforcés par des nanofibres NFC à 7, 14 et 28 jours. Par rapport aux résultats de l'échantillon de référence (ciment, sable et eau), les composites contenant des NFC_n (3%, 5%, 10%, 15%) indiquent une forte diminution de 90% de la résistance à la compression. Pour le composite étudié, la lecture des courbes montre l'effet de la concentration en nanofibres sur la résistance à la compression à différents âges. Cela conduit à une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de concentration en nanofibres augmente (Voir tableau 4.7).

Tableau 4.7 Compositions des échantillons relatives aux essais mécaniques et thermiques.

Teneur en nanofibre	Ciment (g)	Sable (g)	Nanofibre (g)	Eau (g)	E/C
NFC ₀ (0%)	450	1350	-	225	1/2
NFC ₃ (3%)	450	1309,50	40,50	225	1/2
NFC ₅ (5%)	450	1282,50	67,50	225	1/2
NFC ₁₀ (10%)	450	1215,00	135,00	225	1/2
NFC ₁₅ (15%)	450	1147,50	202,50	225	1/2

La proportion d'eau, de ciment et de sable agit comme un plastifiant pour les combinaisons de polymères qui composent les parois cellulaires, augmentant ainsi l'élasticité des structures en nanofibres NFC. Cependant, les nanofibres de cellules végétales se distinguent par leur solubilité dans l'eau et leur capacité significative à inhiber la formation

de ciment, ce résultat est en accord avec l'étude de Djoudi. A et al [231]. Les fibres cellulodiques contiennent des constituants lignocellulosiques solubles qui empêchent le processus d'hydratation du ciment, prolongent le temps de prise et réduisent la quantité et la taille des cristaux nécessaires pour résister aux matériaux minéraux. Ces interactions sont d'autant plus importantes que ces composés ont une vitesse d'hydratation lente. Kriker et al.[232] ont examiné ce phénomène. Cette étude démontre qu'une concentration plus élevée de fibres entraîne une diminution de l'hydratation. Au 28ème jour, la résistance mécanique diminue inévitablement. La figure 4.22 illustre la résistance à la compression du mortier renforcé avec des nanofibres NFC à différents ratios.

Une perte significative de résistance mécanique (de 42,34 à 2,08 MPa) a été enregistrée lorsque la concentration de nanofibres a augmenté de 0% à 15%, par rapport à l'échantillon de référence. Parmi les raisons, l'effet de réduction de la quantité de ciment remplacée par des nanofibres, et également la porosité du composite résultant du vide interne formé par les nanofibres supplémentaires. Les résultats obtenus sont cohérents avec la littérature [233,234]. L'incorporation de nanofibres cellulodiques dans une matrice minérale rend le mortier moins sensible aux hydratations. Par conséquent, l'augmentation graduelle des nanofibres (NFC) diminue la compacité du béton et entraîne la baisse de résistance Les résultats obtenus sont en concordance avec la littérature [235],[236],[237] et [238]. Selon le spectromètre « EDX », qui a été utilisé pour déterminer la composition chimique des nanofibres, il a montré la présence de zinc, qui a suscité le retard du processus d'hydratation.



Figure 4.21 Mesures expérimentales de la résistance à la compression élaborées par l'appareil hydraulique Matest

Il est concevable que l'excès de légèreté obtenu par le renforcement des nanofibres de noyau de palmier dattier soit motivé par une dégradation de la résistance mécanique due à

la diminution de la compacité du composite. Plus la proportion de nanofibres cellulosiques est élevée, plus la résistance est faible. Ceci est nécessairement dû à l'augmentation de la zone de connexions entre la nanofibre et la matrice cimentaire. Par ailleurs, la pâte de mortier fraîche doit contenir suffisamment d'eau pour assurer l'apport en humidité nécessaire à la formation des produits d'hydratation du ciment.

De nombreux auteurs soulignent l'importance de conserver le mortier rapidement afin d'éviter un séchage prématuré dû à l'absorption d'eau par les fibres cellulosiques. Selon d'autres auteurs, cet effet est dû aux passages d'humidité supplémentaires fournis par les NFC en raison de leur structure poreuse, de leur caractère hydrophile et de leur capacité de rétention d'eau [239]. Enfin, la nature nanostructurée des composites permet de préserver la porosité. Ces dernières contribuent à la détérioration de diverses propriétés mécaniques.

En fonction des résultats obtenus, le développement d'un nanocomposite hybride constitué de nanofibres de noyau de palmier dattier (CNF_n) avec une matrice de ciment peut être considéré comme un système de renforcement typique des matériaux cimentaires, profitant à la fois des propriétés d'isolation thermique et de résistance mécanique optimisées par les nanocomposites. Enfin, dans notre étude de cas, la diminution de la résistance mécanique du matériau composite est compensée par d'autres propriétés intéressantes telles que la densité, la masse volumique et l'isolation thermique.

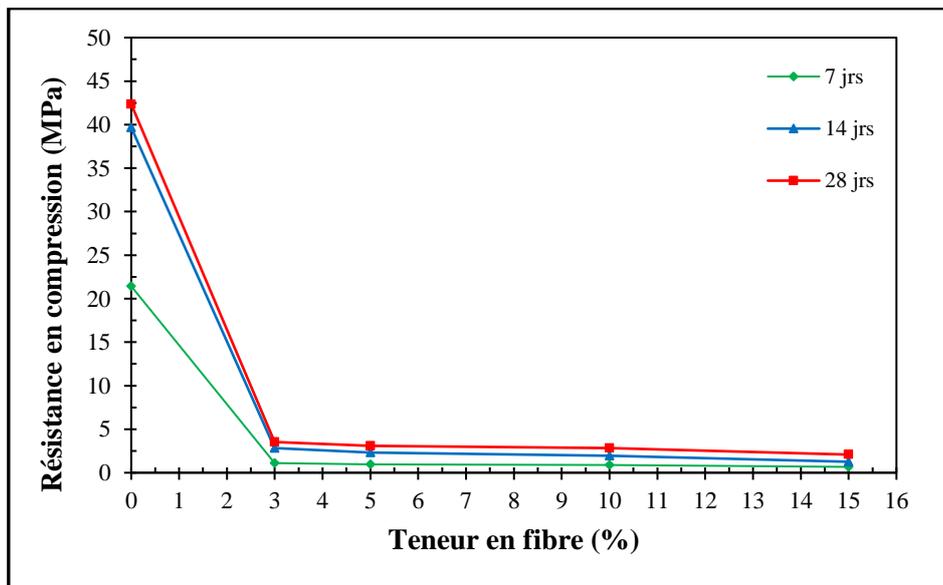


Figure 4.22 Résistance à la compression en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges.

4.3.1.3 Résistance à la traction par flexion

Suite aux expériences, la figure 4 illustre la progression de la résistance à la flexion des composites. L'échantillon de référence sans nanofibres (0%) a démontré une résistance supérieure à la compression et à la traction par flexion. De plus, des nanofibres de noyaux de palmier dattier ont été appliquées dans des proportions variables de 3 %, 5 %, 10 % et 15 %. Les résultats sont interprétés à différents moments de la cure (7, 14, 28 jours). La pente de la courbe montre une diminution substantielle de la résistance à la flexion par rapport à l'échantillon de référence.

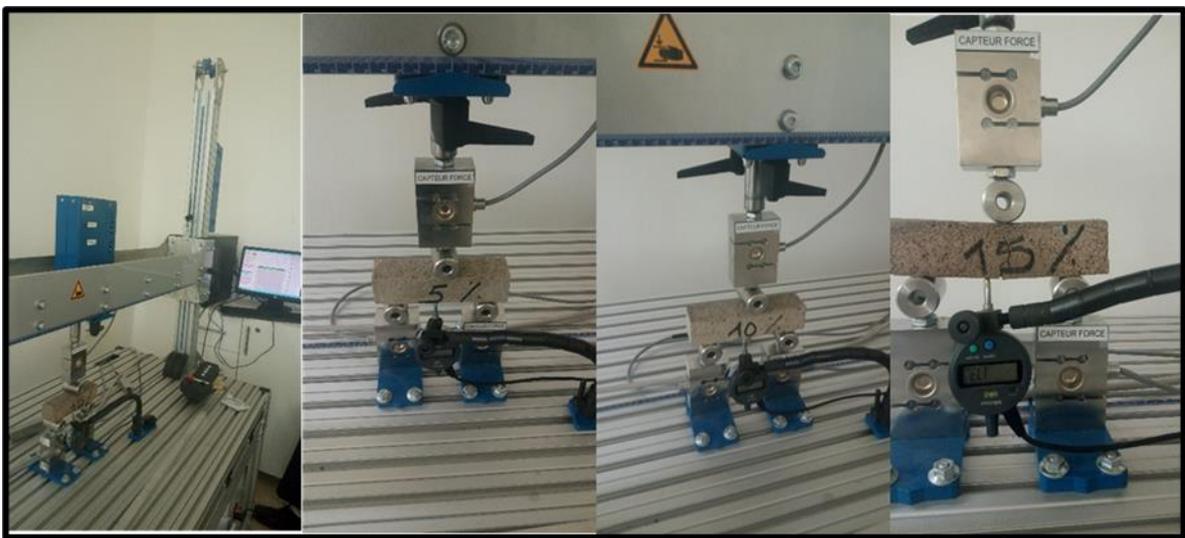


Figure 4.23 Mesures expérimentales de la résistance à la traction par flexion élaborées par le banc d'étude des structures ERM.

Lorsque la concentration de nanofibres (NFCn) a été augmentée de 3% à 15%, une diminution substantielle de la résistance à la traction de 5,56 à 2,62 MPa et de 5,56 à 0,89 MPa a été observée sur les échantillons. Ainsi, l'accumulation d'eau a entraîné un rétrécissement significatif de la matrice de ciment, diminuant la force de liaison entre la nanofibre et la matrice. Les nanofibres favorisent la formation de nanopores dans les échantillons. D'autres chercheurs étudiant le plâtre et le mortier renforcés par des fibres végétales ont observé ce comportement [240, 241]. Les composites renforcés avec une teneur en nanofibres cellulosiques de 5% dans la masse de l'échantillon conservent une meilleure résistance à la flexion. Les résultats montrent que le ciment nanocomposite à base de nanofibres de dattes présente une forte résistance à la flexion, ce qui est cohérent avec sa composition en nanofibres et en cristallites.

Lorsque la résistance de liaison entre les nanofibres et la matrice de ciment diminue, la réaction de résistance à la flexion du composite devient faible. De nombreuses recherches sont nécessaires pour étudier l'amélioration du C-S-H, ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Minet et al [242] ont démontré que les groupes organiques à l'échelle nanométrique peuvent être directement liés aux symbioses silicatées du C-S-H. Cela peut fournir des informations pour comprendre le phénomène des nanofibres. Ces connaissances peuvent être utilisées pour mieux comprendre le processus d'hydratation du ciment au niveau fondamental, ainsi que les interactions entre les phases de ciment hydraté, les nanofibres cellulosiques NFC et les charges à l'échelle nanométrique. De nombreux facteurs affectent les propriétés mécaniques des nanofibres végétales, notamment leur forme, leur composition, leur morphologie et leurs propriétés physiques.

La faible sensibilité à la cure peut être le résultat de la compatibilité des nanofibres mélangées à la matrice de ciment et de l'effet des nanofibres qui retiennent l'humidité à l'intérieur des nanoparticules, même dans un environnement sec. Lorsque la concentration en nanofibres est faible, les nanoparticules ne s'hydratent pas ; au contraire, elles forment un réseau de nanopores ouvert sur l'extérieur, permettant le séchage du composite. En effet, les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) du composite-ciment nanofibres/noyau de palmier dattier (NFC) indiquent que ce nouveau biocomposite peut être utilisé comme un béton léger qui résiste à une compression supérieure à la limite standard ASTM C 109C/109-95 de 2 MPa.

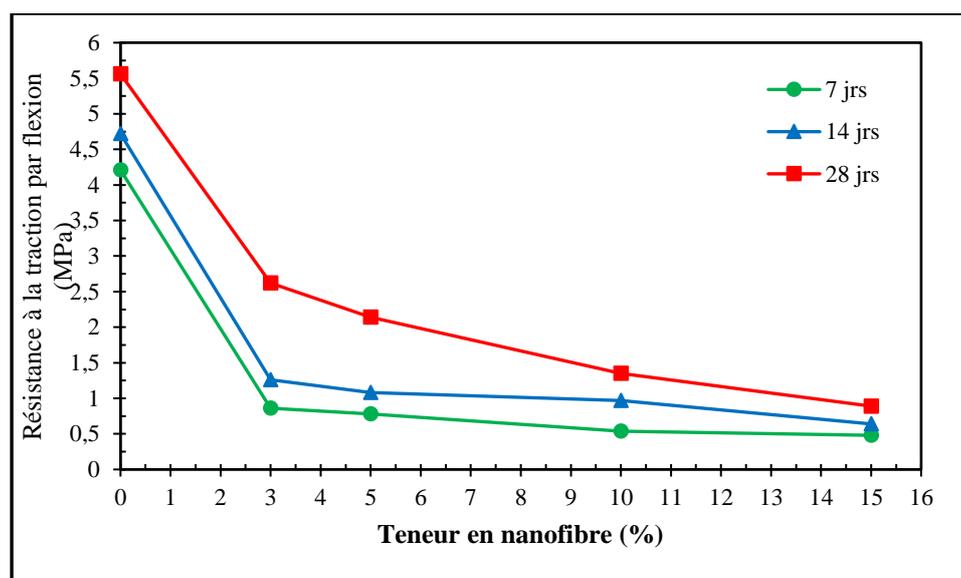


Figure 4.24 Résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges.

4.3.1.4 Corrélation entre compression, conductivité thermique et densité

La figure 4.25 illustre la relation entre la densité apparente, la résistance mécanique et la conductivité thermique des nanocomposites. Plus la densité augmente, plus les propriétés thermiques et mécaniques des composites augmentent. Cela indique que ces paramètres ont une relation directe. En effet, le confinement de l'air à l'intérieur des nanopores diminue la densité des composites, ce qui entraîne une diminution de la conductivité thermique et de la résistance mécanique. De plus, ces résultats indiquent que la concentration et la taille des nanoparticules ont un impact direct sur la conductivité thermique et la densité des nanocomposites. Ce résultat est en accord avec d'autres recherches, telles que [243,244], qui suggèrent que la densité diminue lorsque les fibres naturelles dans la matrice minérale sont renforcées.

Le matériau composite à 15 % de nanofibres (NFC15) représente une réduction relative de la conductivité thermique d'environ 59 %, tandis que sa résistance à la compression est réduite d'environ 90 % par rapport à la lumière de référence. Une diminution équivalente de la résistance à la compression est obtenue avec 10 % de nanofibres (NFC10) avec une diminution de la conductivité thermique d'environ 54 %. Il est important de noter que la densité du matériau composite (NFC10) 10 % est de 378 kg/m³, 33 % plus légers que l'échantillon de référence, résultats qui sont également vérifiés par Benmansour et al [245].

L'efficacité de l'isolation thermique est obtenue au détriment de la résistance à la compression. En effet, la résistance à la compression du matériau composite diminue considérablement, passant de 42,34 MPa pour un mortier sans fibres à 3,54 MPa pour un composite contenant 3% de nanofibres cellulosiques. Plus la concentration en nanofibres est élevée, plus la résistance à la compression du composite diminue jusqu'à 2,08 MPa, ce qui correspond à 15% de la teneur en nanofibres (NFC15). Cette valeur est souvent admise pour les bétons légers et isolants, selon la nomenclature fonctionnelle RILEM des bétons légers [246]. Par conséquent, il est envisageable de traiter le composite de nanofibres cellulosiques à 15% de noyau de palmier dattier (NFC15) comme un béton léger et isolant.

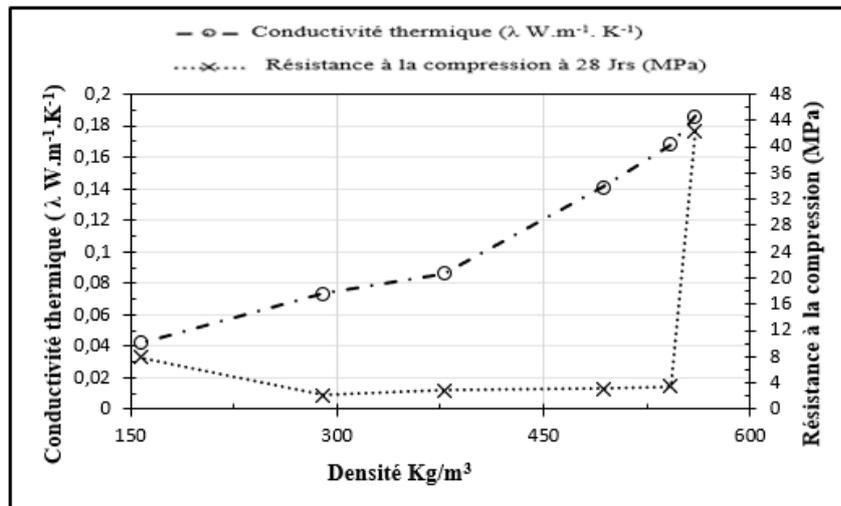


Figure 4.25 Diagramme thermomécanique illustre la corrélation entre conductivité thermique, résistance mécanique et densité.

4.3.1.5 L'effet de nanofibres cellulosique sur la masse des composites en fonction du temps

L'évolution de la masse des nanocomposites au fil des jours de durcissement pour différentes concentrations de nanofibres NFC est représentée sur la figure 4.27. La légèreté des composites de nanofibres de noyau de palmier dattier et de mortier semble être proportionnelle à la quantité de nanofibres et à l'âge de durcissement (28 jours). Le composite renforcé avec des ratios de nanofibres est plus léger que l'échantillon de référence (mortier sans fibres).



Figure 4.26 Evolutions de la masse en fonction de différentes concentrations en nanofibre cellulosiques.

Le mortier sans fibres présente une perte de masse de 12%. En comparaison, les composites renforcés contenant 15% de nanofibres ont perdu 31% de leur masse. Cet écart est justifié par la différence de densité entre les deux composants ainsi que par la différence de taille des particules. La perte de masse est proportionnelle à la concentration de nanofibres. Ce résultat correspond à l'étude de la littérature [247], qui indique que l'augmentation de la concentration en fibres naturelles dans la matrice cimentaire diminue la densité des composites. Cette diminution est le résultat du vide généré dans la matrice suite à la déshydratation des fibres.

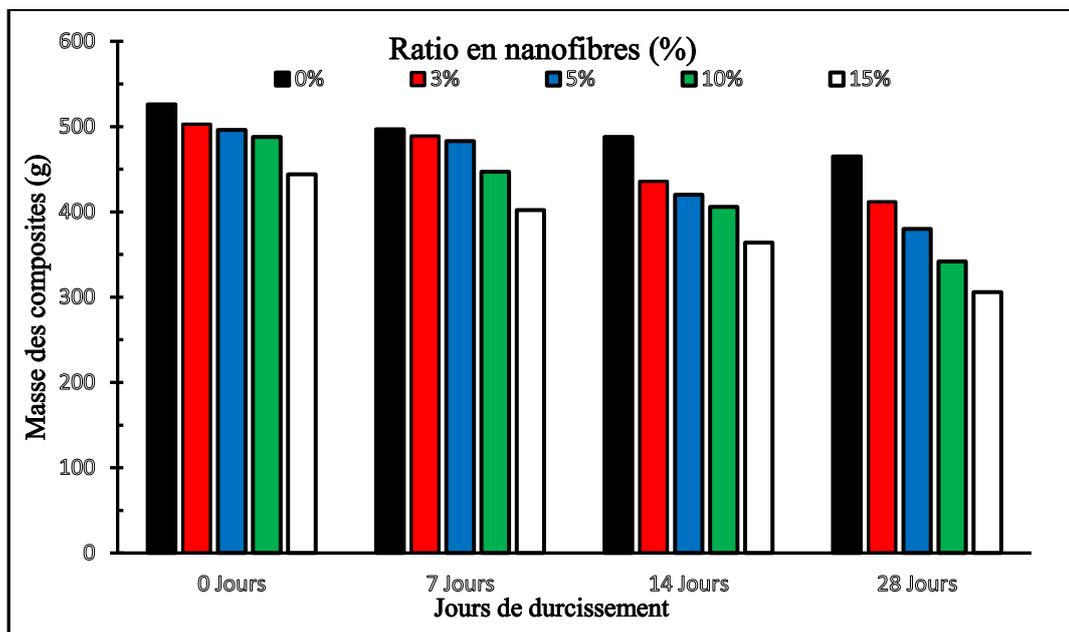


Figure 4.27 Perte de masse en fonction de la teneur en nanofibres pour différents âges.

Conclusion

Le processus de la mécanosynthèse et /ou la technique du broyage est parmi les méthodes les plus utilisées pour la production des nanofibres dérivées de plusieurs sources naturelles. L'isolement de la paroi cellulaire s'effectue à l'aide de la force de cisaillement suscitée par les interactions des boulets et des particules celluloses se trouvant à l'intérieur de la cocotte. La vitesse élevée des différents broyeurs et l'impact du cisaillement identique ont généré la défibrillation des nanoparticules de celluloses atteignant une dimension inférieure à 80 nm.

Les résultats de cette étude démontrent la promesse d'utiliser les déchets de biomasse de palmier dattier comme matière première pour produire des nanofibres celluloses. Le broyage à boulets pendant 24 heures a permis d'isoler avec succès des nanofibres de cellulose (**NFC_n**) avec une cristallinité maximale. En outre, la caractérisation morphologique et structurale des nanofibres de cellulose extraite a été réalisée par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (**FT-IR**), microscopie électronique à balayage (**MEB**) et analyse par spectroscopie à dispersion d'énergie (**EDX**) des déchets de palmier dattier ont été étudiées pour caractériser la microstructure et le produit chimique. Les résultats expérimentaux de la diffraction des rayons X (**XRD**) ont révélé une cristallinité élevée des nanofibres de cellulose et ont montré que l'épaisseur moyenne est comprise entre 3,4 et 6,3 nm.

Cette étude expérimentale analyse l'utilisation de nanofibres celluloses à partir de palmier dattier comme renforcement dans la matrice de ciment. L'objectif est d'évaluer la possibilité d'utiliser le nouveau biocomposite (**NFC_n**) comme matériau isolant pour réduire la perte de chaleur dans les bâtiments. En outre, l'étude sur le comportement thermique montre que l'augmentation de la concentration de NFC dans la matrice de ciment diminue la conductivité thermique des composites. Il est intéressant de noter que l'influence des pores NFC sur les propriétés thermiques est aussi évidente que la concentration de NFC. Ensuite, il a été montré expérimentalement que l'ajout de 15 % de NFC a produit un composite avec $\lambda = 0,073 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Ces valeurs sont proches des plages de conductivité thermique de plusieurs matériaux isolants. Par conséquent, les valeurs inférieures de conductivités thermiques du ciment/NFC sont fournies avec 15 % de concentration en nanofibre cellulose de noyau de palmier dattier (**NFC_n**).

En outre, les nanofibres de déchets de palmier dattier ont une conductivité thermique très faible de $0,042 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ qui peut être exploité comme matériau isolant sur les murs des bâtiments. L'addition de nanofibres à la matrice de ciment améliore la résistance thermique du nanocomposite et réduit par ailleurs sa résistance mécanique. Les analyses thermiques des nanofibres indiquent ainsi que la nanofibre peut être utilisée comme matériau d'isolation thermique puisqu'elles sont biodégradables et ont des impacts environnementaux et économiques positifs. Les déchets de palmier dattier sont un bon candidat pour le développement de matériaux isolants efficaces et incontestables par rapport aux autres matériaux naturels.

En guise de résultats, la résistance à la compression et la résistance à la flexion des échantillons de biocomposites à base de matrice de ciment diminuent avec l'augmentation de la teneur en nanofibres. Les matériaux de ciment à base de NFC3 indiquent une résistance à la compression et une résistance à la flexion plus élevées que les autres échantillons à différents dosages tels que NFC5, NFC10 et NFC15. D'ailleurs, le composite ciment / NFC présente de bonnes propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) par rapport aux autres matériaux présentés dans la littérature. Par conséquent, l'utilisation de 5% de NFC dans la matrice de ciment permet d'obtenir un composite avec de bonnes propriétés thermiques et mécaniques.

La conductivité thermique, la résistance mécanique et la densité sont les paramètres les plus critiques qui doivent être pris en compte dans le choix des matériaux d'isolation thermique des bâtiments. Le degré de résistance mécanique, en particulier à la compression, dépend de la nature d'exploitation du matériau, tandis que la faible densité rend le matériau léger et réduit ainsi la conductivité thermique du matériau. Ces caractéristiques améliorées ont une répercussion directe sur la performance énergétique du bâtiment. Nous considérons que la disponibilité et le faible coût des déchets de noyau de palmier dattier NFC peuvent être une opportunité économique pour une proposition sérieuse de matériaux durables pour l'isolation thermique des bâtiments. Cette vision qui s'inscrit dans la démarche du développement durable permet de renforcer la gestion et la revalorisation d'une grande partie des déchets produits par les citoyens.

CHAPITRE V : INVESTIGATION, INTERPRETATION ET SIMULATION

Introduction

La consommation d'énergie électrique dans le secteur de la construction est principalement due à l'enveloppe extérieure des bâtiments, qui constitue le lieu favorisé des interactions thermiques entre espaces intérieurs et extérieurs. Les propriétés des matériaux qui composent l'enveloppe extérieure du bâtiment sont des critères critiques pour l'échange de chaleur, car la température intérieure du bâtiment est déterminée par l'équilibre entre la perte et le gain de chaleur. Pour réduire la consommation d'énergie tout en maintenant le confort intérieur, il est nécessaire d'améliorer la conductivité thermique des matériaux qui composent l'enveloppe extérieure du bâtiment (murs et plafonds).

L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'effet de l'enveloppe extérieure sur la consommation de deux appartements vacants, plus précisément son impact sur la température intérieure et la consommation d'énergie. Dans notre étude de cas, des mesures in situ se sont déroulées sur deux périodes, l'une estivale et l'autre hivernale. L'ambition de cette recherche est de continuer à développer les critères qui rendent l'enveloppe du bâtiment résistante aux déperditions thermiques et donc de réduire la consommation d'énergie.

5.1 Présentation du cas d'étude

Dans ce travail, l'étude a été menée sur deux types de bâtiments situés à la nouvelle ville Ali Menjeli. Ces deux bâtiments ont une conception structurelle distincte. L'un d'eux est édifié avec un système préfabriqué en coffrage tunnel, et l'autre est construit avec une structure classique (poteau – poutre). Le choix est effectué en fonction de la différence des propriétés physiques et thermiques des matériaux de construction constituant la façade extérieure. La situation du site étudié est représentée sur plan de situation dans la figure (5.1).

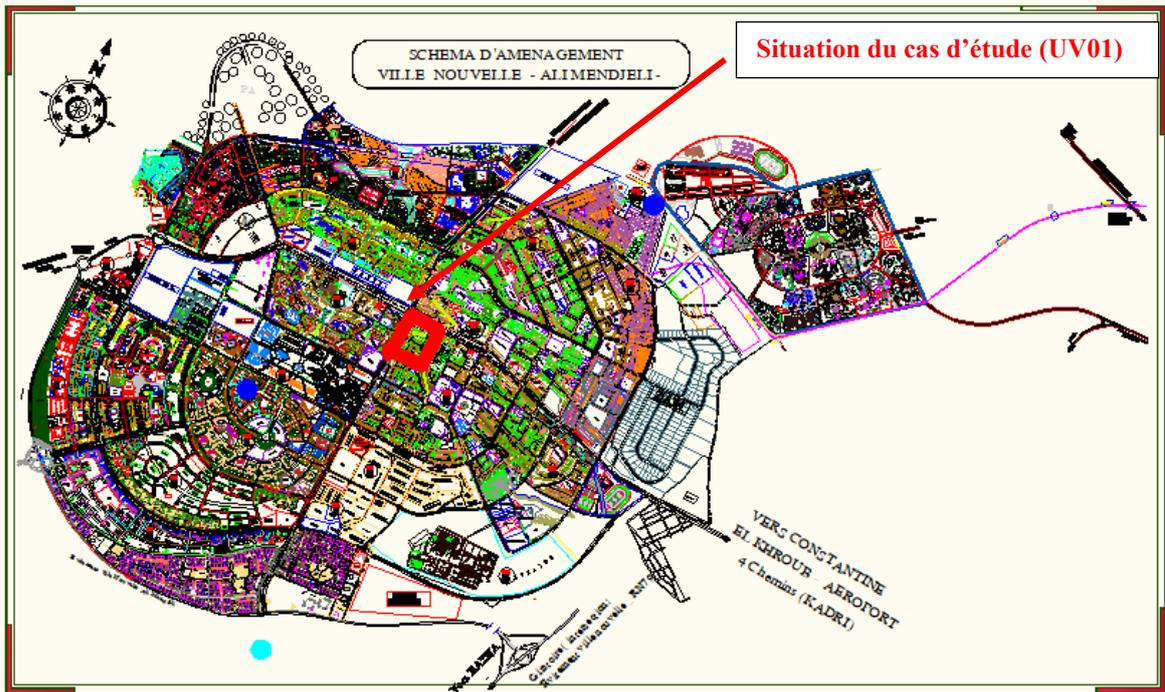


Figure 5.1 plan d'aménagement de la nouvelle ville ALI MENDJELI

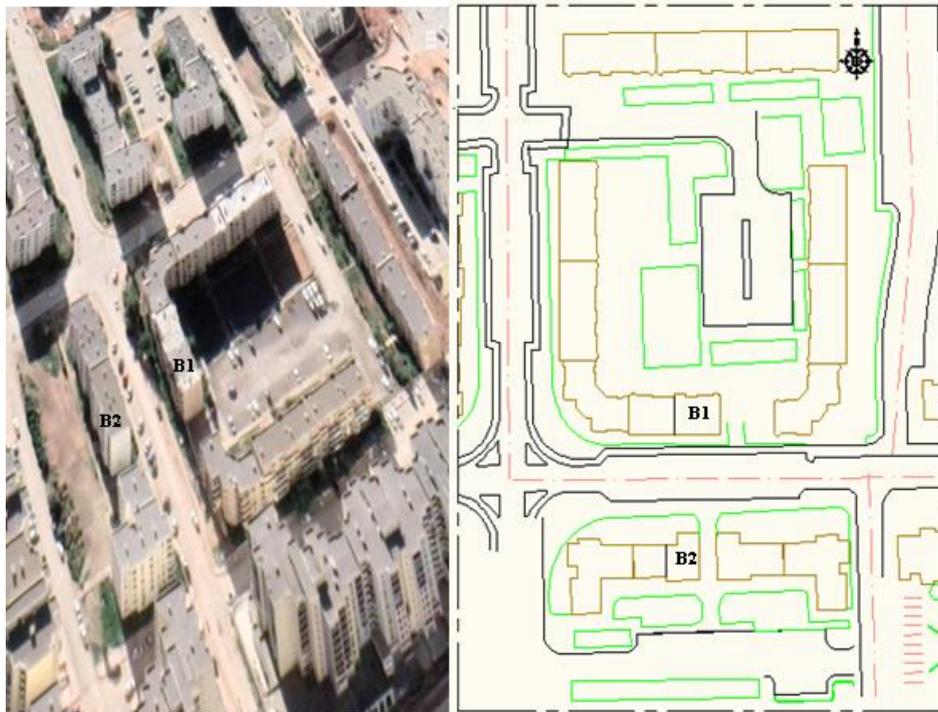


Figure 5.2 Plan masse échelle 1/500 des bâtiments à expérimenter

5.1.1 Description technique des bâtiments à expérimenter

Les deux appartements sélectionnés sont inoccupés, ils sont situés au dernier étage (cinquième étage) et ont la même orientation géographique (Nord et Sud). Cependant, la différence entre eux réside dans la configuration architecturale.

5.1.1.1 Appartement en système constructif (poteau – poutre)

L'appartement est composé d'un séjour, trois chambres, une cuisine, une salle de bain et un sanitaire, d'une superficie de 80 mètres carrés, et une hauteur sous plafond de 2,80 mètres. Les ouvertures représentent 17,46 % de la façade de l'appartement, ce qui correspond à 32,34 % de la surface de plancher. La répartition spatiale de l'appartement est illustrée par la figure 5.3.

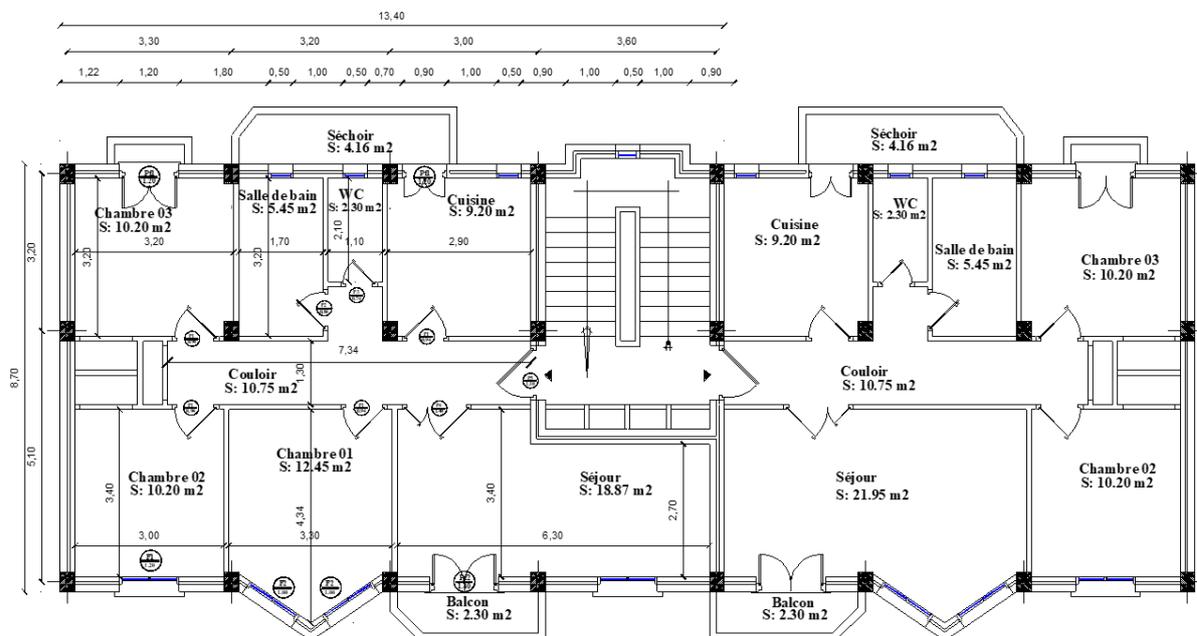


Figure 5.3 Plan logement dernier niveau (F4) en structure conventionnelle (PP)

5.1.1.2 Appartement en béton préfabriqué (système tunnel)

L'appartement est composé d'un séjour, deux chambres, une cuisine, une salle de bain et un sanitaire, d'une superficie de 87 mètres carrés, et une hauteur sous plafond de 2,97 mètres. Les ouvertures représentent 20,98 % de la façade de l'appartement, ce qui correspond à 38,63 % de la surface de plancher. La répartition spatiale de l'appartement est illustrée par la figure 5.4.

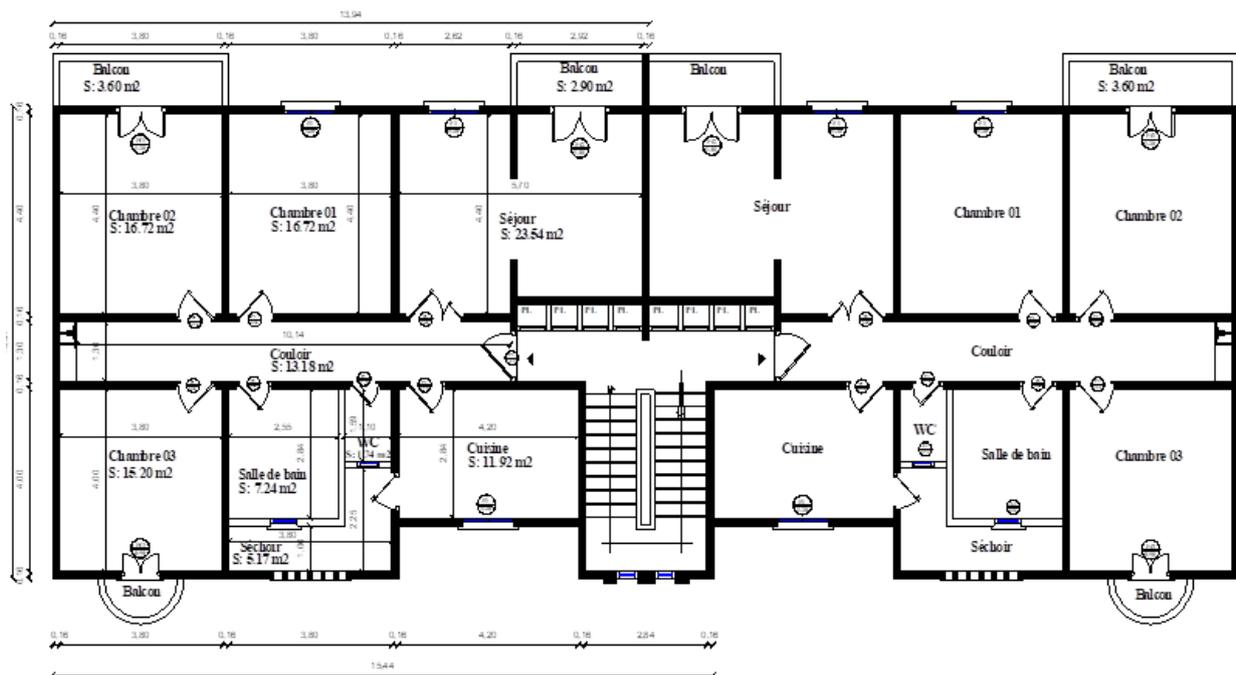


Figure 5.4 Plan logement dernier niveau (F4) avec structure préfabriquée en béton

5.1.2 Forme et orientation des bâtiments

Le terrain est d'une forme régulière, localisée au sud-ouest de la ville Ali Mendjeli, il comprend des bâtiments d'une forme rectangulaire et d'autres angulaire. La forme idéale d'un bâtiment contribue à réduire la consommation d'énergie en été et en hiver. La forme dense et compacte est plus économe en énergie que la forme éclatée, car les pertes de chaleur sont relatives à la surface d'échange thermique entre l'intérieur chaud et l'extérieur froid. À cet égard, il est important de préciser les performances thermiques associées à la construction compacte (faible rapport surface / volume) et donc l'échange thermique limité. Les orientations des deux modèles d'étude ont été rapportées respectivement au nord et au sud pour les façades principale et postérieure (voir figure 5.2).

5.1.2.1 Système constructif

Le système constructif du premier modèle de logement est construit avec un système de réalisation traditionnel (poteau-poutre). Le plancher est en corps creux de (16 +4) cm. La hauteur sous plafond est de 286 cm. En revanche, le second type de logement investigué est un procédé industrialisé de type coffrage tunnel monocoquille. Les refends et les contreventements au rez-de-chaussée et aux étages sont réalisés respectivement en béton

armé de 16cm d'épaisseur et de 297 cm de hauteur. Les étages supérieurs sont des dalles de plancher en béton armé de 16 cm d'épaisseur.

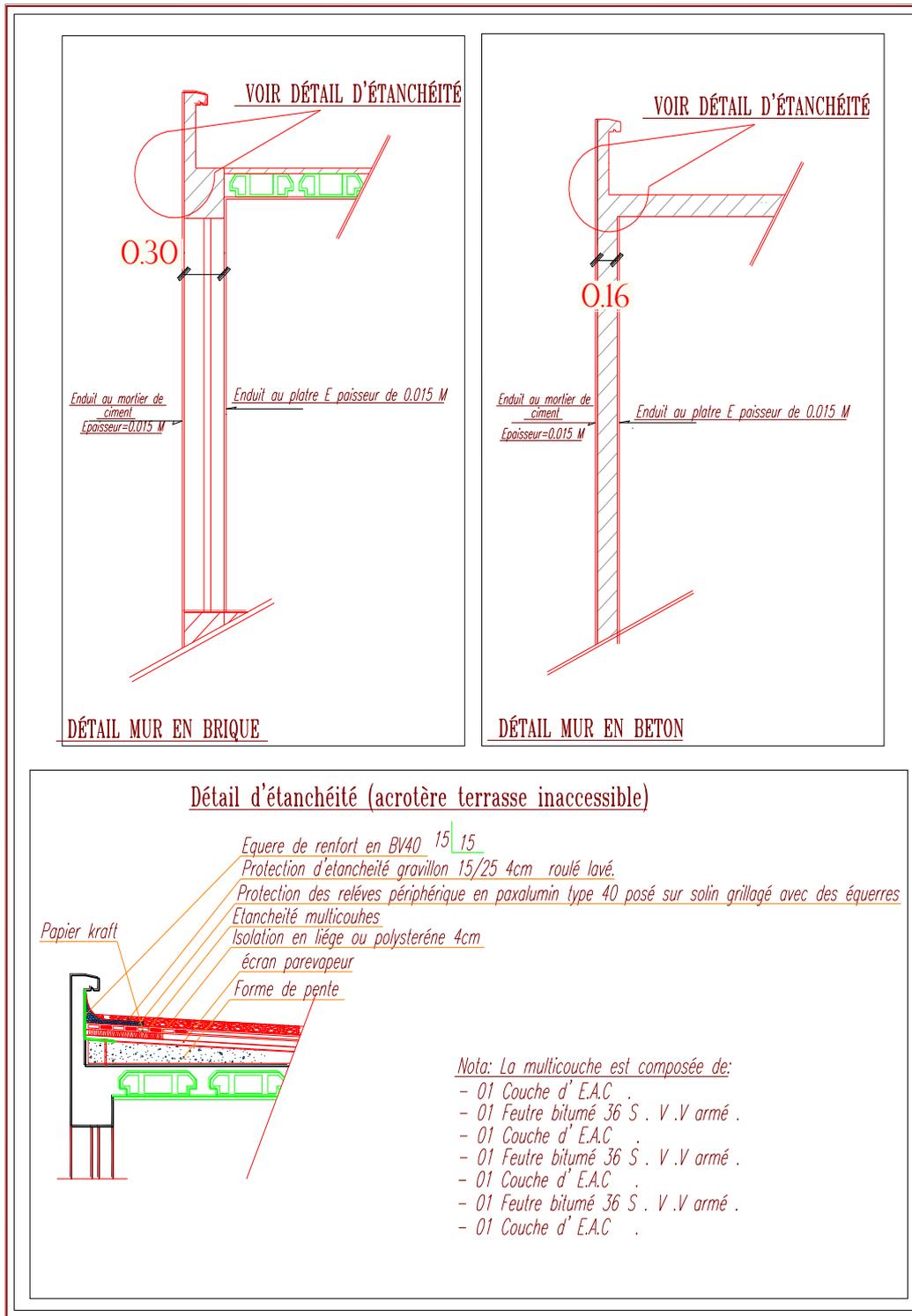


Figure 5.5 Détails constructifs de l'enveloppe extérieure et la terrasse des logements investigués.

5.1.2.2 Caractéristiques thermique de l'enveloppe extérieure

L'enveloppe extérieure du bâtiment joue un rôle de régulateur à travers l'accumulation de la chaleur à l'intérieur et d'un obstacle thermique entre l'ambiance intérieure et extérieure, en particulier l'impact des rayons solaires qui pénètre par les parois des façades. Elle freine ainsi l'augmentation de la température intérieure de la bâtisse en amortissant le pic de chaleur atteint avec un déphasage temporel. Cependant, dans le cas des parois préfabriquées, l'inertie est relativement faible comparativement à celle des parois en briques. De plus, le vitrage simple des fenêtres ne garantit aucune protection contre les conditions climatiques en été comme en hiver.

Tableau 5.1 Matériaux constituant l'enveloppe des deux appartements et leurs caractéristiques thermiques.

	Matériaux	Epaisseur Ep(m)	Conductivité thermique λ (W/m. K)	Chaleur spécifique c (J/KG.°C)	Masse volumique (kg/m ³)	Surface S (m ²)
Paroi extérieure en Brique creuse	Enduit en ciment	0.015	0,800	864	1900	100
	Brique creuse	0.15	0.390	1008	650	
	Lame d'air	0.05	0.047	1000	1.29	
	Brique creuse	0.10	0.270	1008	650	
	Enduit-en Plâtre	0.015	0,250	1008	825	
Paroi extérieure en béton monolithique	Enduit en ciment	0.015	0,800	864	1900	100
	Mur en béton Préfabriqué monolithique	0.16	1.65	1008	2150	
	Enduit-en Plâtre	0.015	0,250	1008	825	

5.1.3 Appareils de mesure

5.1.3.1 Station météo Vantage Pro 2

La station météo Vantage Pro2 mesure les horaires de la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative. Ainsi, cet appareil permet d'obtenir des prévisions locales, des minimums et des maximums. Les principaux paramètres climatiques sont mesurés et enregistrés conformément aux normes de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), notamment la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, les précipitations, ainsi que l'irradiation solaire et le rayonnement ultraviolet. Des capteurs externes pour la pression atmosphérique, l'humidité intérieure et la température sont inclus

dans la station Vantage Vue. Le processus énergétique est alimenté par un panneau photovoltaïque, ce qui garantit une accessibilité toute l'année (voir la figure 5.6).

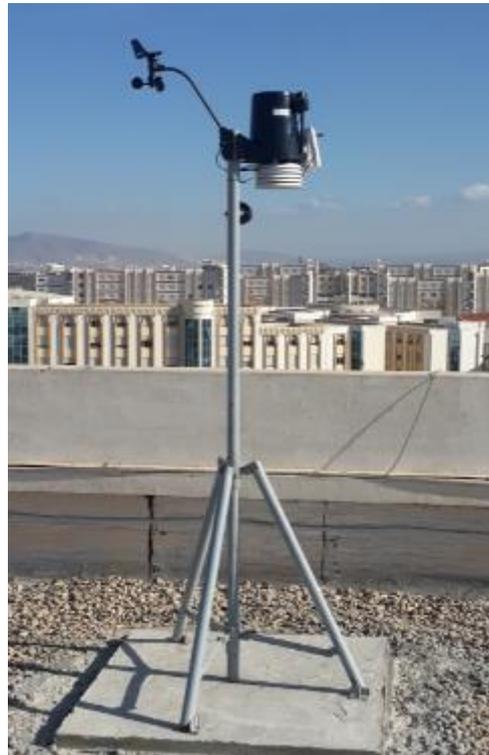


Figure 5.6 Station météo Vantage Pro 2.

5.1.3.2 TROTEC BL30 enregistreur de température et d'humidité

L'enregistreur de température et d'hygrométrie ultra-compact permet de mesurer et d'enregistrer la température et l'humidité relative dans les différents types de constructions. La plage de mesure de la température de l'air est mesurée entre -40 °C et $+70\text{ °C}$ au maximum $\pm 1\text{ °C}$. Concernant l'humidité relative, elle est limitée de 0% à 100% au maximum de $\pm 3\%$. Les deux enregistreurs ont servi pour mesurer les températures intérieures de chaque logement dont chacun a été placé au centre de l'appartement, déposé au niveau d'une table de 1 mètre de hauteur (figure 5.7).



Figure 5.7 TROTEC BL30 enregistreur de température et d'humidité

5.1.3.3 Thermocouple électronique (Ebro TTX 100)

Un thermocouple est utilisé pour déterminer les températures de surface interne et externe de chaque appartement (Figure. 5.9) et (Figure. 5.10). Cette opération consiste à utiliser une sonde pour effectuer des mesures au centre du mur à une hauteur de 1,70 mètre. La plage de température du thermocouple à sensibilité HACCP ebro TTX 100 est limitée de -50 à 350 °C. (Voir figure 5.8).



Figure 5.8 Thermocouple électronique des prises de mesures de températures surfaciques. (Ebro TTX 100)



Figure 5.9 Façade principale et postérieure du logement en structure préfabriquée depuis la rue principale et le parking.



Figure 5.10 Façade principale et postérieure du logement en structure conventionnelle depuis l'axe principale et le parking.

5.1.3.4 Caméra thermique infrarouge avec vision nocturne

La caméra thermique TROTEC EC020-040 combine les images thermiques pour améliorer la reconnaissance des mesures de température de surface en temps réel. Cet appareil raccourcit le temps de mesure en affichant sur l'écran couleur des images thermiques des pertes à travers l'enveloppe extérieure du bâtiment. Cette technique détermine automatiquement les points les plus chauds et les plus froids sur l'image (Voir figure5.11).



Figure 5.11 Caméra thermique avec vision nocturne (TROTEC EC 020 040)

5.1.4 Conditions de déroulement des mesures

Les deux appartements soumis à l'expérimentation ont une orientation géographique identiques et ne sont pas habités. Ils sont situés au dernier niveau dans deux bâtiments adjacents qui présentent des conditions similaires concernant l'inoccupation des logements en dessous et mitoyennes. L'unique différence entre ces deux bâtiments demeure dans leurs structures et leurs enveloppe extérieure, le premier appartement est construit avec le système classique en poteau poutre et avec des parois en briques doubles. Alors que le deuxième logement est édifié en béton préfabriqué avec le système de coffrage tunnel.

Comme il a été indiqué, les mesures sont effectuées sur deux saisons l'une estivale et l'autre hivernale. La première campagne de mesures s'est déroulée en Août pour une durée de trois jours, du 20 août 2020 au 22 août 2020. Cette période des prises de mesures a été marquée par une canicule, indiquant une forte augmentation de température entre 38 et 42 °C. La deuxième campagne de mesures s'est également survenue sur une période de trois jours, du 29 décembre 2020 au 31 décembre 2020. Les jours de l'investigation se sont caractérisés par une vague de froid, marquant une chute de température à - 1 °C (Voir annexe A.3).

5.1.4.1 Mesure en période estivale sans ventilation naturelle entre 20-22 /8/2020

Les appareils de mesure exploités à l'intérieur du premier appartement sont les mêmes que ceux utilisés dans l'autre logement et les données sont relevées toutes les 24 heures. Le scénario fourni : avec des fenêtres fermées, les mesures enregistrées sont les températures

intérieures, extérieures et l'humidité relative, ainsi que les températures de surface intérieure et extérieure.

5.1.4.2 Mesures en période hivernale entre 29-31/12/2020

Durant les jours de campagne de mesures, les fenêtres des appartements étaient fermées. Les mesures sont prises de la même manière que pendant l'été pour enregistrer les températures extérieures et intérieures en même temps. La lecture de la mesure concerne également la température de la surface intérieure et extérieure et la température de la surface intérieure et extérieure du toit.

5.1.4.3 Vision nocturne des logements investigués

La thermographie infrarouge est une technique de diagnostic permettant de discerner les désordres invisibles à l'œil nu. En capturant l'image au plus près, il permet de détecter les différences thermiques locales et ainsi de visualiser et de mettre en évidence les défauts d'isolement qui n'étaient pas suspectés auparavant. Dans la situation actuelle, il permet de mettre en évidence des défauts majeurs à traiter en priorité. Pour les nouveaux projets, cela peut être un outil puissant pour évaluer la qualité des réalisations.

La figure 5.12 décrit une image thermique de la façade Est des deux appartements étudiés, comprenant six niveaux. L'examen, qui s'est déroulé au cours de la nuit d'hiver du mois de février, a permis de mettre en exergue la présence de ponts de divers niveaux thermiques sur le bâtiment à structure de type conventionnel. En ce qui concerne les murs extérieurs en béton de l'autre bâtiment, la thermographie reflète la distribution superficielle quasi uniforme de la température extérieure. L'image en question illustre parfaitement l'efficacité de la méthode de détection et de vérification des pertes de chaleur dans les bâtiments en vue d'une réhabilitation énergétique efficace, et présente la possibilité de visualiser simultanément les anomalies à distance. Le recours à cette technique est possible à condition de disposer d'un gradient thermique de la façade intérieure et extérieure du bâtiment durant la saison hivernale.

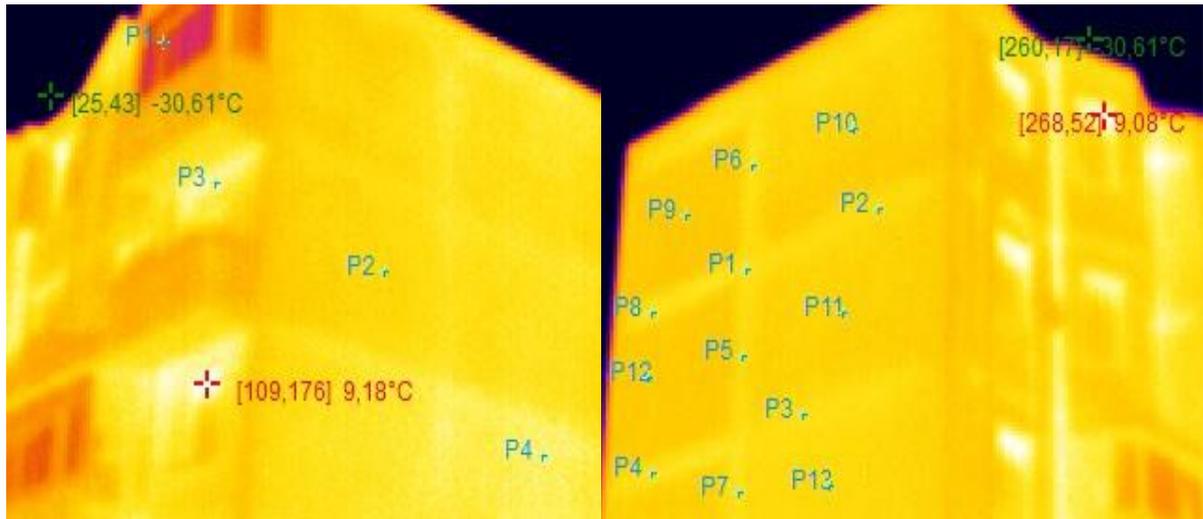


Figure 5.12 Thermographie à infrarouge au niveau des bâtiments diagnostiqués.

5.2 Interprétation des résultats in-situ

Une analyse comparative des variations de température et de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur, ainsi que des températures à l'intérieur et à l'extérieur de chaque logement, a été réalisée afin d'évaluer les caractéristiques physiques de l'enveloppe extérieure des bâtiments. L'objectif est de déceler l'effet de la composition de l'enveloppe extérieure sur les températures intérieures et l'efficacité énergétique du bâtiment. Au cours du mois d'août, la température et le rayonnement solaire ont atteint leur maximum à midi. Cela conduit à une augmentation significative de la température à l'intérieur du bâtiment durant la seconde moitié de la journée, en particulier dans les deux appartements où la mesure de la température a été effectuée. L'absence totale des masques naturels ou artificiels a provoqué l'augmentation du rayonnement et l'absorption des radiations solaires.

5.2.1 Période estivale sans ventilation naturelle entre 20-22/8/2020

5.2.1.1 Variations de température intérieure et humidité relative du logement en structure poteau poutre (PP)

La température intérieure maximale du logement à structure poteau-poutre est de 28,90 °C à 21 heures le premier jour, qui est inférieur à la température extérieure maximale de 41,27 °C à 12 heures. Le second jour, le plafond de la température intérieure est de 29,10 °C à 20 heures, alors que celui de la température extérieure est de 41,50 °C à 14 heures. Pour le troisième jour, la température intérieure maximale est de 29,70 °C à 18 heures, et celle de

l'extérieur est de 36,10 °C à 14 heures. L'oscillation de la courbe de température intérieure est quasiment stabilisée tout au long de la campagne de mesure. Les écarts sont sensiblement en rapport avec les valeurs des températures extérieures enregistrées au cours des trois jours mesurés. Il convient de retenir qu'au niveau du logement (PP), les variations de la température extérieure sont amorties et déphasées entre 4 et 5 heures. Cependant, les oscillations de la température à l'intérieur du logement montrent que la température demeure stable pendant la journée, avec une amplitude limitée à 1,8 °C. Bien que les températures de la rue présentent des amplitudes importantes de 18,2 °C à 22,4 °C, respectivement.

La structure en poteaux-poutres maintient un équilibre approprié entre la température et l'humidité relative. Ceci est dû aux propriétés physiques de l'enveloppe extérieure du logement en structure (PP) composée de briques avec des alvéoles parallèles offre le pouvoir d'accumuler et déstocker de la vapeur d'eau, ce qui permet la stabilisation de l'humidité relative de l'air ambiant. Ainsi, l'augmentation de la température active le processus de sorption et cela correspond à l'étude de Woloszyn et al [248]. En effet, l'équilibre hygrométrique à l'intérieur du logement est déterminé par l'inertie du mur, qui maintient une faible humidité relative. D'autre part, par le caractère cohérent et homogène de la température ambiante, qui correspond à la composante et à l'efficacité thermique de l'enveloppe extérieure, mais aussi au différentiel de température interne/externe. (Voir figure 5.13).

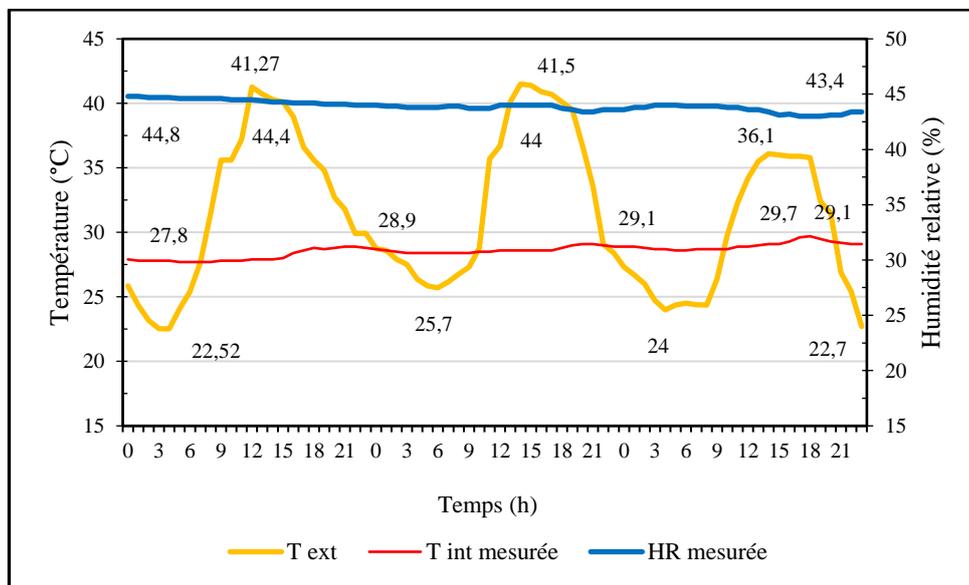


Figure 5.13 Variation de la température de l'air intérieure et humidité relative du logement en structure poteau-poutre (PP) en période d'été (20-21-22, Aout 2020).

5.2.1.2 Variations température intérieure et humidité relative du logement en béton préfabriqué (BPF)

La lecture du (graphe 5.14) montre que, le premier jour, la température maximale du logement en béton préfabriqué (BPF) est de 36,80°C à 15 heures, alors que le deuxième jour, elle est de 36,20°C à 16 heures, tandis que le troisième jour, elle atteint 35,00°C à 17 heures. La différence maximale de température est comprise entre 0.60 ° C, pour le premier et 1,20 ° C pour le deuxième et troisième jour. Ce logement situé au dernier niveau affiche la température de l'air intérieur la plus élevée, en raison de l'exposition directe de son enveloppe (Mur et Toit) aux rayonnements solaires entre midi et 16 heures, où la température atteint son maximum pendant cette période de la journée, ces rayonnements étant perpendiculaires à la surface horizontale du toit. Les fluctuations des températures intérieures au cours du jour d'investigation relevé dans l'appartement sont importantes et suivent le même rythme que celui des températures extérieures. En particulier, pendant les trois jours des mesures, les variations de la température extérieure sont déphasées et le temps d'amortissement est de 2 heures.

La figure 5.14 indique que le taux d'humidité varie entre un minimum de 35,5% et un maximum de 49 %. Dans toutes les circonstances, la fluctuation de l'humidité est inversement proportionnelle à la variation de la température interne du bâtiment. Cette observation a été confirmée et démontrée dans le cas du bâtiment préfabriqué en béton. L'enveloppe extérieure en béton est source de perturbation de l'humidité ambiante.

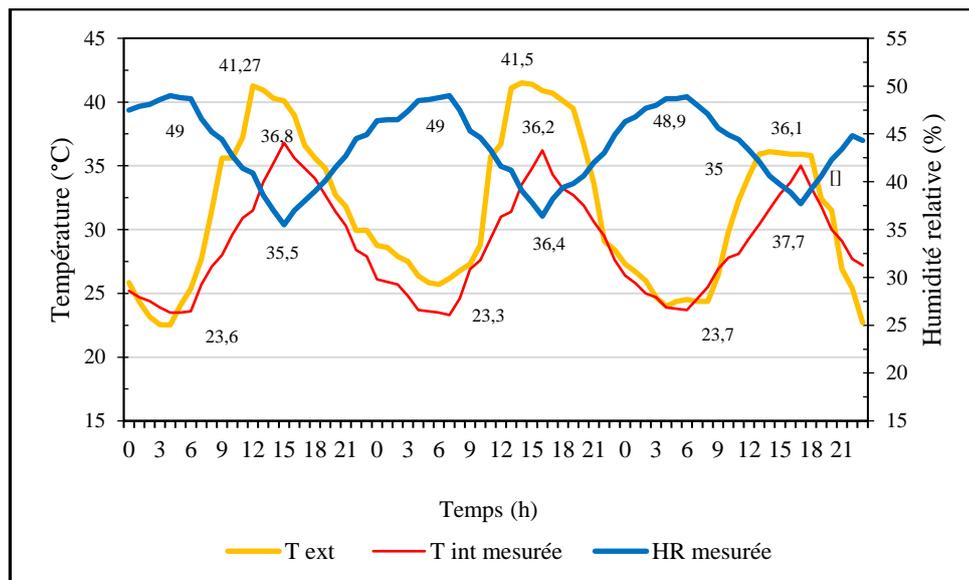


Figure 5.14 Variation de la température de l'air intérieure et humidité relative du logement en structure poteau-poutre (BPF) en période d'été (20-21-22, Aout 2020).

5.2.1.3 Étude comparative de la température intérieure des deux logements avec les seuils de confort d'été sans ventilation nocturne.

La trajectoire de la courbe de température intérieure du premier logement (PP) se situe en dehors des limites du confort thermique tout au long de la journée, et reste stable, après une progression presque linéaire, où la hausse de température est confinée entre 27,90 et 28,80 °C et l'écart de 0,90 °C est imperceptible, ces résultats sont proches aux normes de confort [249], et présente une tendance constante sans fluctuations. La différence de température entre les deux logements est significative (d'environ 8 °C). Le diagramme de la courbe de température intérieure du second logement (structure préfabriquée) se situe dans la zone de confort de minuit à 7 heures du matin. Puis, de 8 heures à 23 heures, la limite de confort est dépassée pour atteindre une température maximale de 36,80 °C à 15 heures. Lorsque le soleil se lève, la radiation solaire affecte la façade N-E d'une intensité de 650 W/m², les températures extérieures entament leur ascension. Il se produit un apport de chaleur par l'absorption à travers l'enveloppe extérieure de couleur marron dont le coefficient d'absorption élevé.

La performance de l'enveloppe extérieure du premier logement en structure poteau-poutre (PP) est clairement illustrée par sa capacité à protéger le logement du rayonnement solaire pendant la journée et à préserver sa stabilité pendant la nuit. En d'autres termes, la double paroi avec l'isolation thermique de l'air a permis, par sa faible conductivité thermique (λ) 0,025 w.m⁻¹. K-1, de ralentir la chaleur extérieure du jour en l'amortissant et en la restituant avec une valeur de diffusion thermique relativement faible de 06 heures de temps, lorsque la température extérieure commence à baisser. L'étude de Tsilingiris [250], démontre que la capacité thermique décroît lorsque la résistance accroît dans le cas où la couche d'isolation est placée à l'extérieur ou au milieu de la paroi. L'enveloppe extérieure en double brique avec une lame d'air située au milieu correspond parfaitement à la situation rencontrée dans cet appartement.

Alors que l'enveloppe du second logement met en évidence l'importance de la conductivité thermique de la structure en béton dans le transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur lorsque la température extérieure est inférieure à 26°C. Ce résultat est en parfaite adéquation avec ceux de Song et al. [251] ont découvert que, contrairement au coefficient de conductivité thermique (λ), qui augmente avec la température ambiante, la densité du matériau, demeurant constante dans le temps. Ainsi l'orientation, la couleur de la façade, et

l'absence totale de masques et d'occultations environnementales sont autant de facteurs qui peuvent être à l'origine d'un réchauffement important du logement l'après-midi. (Voir figure 5.15)

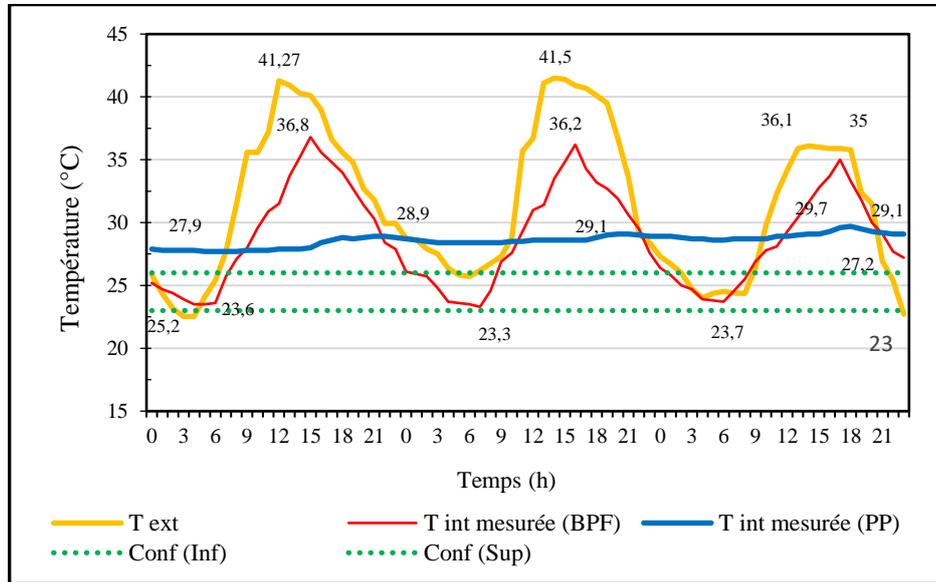


Figure 5.15 Comparaison des variations des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période (20-21- 22 août 2020) entre l'appartement (PP) et (BPF).

5.2.2 Période hivernale entre 29-31 décembre 2020

5.2.2.1 Variations températures intérieure et humidité relative du logement en structure poteau poutre (PP)

Selon la figure 5.16, pendant les jours de mesure, la température intérieure du logement présente une faible amplitude de 3,60 °C entre la valeur maximale de 17 °C à 16 heures et la valeur minimale de 13,40 °C obtenus à 7 heures du matin. Durant le deuxième jour, la courbe de la température intérieure diminue lentement, et varie entre 14,50 et 14,90 °C. Enfin, la température nocturne descend à 14,50 degrés Celsius, puis revient pour maintenir ses valeurs stables. La configuration de l'enveloppe extérieure du bâtiment et la fermeture des fenêtres sont des variables essentielles à la réduction des pertes de chaleur par convection. Ce type d'enveloppe (briques creuses et lame d'air) est conçu pour jouer le rôle de barrière thermique et rétablir l'ambiance thermique intérieure indépendamment des fluctuations de température extérieures [252].

La lecture de la courbe de l'humidité relative intérieure est inversement proportionnelle à la température de l'air intérieur. Pour le logement en structure (PP), elle augmente lorsque la

température diminue, enregistrant le premier et le troisième jour de la mesure, les taux les plus bas de 41,9 à 41,3 % respectivement. Alors que le deuxième jour a connu une augmentation significative de 50,4% en raison de la diminution de la température au cours de cette journée. Cette augmentation peut influencer la performance thermique du bâtiment, notamment les propriétés de conductivité thermique et de sorption du matériau [253],[254]et [255]. En raison de la basse température en saison hivernale, et les caractéristiques thermo physique de l'enveloppe, le taux d'humidité grimpe à ses niveaux les plus hauts. (Voir figure 5.16).

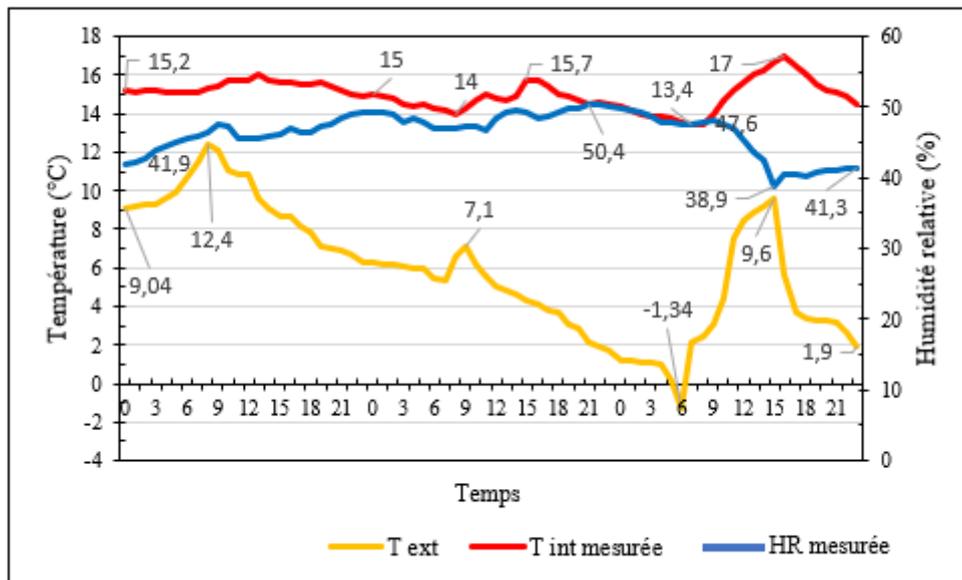


Figure 5.16 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement PP.

5.2.2.2 Variations températures intérieure et humidité relative du logement en béton préfabriqué (BPF)

La température intérieure pendant les 3 jours de mesure successifs fluctue à la hausse de 9 heures à 15 heures, où la température de l'air intérieur de l'appartement atteint son maximum de 14,40, 14,60 et 15,50 °C (figure 5.17). Ensuite, la température suit une trajectoire décroissante de 17 heures à 8 heures du matin, avec des températures intérieures comprises entre 11,5 et 10,20 °C. Concernant la température extérieure, elle se situe entre un maximum de 12,90 °C et un minimum de -2,5 °C. La fluctuation de la température à l'intérieur de ce logement est donc imprévisible et semble diminuer de manière significative avec la baisse de la température extérieure. La fluctuation de la température à l'intérieur de ce logement est donc imprévisible et semble diminuer de manière significative avec la baisse

de la température extérieure durant la nuit. Il a été enregistré des variations importantes entre les valeurs de température intérieure et extérieure, entre 3,80 et 9,80 °C.

La figure 5.17 indique que le taux d'humidité relative est compris entre 41,30 et 55,40 %, cependant, sur toute la période de mesure, le taux d'humidité enregistré s'est maintenu entre 50 % et 55 %. Lorsque l'humidité relative se déplace de l'intérieur vers l'extérieur et rencontre des températures plus basses, cela entraîne la formation de condensation sur l'enveloppe du bâtiment. Malgré les températures plus basses de la saison hivernale, l'humidité enregistrée à l'intérieur du bâtiment n'a pas franchi le seuil de 55 %. Le matériau à conductivité thermique élevée a une faible capacité d'absorption de l'humidité. Ce résultat est similaire à celui de He X, Zhang H, et al [256].

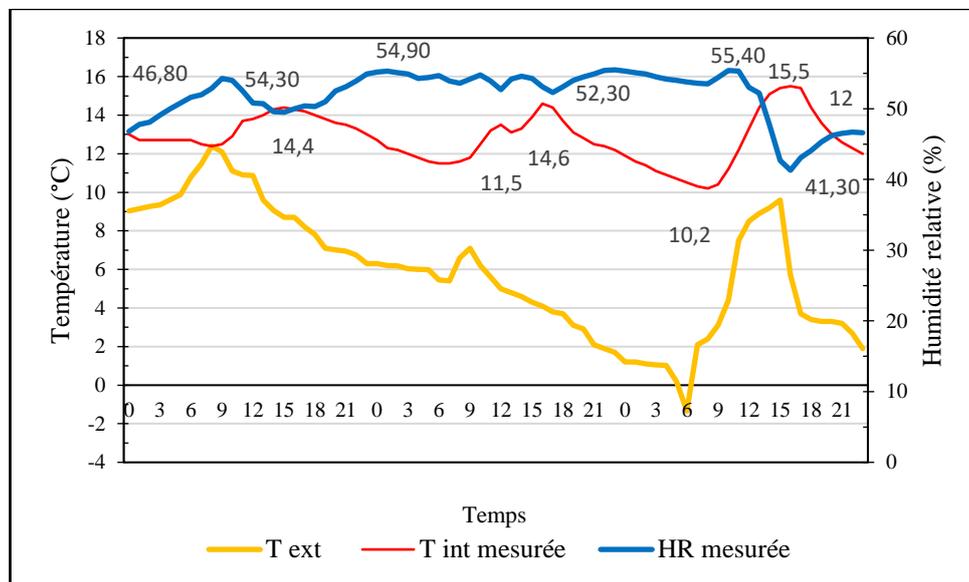


Figure 5.17 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement BPF.

5.2.2.3 Étude comparative de la température intérieure des deux logements avec les seuils de confort en hiver

Dans cette étude, la norme ASHRAE 55-2010 a été adoptée pour définir la plage de confort thermique de la température ambiante en fonction du type de vêtement, du niveau d'activité et de la température saisonnière [257]. Cette norme permet de mesurer le confort thermique des deux bâtiments pendant les saisons d'été et d'hiver. La zone de confort pour l'espace intérieur, selon Givoni [258], est limitée à une température comprise entre 18°C et 25°C en hiver et entre 20°C et 27°C en été.

En considérant le deuxième jour comme une journée type, la figure 5.18 montre que la température intérieure du logement en structure (PP) est toujours supérieure à la température intérieure de l'appartement en structure (BPF) et inférieure à la valeur de confort tout au long de la journée de mesure, avec un maximum de 4,50 °C à minuit et un minimum de 3 °C atteint à 16 heures. La variation maximale entre les températures intérieures et extérieures s'élève à 14,94 °C à 6 heures du matin, tandis que la variation minimale atteint 7,10 °C à 15 heures.

La température ambiante intérieure enregistrée dans le logement en béton préfabriqué indique que la variation de la courbe de température intérieure est comprise entre un minimum de 10,20 °C à 8 heures et un maximum de 15,50 °C à 16 heures. La différence maximale entre les températures intérieure et extérieure est de 11,84 degrés Celsius à 6 heures et la différence minimale est de 5,80 °C à 15 heures. La température intérieure est inférieure à la valeur du confort minimale avec un maximum de 13,8 °C à 8 heures et un minimum de 4,6 °C atteint à 16 heures. Ces températures intérieures mesurées en période d'hiver n'atteignant pas la plage de confort [259].

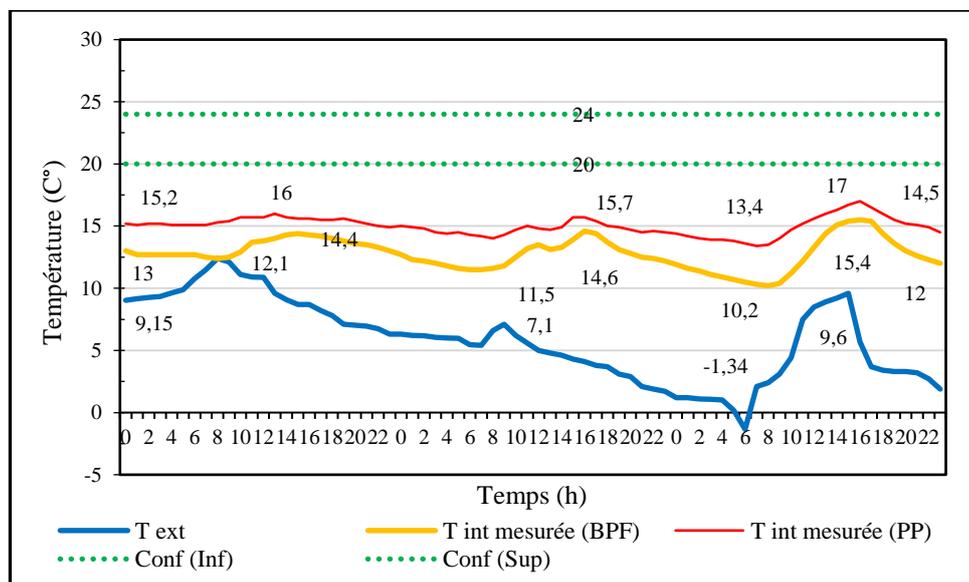


Figure 5.18 Comparaison des variations des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et humidité relative durant la période 29-31 décembre 2020 entre l'appartement (PP) et (BPF).

5.3 Déroulement de simulation et comparaison entre température mesurées et simulées par TRNSys

5.3.1 Période estivale (sans ventilation naturelle)

5.3.1.1 Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) durant la période du 20 au 22 Aout 2020

L'évolution de la température de l'air intérieur de l'appartement PP du 20 au 22 août est représentée sur la figure 5.19. Pour le premier jour, nous avons observé que les deux températures ont augmenté au même rythme. La température de l'air mesuré varie entre 27,7 et 28,9 degrés Celsius, tandis que la température de l'air simulé varie entre 26,53 et 28,80 degrés Celsius, avec une différence de 0,02 à 1,17 degrés Celsius entre les deux températures. Alors que pour la journée du 21 Aout, la température de l'air intérieur mesurée varie entre 28.40 °C et 29.10 °C avec un maximum obtenu à 20 h avec un déphasage de 6 h par rapport à la température maximale de l'air extérieur. Cependant la température de l'air intérieur mesurée varie entre 27.28 °C et 30.70 °C avec un maximum enregistré à 20 h et une différence par rapport aux températures mesurées entre 0.2 °C et 1.9 °C. Pour la troisième journée (22 Aout), la température de l'air mesurée varie entre 28.6 °C et 29.7 °C avec un maximum obtenu à 18 h soit un déphasage de 4h par rapport à la température maximale de l'air extérieur. La température de l'air intérieur simulée varie entre 28.43 °C et 30.97 °C avec un maximum obtenu à 18 h et une différence par rapport aux valeurs mesurées entre 0.02 °C et 1,62 °C.

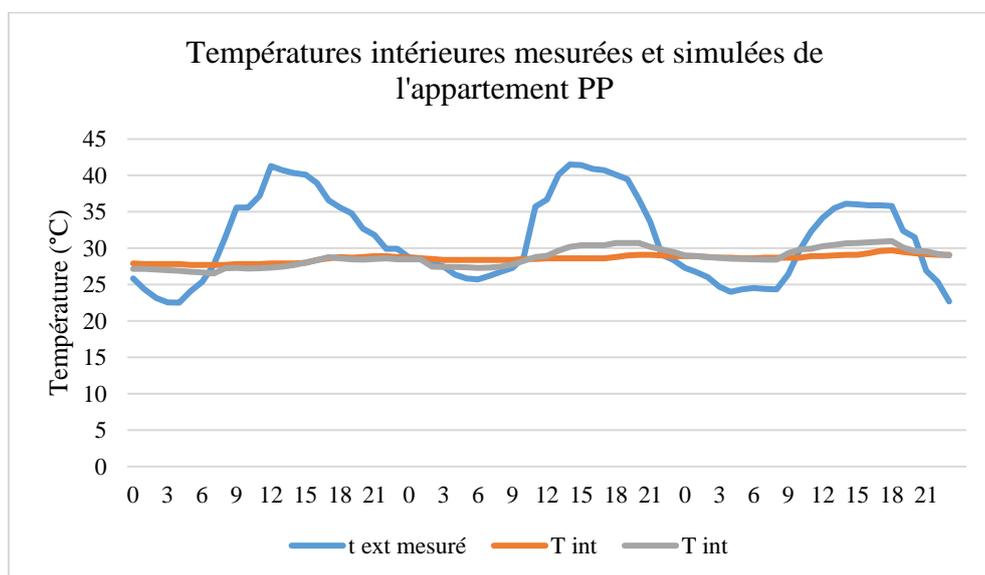


Figure 5.19 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 20-22 Aout 2020 pour l'appartement PP.

5.3.1.2 Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (BPF) durant la période du 20 au 22 Aout 2020

La différence de température de l'air intérieur de l'appartement BPF entre le 20 et le 22 août est représentée sur la figure 5.20 pour le cas sans ventilation nocturne. Contrairement à

l'appartement PP, où la température de l'air intérieur varie légèrement au cours de la journée, la variance de l'appartement BPF est importante en suivant la température extérieure avec un décalage de 3 heures pour les trois jours de mesure. En effet, le premier jour (20 août), la température mesurée de l'air intérieur oscille entre 23,50 et 36,80 degrés Celsius, avec un maximum à 15 heures, tandis que la température de l'air simulée se situe entre 24,26 et 35,37 degrés Celsius, avec un maximum à 15 heures. La différence de température entre ces deux températures est comprise entre 0,23 et 1,50 degrés Celsius.

Lors de la journée du 21 août, la température de l'air intérieur mesurée varie entre 23,30 et 36,20 degrés Celsius avec un maximum situé à 16 heures, tandis que la température de l'air mesurée varie entre 24,69 et 36,89 degrés Celsius avec un maximum atteint à 16 heures et une différence par rapport aux valeurs mesurées de 0,04 degré Celsius et 1,64 degré Celsius. Quant au troisième jour (22 août), la température de l'air intérieur mesurée varie de 23,70 à 35 degrés Celsius avec un maximum à 17 heures, alors que la température mesurée varie de 25,22 degrés Celsius à 34,29 degrés Celsius avec un maximum à 17 heures et un écart par rapport aux valeurs mesurées de 0,19 degré Celsius et 1,98 degré Celsius.

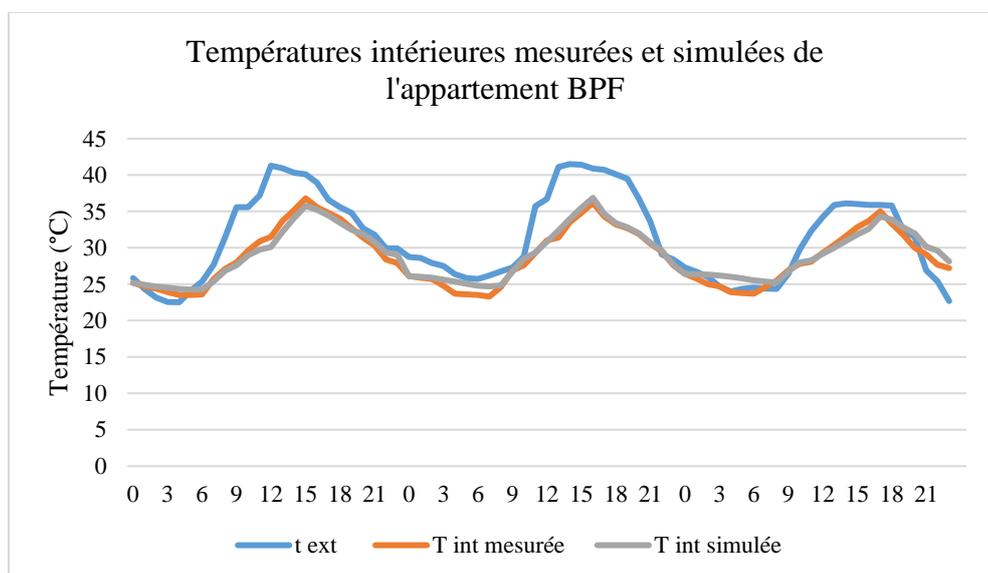


Figure 5.20 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 20-22 Aout 2020 pour l'appartement BPF.

L'analyse des températures intérieures de l'air et de la surface de l'appartement BPF révèle que la fluctuation est significative pendant la journée. En effet, la variation entre la température minimale et maximale de l'air ou de la surface est supérieure à celle de l'appartement PP, dont les températures de l'air et de la surface restent quasiment stables au cours de la journée. L'augmentation excessive de la température de l'air et de la surface

engendre donc une hausse de la température opérative affectant le confort thermique de l'individu. Les Variations de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) et (BPF) durant la période du 20 au 22 Aout 2020 sont récapitulées dans le tableau 5.1.

Nous constatons que les variations entre les températures intérieures, surfacique intérieure et extérieure mesurées et simulées durant la période estivale et hivernale sont relativement faibles, avec des écarts allant de 0,02 °C à 2,15 °C. Pendant la période estivale, les variances absolues typiques pour les températures intérieures du logement (PP) vont de 0,02 °C à 1,90 °C. Alors que les écarts absolus pour le logement (BPF) se situent entre 0,04 °C et 2,10 °C. Par conséquent, les températures surfaciques intérieures des murs et du toits mesurées et simulées sont donc insignifiantes. Les écarts absolus typiques pour les températures du logement (PP) sont respectivement compris entre 0,01 °C et 1,07 °C et entre 0,07 °C et 1,89 °C. Alors que les écarts absolus pour le logement (BPF) sont situés entre 0,02 °C et 2,15 °C et entre 0,02 °C et 2,11 °C. Par ailleurs, les températures de la surface extérieure des murs et des toits sont minimales, qu'elles soient mesurées ou simulées. Les différences absolues des températures des logements (PP) varient en moyenne entre 0,02 °C et 2,14 °C et entre 0,01 °C et 2,12 °C, respectivement. Quant aux différences absolues pour les logements (BPM), elles varient entre 0,01 et 1,49 °C et entre 0,01 et 2,14 °C.

Tableau 5.2 Variation de la température (intérieure, surfacique intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement PP durant la période du 20 au 22 Aout 2020

Type de logts	Appartement en structure poteau-poutre (PP)			Appartement en béton préfabriquée (BPF)		
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp int mesurée $T_{(mes)}$	Temp int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp int mesurée $T_{(mes)}$	Temp int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
22,52 et 41,27	27,70 et 28,90	26,53 et 28,80	0,02 et 1,17	23,50 et 36,80	24,26 et 35,75	0,23 et 1,50
25,70 et 41,50	28,40 et 29,10	27,28 et 30,72	0,22 et 1,90	23,30 et 36,20	24,69 et 36,86	0,04 et 1,64
22,70 et 36,10	28,60 et 29,70	28,43 et 30,97	0,02 et 1,62	23,70 et 35,00	25,22 et 34,29	0,13 et 2,10
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp surfacique int mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
22,52 et 41,27	27,79 et 29,42	28,11 et 29,79	0,09 et 0,96	23,62 et 36,85	23,98 et 36,35	0,02 et 1,79
25,70 et 41,50	28,46 et 29,19	27,55 et 29,57	0,01 et 1,07	23,42 et 36,53	24,09 et 35,73	0,02 et 1,96
22,70 et 36,10	28,72 et 29,85	28,21 et 29,12	0,28 et 0,73	23,83 et 35,05	24,73 et 34,69	0,02 et 2,15
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp toiture int mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
22,52 et 41,27	27,86 et 29,23	27,75 et 28,47	0,07 et 1,03	23,68 et 37,00	24,41 et 37,70	0,02 et 1,09
25,70 et 41,50	28,50 et 29,46	27,36 et 29,26	0,35 et 1,43	23,70 et 36,36	24,64 et 37,53	0,03 et 2,11
22,70 et 36,10	28,97 et 30,30	27,73 et 29,16	0,30 et 1,89	24,00 et 35,40	25,18 et 34,78	0,16 et 1,62
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp surfacique ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
22,52 et 41,27	19,56 et 35,38	19,95 et 37,55	0,02 et 2,14	23,58 et 41,34	22,99 et 41,47	0,01 et 0,97
25,70 et 41,50	25,93 et 41,86	25,16 et 41,75	0,07 et 1,52	25,85 et 41,58	25,46 et 41,68	0,05 et 1,49
22,70 et 36,10	22,82 et 36,30	23,60 et 37,39	0,03 et 1,51	23,00 et 36,21	23,33 et 36,85	0,08 et 1,25
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp toiture ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
22,52 et 41,27	19,60 et 35,43	19,92 et 36,07	0,04 et 1,14	23,56 et 40,47	23,33 et 40,11	0,01 et 2,14
25,70 et 41,50	26,17 et 41,17	26,18 et 41,42	0,01 et 2,12	26,11 et 41,62	25,97 et 42,79	0,11 et 1,27
22,70 et 36,10	22,76 et 36,52	23,75 et 36,98	0,15 et 1,47	22,80 et 36,34	24,19 et 36,99	0,12 et 1,73

* $T_{(mes)}$: température mesurée.

* $T_{(sim)}$: température simulée.

5.3.2 Période hivernale

5.3.2.1 Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) durant la période du 29 au 31 décembre 2020

Après avoir validé les mesures pour les deux appartements pendant la saison estivale sans ventilation naturelle, nous allons valider les mesures pour la période hivernale. L'évolution de la température intérieure mesurée et simulée de l'appartement PP pendant la période du 29 au 31 décembre est illustrée à la figure 5.21. Nous observons que les deux températures augmentent et diminuent au même rythme pendant la période de simulation, avec quelques variations enregistrées. En effet, le premier jour de l'année (29 décembre), la température de l'air intérieur mesuré varie entre 14,9 et 16 °C avec un maximum à 13 heures, tandis que la température de l'air intérieur simulé varie entre 14,23 et 16,48 °C avec un maximum à 14 heures. La différence de température entre les températures mesurées et simulées pendant la journée est inférieure à 1oC. Lors du deuxième jour, nous constatons que la température de l'air intérieur mesuré varie entre 14 et 15,70 °C, avec un maximum à 16 heures, alors que la température de l'air intérieur simulé varie entre 14,32 et 16,48 oC, avec un maximum à 17 heures.

Il est constaté que la valeur maximale de la température de l'air extérieur est obtenue à 9h du matin avec une valeur de 7.1oC. Pendant la journée du 31 décembre, la température de l'air intérieur mesuré varie entre 13,4 et 16,8 °C avec un maximum à 16 heures, tandis que la température de l'air intérieur simulé varie entre 13,66 et 15,8 °C avec un maximum à 15 heures. La différence entre ces deux températures varie au cours de la journée entre 0,09 et 1,48 °C. La température de l'air extérieur varie entre 1,34 et 9,6 °C (valeur maximale obtenue à 15 heures).

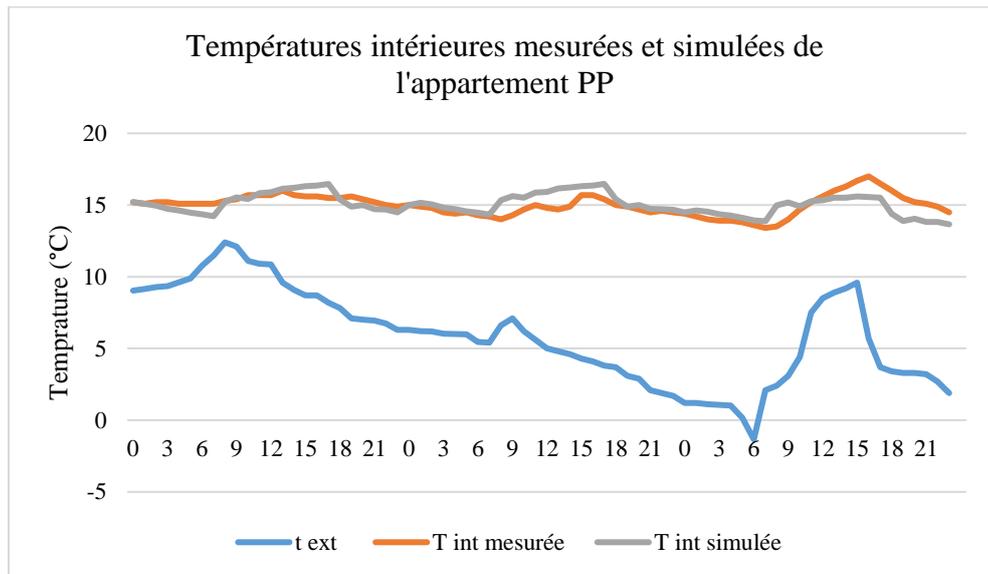


Figure 5.21 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement PP.

5.3.2.2 Variation de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (BPF) durant la période du 29 au 31 décembre 2020

La différence entre les températures mesurées et simulées de l'air intérieur dans l'appartement BPF du 29 au 31 décembre est illustrée à la figure 5.22. Le 29 décembre, la température de l'air intérieur enregistrée varie entre 12,40 et 14,40 degrés Celsius, avec un pic à 15 heures, tandis que la température simulée varie entre 12,63 et 13,26 degrés Celsius, avec un maximum à 15 heures. La différence de température entre ces deux points est comprise entre 0,26 et 1,14 degrés Celsius. La température de l'air extérieur varie au cours de la journée, allant de 6,3 degrés Celsius à 23 heures à 12,4 degrés Celsius à 8 heures.

Le second jour (30 décembre), la température de l'air intérieur mesurée varie entre 11,50 et 14,60 degrés Celsius enregistrée à 16 heures, tandis que la température de l'air simulé oscille entre 11,83 et 14,36 degrés Celsius à 16 heures. En outre, l'écart entre les deux

températures est compris entre 0,02 et 0,93 degrés Celsius. La température de l'air extérieur fluctue entre 1,7 degrés Celsius enregistrés à 23 heures à 7, 1 degrés Celsius enregistrés à 9 heures du matin. Pendant le troisième jour (31 décembre), la température de l'air intérieur relevée par les mesures se situe entre 10,20 et 15,50 degrés Celsius avec un maximum atteint à 16 heures, alors que la température de l'air intérieur simulée se positionne entre 11,05 et 15,24 degrés Celsius avec un maximum obtenu à 16 heures et une variation par rapport à la température mesurée allant de 0,03 à 1,05 degrés Celsius.

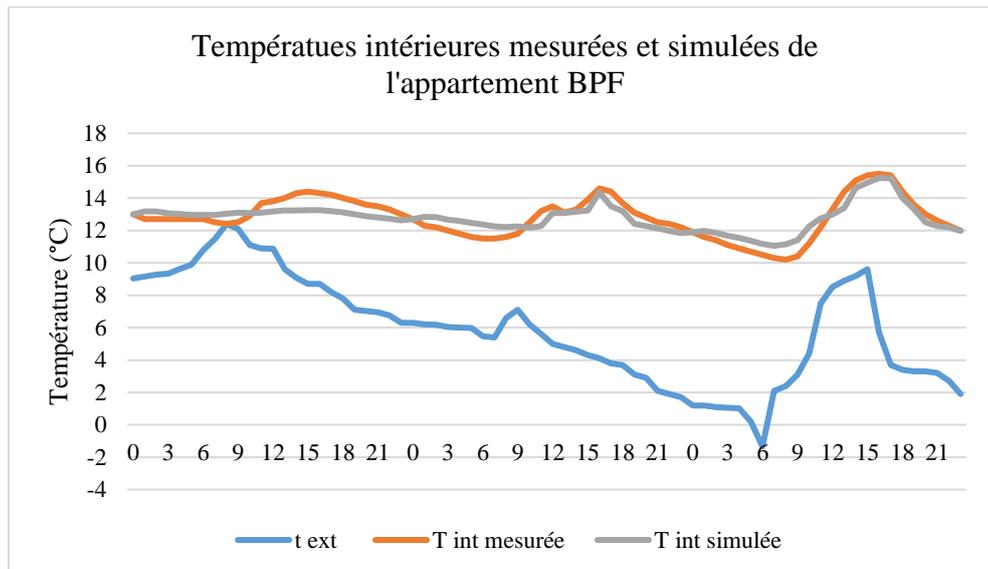


Figure 5.22 Variation des températures de l'air extérieure, intérieure mesurées et simulées durant la période 29-31 décembre 2020 pour l'appartement BPF.

De plus, les Variations de la température (intérieure et extérieure) mesurée et simulée de l'appartement (PP) et (BPF) durant la période du 29 au 31 Décembre 2020 sont récapitulées dans le tableau 5.2.

En période hivernale, les écarts absolus typiques des températures intérieures du logement (PP) varient de 0,02 °C à 1,62 °C. Tandis que les variances absolues pour le logement (BPF) se situent entre 0,02 °C et 1,14 °C. Par conséquent, les températures mesurées et simulées des murs intérieurs et de la surface du toit ne sont pas significatives. Les écarts absolus typiques pour les températures du logement (PP) sont compris entre 0,02 °C et 1,34 °C et entre 0,03 °C et 1,26 °C, respectivement. Quant aux écarts absolus pour le logement (BPF), ils se situent entre 0,02 °C et 1,97 °C et entre 0,02 °C et 1,53 °C. En revanche, les températures de la surface extérieure des murs et des toits sont minimales, qu'elles soient mesurées ou simulées. Les différences absolues des températures des logements (PP) sont en moyenne comprises entre 0,01 °C et 1,41 °C et entre 0,02 °C et 2,04 °C, respectivement,

quant aux écarts absolus pour les logements (BPM), ils varient entre 0,01 °C et 1,10 °C et entre 0,01 °C et 1,73 °C.

Les différences entre les températures intérieures, de surface intérieure et extérieure mesurées et simulées pendant les périodes d'été et d'hiver sont assez faibles, avec des variations entre 0,02°C et 2,15°C pendant toute la période de monitoring, ce qui indique que les données acquises sont parfaitement concordantes et validées.

Tableau 5.3 Variations des températures mesurées et simulées des deux appartements (PP) et (BPF) en période hivernale 29-31 Décembre 2020

Type de logs	Appartement en structure poteau-poutre (PP)			Appartement en béton préfabriquée (BPF)		
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp int mesurée $T_{(mes)}$	Temp int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp int mesurée $T_{(mes)}$	Temp int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
6,3 et 12,4	14,9 et 16	14,23 et 16,48	0,02 et 0,98	12,40 et 14,40	12,63 et 13,26	0,02 et 1,14
1,7 et 7,1	14,0 et 15,70	14,32 et 16,48	0,02 et 1,45	11,50 et 14,60	11,83 et 14,36	0,02 et 0,93
-1,34 et 9,6	13,4 et 17,0	13,66 et 15,6	0,08 et 1,62	10,20 et 15,50	11,05 et 15,24	0,03 et 1,05
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp surfacique int mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
6,3 et 12,4	14,92 et 16,09	14,63 et 15,40	0,02 et 1,18	12,59 et 14,42	11,46 et 15,04	0,02 et 1,24
1,7 et 7,1	14,10 et 15,85	14,31 et 15,15	0,02 et 0,99	11,72 et 14,70	10,77 et 15,22	0,02 et 1,97
-1,34 et 9,6	13,59 et 17,11	13,87 et 16,47	0,07 et 1,34	10,41 et 15,60	9,58 et 16,55	0,02 et 0,95
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp toiture int mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture int simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
6,3 et 12,4	15,25 et 16,30	14,70 et 15,40	0,06 et 1,26	12,69 et 14,68	12,93 et 14,14	0,06 et 0,94
1,7 et 7,1	14,11 et 15,79	14,65 et 15,18	0,03 et 0,97	11,93 à 14,72	12,18 et 14,41	0,02 et 0,73
-1,34 et 9,6	13,85 et 17,22	14,21 et 16,72	0,09 et 1,02	10,65 et 15,84	11,83 et 14,71	0,02 et 1,53
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp surfacique ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp surfacique ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
6,3 et 12,4	6 et 12,39	5,9 et 12,52	0,02 et 0,7	6,69 et 12,84	6,30 à 12,40	0,02 à 0,92
1,7 et 7,1	2,3 et 7,12	2,6 et 8,01	0,02 à 1,14	2,10 et 7,16	1,97 et 6,9	0,01 et 0,68
-1,34 et 9,6	-0,84 et 9,76	-0,95 à 9,33	0,01 et 1,41	-0,6 à 9,81	-1,5 à 10	0,02 et 1,1
Temp ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$	Temp toiture ext mesurée $T_{(mes)}$	Temp toiture ext simulée $T_{(sim)}$	Ecart (ΔT) $T_{(mes)} - T_{(sim)}$
6,3 et 12,4	4,78 et 12,32	5,01 et 12,93	0,03 et 1,26	6,02 et 12,79	6,44 et 12,30	0,02 et 1,73
1,7 et 7,1	2,21 et 7,0	1,59 et 7,21	0,05 et 1,78	2,01 et 6,97	1,93 et 7,00	0,01 et 1,21
-1,34 et 9,6	-1,14 et 10	-0,4 et 9,15	0,02 et 2,04	-0,2 et 9,96	-1,25 et 9,67	0,02 et 1,23

* $T_{(mes)}$: température mesurée.

* $T_{(sim)}$: température simulée.

5.4 Etude des améliorations des performances énergétiques des deux appartements

5.4.1 Evaluation des performances énergétiques des deux appartements à l'état réel

Après avoir validé les résultats obtenus par les mesures, nous allons évaluer par la suite les besoins énergétiques des deux appartements à l'état réel. La figure 5.23 illustre la variation des besoins en chauffage et en climatisation de l'appartement PP. La période du chauffage commence du mois de Novembre au mois de Mai. La consommation maximale

est obtenue en mois de Janvier estimée à 534 kWh et celle minimale en mois de Mai estimée à 65 kWh. La consommation totale du chauffage pendant l'année est estimée à 2330 kWh soit 30.21 kWh/m².an. Cependant la période de climatisation commence du mois de Juin au mois de d'Octobre avec une valeur maximale obtenue en mois d'Aout estimée à 463,7 kWh et une valeur minimale obtenue en moi de Juin estimée à 132,2kWh. La consommation totale de la climatisation est estimée à 1452 kWh soit 18.82 kWh/m².an. La consommation totale de l'appartement est de 3782 kWh soit 49 kWh/m².an. Le logement (PP) répond aux exigences minimales requises par la réglementation thermique algérienne qui sont de l'ordre de 9940 kWh/an.[260].

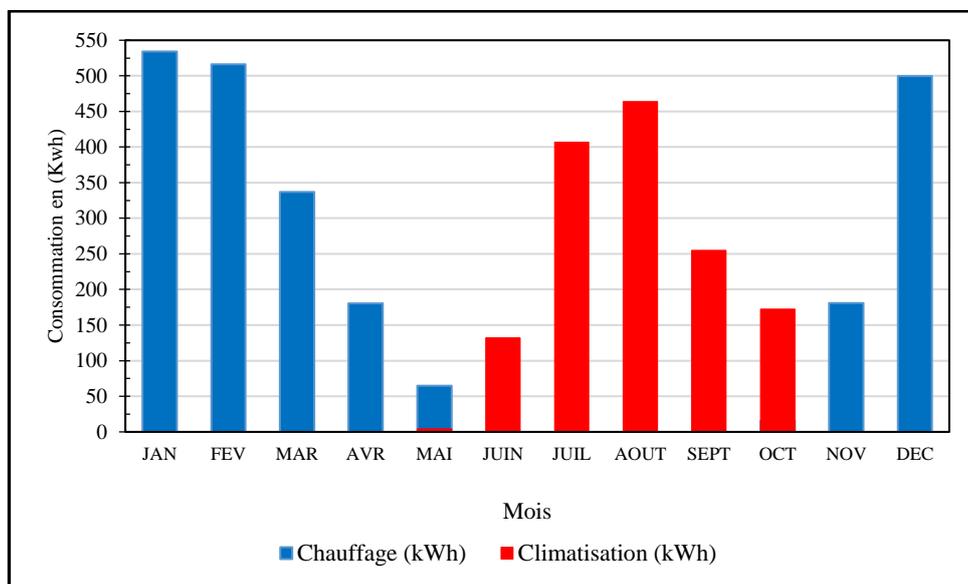


Figure 5.23 Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement PP (cas réel)

La consommation du chauffage et climatisation de l'appartement BPF est illustrée sur la figure 5.24. Nous remarquons que les besoins en chauffage représentent une augmentation considérable comparé à l'appartement PP. En effet, les besoins en chauffage commencent du mois d'Octobre au mois de Mai avec un maximum obtenu en mois de Janvier estimé à 2053 kWh et un minimum obtenu en mois d'Octobre estimé à 158 kWh. La consommation totale du chauffage obtenue est de 9628 kWh soit 92.11 kWh/m².an. Cependant la période de climatisation commence du mois de Juin au mois de Septembre avec un maximum obtenu en mois de Juillet estimé à 632 kWh et un minimum obtenu en mois de Septembre estimé à 143 kWh. Les besoins totaux de la climatisation sont estimés à 1632 kWh soit 15.61 kWh/m².an. La consommation totale de l'appartement est de 13692 kWh soit 134.86 kWh/m².an. Le logement (BPF) ne répond pas aux exigences minimales prévues par la

réglementation thermique algérienne, l'augmentation enregistrée du besoin de consommation d'énergie est de 27,40 %.[260]

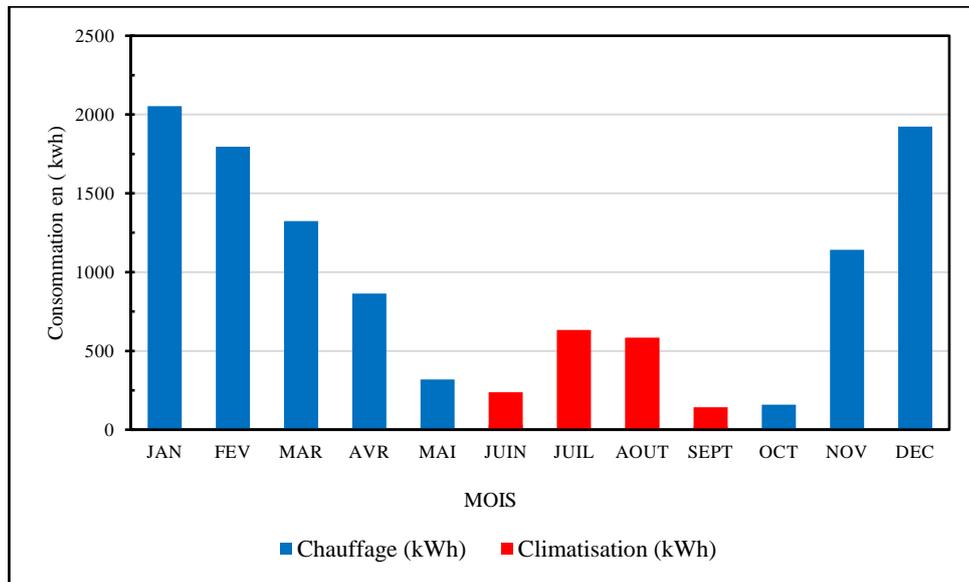


Figure 5.24 Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement BPF (cas réel)

5.4.2 Vérification des performances énergétiques du nanomatériau placé sur la face externe de l'enveloppe de l'appartement (PP)

Après avoir évalué la performance énergétique des deux appartements en situation réelle. Ensuite, nous évaluerons la contribution du nanomatériau lorsqu'il est utilisé comme isolant thermique (pourcentage de 100 %) et l'épaisseur de cet isolant est prise égale à 5 cm.

La figure 5.25 illustre la variation des besoins en chauffage et climatisation de l'appartement (PP) pour ce cas d'étude. Nous remarquons que les besoins en chauffage commencent du mois de Novembre au mois de Mai avec un maximum obtenu le mois de Janvier estimé à 393 kWh et un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 22 kWh. Les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1605 kWh soit 15.28 kWh/m².an avec une réduction de 31.11 %. Ce résultat est similaire à ceux de Suh et al. [261] qui ont trouvé une réduction de 24 % et 33 % de l'énergie de chauffage dans un bureau de poste en Corée. Cependant la période de climatisation commence du mois de Mai au mois d'Octobre avec un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 7 kWh et un maximum obtenu le mois d'Aout estimé à 517 kWh. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1695 kWh soit 16.14 kWh/m².an avec une augmentation par rapport au cas existant estimée à 16.73 %. Les

besoins annuels de l'appartement sont 3300 kWh soit 31.42 kWh/m².an et une réduction de 12.74 % par rapport au cas existant.

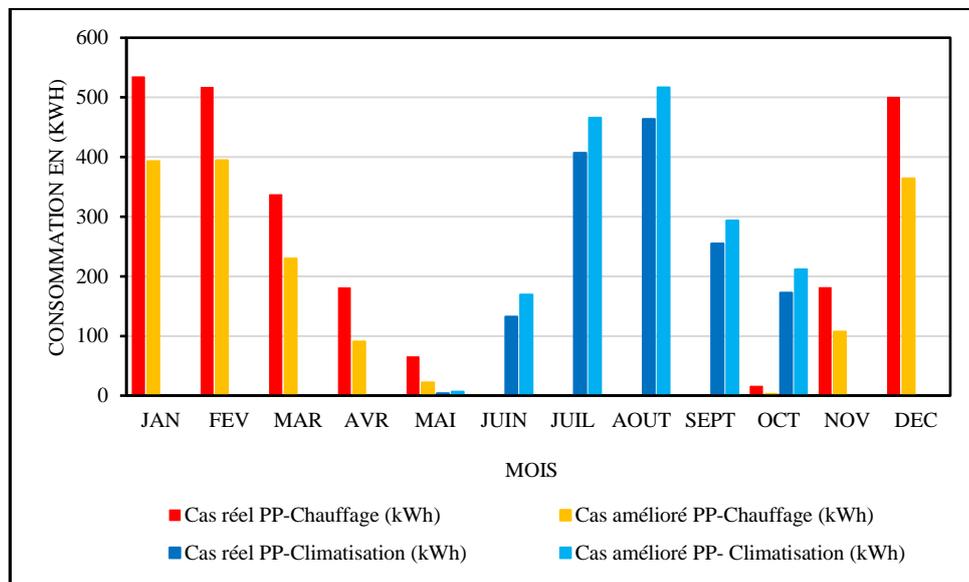


Figure 5.25 Comparaison des consommations mensuelles du chauffage et climatisation entre cas réel et cas amélioré (PP).

5.4.3 Vérification des performances énergétiques de l'isolation en nanomatériau placé sur la face externe de l'enveloppe de l'appartement (BPF)

La figure 5.26 illustre la variation des besoins en chauffage et climatisation de l'appartement (BPF) pour ce cas d'étude. Nous remarquons que les besoins en chauffage commencent du mois de Novembre au mois de Mai avec un maximum obtenu le mois de Janvier estimé à 407 kWh et un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 26 kWh. Les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1654 kWh soit 15.75 kWh/m².an avec une réduction de 85.31 %. Cependant la période de climatisation commence du mois de Mai au mois d'Octobre avec un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 10 kWh et un maximum obtenu le mois d'Aout estimé à 467 kWh. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1444 kWh soit 13.75 kWh/m².an avec une diminution par rapport au cas existant estimée à 11.51 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 3098 kWh soit 29.50 kWh/m².an et une réduction de 72.48 % par rapport au cas existant. Ce résultat est conforme à celui obtenu par Pungercar et, al. [262] qui ont démontré que les résultats de la simulation sur les besoins en chauffage d'un bureau réhabilité permettent une réduction de l'énergie de chauffage allant jusqu'à 77 %.

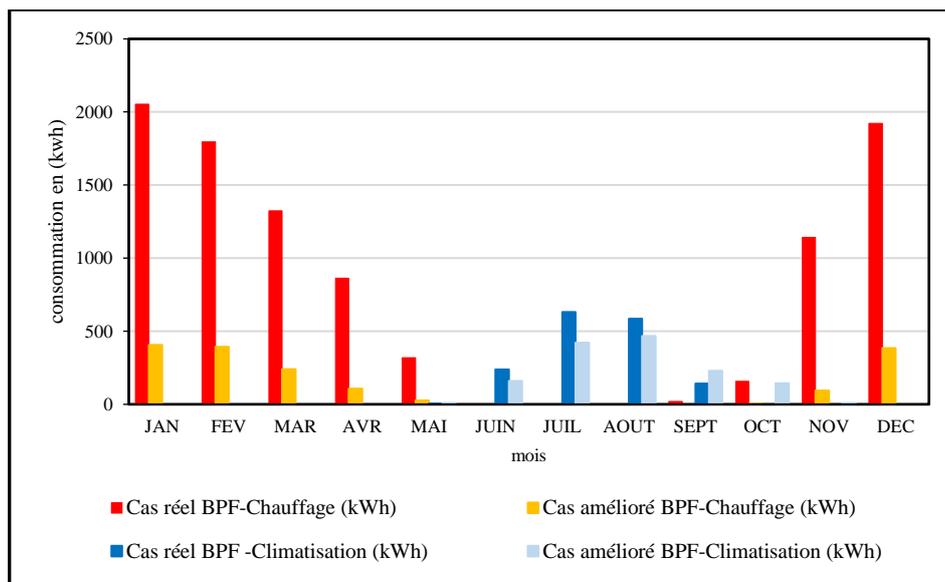


Figure 5.26 Comparaison des consommations mensuelles du chauffage et climatisation entre cas réel et cas amélioré (BPF).

5.4.4 Vérification de la performance énergétique de l'enveloppe du logement (BPF) dopée en nanofibre (NFC) à différents ratios

Après avoir étudié l'influence d'ajout du nanomatériau isolant sur la consommation énergétique, nous allons par la suite déterminer l'impact de l'utilisation du nano composite sur la consommation énergétique de l'appartement en béton préfabriqué (BPF). En première phase la performance de ce matériau est évaluée lorsqu'il est utilisé comme isolant thermique sur la face extérieure des deux appartements. Par la suite le matériau nanocomposite est utilisé comme additif au béton selon plusieurs pourcentages.

La figure 5.27 illustre l'influence de l'ajout de 3 % du matériau nano composite au béton sur la consommation de chauffage et climatisation de l'appartement (BPF). Nous constatons que les besoins en chauffage commencent du mois de Novembre au mois de Mai avec un maximum obtenu le mois de Janvier estimé à 548 kWh et un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 50 kWh. Les besoins annuels du chauffage sont estimés à 2301 kWh soit 21.91 kWh/m².an avec une réduction de 76.1 %. Cependant la période de climatisation débute du mois de Mai au mois d'Octobre avec un minimum obtenu le mois de Mai et un maximum obtenu le mois d'Aout estimé à 480 kWh. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1491 kWh soit 14.33 kWh/m².an avec une diminution par rapport au cas existant estimée à 8.63 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 3792 kWh soit 36.46 kWh/m².an. Ce résultat rejoint celui de Sarri A et al [263] ont montré que les MCP jouent un rôle positif dans la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement. Par exemple, à

Constantine, les MCP permettent une réduction de l'énergie de refroidissement de 8,41 %. Les conditions environnementales externes peuvent imposer une plus grande consommation d'énergie pour maintenir le confort thermique.

Dans le cas d'un pourcentage de 5%, la période de chauffage s'étend de Novembre à Mai. La consommation maximale est obtenue en mois de Janvier estimée à 481 kWh et celle minimale en mois de Mai estimée à 40 kWh. La consommation totale du chauffage pendant l'année est estimée à 1988 kWh soit 18.93 kWh/m².an. Cependant la période de climatisation commence du mois de Mai au mois d'octobre avec une valeur maximale obtenue en mois d'Aout estimée à 476 kWh et une valeur minimale obtenue en moi de Mai estimée à 18 kWh. La consommation totale de la climatisation est estimée à 1507 kWh soit 14.35 kWh/m².an. La consommation totale de l'appartement est de 3495 kWh soit 33.28 kWh/m².an avec une réduction de 69 % par rapport au cas existant.

Après avoir incorporé 10 % du matériau nano composite au béton. Nous constatons que les besoins en chauffage commencent de Novembre à Mai avec un maximum obtenu le mois de Janvier estimé à 328 kWh et un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 18 kWh. Les besoins annuels du chauffage sont estimés à 2301 kWh soit 21.91 kWh/m².an avec une réduction de 76.1 %, résultat qui est aussi vérifier par Pungercar V et al [262]. Cependant la période de climatisation commence du mois de Mai au mois d'Octobre avec un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 22 kWh et un maximum obtenu le mois d'Aout estimé à 466 kWh. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1553 kWh soit 14.6 kWh/m².an avec une diminution par rapport au cas existant estimée à 7.63 %. Ce résultat est démontré par Kämpf et al. [264] qui ont constaté une réduction de 7,1 % des besoins en climatisation dans un climat chaud (Floride, États-Unis). Les besoins annuels de l'appartement sont 2822 kWh soit 26.86 kWh/m².an et une réduction de 75 % par rapport au cas existant.

Selon le pourcentage de 15 %, les besoins en chauffage commencent de Novembre à Mai avec un maximum obtenu le mois de Janvier estimé à 287 kWh et un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 14 kWh. Les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1083 kWh soit 10.31 kWh/m².an avec une réduction de 88.7 %. Cependant la période de climatisation commence du mois de Mai au mois d'Octobre avec un minimum obtenu le mois de Mai estimé à 24 kWh et un maximum obtenu le mois d'Aout estimé à 464 kWh. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1575 kWh soit 15 kWh/m².an avec une diminution

par rapport au cas existant estimée à 3.49 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 2658 kWh soit 25.31 kWh/m².an et une réduction de 76.4 % par rapport au cas existant.

Les résultats comparatifs de la consommation mensuelle de chauffage et de climatisation pour différents cas d'amélioration du logement (BFP) en utilisant le nanomatériau isolant constitué de nanofibres de cellulose issue de noyaux de palmier dattier révèlent que les propriétés thermo physiques établies lors de la caractérisation, ainsi que la présence des nanopores, ont permis de réduire la conductivité thermique par le confinement de l'air contenu à l'intérieur.

Les nanofibres cellulosiques comportent des nanopores composites de structure alvéolaire en nid d'abeille et des colloïdes dans la matrice nanostructurée, ce qui entraîne une très faible conductivité thermique. Les nanoparticules de fibre cellulosique dopés dans le ciment limitent l'absorption d'eau et rendent la surface imperméable, modifiant la composition volumétrique du mélange et le rendant plus respirable ; ceci dépend entièrement de l'augmentation de la porosité capillaire produite par la croissance microstructurale et les hydrates de carbone distribués de manière hétérogène dans la matrice du ciment. Ces agglomérats nodulaires spécifiques aux nanofibres cellulosiques sont utilisés comme renforts dans les nanocomposites.

La conductivité thermique diminue progressivement avec l'augmentation du ratio en nanofibres. Ce résultat est associé à la porosité des nanofibres interconnectées, bien que l'augmentation de la concentration en nanofibres et de la porosité des constituants. En outre l'effet atténuant de la diffusivité thermique dû à l'augmentation de la porosité du nanocomposite et à la structure alvéolaire des nanofibres, se caractérisent par leur interception et leur opposition aux voies de circulation de la chaleur. Plus la valeur de la diffusion thermique est faible, plus la chaleur met du temps à pénétrer dans les nanoparticules.

En effet, la haute efficacité de ce matériau a permis de réduire la transmission de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment pendant l'hiver et vice versa pendant l'été. Il en ressort donc une baisse conséquente des besoins annuels en consommation du logement par rapport à son état initial, notamment avec l'effet des taux de 3 %, 5 % et 15 % du nanocomposite qui témoigne des performances énergétiques élevées permettant la

diminution des besoins en chauffage atteignant le taux de 88 % et de 8 % en climatisation. Le nanomatériau élaboré peut donc servir à l'isolation de l'enveloppe extérieure des bâtiments.

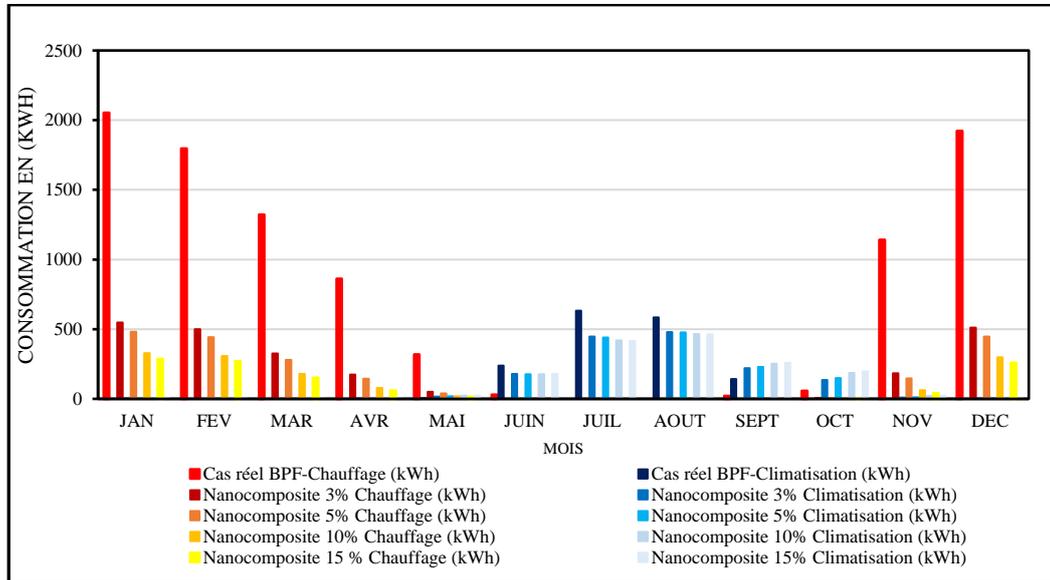


Figure 5.27 Variation mensuelle de la consommation du chauffage et climatisation de l'appartement BPF (Etat brut, 3 %,5%,10%,15% de nano composite).

5.4.5 Comparaison entre les différents cas d'amélioration en nanofibre cellulosique de noyau de dattier pour les deux types de logements (BFP &PP)

Après l'amélioration des cas d'étude réel (appartement PP& BPF) en ajoutant le nanomatériau composé que ce soit en tant qu'isolant thermique avec une épaisseur égale à 5 cm placé sur la face extérieure du bâtiment ou bien en incorporant les nanofibres cellulosiques dans le béton qui constitue l'enveloppe extérieure du logement en (BPF). La contribution du nanomatériau composé sur la réduction de la consommation énergétique en chauffage et en climatisation dans les différents cas de figure se résume comme suit :

D'abord pour l'appartement (PP) en plaçant l'isolant thermique sur la façade extérieure, nous remarquons que les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1605 kWh soit 15.28 kWh/m².an avec une réduction de 31.11 %. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1695 kWh soit 16.14 kWh/m².an avec une augmentation par rapport au cas existant estimée à 16.73 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 3300 kWh soit 31.42 kWh/m².an et une réduction de 12.74 % par rapport au cas existant. Ces résultats sont en accord avec ceux de Hasan A et al [265] et Nematchoua MK et al [266].

Puis pour l'appartement (BPF) en fixant l'isolation thermique sur la face extérieure, les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1654 kWh soit 15.75 kWh/m².an avec une réduction de 85.31 %. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1444 kWh soit 13.75 kWh/m².an avec une diminution par rapport au cas existant estimée à 11.51 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 3098 kWh soit 29.50 kWh/m².an et une réduction de 72.48 % par rapport au cas existant.

Enfin, le matériau nanocomposite est utilisé comme additif au béton avec un pourcentage de 15%, les besoins annuels du chauffage sont estimés à 1083 kWh soit 10.31 kWh/m².an avec une réduction de 88.7 %. Les besoins annuels de climatisation sont estimés à 1575 kWh soit 15 kWh/m².an avec une diminution par rapport au cas existant estimée à 3.49 %. Les besoins annuels de l'appartement sont 2658 kWh soit 25.31 kWh/m².an et une réduction de 76.4 % par rapport au cas existant. Ces résultats correspondent avec d'autre étude comme Nguyen AT et al [267] et Cabeza LF et al [268].

Les résultats de la comparaison de la consommation mensuelle de chauffage et de climatisation pour différents cas d'amélioration des deux types de logements (BFP & PP) en utilisant le matériau isolant formé de nanofibres de cellulose provenant des noyaux du palmier dattier ont révélé que les propriétés thermo physiques de ce nanomatériau préalablement spécifiées lors de la caractérisation à la présence de nanopores qui permettaient de réduire la conductivité thermique en confinant l'air à leur intérieur. Ce résultat nous a incité à utiliser ces nanofibres cellulosiques pour composer un nanomatériau isolant fixé à l'extérieur des deux appartements, ou comme nanofibres intégrées dans le matériau cimentaire composant le mur extérieur de l'appartement BFP. En effet, la haute efficacité de ce matériau a permis de réduire la transmission de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment pendant l'hiver et vice versa pendant l'été. Il en a résulté un pourcentage significatif de réduction des besoins de consommation annuelle des appartements par rapport à leur état initial, avec un accent particulier sur l'effet de 15% du nanocomposite, qui a démontré une haute performance énergétique pour une réduction des besoins de chauffage allant jusqu'à 88%.

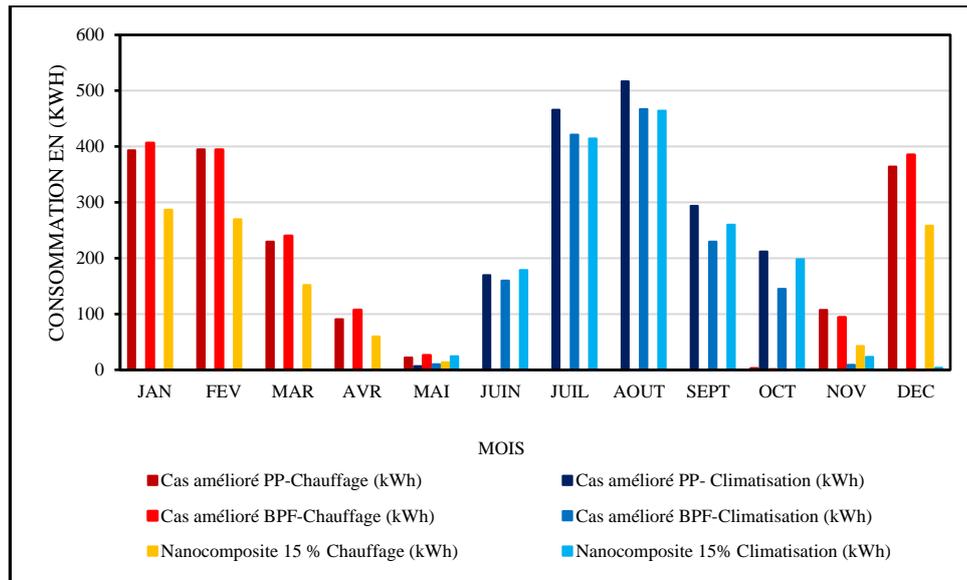


Figure 5.28 Comparaison de la consommation mensuelle du chauffage et climatisation entre les différents cas d'amélioration en nanofibre cellulosique de noyau de dattier pour les deux types de logements (BFP & PP).

5.4.6 Etude de l'influence du matériau nano composite sur le confort thermique

5.4.6.1 Variations de la température opérative de l'appartement PP durant la période estivale

Dans cette partie, nous allons évaluer l'influence de la structure sur le confort thermique à l'intérieur de l'appartement. La température opérative est utilisée afin de mesurer le degré du confort thermique. Pour l'hiver nous allons prendre l'intervalle de la température opérative de 20 °C à 23.5 °C alors que pour l'été l'intervalle est de 23 °C à 26 °C.

La figure 5.29 illustre la variation de la température opérative de l'appartement PP durant la période estivale pour les deux cas existant et isolé avec le nano composite. Nous remarquons que pour le premier cas (existant), nous avons obtenu 866 heures de confort thermique soit 23.55 % alors que pour le cas isolé nous avons obtenu 1206 heures de confort soit 32.08 %.

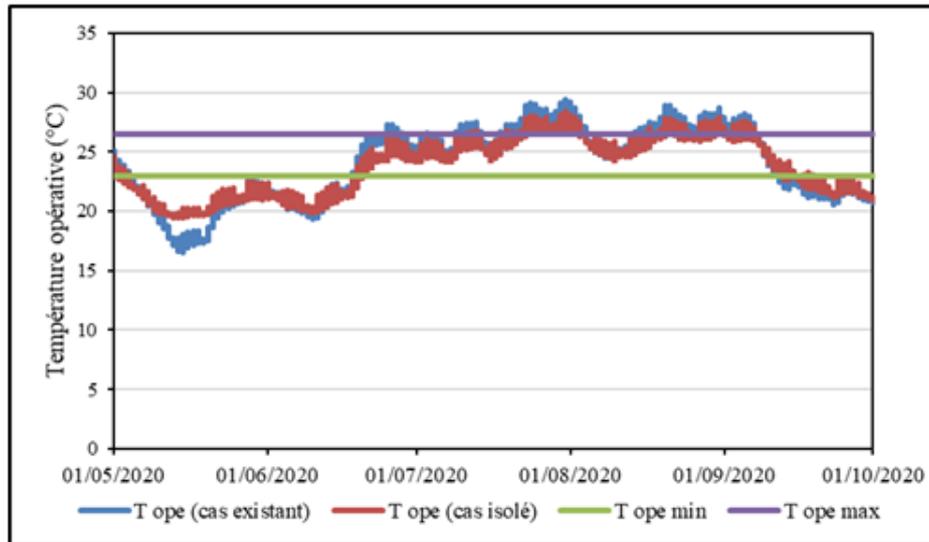


Figure 5.29 Variation de la température opérative pour le cas existant et réel de l'appartement PP pendant l'été

5.4.6.2 Variations de la température opérative de l'appartement BPF durant la période estivale

Pour l'appartement BPF représentée sur la figure 5.30, nous remarquons que sur la période estivale, 959 heures est obtenues dans la zone de confort pour le cas existant soit 26 % alors que pour le cas isolé, nous avons obtenu 908 heures de confort thermique soit 24.7 %. Cela est dû à la structure du béton qui se refroidisse rapidement durant la nuit conduisant ainsi à une baisse de la température opérative comparé au cas isolé.

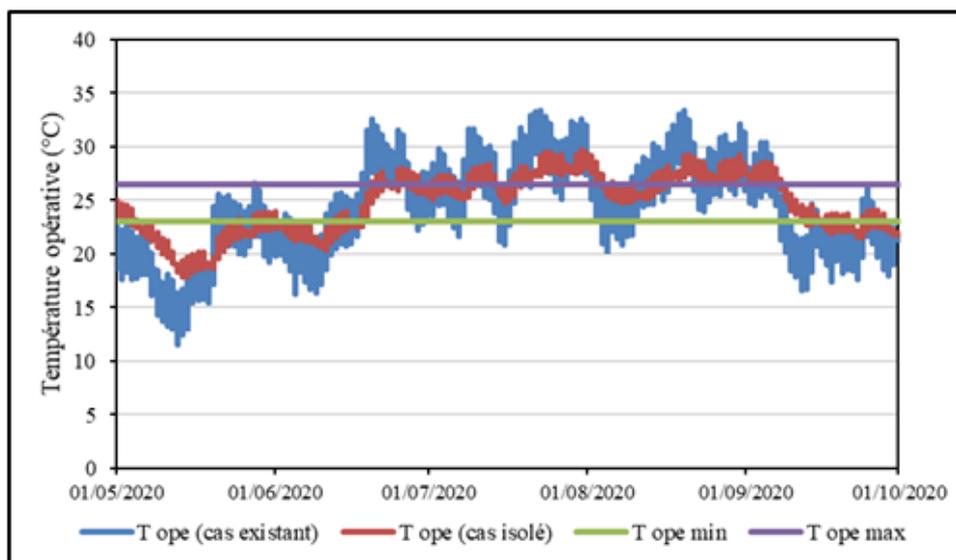


Figure 5.30 Variation de la température opérative pour le cas existant et réel de l'appartement BPF pendant l'été.

5.4.6.3 Variations de la température opérative de l'appartement PP durant la période hivernale

La figure 5.31 montre la variation de la température opérative de l'appartement PP pendant l'hiver pour les deux cas existant et isolé avec le matériau nano composite. Nous remarquons que pour le cas existant, les valeurs obtenues hors zone de confort sont plus élevées que celles pour le cas isolé. En effet, sur la période de l'hiver (entre novembre et avril) nous avons obtenu 1636 heures de confort thermique pour le cas existant soit 32.13 % alors que pour le cas isolé nous avons obtenu 3304 heures de confort thermique soit 65 %.

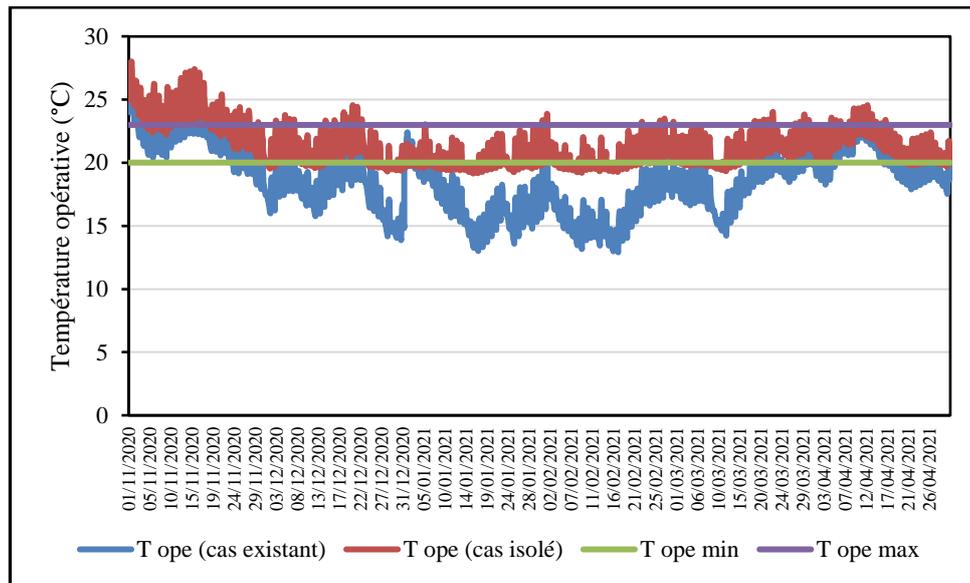


Figure 5.31 Variation de la température opérative pour le cas existant et réel de l'appartement PP pendant l'hiver.

5.4.6.4 Variations de la température opérative de l'appartement BPF durant la période hivernale

Pour le cas de l'appartement BPF (figure 5.32), la zone d'inconfort thermique en hiver est plus élevée que celle de l'appartement PP. en effet pour le cas existant, nous avons obtenu 260 heures de confort thermique soit 5.1 % et 1335 heures pour le cas isolé soit 26.22 %.

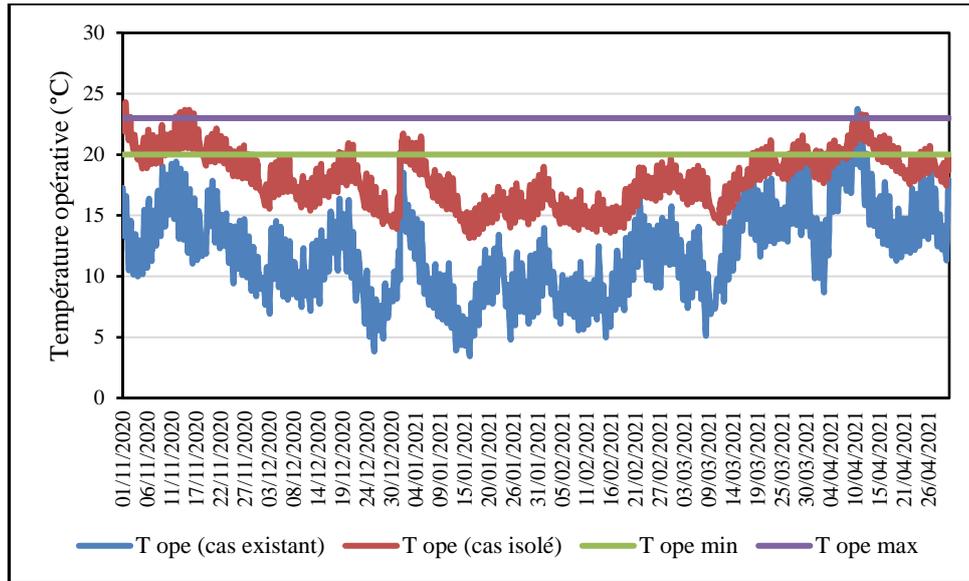


Figure 5.32 Variation de la température opérative pour le cas existant et réel de l'appartement BPF pendant l'hiver

Conclusion

Les résultats de cette étude ont mis en évidence les facteurs qui influencent le besoin de climatisation et de chauffage dans les bâtiments. L'isolation thermique contribue à une amélioration du confort thermique, aussi bien en hiver qu'en été. En hiver, l'enveloppe non isolée facilite la migration de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. De plus, le refroidissement des espaces intérieurs pendant l'été dépend de la composition de l'enveloppe extérieure du bâtiment. La chaleur induite par le rayonnement solaire reste le principal facteur influençant la température de l'air intérieur. La composition de l'enveloppe a clairement un effet sur la consommation énergétique du bâtiment, qu'elle soit plus ou moins importante. La solution la plus efficace consiste à utiliser nano-isolant avec des caractéristiques thermiques supérieures aux matériaux utilisés dans les constructions existantes. Dans une perspective de terrain, il ressort que l'enveloppe du bâtiment a un impact significatif sur la consommation d'énergie.

L'efficacité énergétique du matériau nanocomposite a été évaluée, ainsi que l'effet de son utilisation comme additif au béton à différents pourcentages sur la consommation d'énergie de l'appartement avec une enveloppe extérieure en béton. Par la suite, l'efficacité de ce matériau en tant qu'isolant thermique placé sur la face des enveloppes extérieures été mesurée pour les deux appartements. Après avoir examiné l'impact du pourcentage de nanocomposite sur l'efficacité énergétique de l'appartement BPF, il a été déterminé que 15% des nanocomposites offrent les meilleurs résultats relativement aux autres pourcentages. En effet, les besoins annuels en chauffage ont été réduits de 88,7 % et les besoins annuels en climatisation de 73,49 %, soit une réduction de 76,4 % par rapport au cas réel, dans lequel l'appartement nécessite 2658 kWh soit 25,31 kWh / m².an. Ce résultat répond aux exigences minimales fixées par la réglementation thermique française RT2012.

Par rapport à la situation existante, l'application d'isolation thermique de nanocomposites à l'extérieur de l'enveloppe de l'appartement (BFP) a permis de réduire les besoins annuels de chauffage et de climatisation de 85,31% et 11,51%, respectivement. Les besoins annuels de chauffage et de climatisation ont également été réduits de 31,11% et 16,73%, respectivement, pour l'appartement (PP). Les nanofibres cellulosiques du palmier dattier ont le meilleur rendement énergétique par rapport aux différents isolants simulés, qu'elles soient

appliquées comme additif pour l'enveloppe extérieure en béton ou comme isolant thermique pour l'enveloppe des deux appartements.

Les variations des besoins en chauffage et en climatisation entre les deux appartements sont dues à la différence des températures in situ mesurées en hiver et en été. Ceci démontre que l'isolation thermique en nanofibre cellulosique de l'appartement (BPF) a permis de limiter les pertes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur en hiver et la pénétration du rayonnement solaire de l'extérieur vers l'intérieur en été. Ce résultat confirme l'impact significatif des nanofibres cellulosiques sur la performance énergétique du logement (BPF). Quant au deuxième logement (PP), l'effet de la nano-isolation en fibre cellulosique est considérable pour la réduction des besoins en chauffage par rapport aux besoins en climatisation à cause de la température ambiante stable entre 27,8°C et 29,7°C au-delà de la limite du confort qui reste confinée à l'intérieure du logement ainsi que l'efficacité de l'isolant qui empêche la pénétration et la déperdition en maintenant les variations des températures de l'air intérieure quasiment stable pendant la période estivale.

Le bilan établi par les différentes simulations confirme le rôle prépondérant de l'isolation des enveloppes extérieures dans la stabilisation thermique de l'intérieur du bâtiment. Cependant, la solution d'amélioration la plus pertinente en termes de consommation d'énergie est l'isolation externe de l'enveloppe du bâtiment dans le cas des appartements en PP et BPF ainsi que l'incorporation de nanofibres cellulosiques de noyaux de palmier dattier à raison de 15% dans l'enveloppe en béton préfabriqué. L'utilisation d'une isolation thermique efficace réduit la consommation d'énergie de chauffage, mais en revanche elle augmente la consommation de climatisation. Les procédés passifs comme la ventilation naturelle nocturne et la protection des façades extérieures contre les radiations solaires contribuent sensiblement à la réduction de la consommation d'énergie électrique de la climatisation pendant l'été pour les appartements étudiés. La combinaison des deux solutions (isolation thermique améliorée et ventilation naturelle) permet une diminution significative des besoins en climatisation durant l'été.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

De nombreux chercheurs du XXI^e siècle étudient le développement durable dans le sens de la gestion des ressources naturelles à des fins économiques, ce qui inclut le contrôle de leur utilisation et l'influence sur leur transformation environnementale. Devant la forte raréfaction attendue des combustibles fossiles, notamment du pétrole, et l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone qui en découle, la production de biomasse représente une ressource alternative viable en raison de sa nature renouvelable et de sa diversité. Le développement durable exige une production agricole qui réponde aux besoins de consommation humaine tout en servant de source primaire d'énergie, de produits chimiques et de matériaux composites. Le défi actuel consiste à maintenir le confort des utilisateurs tout en réduisant la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Pour y parvenir, il est important d'intégrer l'efficacité énergétique dans la conception des projets, de créer de nouveaux produits et d'évaluer les systèmes structurels.

La démarche générale de cette étude visait à évaluer l'utilisation des nanofibres des noyaux de palmier dattier comme alternative aux matériaux isolants utilisés dans le secteur de la construction en Algérie. Pour atteindre cet objectif, des matériaux biosourcés pour une variété d'applications à faible coût peuvent être créés en combinant les nanoparticules contenues dans ces déchets avec les différents produits cimentaires destinés au secteur du bâtiment. L'intégration des nanoparticules de noyaux de palmier dattier dans une matrice de ciment nécessite une bonne compréhension des propriétés physiques, chimiques, thermiques et mécaniques de la matrice. Ainsi, la première phase de l'étude expérimentale a été consacrée à la caractérisation des noyaux de palmier dattier de la variété deglat Noor récoltés dans les palmeraies de la zone orientale de la Wilaya de Biskra.

Les nanotechnologies semblent être la technologie potentielle la plus prometteuse de l'humanité. En raison des propriétés particulières de la matière à l'échelle nanométrique, la science des nanotechnologies ouvre de nouveaux horizons avec des applications jusqu'alors inconnues. À l'heure actuelle, la recherche et le développement des nanotechnologies sont en plein essor dans le secteur de l'énergie. En fait, cette planète est désormais un laboratoire de créativité, en raison de l'urbanisation et de la nécessité de minimiser les impacts négatifs sur le patrimoine et le climat. L'ampleur des innovations actuelles dépasse largement la complexité de leur mise en œuvre. Elle a le potentiel d'être un terrain fertile pour des développements dans la régulation de la matière à l'échelle atomique et moléculaire.

Ces matériaux nanotechnologiques présentent des caractéristiques techniques originales très intéressantes qu'il convient désormais de comprendre dans le cadre des nouvelles règles de construction.

Selon les différentes études, le gisement le plus important se situe dans le domaine du bâtiment, plus précisément au niveau des enveloppes extérieures, et elles distinguent également les différentes opérations de rénovation. Par conséquent, la rénovation énergétique serait un levier essentiel pour diminuer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. La réhabilitation énergétique complète passe désormais par le développement de nouveaux matériaux et composants avec des performances thermiques optimales par rapport aux matériaux existants. L'amélioration du comportement et des performances thermiques des enveloppes de bâtiments est essentielle pour réduire la consommation d'énergie nécessaire pour les bâtiments neufs et même pour les rénovations.

Les solutions dites passives sont à privilégier dans cette perspective. Les problèmes de surchauffe sont dus à l'utilisation intensive de vitrages dans les façades des bâtiments modernes, qui sont plus aigus dans les climats tempérés et froids. En hiver, la structure légère est une source de perte de chaleur et d'isolation contre le froid. Ensuite, dans les constructions modernes, l'utilisation extensive de moyens mécaniques de contrôle thermique est utile pour obtenir ces microclimats souhaitables. En revanche, l'utilisation de mécanismes artificiels pour réguler la température ambiante du bâtiment a une incidence directe sur la consommation d'énergie du bâtiment. Cette méthode consomme de l'énergie et pollue l'environnement en libérant du CO₂.

Le secteur énergétique algérien a connu un essor important ces dernières années, le plaçant à l'épicentre d'un enjeu majeur, celui du développement durable. Le secteur de la construction en Algérie subit un problème climatique considérable, ainsi qu'un manque d'adaptation des constructions au contexte climatique local, ce qui entraîne des conditions désagréables, ainsi qu'une utilisation excessive d'énergie au cours de l'année avec des conséquences environnementales négatives. La seule façon d'assurer ce confort est d'optimiser les critères thermiques des enveloppes des bâtiments, et, bien sûr, de concevoir le bâtiment en tenant compte des paramètres de l'architecture bioclimatique. L'enveloppe sert de bouclier thermique, créant un microclimat interne insensible aux changements du climat extérieur. Les caractéristiques du filtre sont influencées par la composition de l'enveloppe.

Les biopolymères dérivés de matières premières agricoles renouvelables peuvent servir de base à un processus de fabrication sûr et écologique capable de concurrencer les matériaux de construction dérivés du pétrole, qui dominent actuellement le marché. La synthèse mécanique et/ou le broyage sont deux des méthodes les plus couramment utilisées pour produire des nanofibres à partir de diverses sources naturelles. Les vitesses de rotation élevées des différents broyeurs combinées à l'impact similaire du cisaillement ont entraîné la défibrillation des nanoparticules de cellulose d'une taille inférieure à 80 nm. Les résultats de cette étude montrent le potentiel de production de nanofibres cellulosiques à partir de déchets de biomasse de palmier dattier.

Le broyage à billes sur 24 heures a permis d'isoler avec succès des nanofibres de cellulose à cristallinité maximale (NFCn). En outre, la spectroscopie infrarouge traitée par Fourier (FT-IR), la microscopie électronique à balayage (MEB) et l'étude par spectroscopie de dispersion d'énergie (EDX) des déchets de palmier dattier ont été utilisées pour caractériser la microstructure et la composition chimique. Les résultats expérimentaux de la diffraction des rayons X (XRD) ont indiqué que les nanofibres de cellulose ont un haut degré de cristallinité et une taille moyenne comprise entre 3,4 et 6,3 nm.

Cette recherche expérimentale porte sur l'utilisation de nanofibres cellulosiques de palmier dattier comme renforcement dans une matrice de ciment. L'objectif de cette étude est de déterminer la faisabilité de l'utilisation d'un nouveau biocomposite (NFCn) comme matériau d'isolation thermique dans les bâtiments. De plus, la conductivité thermique des composites est diminuée lorsque la concentration de NFC dans la matrice de ciment est augmentée. Il est intéressant de noter que l'effet des nanopores du NFC sur les propriétés thermiques est tout aussi prononcé que la concentration du NFC. Ensuite, il a été démontré expérimentalement que l'ajout de 15% de NFC a créé un composite avec une conductivité thermique de $0,073 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Ces valeurs se situent dans le spectre de conductivité thermique d'un certain nombre de matériaux isolants. Par conséquent, les valeurs de conductivité thermique du ciment/NFC avec une concentration de 15 % en nanofibre cellulosique de noyau de palmier dattier (NFCn) peuvent être retenues comme la composition optimale pour une meilleure efficacité.

La résistance à la compression et à la flexion des biocomposites à base de matrice cimentaire diminue lorsque la teneur en nanofibres augmente. En fonction des différents dosages, les matériaux en ciment à base de NFC3 sont plus performants que les autres

échantillons tels que le NFC5, le NFC10 et le NFC15 en termes de résistance à la compression et à la flexion. De plus, le ciment composite / NFC présente des propriétés mécaniques supérieures (résistance à la compression et à la flexion) par rapport aux autres matériaux à base de fibre naturelles comme les fibres de bois et de paille. Ainsi, l'ajout de 5% de NFC à la matrice de ciment permet d'obtenir un composite aux excellentes propriétés thermiques et mécaniques.

En outre, les nanofibres cellulosiques de noyaux de palmier dattier ont une conductivité thermique de $0,042 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui les rend idéales pour être utilisées comme matériau isolant sur les murs des bâtiments. L'ajout de nanofibres à la matrice de ciment augmente la résistance thermique du nanocomposite tout en diminuant sa résistance mécanique. Les expériences thermiques sur les nanofibres montrent qu'elles peuvent être utilisées comme matériaux d'isolation thermique en raison de leur impact environnemental et économique favorable. Les noyaux de palmier dattier, par rapport à d'autres matériaux naturels, sont un excellent candidat pour le développement de matériaux isolants durables et efficaces.

Pour répondre aux exigences technologiques de la construction, de l'orientation et de la forme des bâtiments, la recherche in situ suggère que les propriétés de l'enveloppe extérieure du bâtiment ont un impact direct sur la consommation d'énergie. L'étude a démontré qu'une méthode de réhabilitation réussie est essentielle pour optimiser les propriétés physiques et thermiques des matériaux de l'enveloppe extérieure. Cette solution permet d'éviter les pertes de chaleur en hiver et les pénétrations en été. L'enveloppe est essentielle pour préserver la chaleur interne d'un bâtiment tout en maintenant le confort intérieur. Cette fonction est déterminée par la composition des matériaux qui composent l'enveloppe extérieure, qui agit comme une barrière, empêchant le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

Les résultats indiquent que le matériau de l'enveloppe extérieure contribue au maintien d'une température ambiante presque constante pendant l'été, en particulier dans les constructions conventionnelles examinées (poteau-poutre). En outre, l'étude a révélé que l'intérieur de la structure préfabriquée est inconfortablement chaud en raison de la surchauffe causée par le rayonnement solaire qui traverse la façade, faute de protection solaire appropriée. L'inconfort thermique enregistré a été atténué par l'évacuation de l'excès de chaleur pendant la nuit ; à ce stade, il a été établi que pendant la saison estivale, l'habitation étudiée construite en éléments préfabriqués est une source de chaleur excessive émise de l'extérieur vers l'intérieur, interférant avec le confort thermique de l'occupant.

La validation des résultats de cette investigation par le programme "TRNSys17" en termes de température intérieure de l'air ambiant conforte la contribution essentielle de l'isolation thermique à la préservation de la balance thermique intérieure. En outre, elle confirme l'efficacité et la pertinence des mesures in situ, ainsi que leur commodité de manipulation. Au cours de la simulation, différentes techniques permettant de développer l'efficacité énergétique de ces deux logements ont été présentées. En utilisant le modèle TRNsyst17 pour simuler divers paramètres, il a été déterminé que l'isolation extérieure, notamment en biomatériaux, est une option viable pour améliorer le confort thermique et réduire la consommation d'énergie associée à la climatisation et au chauffage.

L'objectif de ce travail est de tester les solutions proposées en faisant varier les proportions de l'isolant en nanofibre cellulosique, ainsi que son épaisseur et son emplacement par rapport à l'enveloppe extérieure, afin de déterminer la solution optimale pour réduire significativement la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation tout en préservant le confort thermique. Le compromis idéal pour réduire les surconsommations énergétiques consiste à recouvrir l'enveloppe extérieure du bâtiment avec un matériau isolant aux propriétés thermiques efficaces pour lutter contre les températures extérieures élevées et les empêcher de pénétrer à l'intérieur du bâtiment.

La mise en œuvre de ces différentes mesures a permis de réduire les consommations d'énergie jusqu'à 75%. Les nanofibres cellulosiques de noyaux de palmier dattier présentent l'isolation la plus efficace, avec une conductivité thermique de $0,042 \text{ W/m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, la valeur la plus basse des isolants retenus après celle de l'aérogel. Le choix de cet isolant s'est donc porté sur sa faible conductivité thermique et son emplacement optimal à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, ce qui a permis de réduire considérablement la consommation d'énergie par l'élimination des ponts thermiques situés entre la structure et l'enveloppe.

Par rapport à la situation existante, l'application d'isolation thermique de nanocomposites à l'extérieur de l'enveloppe de l'appartement (BFP) a permis de réduire les besoins annuels de chauffage et de climatisation de 85,31% et 11,51%, respectivement. Les besoins annuels de chauffage et de climatisation ont également été réduits de 31,11% et 16,73%, respectivement, pour l'appartement (PP). Les nanofibres cellulosiques du palmier dattier ont le meilleur rendement énergétique par rapport aux différents isolants simulés, qu'elles soient appliquées comme additif pour l'enveloppe extérieure en béton ou comme isolant thermique pour l'enveloppe des deux appartements.

La disponibilité et le caractère économique des noyaux de palmier dattier semblent être une excellente opportunité pour suggérer une solution concrète pour de nouveaux matériaux de construction durables. Dans le cadre du développement durable, le recyclage des nanofibres de cellulose extraite du noyau de la datte permet de développer la filière des matériaux isolants utilisés dans le domaine de la construction, renforçant ainsi la démarche de gestion et de valorisation des déchets issus de l'extraction des ressources naturelles et développant son exploitation dans le domaine de la construction. Enfin, nous précisons que les nanofibres cellulosiques développées dans ce travail sont entièrement biosourcées et possèdent donc un important potentiel en termes d'isolation thermique, mais également pour une gamme variée d'autres applications.

Les futurs axes de recherche

Les nano-isolations thermiques sont donc des nanocomposites complexes issus de ressources renouvelables qui sont nécessaires pour les enveloppes extérieures des bâtiments. Certaines questions restent cependant sans réponse, et leurs résolutions sont susceptibles de générer de nouvelles pistes de recherche.

L'étude du compromis entre les propriétés mécaniques et thermiques des nanofibres cellulosiques est une piste intéressante. Par exemple, l'ajout de nanoparticules telles que des nanocristaux de cellulose pourrait améliorer les propriétés mécaniques des aérogels sans altérer leurs propriétés d'isolation thermique.

En outre, les recherches futures dans les secteurs résidentiel et tertiaire devraient examiner les effets de l'amélioration des caractéristiques des toits et des planchers sur le rendement thermique et l'efficacité énergétique. En outre, l'utilisation d'Aérocéllulos comme isolants thermiques hybrides dans les murs-rideaux représente une opportunité intéressante pour rectifier les déséquilibres thermiques induits par la conductivité thermique élevée des murs en verre et viser à améliorer l'efficacité énergétique de ce mode de construction contemporain.

Envisager également de nouvelles pistes de recherche dans l'application de la nanotechnologie à la peinture. De plus, les nanoparticules peuvent être utilisées pour augmenter la conductivité thermique du revêtement, agissant comme une première ligne de défense contre tous les phénomènes naturels externes. Par conséquent, plusieurs études se sont concentrées sur l'intégration de nanoparticules organiques dans la matrice polymère en

peinture afin d'améliorer ses propriétés thermiques. En raison de leur faible conductivité thermique, ces revêtements hybrides composés de nanomatériaux conservent de faibles températures de surface.

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, qu'ils soient expérimentaux ou théoriques, peuvent être utilisés pour optimiser les propriétés des nanocomposites de noyau de palmier dattier. Ces caractéristiques pourront être utilisées pour construire les enveloppes extérieures des constructions. Les aspects de l'isolation thermique examinés sont cruciaux à comprendre et à traiter efficacement pour les entreprises qui envisagent de créer une start-up en vue de produire des isolants thermiques à base de nanoparticules pour les bâtiments à haut rendement énergétique dans les années à venir. Enfin, nous espérons avoir contribué à une meilleure compréhension de l'activité de ces nanomatériaux et à l'avancement des connaissances scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Jayr E. Nouvelles matières premières d'origine animale ou végétale pour la construction. Technical report, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB); 2010.
- [2] Dutreix, A., Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments. 2010.
- [3] DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [4] El Hassar SMK, Amirat M, Silhadi K, Souici M, Sakhraoui S. Réglementation thermique algérienne des bâtiments : Contribution à la définition de nouveaux coefficients réglementaires. Revue française de génie civil. 2002 ;6(4) :661-81.
- [5] Dupré B. Le végétal en construction-Bâtir durable avec des ressources de proximité. Techniques de l'ingénieur-Environnement et construction, base documentaire : TIB552DUO (ref article : c8104). 2014.
- [6] González MJ, Navarro JG. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. Building and environment. 2006;41(7):902-9.
- [7] Rudaz C, Budtova T. Rheological and hydrodynamic properties of cellulose acetate/ionic liquid solutions. Carbohydrate polymers. 2013;92(2):1966-71.
- [8] Liu R, Yu H, Huang Y. Structure and morphology of cellulose in wheat straw. Cellulose. 2005;12(1):25-34.
- [9] Zucchelli A, Focarete ML, Gualandi C, Ramakrishna S. Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials. Polymers for Advanced Technologies. 2011;22(3):339-49.
- [10] García-González C, Alnaief M, Smirnova I. Polysaccharide-based aerogels—Promising biodegradable carriers for drug delivery systems. Carbohydrate Polymers. 2011;86(4):1425-38.
- [11] Soares A, Júlio M, Flores-Colen I, Ilharco L, De Brito J, Gaspar Martinho J, editors. Water-resistance of mortars with lightweight aggregates. Key Engineering Materials; 2015: Trans Tech Publ.
- [12] [en ligne] www.aprue.org.dz
- [13] Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, La Revue de l'Habitat, n°6, janvier 2011.
- [14] ENERATA, consommation mondiale d'énergie et statistiques, année 2019.
- [15] Ministère de l'énergie - BILAN ENERGETIQUE NATIONAL- de l'année 2019. DGP/DES/SDS juillet 2020.
- [16] APRUE La consommation énergétique finale -chiffre clés année 2017.

- [17] [En ligne] www.aprue.org.dz
- [18] Benhalilou K. « Impact de la végétation grimpante sur le confort intérieur dans les bâtiments », Thèse de magister, Constantine 2009.
- [19] Belili H. « Evaluation de la performance énergétique d'un équipement réhabilité dans un climat semi-aride (cas d'étude : bâtiment ex Comamo à Constantine) », Thèse de magister, Constantine 2017.
- [20] Medjellekh D. « Rôle de l'inertie thermique du matériau sur Le confort Hygrothermique du bâtiment », Thèse de magister, Constantine 2006.
- [21] Müller A, Leydolph B, Stanelle K. Recycling Mineral Wool Waste-Technologies for the Conversion of the Fiber Structure, Part 2. *Interceram*. 2010 ;59(1) :39-44.
- [22] Jedidi M, Benjeddou O. *La thermique du bâtiment : Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de clim* : Dunod ; 2016.
- [23] Demirel B. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*. 2013; 40:306-13.
- [24] Jelle B, Kalnæs S. Phase change materials for application in energy-efficient buildings. *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting*. 2017:57-118.
- [25] Limam A, Zerizer A, Quenard D, Sallee H, Chenak A. Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings*. 2016; 116:89-95.
- [26] Le Barbenchon L, Kopp J-B, Girardot J, de Montbrun A, Quinton R, Viot P, editors. *Influence de fibres courtes sur la microstructure et comportement mécanique d'un liège aggloméré*. 21ème Journées Nationales sur les Composites ; 2019.
- [27] Fedullo D. *Le grand livre de l'isolation* : Eyrolles ; 2013.
- [28] Asdrubali F, D'Alessandro F and Schiavoni S: A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 2015; 4:1–17.
- [29] Hüsing N, Schubert U. Aerogels—airy materials: chemistry, structure, and properties. *Angewandte Chemie International Edition*. 1998;37(1-2):22-45.
- [30] Asdrubali F, D'Alessandro F and Schiavoni S: A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 2015 ;4 :1–17.
- [31] Goodhew S and Griffiths R: Sustainable earth walls to meet the building regulation. *Energy and Buildings*. 2005;37(5):451–459.
- [32] Straw bale production in Turkey. Available from <http://www.kerkenes.metu.edu.tr/> [Consulté le : 20-04-2020].

- [33] Yarbrough DW, Wilkes KE, Olivier PA, Graves RS and Vohra A: Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells. *Thermal Conductivity*. 2005; 27:222–230.
- [34] Rodríguez NJ, Yáñez-Limón M, Gutiérrez-Miceli FA, Gomez-Guzman O, Matadamas- Ortiz TP, Lagunez-Rivera L and Vazquez Feijoo JA: Assessment of coconut fibre insulation characteristics and its use to modulate temperatures in concrete slabs with the aid of a finite element methodology. *Energy and Buildings*. 2011; 43:1264–1272.
- [35] Panyakaew S and Fotios S: Agricultural waste as thermal insulation for dwellings in Thailand: preliminary results. In *Proceedings of PLEA 2008: 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*; 22–24 October 2008; Dublin, Ireland.
- [36] Ali M: Coconut fibre-a versatile material and its applications in engineering. In: *Proceedings of Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*; 28–30 June 2010; Ancona, Italy.
- [37] Oushabi A, Sair S, Abboud Y, Tanane O and EL Bouari A: Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: characterization of local date palm fibers (LDPF). *Journal of Materials and Environmental Science*. 2015;6(12):3395–3402.
- [38] G. Peyron, *Cultiver le palmier-dattier : Guide illustré de formation*. Montpellier, France: CIRAD, 2013.
- [39] Lavoine N, Bergström L. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2017;5(31):16105-17.
- [40] Illera D, Mesa J, Gomez H, Maury H. Cellulose aerogels for thermal insulation in buildings: trends and challenges. *Coatings*. 2018;8(10):345.
- [41] Ioelovich M. Cellulose as a nanostructured polymer: a short review. *BioResources*. 2008;3(4):1403-18.
- [42] Isogai A. Wood nanocelluloses: fundamentals and applications as new bio-based nanomaterials. *Journal of wood science*. 2013;59(6):449-59.
- [43] Abitbol T, Rivkin A, Cao Y, Nevo Y, Abraham E, Ben-Shalom T, et al. Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications. *Current opinion in biotechnology*. 2016; 39:76-88.
- [44] Sakai K, Kobayashi Y, Saito T, Isogai A. Partitioned air at microscale and nanoscale: thermal diffusivity in ultrahigh porosity solids of nanocellulose. *Scientific reports*. 2016 ;6(1) :1-7.
- [45] Tonoli G, Teixeira E, Corrêa A, Marconcini J, Caixeta L, Pereira-da-Silva M, et al. Cellulose micro/nanofibres from Eucalyptus kraft pulp: preparation and properties. *Carbohydrate polymers*. 2012;89(1):80-8.
- [46] Jiang F, Hsieh Y-L. Chemically and mechanically isolated nanocellulose and their self-assembled structures. *Carbohydrate polymers*. 2013;95(1):32-40.

- [47] Khalil HA, Bhat A, Yusra AI. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate polymers*. 2012;87(2):963-79.
- [48] Kobayashi Y, Saito T, Isogai A. Aerogels with 3D ordered nanofiber skeletons of liquid-crystalline nanocellulose derivatives as tough and transparent insulators. *Angewandte Chemie International Edition*. 2014;53(39):10394-7.
- [49] Li H, Chen H, Li X, Duan W. Degradation of VIP barrier envelopes exposed to alkaline solution at different temperatures. *Energy and Buildings*. 2015; 93:208-16.
- [50] Villasmil W, Fischer LJ, Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 103:71-84.
- [51] Heinemann U, Kastner R. VIP-PROVE: Vakuuminisolationen paneel-Bewährung in der Baupraxis. *Wissenschaftliche Begleitforschung Schlussbericht Energieoptimiertes Bauen, ViBau Report ZAE*. 2010:2-1210.
- [52] Pacheco-Torgal F, Rasmussen ES, Granqvist CG, Ivanov V, Kaklauskas HA, Makonin S. *Start-up creation: the smart eco-efficient built environment*: Woodhead Publishing; 2016.
- [53] He J, Li X, Su D, Ji H, Wang X. Ultra-low thermal conductivity and high strength of aerogels/fibrous ceramic composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2016;36(6):1487-93.
- [54] Dowson, M., Grogan, M., Birks, T., Harrison, D., Craig, S., 2012. Streamlined life cycle assessment (LCA) of transparent silica aerogel made by supercritical drying. *Applied Energy* 97, 396-404.
- [55] Dowson M, Poole A, Harrison D, Susman G. Domestic UK retrofit challenge: Barriers, incentives and current performance leading into the Green Deal. *Energy Policy*. 2012 ;50 :294-305.
- [56] Dahou DB. *Nouveaux matériaux nanoporeux et bio-hybrides à base de nanoparticules minérales et/ou cellulosiques : relation structure/propriétés* : Université de Bretagne Sud ; 2015.
- [57] Kalnæs, S.E., Jelle, B.P., 2015. Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings* 94, 150e176.
- [58] Park S, Lee Y, Kim YS, Lee HM, Kim JH, Cheong IW, et al. Magnetic nanoparticle-embedded PCM nanocapsules based on paraffin core and polyurea shell. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*. 2014; 450:46-51.
- [59] Jelle, B.P., *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. *Start-Up Creation: The Smart Eco-efficient Built Environment*, 2016: p. 129.
- [60] Gao T, Jelle BP, Gustavsen A. Building integration of aerogel glazings. *Procedia Engineering*. 2016; 145:723-8.

- [61] Jelle, B.P., A. Gustavsen, and R. Baetens, Innovative High Performance Thermal Building Insulation Materials-Todays State-of-the-Art and Beyond Tomorrow. Atlanta, 2012. 2: p. 4.
- [62] Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*. 2011;43(10):2549-63.
- [63] Jelle BP. Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings. *Start-Up Creation: Elsevier*; 2016. p. 129-81.
- [64] McArdle P, Lindstrom P. Emissions of Greenhouse Gases. sl: US Energy Information Administration, 2009. DOE/EIA-0573.
- [65] Fedullo. D, Gallauziaux. T, L'isolation thermique. Eyrolles,2019.
- [66] Ter Minassian H. La réhabilitation thermique des bâtiments anciens à Paris : comment concilier protection du patrimoine et performance énergétique ? *Cybergeog: European Journal of Geography*. 2011.
- [67] Schodek DL, Ferreira P, Ashby MF. Nanomaterials, nanotechnologies and design: an introduction for engineers and architects: Butterworth-Heinemann; 2009.
- [68] Leydecker S. Nano materials: in architecture, interior architecture and design: Walter de Gruyter; 2008.
- [69] Bigley. C and Greenwood. P, "Using silica to control bleed and segregation in self-compacting concrete," *Concrete (London)*, 2003 vol. 37, no. 2, pp. 43-45.
- [70] Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*. 2011;43(10):2549-63.
- [71] Sobolev K, Gutiérrez MF. How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*. 2005;84(10):14.
- [72] Lee CL. A study and evaluation on Seri Wawasan bridge in Putrajaya, Malaysia. 2005.
- [73] Mann. S, "Nanoforum report: Nanotechnology and construction," *European Nanotechnology Gateway*, 2006.
- [74] Nozahic V. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal : application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux : Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II ; 2012.
- [75] Fahma F, Iwamoto S, Hori N, Iwata T, Takemura A. Isolation, preparation, and characterization of nanofibers from oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *Cellulose* 2010;17(5):977–85.

- [76] Fahma F, Iwamoto S, Hori N, Iwata T, Takemura A. Effect of pre-acid-hydrolysis treatment on morphology and properties of cellulose nanowhiskers from coconut husk. *Cellulose* 2011;18(2):443–50.
- [77] Siddiqui N, Mills RH, Gardner DJ, Bousfield D. Production and characterization of cellulose nanofibers from wood pulp. *J Adhesion Sci Technol* 2011;25(6-7):709–21.
- [78] Jonoobi M, Harun J, Tahir PM, Shakeri A, SaifulAzry S, Makinejad MD. Physicochemical characterization of pulp and nanofibers from kenaf stem. *Mater Lett* 2011;65(7): 1098–100.
- [79] Yu M, Yang R, Huang L, Cao X, Yang F, Liu D. Preparation and characterization of bamboo nanocrystalline cellulose. *BioResources* 2012;7(2):1802–12.
- [80] Qua EH, Hornsby PR, Sharma HSS, Lyons G. Preparation and characterisation of cellulose nanofibers. *J Mater Sci* 2011;46(18):6029–45.
- [81] Lu P, Hsieh YL. Preparation and characterization of cellulose nanocrystals from rice straw. *Carbohydr Polym* 2012 ;87(1) :564–73.
- [82] Spence KL, Venditti RA, Habibi Y, Rojas OJ, Pawlak JJ. The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: mechanical processing and physical properties. *Bioresour Technol* 2010;101(15):5961–8.
- [83] Mathew AP, Oksman K, Pierron D, Harmand MF. Fibrous cellulose nanocomposite scaffolds prepared by partial dissolution for potential use as ligament or tendon substitutes. *Carbohydr Polym* 2012;87(3):2291–8.
- [84] Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*. 2011;43(10):2549-63.
- [85] Tenpierik MJ. Vacuum insulation panels applied in building constructions. 2010.
- [86] R. Haj-Ali, R. Eliasi, V. Fourman, C. Tzur, G. Bar, E. Grossman, et al., Mechanical characterization of aerogel materials with digital image correlation, *Microporous Mesoporous Mater.* 226 (2016) 44–52.
- [87] Rigacci A, Achard P, Ehrburger-Dolle F, Pirard R. Structural investigation in monolithic silica aerogels and thermal properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1998; 225:260-5.
- [88] He Y-L, Xie T. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 81:28-50.
- [89] He J, Li X, Su D, Ji H, Wang X. Ultra-low thermal conductivity and high strength of aerogels/fibrous ceramic composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2016;36(6):1487-93.

- [90] Maleki H, Durães L, Portugal A. An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2014; 385:55-74.
- [91] Thapliyal PC, Singh K. Aerogels as promising thermal insulating materials: An overview. *J Mater*. 2014;2014(10).
- [92] He J, Li X, Su D, Ji H, Wang X. Ultra-low thermal conductivity and high strength of aerogels/fibrous ceramic composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2016;36(6):1487-93.
- [93] Buratti C, Moretti E, Belloni E, Agosti F. Development of innovative aerogel-based plasters: preliminary thermal and acoustic performance evaluation. *Sustainability*. 2014;6(9):5839-52.
- [94] Garnier C, Muneer T, McCauley L. Super insulated aerogel windows: Impact on daylighting and thermal performance. *Building and Environment*. 2015; 94:231-8.
- [95] Villasmil W, Fischer LJ, Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 103:71-84.
- [96] Berardi U. The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofiting project. *Applied Energy*. 2015; 154:603-15.
- [97] Abu-Jdayil B, Mourad A-H, Hittini W, Hassan M, Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*. 2019; 214:709-35.
- [98] Li J, Xue P, Ding W, Han J, Sun G. Micro-encapsulated paraffin/high-density polyethylene/wood flour composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009;93(10):1761-7.
- [99] Alkan C, Sari A. Fatty acid/poly (methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage. *Solar energy*. 2008;82(2):118-24.
- [100] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*. 2003;23(3):251-83.
- [101] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*. 1983;30(4):313-32.
- [102] Khudhair AM, Farid MM. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy conversion and management*. 2004;45(2):263-75.
- [103] BASF, 'We create chemistry. <http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/>', (page consultée 04/10/2020).

- [104] Ortiz M, Barsun H, He H, Vorobieff P, Mammoli A. Modeling of a solar-assisted HVAC system with thermal storage. *Energy and buildings*. 2010;42(4):500-9.
- [105] Zhang D, Li Z, Zhou J, Wu K. Development of thermal energy storage concrete. *Cement and concrete research*. 2004;34(6):927-34.
- [106] Bentz DP, Turpin R. Potential applications of phase change materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29(7):527-32.
- [107] Gupta, P., Singh, B., Agrawal, A.K., Maji, P.K., 2018. Low density and high strength nano fibrillated cellulose aerogel for thermal insulation application. *Materials and Design* 158, 224–236.
- [108] Li T, Song J, Zhao X, Yang Z, Pastel G, Xu S, et al. Anisotropic, lightweight, strong, and super thermally insulating nanowood with naturally aligned nanocellulose. *Science advances*. 2018;4(3): eaar3724.
- [109] Gupta P, Maji P. Characterization of wood, cork and their composites for building insulation. *Mater Sci and Mater Eng*. 2019;1(1).
- [110] Oushabi A, Sair S, Abboud Y, Tanane O and EL Bouari A: Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: characterization of local date palm fibers (LDPF). *Journal of Materials and Environmental Science*. 2015;6(12):3395–3402.
- [111] Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer MM and Chabannet M: Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibre in hot-dry climate. *Cement & Concrete Composites*. 2005 ;27 :554–564.
- [112] Alawar A, Hamed AM and Al-Kaabi K: Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites: Part B*. 2009 ;40 :601–606.
- [113] Khalil HA, Davoudpour Y, Islam MN, Mustapha A, Sudesh K, Dungani R, et al. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: a review. *Carbohydrate polymers*. 2014; 99:649-65.
- [114] Khalil HA, Bhat A, Yusra AI. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydrate polymers*. 2012;87(2):963-79.
- [115] Nechyporchuk, O.; Belgacem, M. N.; Bras, J., Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products* 2016.
- [116] Pääkkö M, Ankerfors M, Kosonen H, Nykänen A, Ahola S, Österberg M, et al. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules*. 2007;8(6):1934-41.
- [117] Wüstenberg. T, Cellulose and cellulose derivatives in the food industry: fundamentals and applications. John Wiley & Sons, 2014.

- [118] Eichhorn SJ, Dufresne A, Aranguren M, Marcovich N, Capadona J, Rowan SJ, et al. Current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *Journal of materials science*. 2010;45(1):1-33.
- [119] Mariano M, El Kissi N, Dufresne A. Cellulose nanocrystals and related nanocomposites: review of some properties and challenges. *J Polym Sci Part B: Polym Phys* 2014;52(12):791–806.
- [120] Moon RJ, Martini A, Nairn J, Simonsen J, Youngblood J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chem Soc Rev* 2011;40(7):3941–94.
- [121] Abdul Khalil HPS, Bhat AH, Ireana Yusra AF. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: a review. *Carbohydr Polym* 2012; 87:963–79.
- [122] Brinchi L, Cotana F, Fortunati E, Kenny JM. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. *Carbohydr Polym* 2013; 94:154–69.
- [123] Ayrimis N, Jarusombuti S, Fueangvivat V, Bauchongkol P, White R. Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications. *Fibers Polym* 2011;12(7):919.
- [124] Bajwa SG, Bajwa DS, Holt G, Coffelt T, Nakayama F. Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. *Ind Crops Prod* 2011; 33:747–55.
- [125] Chand N, Prajapati SC, Singh RK. Development and characterization of sisal nano fibre reinforced polyolefin composites. *J Sci Res Rev* 2012;1(3):026–32.
- [126] Aprilia NAS, Abdul Khalil HPS, Bath AH, Dungani R, Hossain SMD. Exploring material properties of vinyl ester biocomposites filled carbonized jatropha seed shell. *BioResources* 2014 ;9(3) :4888–98.
- [127] Li W, Wu Q, Zhao X, Huang Z, Cao J, Li J, et al. Enhanced thermal and mechanical properties of PVA composites formed with filamentous nanocellulose fibrils. *Carbohydr Polym* 2014; 113:403–10.
- [128] Rosamah E, Hossain MdS, Abdul Khalil HPS, Wan Nadirah WO, Dungani R, Nur Amiranajwa AS, et al. Properties enhancement using oil palm shell nanoparticles of fibers reinforced polyester hybrid composites. *Advanc Compos Mater* 2016; 23:1–14.
- [129] Kalia S, Dufresne A, Cherian BM, Kaith BS, Averous L, Njuguna J, et al. Cellulose-based bio- and nanocomposites: a review. *Inter J Polym Sci* 2011 2011:1–35.
- [130] Deepa B, Abraham E, Cherian BM, Bismarck A, Blaker JJ, Pothan LA, et al. Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. *Bioresour Technol* 2011 ;102 :1988–97.
- [131] Akil HM, Omar MF, Mazuki AAM, Safiee S, Ishak ZAM, Bakar AA. Kenaf fiber reinforced composites: a review. *Mater Design* 2011; 32:4107–21.

- [132] Chaker A, Mutjé P, Vilar MR, Boufi S. Agriculture crop residues as a source for the production of nanofibrillated cellulose with low energy demand. *Cellulose* 2014;21(6):4247–59.
- [133] Somboon P, Nieminen K, Paulapuro H. Finite element analysis of the fatigue behavior of wood fiber cell walls. *BioResources* 2008;3(4):983–94.
- [134] Basiji F, Safdari F, Nourbakhsh A, Pilla S. The effects of fiber length and fiber loading on the mechanical properties of wood-plastic (polypropylene) composites. *Turk J Agric for* 2010; 34:191–6.
- [135] Wu X, Radovic LR. Inhibition of catalytic oxidation of carbon/carbon composites by phosphorus. *Carbon* 2006 ;44(1) :141–51.
- [136] Bendahou A, Kaddami H, Raihane M, Habibi Y, Dufresne A. Matériaux nanocomposites à base de whiskers de cellulose du palmier dattier. *Rev Roum Chim.* 2009 ;54(7).
- [137] LAHOUIOUI M, FOIS M, IBOS L, GHORBAL A. Etude des performances thermiques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier traitées.
- [138] Boumhaout, M., Boukhattem, L., Hamdi, H., Benhamou, B., & Nouh, F. A. (2017). Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials*, 135, 241-250.
- [139] Abas FO. Re-Use of Date Palm Wastes to Improve Aging of Composite Concrete System. *Iraqi Journal of Science.* 2020:462-71.
- [140] Çetintaş S, Bingöl D. Optimization of Pb (II) biosorption with date palm (*Phoenix Dactylifera L.*) seeds using response surface methodology. *Journal of Water Chemistry and Technology.* 2018;40(6):370-8.
- [141] Amara I, Mazioud A, Boulaoued I, Mhimid A. Experimental study on thermal properties of bio-composite (gypsum plaster reinforced with palm tree fibers) for building insulation. *International journal of heat and technology.* 2017 ;35(1) :576-84.
- [142] Djoudi T, Hecini M, Scida D, Djebloun Y, Guerira B. Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier. *Matériaux & Techniques.* 2018 ;106(4) :403.
- [143] Agoudjil B, Benchabane A, Boudenne A, Ibos L, Fois M. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings.* 2011 ;43(2-3) :491-7.
- [144] El BARNAOUI, O. (2016). *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*. CRSTRA, 84.
- [145] DSA, la direction des services agricole (2018) statistique agricole.

- [146] Wang X, Wang H, Hu L-X, Wang E-D. Nanocrystalline Mg and Mg alloy powders by hydriding-dehydriding processing. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20(7):1326-30.
- [147] Machio C, Nyabadza D, Sibanda V, Chikwanda H. Characterization of mechanically alloyed fcc Ti-Mg-based powders. Powder technology. 2011 ;207(1-3) :387-95.
- [148] Chniti S. Optimisation de la bioproduction d'éthanol par valorisation des refus de l'industrie de conditionnement des dattes : Thèse de doctorat, Université Rennes 1 ; 2015.
- [149] Ben-Abbes F. Etude de quelques propriétés chimiques et biologiques d'extraits de dattes Phoenix dactylifera L', Université Ferhat Abbes -SETIF, Thèse de magister 2011.
- [150] NOUI Y. Fabrication et caractérisation des produits alimentaires élaborés à partir de trois variétés de dates (phoenix dactylifera L): Thèse de doctorat, Université de Batna 1-Hadj Lakhder.
- [151] Dammak. I *et al.*, "Huile des noyaux de dattes : effet antioxydant sur des biopsies cutanées in vitro," in *ANNALES DE DERMATOLOGIE ET DE VENEREOLOGIE*, 2007, vol. 134, no. 2, p. P312 : SPPIF-MASSON SERVICE.
- [152] Meroufel-Zenasni B. Adsorption des polluants organiques et inorganiques sur des substances naturelles : Kaolin, racines de Calotropis procera et noyaux de dattes : Université de Lorraine ; 2015.
- [153] Menier P, Menier PM, Vilardebo A., 1973 palmier-dattier. Edition Maisonneuve et la rose. P221.
- [154] Al-Farsi M, Alasalvar C, Al-Abid M, Al-Shoaily K, Al-Amry M, Al-Rawahy F. Compositional and functional characteristics of dates, syrups, and their by-products. Food chemistry. 2007;104(3):943-7.
- [155] Devshony S, Eteshola E, Shani A. Characteristics and some potential applications of date palm (Phoenix dactylifera L.) seeds and seed oil. Journal of the American Oil Chemists' Society. 1992 ;69(6) :595-7.
- [156] Benguedouar A, Mémoire de magister : synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides. Université des Frères Mentouri de Constantine (Algérie), 2013.
- [157] Bounab. B, Automatisation du stockeur et le moteur four ; Rapport de stage à ERCE et SCHB ; Université de Paul Cézanne Aix Marseille. 2006-2007
- [158] COSTA P. Nanomatériaux. Structure et élaboration. Techniques de l'ingénieur Matériaux métalliques. 2001(M4026):M4026. 1-M. 11.
- [159] Liu TY, Ma Y, Yu SF, Shi J, Xue S. The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2011 ;12(4) :586-93.

- [160] Segal L, Creely JJ, Martin Jr A, Conrad C. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. *Textile research journal*. 1959;29(10):786-94.
- [161] Gascoin N, Gillard P, Baudry G. Characterisation of oxidised aluminium powder: Validation of a new anodic oxidation bench. *Journal of hazardous materials*. 2009 ;171(1-3):348-57.
- [162] Sahli M. Synthèse, élaboration et caractérisation des nanocomposites à base de magnésium pour le stockage solide d'hydrogène : Université des Frères Mentouri de Constantine (Algérie) ; 2015.
- [163] [En ligne]. Available: <http://urlz.fr/1UH7>. [Accès le 22 04 2020].
- [164] Serne RJ, Westsik JH. Data Package for Secondary Waste Form Down-Selection—Cast Stone. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States); 2011.
- [165] Rosa, S.M.L., Rehman, N., de Miranda, M.I.G., Nachtigall, S.M.B., Bica, C.I.D., 2012. Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. *Carbohydr. Polym.* 87 (2), 113–1138.
- [166] Nuruddin M, Chowdhury A, Haque S, Rahman M, Farhad S, Jahan MS, et al. Extraction and characterization of cellulose microfibrils from agricultural wastes in an integrated biorefinery initiative. *biomaterials*. 2011; 3:5-6.
- [167] Sain M, Panthapulakkal S. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products*. 2006;23(1):1-8.
- [168] Sun X, Xu F, Sun R, Fowler P, Baird M. Characteristics of degraded cellulose obtained from steam-exploded wheat straw. *Carbohydrate research*. 2005;340(1):97-106.
- [169] Alemdar A, Sain M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues—Wheat straw and soy hulls. *Bioresource technology*. 2008;99(6):1664-71.
- [170] Li R, Fei J, Cai Y, Li Y, Feng J, Yao J. Cellulose whiskers extracted from mulberry: A novel biomass production. *Carbohydrate polymers*. 2009;76(1):94-9.
- [171] Sun R, Tomkinson J, Wang Y, Xiao B. Physico-chemical and structural characterization of hemicelluloses from wheat straw by alkaline peroxide extraction. *Polymer*. 2000;41(7):2647-56.
- [172] Cromme P, Zollfrank C, Müller L, Müller FA, Greil P. Biomimetic mineralisation of apatites on Ca²⁺ activated cellulose templates. *Materials Science and Engineering: C*. 2007;27(1):1-7.
- [173] Papadkis. M, Venuant. M, *Industrie de la chaux du ciment et du plâtre* (1970), DUNOD, Paris.
- [174] Baron. A, "Application de spectrométrie infrarouge à l'étude des ciments", *Bulletin de la société française de céramique*, L 32/D 533, pp. 73-83.

- [175] Tarte. P, *Silicates Industriels*, (1966), pp. 425-438.
- [176] Serne RJ, Westsik JH. *Data Package for Secondary Waste Form Down-Selection—Cast Stone*. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States); 2011.
- [177] Segneanu AE, Gozescu I, Dabici A, Sfirloaga P, Szabadai Z. *Organic compounds FT-IR spectroscopy*: InTech Romania; 2012.
- [178] Abderraouf. A, *Study of the performance of natural fiber-reinforced mortars: valorization of local plants*, Doctoral thesis, A.Belkaid University, Algeria, 2017; 1-116.
- [179] Viehland, D Xu Z. *Observation of a mesostructure in calcium silicate hydrate gels of portland cement*. *Physical review letters*. 1996;77(5):952.
- [180] Chaid. R, Jauberthie. R, Mesbah. H, and Bali. A, "Chemical resistance of HPC preserved in the sulphatic water," in *12th International Congress on the Chemistry of Cement*, held on July 8, 2007, vol. 13.
- [181] Cabane, N. (2004). *Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation* (Saint-Etienne, EMSE).
- [182] Hibouche A. *Sol traités aux liants : performances hydromécaniques et hygrothermiques : application en BTP* : Le Havre ; 2013.
- [183] Boubekour T, Ezziane K, Kadri E-H. *Estimation of mortars compressive strength at different curing temperature by the maturity method*. *Construction and Building Materials*. 2014; 71:299-307.
- [184] Gallucci. E, Zhang.X. Y, and Scrivener. K, "Influence de la température sur le développement microstructural des bétons," *Septième édition des journées Sci. Du regroupement Francoph. Pour la Rech. La Form. Sur le Bét.*, p. 10, 2006.
- [185] Alawar A, Hamed AM, Al-Kaabi K. *Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement*. *Composites Part B: Engineering*. 2009;40(7):601-6.
- [186] Ovando-Medina VM, Vizcaíno-Mercado J, González-Ortega O, Rodríguez de la Garza JA, Martínez-Gutiérrez H. *Synthesis of α -cellulose/polypyrrole composite for the removal of reactive red dye from aqueous solution: Kinetics and equilibrium modeling*. *Polymer Composites*. 2015;36(2):312-21.
- [187] Elnajjar E, Hasan S, Al Zuhair S, Al Omari S, Hilal-Alnaqbi A, editors. *Characterization and chemical composition of UAE date seeds*. 2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA); 2018: IEEE.
- [188] Riahi, B.B. Thayer, A.B. Mammou, A.B. Ammar, M.H. Jaafoura, *Biosorption characteristics of phosphates from aqueous solution onto Phoenix dactylifera L. date palm fibers*, *Journal of Hazardous Materials* 170 (2–3) (2009) 511–519.

- [189] Wang S-D, Scrivener KL. ²⁹Si and ²⁷Al NMR study of alkali-activated slag. *Cem Concr Res* 2003; 33: 769-774.
- [190] Norton AJ, Bennett SJ, Hughes M, Dimmock JPRE, Wright D, Newman G, et al. Determining the physical properties of flax fibre for industrial applications: the influence of agronomic practice. *Ann Appl Biol* 2006; 149:15–25.
- [191] Guzmán P, Fernández F, Graça J, Cabral V, Kayali N, Khayet M, et al. Chemical and structural analysis of *Eucalyptus globulus* and *E. camaldulensis* leaf cuticles: a lipidized cell wall region. *Front Plant Sci* 2014; 5:21–30.
- [192] Ping JL, Green CJ, Bronson KF, Zartman RE, Dobermann A. Identification of relationships between cotton yield, quality and soil properties. *Agro J* 2004; 96:1588–97.
- [193] Jahan MS, Sabina R, Tasmin B, Chowdhury DAN, Noori A, Al-Maruf A. Effect of harvesting age on the chemical and morphological properties of dhaincha (*Sesbania aculeata*) and its pulp ability and bleachability. *BioResources* 2009; 4:471–81.
- [194] Zhu H, Fang Z, Preston C, Li Y, Hu L. Transparent paper: fabrications, properties, and device applications. *Energy Environ Sci* 2014;7(1):269–87.
- [195] Miao C, Hamad WY. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: a critical review. *Cellulose* 2013;20(5):2221–62.
- [196] Deepa B, Abraham E, Cherian BM, Bismarck A, Blaker JJ, Pothan LA, et al. Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. *Bioresour Technol* 2011 ;102 :1988–97.
- [197] Chaker A, Mutjé P, Vilar MR, Boufi S. Agriculture crop residues as a source for the production of nanofibrillated cellulose with low energy demand. *Cellulose* 2014;21(6):4247–59.
- [198] Khiari R, Mhenni MF, Belgacem MN, et al. Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – A comparison with other wood and non-wood fibre sources. *Biores Technol* 2010; 101: 775–780.
- [199] Budruga P, Trandafir V, Albu MG. The effect of the hydration degree on the hydrothermal and thermo-oxidative stability of some collagenous matrices. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2003;72(2):581-5.
- [200] Ouajai S, Shanks R. Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments. *Polymer degradation and stability*. 2005;89(2):327-35.
- [201] Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 2007;86(12-13):1781-8.
- [202] Strezov V, Moghtaderi B, Lucas J. Thermal study of decomposition of selected biomass samples. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2003 ;72(3) :1041-8.

- [203] Nenonene A. *Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage* 2009.
- [204] Alawar A, Hamed AM, Al-Kaabi K. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*. 2009;40(7):601-6.
- [205] Jeguirim M, Dorge S, Trouvé G, Said R. Study on the thermal behavior of different date palm residues: characterization and devolatilization kinetics under inert and oxidative atmospheres. *Energy*. 2012;44(1):702-9.
- [206] Ho Thi TN. *Étude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres de chanvre et de coco : École de technologie supérieure ; 2008.*
- [207] Sedan D. *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite : Limoges ; 2007.*
- [208] Do Thi VV. *Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non : Université de Grenoble ; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville ; 2011.*
- [209] Mansouri. S, Khiari. R, Bettaieb. F, R. E. Abou-Zeid, F. Malek, and F. Mhenni, "Characterization of composite materials based on LDPE loaded with agricultural Tunisian waste," *Polymer Composites*, vol. 36, no. 5, pp. 817-824, 2015.
- [210] Khiari R, Krouit M, Belgacem M, Mauret E, Mhenni M. Préparation et caractérisation d'un matériau composite à base de *Posidonia oceanica*. *Matériaux & Techniques*. 2012 ;100(5) :369-75.
- [211] Li R, Fei J, Cai Y, Li Y, Feng J, Yao J. Cellulose whiskers extracted from mulberry: A novel biomass production. *Carbohydrate polymers*. 2009;76(1):94-9.
- [212] Wang N, Ding E, Cheng R. Thermal degradation behaviors of spherical cellulose nanocrystals with sulfate groups. *Polymer*. 2007;48(12):3486-93.
- [213] Herrera MA, Mathew AP, Oksman K. Comparison of cellulose nanowhiskers extracted from industrial bio-residue and commercial microcrystalline cellulose. *Materials Letters*. 2012; 71:28-31.
- [214] Agoudjil B, Benchabane A, Boudenne A, Ibos L, Fois M. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings*. 2011;43(2-3):491-7.
- [215] Benazzouk A, Douzane O, Mezreb K, Laidoudi B, Quéneudec M. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*. 2008;22(4):573-9.
- [216] Taoukil D, Sick F, Mimet A, Ezbakhe H, Ajzoul T. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials*. 2013; 48:104-15.

- [217] Khedari J, Suttisonk B, Pratinthong N, Hirunlabh J. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*. 2001;23(1):65-70.
- [218] Cherian BM, Pothan LA, Nguyen-Chung T, Mennig Gn, Kottaisamy M, Thomas S. A novel method for the synthesis of cellulose nanofibril whiskers from banana fibers and characterization. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2008;56(14):5617-27.
- [219] Wei K, Lv C, Chen M, Zhou X, Dai Z, Shen D. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing. *Energy and Buildings*. 2015; 87:116-22.
- [220] Manohar K. Experimental investigation of building thermal insulation from agricultural by-products. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2012:227-39.
- [221] Hernández-Olivares F, Bollati M, Del Rio M, Parga-Landa B. Development of cork–gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*. 1999;13(4):179-86.
- [222] Benmansour N, Agoudjil B, Gherabli A, Kareche A, Boudenne A. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*. 2014; 81:98-104.
- [223] Rilem L. Functional classification of lightweight concrete. *Mater Struct*. 1978; 11:281-3.
- [224] Cherki A-b, Khabbazi A, Remy B, Baillis D. Granular cork content dependence of thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of the composite material/granular cork bound with plaster. *Energy Procedia*. 2013; 42:83-92.
- [225] Chikhi M, Agoudjil B, Boudenne A, Gherabli A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*. 2013; 66:267-73.
- [226] Khedari J, Suttisonk B, Pratinthong N, Hirunlabh J. New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*. 2001;23(1):65-70.
- [227] Oushabi A, Sair S, Abboud Y, Tanane O, Bouari A. Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: characterization of local date palm fibers (LDPF). *J Mater Environ Sci*. 2015;6(12):3395-402.
- [228] Cetiner I, Shea AD. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy and buildings*. 2018; 168:374-84.
- [229] Taoukil D, Albouardi A, Ajzoul T, Ezbakhe H. Caractérisation mécanique et Hydrique d'un béton allège avec les résidus de bois. *Revue internationale d'héliotechnique*. 2011(43):1-7.

- [230] Khedari J, Nankongnab N, Hirunlabh J, Teekasap S. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and environment*. 2004;39(1):59-65.
- [231] Djoudi A, Khenfer M, Bali A, Kadri E, Debicki G. Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. *International Journal of Physical Sciences*. 2012;7(21):2845-53.
- [232] Kriker A. *Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec : Alger, Ecole Nationale Polytechnique ; 2005.*
- [233] Pacheco-Torgal F, Jalali S. Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and building materials*. 2011;25(2):582-90.
- [234] Brás A, Gonçalves F, Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 2014; 72:296-308.
- [235] Benmansour N, Agoudjil B, Gherabli A, Kareche A, Boudenne A. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*. 2014; 81:98-104.
- [236] Kriker A, Debicki G, Bali A, Khenfer M, Chabannet M. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites*. 2005;27(5):554-64.
- [237] Brás A, Gonçalves F, Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 2014; 72:296-308.
- [238] Taoukil D, Sick F, Mimet A, Ezbakhe H, Ajzoul T. Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite. *Construction and Building Materials*. 2013; 48:104-15.
- [239] Ferrara L, Ferreira SR, della Torre M, Krelani V, de Silva FA, Toledo Filho RD. Effect of cellulose nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement-based composites. *Nanotechnology in Construction: Springer; 2015. p. 325-30.*
- [240] Chikhi M, Agoudjil B, Boudenne A, Gherabli A. Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings*. 2013; 66:267-73.
- [241] Hamza S, Saad H, Charrier B, Ayed N, Charrier-El Bouhtoury F. Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster-based composites. *Industrial Crops and Products*. 2013; 49:357-65.
- [242] Minet J, Abramson S, Bresson B, Franceschini A, Van Damme H, Lequeux N. Organic calcium silicate hydrate hybrids: a new approach to cement-based nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*. 2006;16(14):1379-83.

- [243] Ashour T, Wieland H, Georg H, Bockisch F-J, Wu W. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Materials & Design*. 2010;31(10):4676-85.
- [244] Panesar D, Shindman B. The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34(9):982-92.
- [245] Benmansour, N, Agoudjil, B, Gherabli, A, et al. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building. *Energy and Buildings*, 2014, vol. 81, p. 98-104.
- [246] Rilem L. Functional classification of lightweight concrete. *Mater Struct*. 1978; 11:281-3.
- [247] Panesar, D. K. et Shindman, B. The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork. *Cement and Concrete Composites*, 2012, vol. 34, no 9, p. 982-992.
- [248] Woloszyn M, May M, Kwiatkowski J. Influence des conditions aux limites sur les mesures de « l'inertie hygrique » des matériaux de construction. 24èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil. 2006.
- [249] European standard UNI EN 15251:2008, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- [250] Tsilingiris, P., Wall heat loss from intermittently conditioned spaces—The dynamic influence of structural and operational parameters. *Energy and Buildings*, 2006. 38(8): p. 1022-1031.
- [251] Song HY, Cheng XX, Chu L, editors. Effect of density and ambient temperature on coefficient of thermal conductivity of heat-insulated EPS and PU materials for food packaging. *Applied Mechanics and Materials* ; 2014 : Trans Tech Publ.
- [252] Miranville F. Contribution à l'étude des parois complexes en physique du bâtiment : modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexes de toitures incluant des produits minces réfléchissants en climat tropical humide : Université de la Réunion ; 2002.
- [253] Nosrati RH, Berardi U. Hygrothermal characteristics of aerogel-enhanced insulating materials under different humidity and temperature conditions. *Energy and Buildings*. 2018; 158:698-711.
- [254] Khoukhi M, Hassan A, Al Saadi S, Abdelbaqi S. A dynamic thermal response on thermal conductivity at different temperature and moisture levels of EPS insulation. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019; 14:100481.
- [255] Mahapatra AK. Thermal properties of sweet sorghum bagasse as a function of moisture content. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2018;19(4):108-13.

- [256] He X, Zhang H, Qiu L, Mao Z, Shi C. Hygrothermal performance of temperature-humidity controlling materials with different compositions. *Energy and Buildings*. 2021; 236:110792.
- [257] Taleghani M, Tenpierik M, Kurvers S, Van Den Dobbelsteen A. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013 ;26 :201-15.
- [258] GIVONI. B, *L'homme, l'architecture et le climat*, Paris : Édition du Moniteur, 1978, p353.
- [259] UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [260] DTR C. 2/4'Document Technique Réglementaire, Règlements Thermique Algérienne du Bâtiment'. CNERIB; 2016.
- [261] Suh W-J, Park C-S, Kim D-W, editors. Heuristic vs. meta-heuristic optimization for energy performance of a post office building. *Proceedings of the 12th conference of international building performance simulation association Sydney: IBPSA; 2011: Citeseer*.
- [262] Pungercar V, Zhan Q, Xiao Y, Musso F, Dinkel A, Pflug T. A new retrofitting strategy for the improvement of indoor environment quality and energy efficiency in residential buildings in temperate climate using prefabricated elements. *Energy and Buildings*. 2021; 241:110951.
- [263] Sarri A, Bechki D, Bouguettaia H, Al-Saadi SN, Boughali S, Farid MM. Effect of using PCMs and shading devices on the thermal performance of buildings in different Algerian climates. A simulation-based optimization. *Solar Energy*. 2021; 217:375-89.
- [264] Kämpf JH, Wetter M, Robinson D. A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus. *Journal of Building Performance Simulation*. 2010;3(2):103-20.
- [265] Hasan A, Vuolle M, Sirén K. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and environment*. 2008;43(12):2022-34.
- [266] Nematchoua MK, Noelson JCV, Saadi I, Kenfack H, Andrianaharinjaka A-ZF, Ngoumdoum DF, et al. Application of phase change materials, thermal insulation, and external shading for thermal comfort improvement and cooling energy demand reduction in an office building under different coastal tropical climates. *Solar Energy*. 2020; 207:458-70.
- [267] Nguyen AT. *Sustainable housing in Vietnam: Climate responsive design strategies to optimize thermal comfort*: Université de Liège, Liège, Belgium; 2013.
- [268] Cabeza LF, Navarro L, Pisello AL, Olivieri L, Bartolomé C, Sánchez J, et al. Behaviour of a concrete wall containing micro-encapsulated PCM after a decade of its construction. *Solar Energy*. 2020; 200:108-13.

LISTES DES ANNEXES

Annexe A

Les graphiques de données climatologiques de la ville de Constantine représentent la température, l'humidité relative et les précipitations de 2014 à 2020.

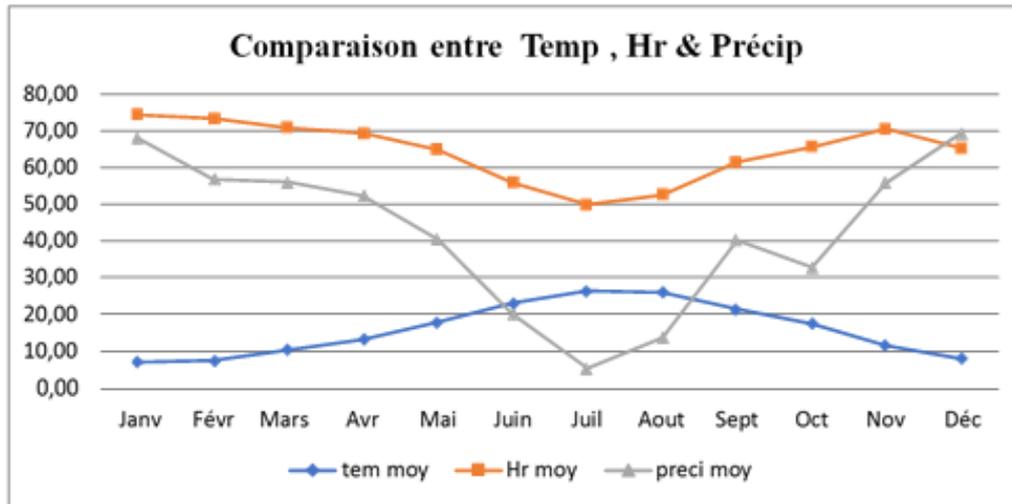


Figure A.1 Interprétation des données météorologiques de Constantine Période 2014-2020 (Source : O.N.M 2020).

1. Dessin de l'isotherme

Les points de mêmes températures sont reliés par des courbures sur le même tableau, qui comprend les mois en abscisse et les heures dans l'ordre (10 degrés Celsius, 15 degrés Celsius, 20 degrés Celsius, 25 degrés Celsius, 30 degrés Celsius). Nous obtenons l'isotherme, qui permet de déterminer les différentes zones (sous-chauffe, confort et surchauffe) pour les tranches horaires uniques de chaque mois.

- D'après la formule de Humphrey

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m)$$

$$T_n = 22.93 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

- Les températures limitent de confort Tc

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.} \quad T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{24.93}^\circ\text{C} \text{ correspondant au niveau maximal de confort.}$$

$$T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{20.93}^\circ\text{C} \text{ correspondant au niveau minimal de confort.}$$

❖ La zone de surchauffe

Comprend les températures au-delà de 25°C, elle englobe les mois de mai, juin, juillet, août et septembre.

❖ La zone de confort

La zone de confort se situera entre 21 et 25 °C et s'étendra sur les mois d'avril, de mai et d'octobre, avec diverses périodes intermédiaires, ainsi que quelques heures en mars. Elle est comprise dans la plage de $\pm 2^\circ\text{C}$.

❖ La zone de sous-chauffe :

La région englobe des températures inférieures à 20°C et s'étend quasiment sur les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre.

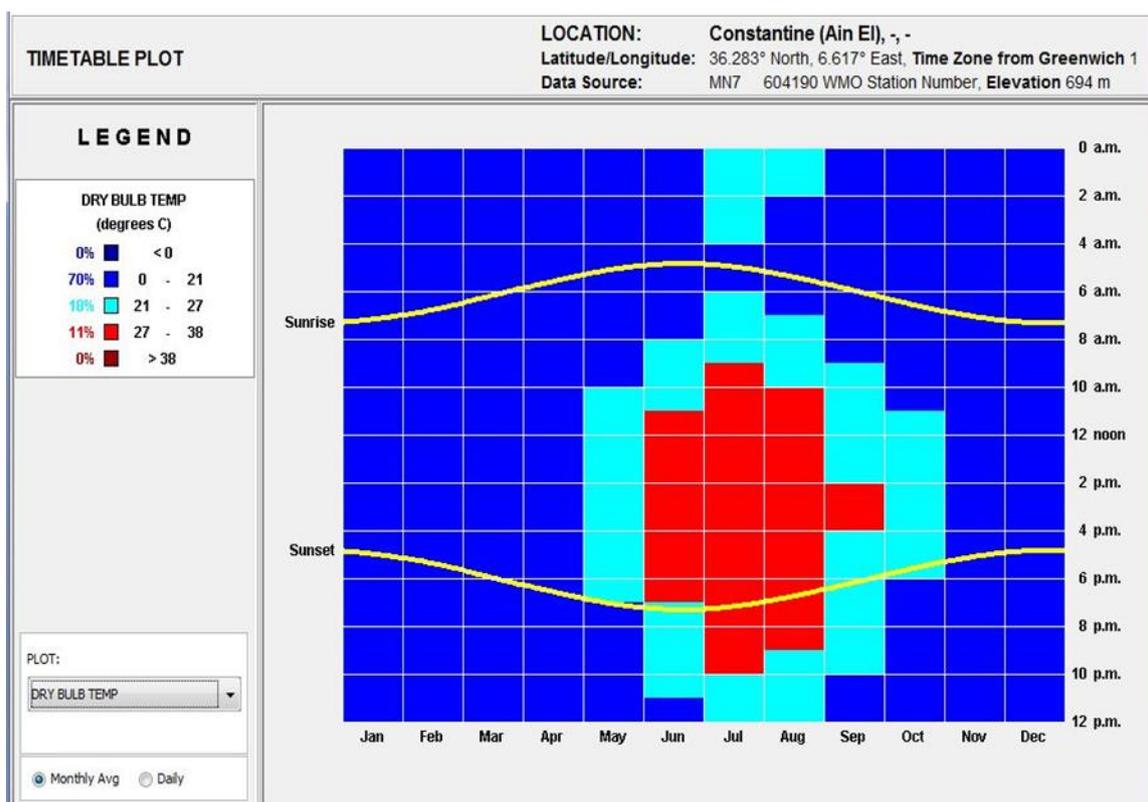


Figure A.2 Matrice des isothermes de la région de Constantine

2. Protocole de terrain (Mesures in-situ)

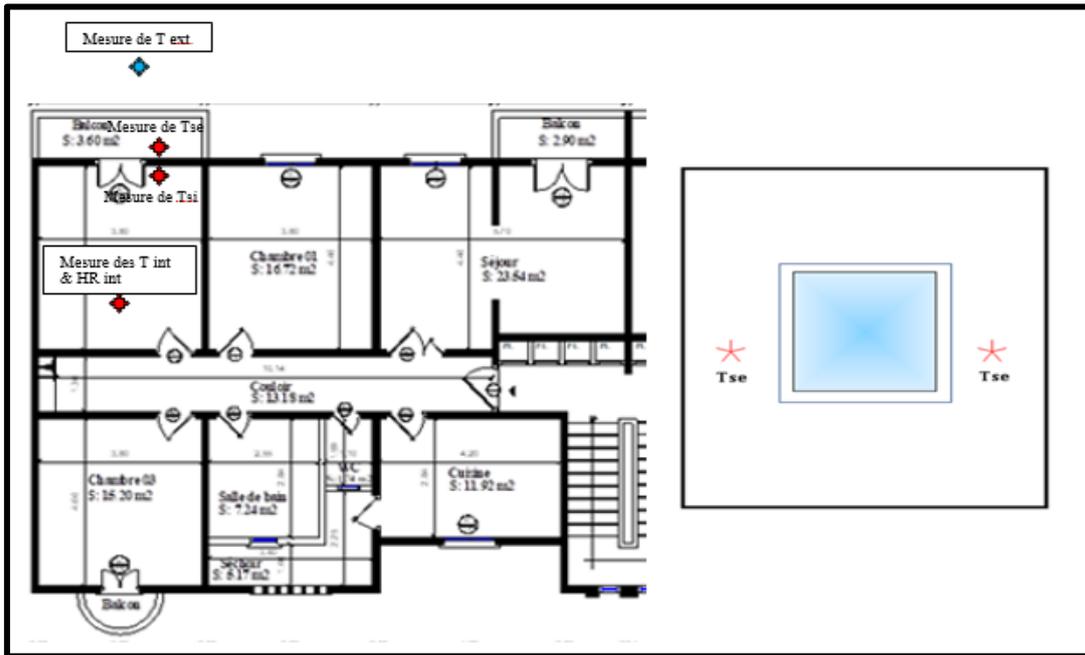


Figure A.3 Protocole des mesures de températures de l'air intérieur, humidité relative et températures surfaciques intérieures et extérieures

3. Résultats de mesures in-situ

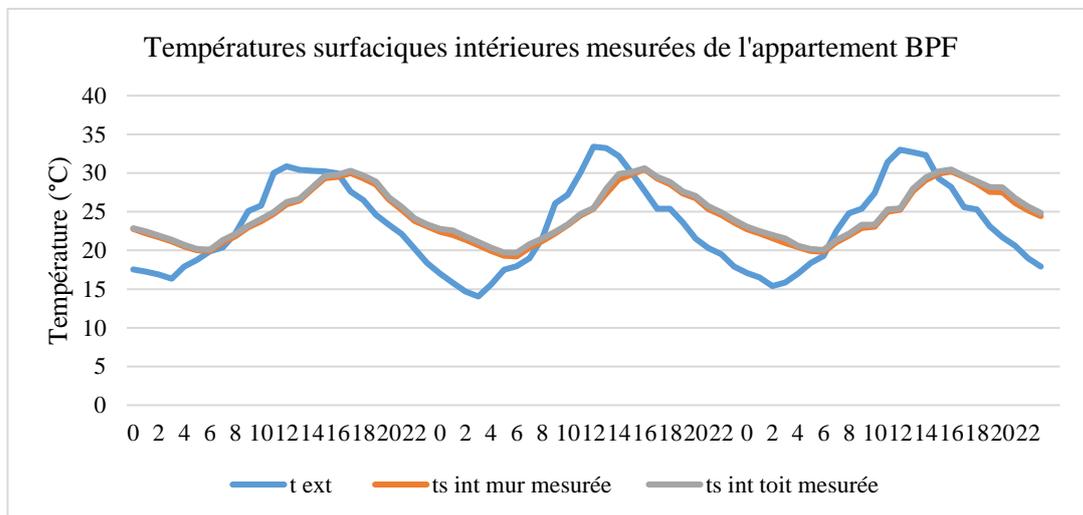


Figure A.4 Températures surfaciques intérieures mesurées de l'appartement (BPF) avec ventilation nocturne durant 6-8.08.2020

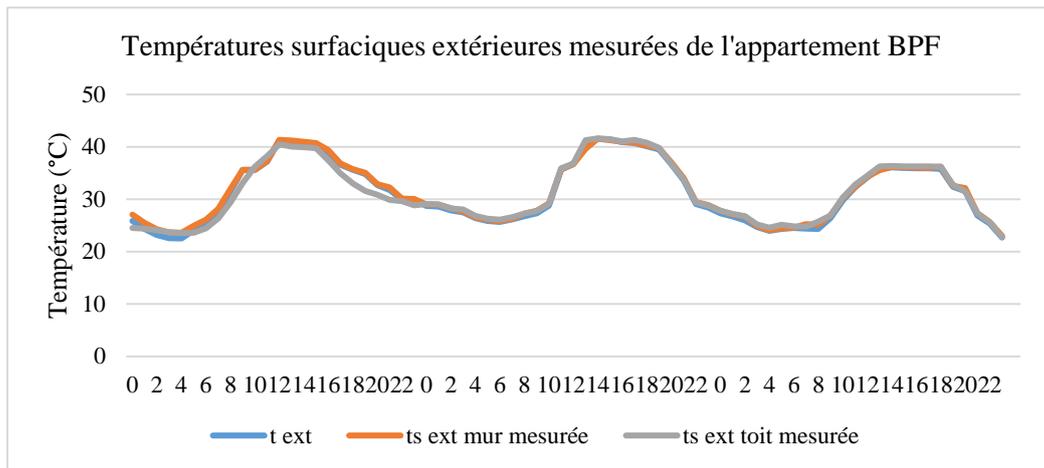


Figure A.5 Températures surfaciques intérieures mesurées et simulées de l'appartement (BPF) sans ventilation nocturne durant 20-22.08.2020

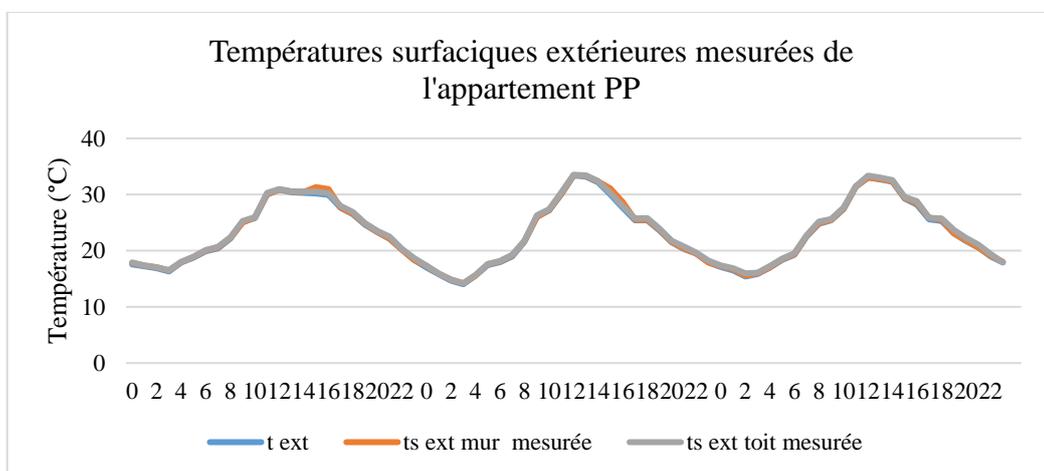


Figure A.6 Températures surfaciques intérieures mesurées de l'appartement (PP) sans ventilation nocturne durant 6-8.08.2020

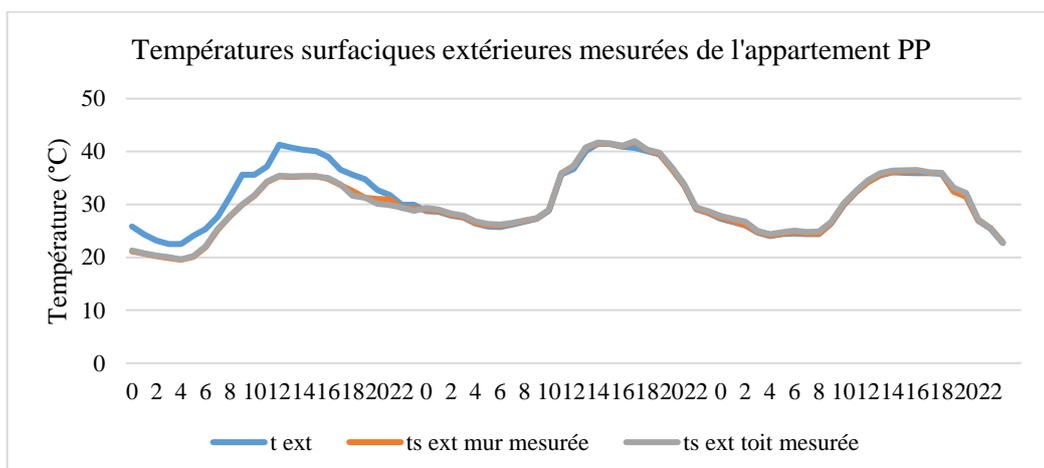


Figure A.7 Températures surfaciques intérieures mesurées de l'appartement (PP) avec ventilation nocturne durant 20-22.08.2020

Annexe B

Les caractéristiques thermiques des nanomatériaux (NFC) de noyau de palmier dattier

Tableau B.1 Propriétés thermiques des pastilles avec des différents ratios en (NFC)

Pastille (1x10) mm	Nanofibre Cellulosique (%)	Nanofibre Cellulosique (g)	Ciment (g)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique W.m ⁻¹ . °C ⁻¹	Diffusivité (m ² /s),10 ⁻⁶	Chaleur spécifique Cp (J/m ³ , K)
NFC ₀	0	0,00	1,00	560,00	0,186	0,315	0,5905
NFC ₁	3	0,03	0,97	542	0,168	0,301	0,5581
NFC ₂	5	0,05	0,95	493	0,141	0,293	0,4812
NFC ₃	10	0,10	0,90	378,00	0,0863	0,214	0,4033
NFC ₄	15	0,15	0,85	290	0,0732	0,205	0,3571
NFC ₅	100	1,00	0,00	157,00	0,042	0,148	0,2838

*NFC : nanofibres cellulosique

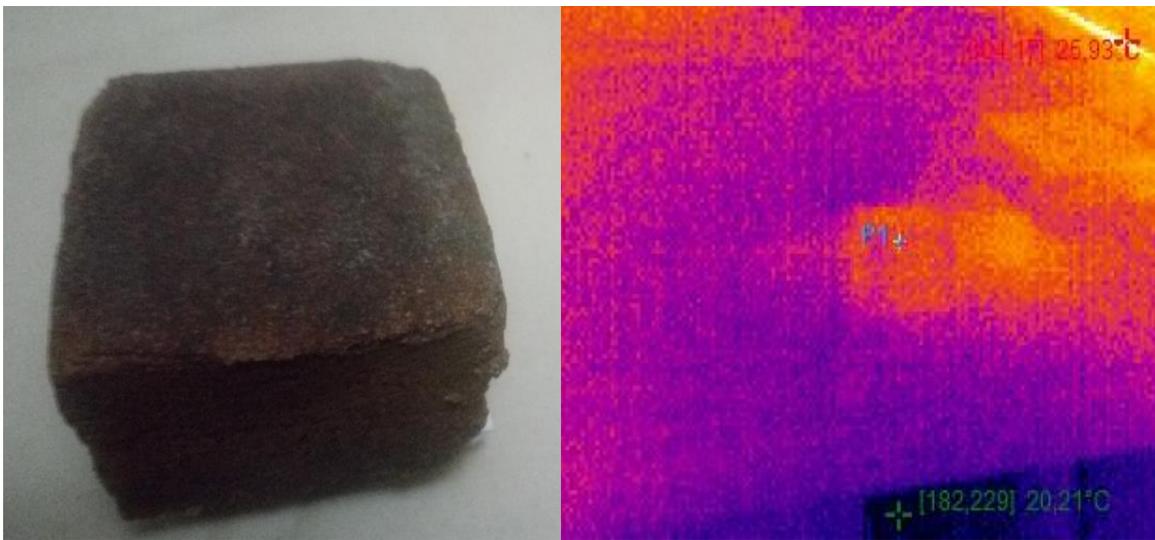


Figure B.1 Thermographie à infrarouge au niveau du nanomatériau élaborés avec des nanofibre cellulosique de noyau de palmier dattier.

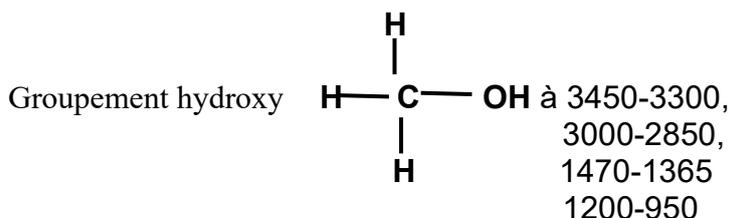
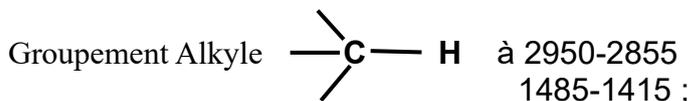


Figure B.2 CT mètre appareil de mesure de la conductivité thermique et chambre climatique permet de simuler différentes valeurs de température et d'humidité.

Annexe C

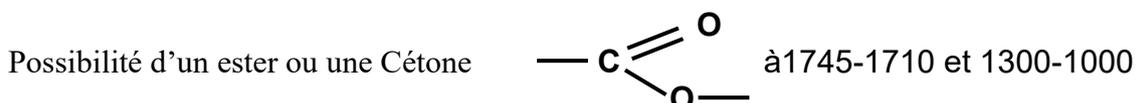
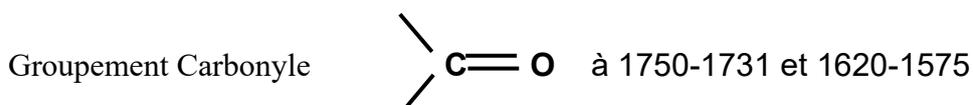
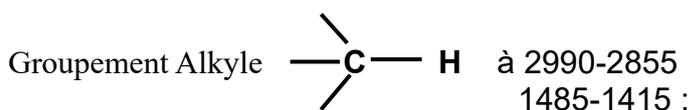
1. Interprétation des spectres

Poudre N°1 : Poudre marron

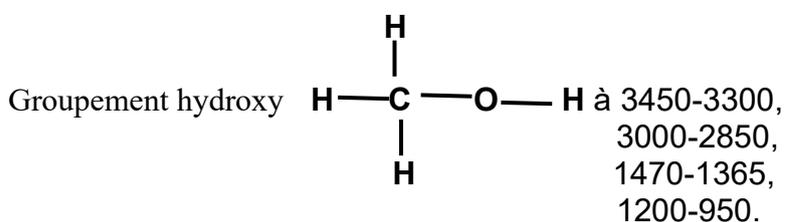
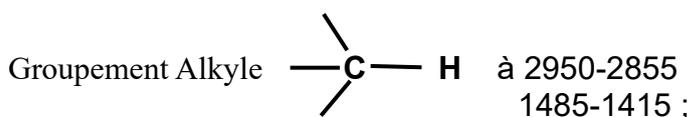


Alcool aromatique à 3610-3225, 1525-1485, 1095-995 et 840-740

Poudre N°2 : Poudre marron



Poudre N°3 : Poudre marron



Alcool aromatique à 3610-3225, 1525-1485, 1095-995 et 840-740

Poudre N°4 : Poudre grise

Pic important à 880

2. Estimation des tailles des cristallites

Les tailles des cristallites des fibres cellulosique du noyau de datte est estimé en utilisant la formule de Scherrer :

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Où

- D diamètre moyen des cristallites en nanomètre.
- λ longueur d'onde des rayons X $\lambda_{\text{K}\alpha\text{Cu}}=1.5418\text{\AA}$.
- β Largeur à mi-hauteur du pic de diffraction en radian.
- θ angle de diffraction.

47-2462				Wavelength= 1.5405981									
(C10H16O5)n				2 θ	Int	h	k	l	2 θ	Int	h	k	l
Poly(trimethylcellulose)				8.241	100	0	4	0	39.856	10	1	2	4
				8.471	10	0	0	1	39.856	10	2	5	0
				16.433	50	0	0	0	40.806	5	0	19	1
				16.939	80	0	0	2	40.991	5	1	12	3
				18.052	5	0	3	2	42.402	5	2	8	0
				18.547	5	0	8	1	43.254	5	2	8	1
				19.154	100	1	1	0					
				19.494	5	1	2	0					
				20.165	50	1	3	0					
				20.885	100	1	4	0					
				21.085	5	1	1	1					
				22.491	100	1	4	1					
				24.710	50	0	12	0					
				25.281	50	1	8	0					
				25.502	50	1	7	1					
				25.727	80	1	1	2					
				26.111	10	0	12	1					
				27.165	50	1	4	2					
				27.165	50	0	5	3					
				29.961	50	0	12	2					
				30.485	5	0	8	3					
				31.475	10	1	12	0					
				31.475	10	0	9	3					
				32.292	5	1	1	3					
				33.027	5	0	10	3					
				36.806	10	1	15	0					

Rad.:	λ :	Filter:	d-sp:
Cut. off:	Int.:	Estimation	I/leor.:

Ref: Zugenmaier, P., Kuppel, A., Colloid and Polymer Sci., 264, 231 (1986)

Sys.: Orthorhombic		S.G.:	
a: 4.64	b: 43.2	c: 10.42	A: 0.1074 C: 0.2412
α :	β :	γ :	Z: mp:

Ref: Ibid.

Dx:	Dm:	SS/POM: F ₂₉ = 2(0.085 . 190)

Trimethylcellulose was slowly crystallized from a solution of diethyleneglycol at 150-200 C. Fibers for XRD were obtained by stretching strips of film over a hot stage. C.D. Cell: a=10.420, b=43.200, c=4.640, a/b=0.2412, c/b=0.1074, S.G.=, Mwt: 216.23. Volume[CD]: 2088.67.

1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 1.30

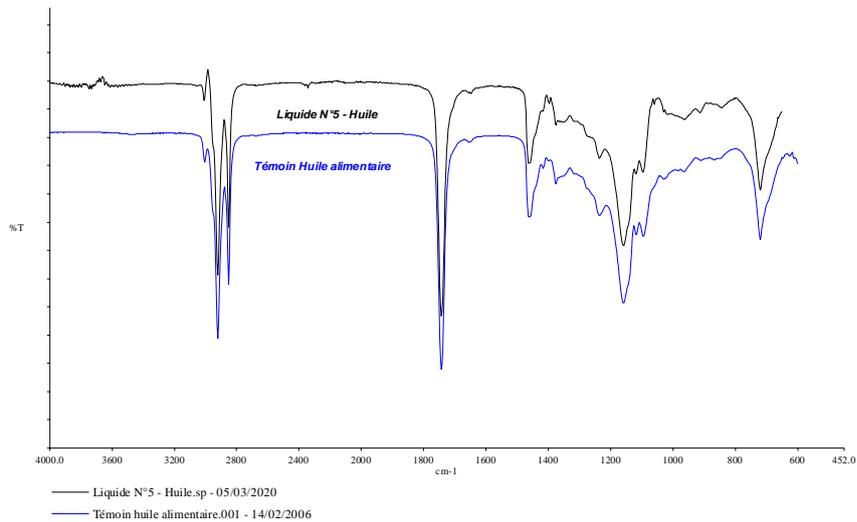


Figure C.1 Spectre FT-IR des huiles des nanofibres cellulosique des noyaux de palmier dattier.

3. Analyses chimiques des échantillons

Caractéristiques	Nature	Aspect	Couleur
Echantillon N°01	Sable	Fin	Grise (ciment)
Echantillon N°02	Solide	Granuleux	Marron jaunâtre (poudre noyau de datte)

a) Les échantillons séparés sont analysés dans les réactifs de l'eau qualitatifs et semi-quantitatifs pour les cations et anions spécifiques aux tests mentionnés dans le tableau suivant :

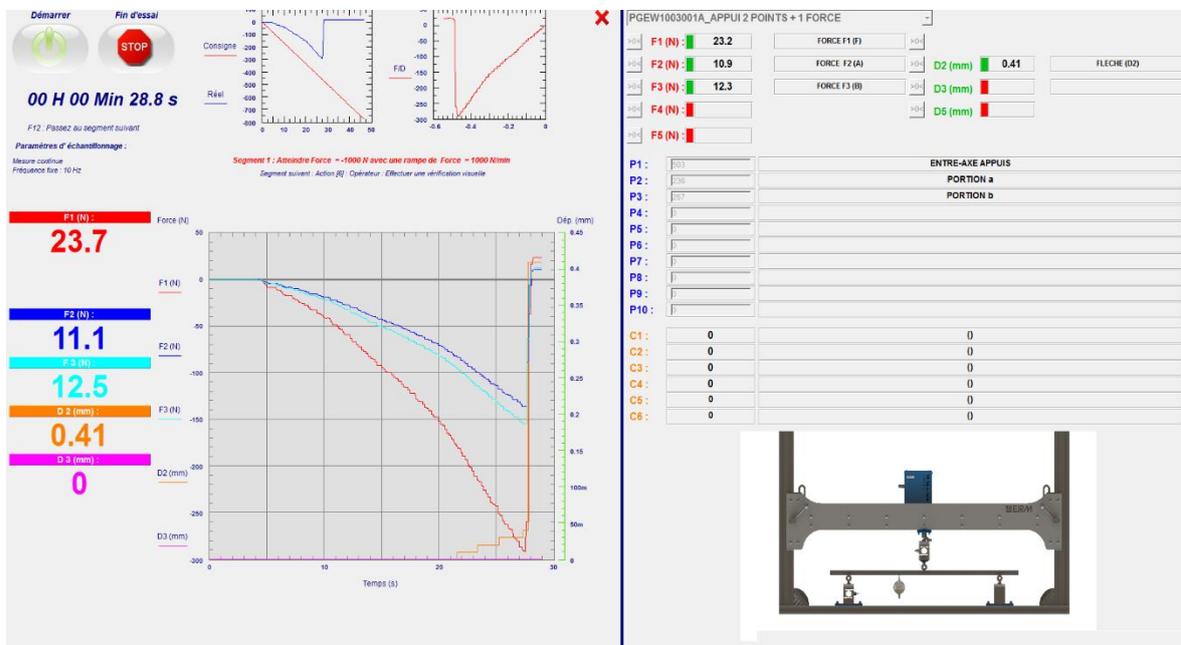
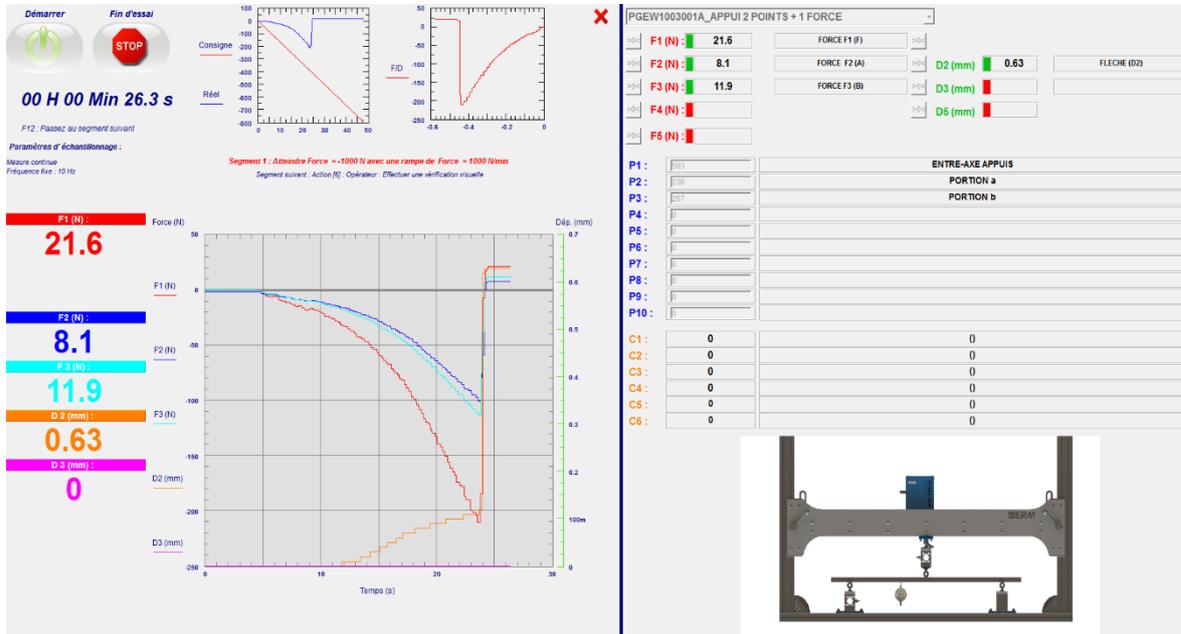
Cations ou Anions recherches	Ech n° : 01 poudre grise	Ech n° :02 poudre marron
PH	11.61	7.04
Carbonates CO_3^{3-} mg/l	178	106.8
Calcium Ca^{2+} mg/l	25	10
Fer en mg/l	10	Négatif
Ammonium NH_4^+	Négatif	Négatif
Aluminium Al^{3+} mg/l	Négatif	Négatif
Cuivre Cu^{2+} mg/l	Négatif	Négatif
Phosphate mg/l	Entre 3-10	Négatif
Sulfates SO_4^{2-} mg/l	400	400
Silicates	Présence	Présence

b) Pour identifier la cellulose contenue dans l'échantillon No02, la poudre marron est soumise à des réactions de coloration :

Réactif/ Echantillon	Réaction en présence acide sulfurique	Résultat
Échantillon 02	Coloration noire	Positif

Annexe D

1. Résultats de mesures à la traction par flexion



2. Résultats des mesures de la résistance à la compression des échantillons

Des échantillons de ciment dopés avec des ratios 5%, 10% et 15% en nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier (NFC) soumis à l'épreuve d'écrasement.

Le dispositif de perméabilité à l'air de Blaine mesure la finesse des particules en fonction de la surface totale exprimée en centimètres carrés par gramme. La surface exacte est calculée en utilisant la constante de l'appareil et la température ambiante. La norme ASTM C204 détaille ce processus.



Figure D.3 représente le dispositif de mesure de compression et de perméabilité à l'air Blaine.



Nom et Prénom : Hocine BELILI
Titre : Contribution des Enveloppes Nanotechnologiques dans
l'Amélioration de la Performance Energétique
Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences
en Architecture climatique et environnement

Résumé

L'industrie des nanotechnologies est l'un des domaines technologiques les plus passionnants pour l'avenir de l'humanité. La recherche en nanotechnologie a ouvert des perspectives et des applications très sophistiquées en raison des caractéristiques nanométriques des matériaux. La disponibilité et l'économie des noyaux de palmier dattier semblent constituer un excellent potentiel pour apporter une réponse réelle aux nouveaux matériaux de construction durables. L'objectif de cette étude est de déterminer la faisabilité de l'utilisation de nanofibres cellulosiques produites à partir de noyaux de palmier dattier comme substitut de matériaux isolants dans le secteur de la construction. Nous entreprenons une étude de faisabilité pour examiner la viabilité de l'utilisation d'un nouveau nanomatériau biocomposite (NFC_n) comme isolant thermique pour les bâtiments.

Une première étape a consisté en des travaux réalisés au laboratoire pour développer des nanomatériaux composés de biomatériaux de nanofibres cellulosiques provenant de fibres de palmier dattier par le procédé de mécanosynthèse avec broyage planétaire, suivie de la caractérisation morphologique et structurale de ce type de nanomatériaux ainsi la détermination de la nanostructure et de la composition chimique. Des dispositifs scientifiques ont été utilisés pour cette expérience, tels que la spectroscopie infrarouge de Fourier (FT-IR), la microscopie électronique (MEB), la spectroscopie de dispersion d'énergie (EDX) et l'analyse par diffraction des rayons X (XRD).

La deuxième étape concerne le dopage de la matrice cimentaire par différents ratios (3-5-10-15 %) de nanofibres cellulosiques et vérifier leurs propriétés thermo physiques et mécaniques des nanofibres cellulosiques, puis l'évaluation de la faisabilité technique de l'incorporation de ce nanofibres cellulosiques de noyau de palmier dattier pour constituer un matériau nanocomposite léger protégeant l'enveloppe extérieure des bâtiments des radiations solaires.

Ensuite des mesures in situ se sont déroulées sur deux périodes, l'une estivale et l'autre hivernale a permis de lire et de comparer la performance de l'enveloppe architecturale en béton armé et l'autre en brique creuse sans isolation. Puis une simulation par le biais de "TRNSys17" a permis de valider les résultats de terrain et de vérifier l'amélioration de leur performance en utilisant le nanomatériau comme isolant sur la face extérieure des deux bâtiments et d'évaluer l'effet du dopage de la matrice cimentaire de l'enveloppe architecturale en béton armé par différents ratios.

Les nanofibres de cellulose de palmier dattier présentent la meilleure efficacité énergétique lorsqu'elles sont utilisées comme additif à l'enveloppe extérieure en béton armé ou comme isolant thermique pour les deux enveloppes d'appartement. Les résultats ont confirmé les hypothèses établies à savoir la réduction de la conductivité thermique du nanocomposite et la réduction de consommation énergétique jusqu'à 75%. Enfin, nous soulignons que les nanofibres cellulosiques développées dans ce travail sont entièrement biosourcées et ont donc un potentiel important en termes d'isolation thermique, mais aussi pour une large gamme d'autres applications.

Mots-clés : Réhabilitation thermique ; Nanofibre cellulosique de noyau du palmier dattier ; caractérisation structurale et morphologique ; enveloppe nanotechnologique ; isolation thermique ; résistance mécanique ; Performance énergétique.

Directeur de thèse : Saliha OUTTAS - UNIVERSITE CONSTANTINE 3

Année Universitaire : 2020-2021

