

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil  
Laboratoire de génie de la construction et d'architecture (LGCA)

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**DOCTORAT**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Structures**

**Présentée par**

**Medjmadj Sara**

*Thème*

**Élaboration et modélisation du comportement des structures sandwiches stratifiées à base de matériaux à gradient fonctionnel FGM**

**Soutenue le : 02 Novembre 2024**

**Devant le Jury composé de :**

**Nom et Prénom**

**Grade**

<b>Mr. CHELOUAH Nasser</b>	Professeur	Univ. de Bejaia	Président
<b>Mr. SI SALEM Abdelmadjid</b>	MCA	Univ. de Tizi Ouzou	Rapporteur
<b>Mr. KERNOU Nassim</b>	MCA	Univ. de Bejaia	Examineur
<b>Mr. BOUZEROURA Mansour</b>	MCA	Univ. de Bejaia	Examineur
<b>Mme. TAOUCHE-KHELOUI Fatma</b>	Professeur	Univ. de Tizi Ouzou	Examinatrice

**Année Universitaire : 2024/2025**

## REMERCIEMENTS

Au terme de ces quatre années de travail, l'aboutissement de cette thèse marque la fin d'une période de ma vie, mais aussi le début d'une nouvelle. Je souhaite donc remercier en premier lieu le Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la capacité, la volonté, la patience ainsi que le courage d'entreprendre et de mener à bien ce travail.

Ma gratitude et ma profonde reconnaissance s'adressent tout d'abord à mon directeur de thèse Monsieur **Dr SI SALEM Abdelmadjid** maître de conférences à l'université de Tizi Ouzou de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un sujet particulièrement intéressant et porteur. Je tiens également à le remercier pour la confiance et la sympathie témoignées. En outre, ses conseils, son aide, sa disponibilité et son expertise m'ont encouragé à surmonter les difficultés rencontrées durant ces années de recherche.

Mes remerciements sincères s'adressent également au **Dr. AIT TALEB Souad**, maître de conférences à l'université de Tizi Ouzou pour son aide précieuse en rapport avec la modélisation et la rédaction des contributions scientifiques.

Un très grand merci également aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, à **Prof. CHELOUAH Nasser**, professeur à l'université de Bejaia de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. À **Prof. KHELOUI-TAUCHE Fatma**, professeure à l'université de Tizi Ouzou ; **Dr KERNOU Nassim** et **Dr. BOUZEROURA Mansour** maîtres de conférences à l'université de Bejaia pour avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Je saisis cette occasion pour remercier très chaleureusement mes parents qui m'ont encouragée à continuer mes études et grâce à eux que je suis ici aujourd'hui et je leur en serai éternellement reconnaissante. Mes pensées s'adressent aussi tout naturellement à mon mari qui m'a toujours soutenu et encouragé dans les moments difficiles. Je remercie également mes sœurs **Kamilia** et **Amel**, mon frère **Massinissa** et sans oublier ma chère amie **Djenad Sonia** qui m'a beaucoup aidé durant cette période de recherche.

Enfin, Un grand merci à ma petite ange **Numidia** qui m'a donné la volonté d'avancer et d'être avec moi dans ces beaux moments.

Un grand merci à tous.

# TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	I
Table des matière.....	II
Notations & Nomenclature .....	VI
Liste des figures .....	IX
Liste des tableaux .....	XVI
Liste des travaux scientifiques... ..	XVIII
Résumé & Abstract .....	XXI

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.1	Introduction.....	5
I.2	Structures sandwiches.....	5
I.2.1	Constituants des structures sandwiches.....	5
I.2.1.1	L'âme.....	6
I.2.1.2	Les peaux (Semelles) .....	7
I.2.1.3	L'adhésif... ..	9
I.2.1.3.1	Les résines .....	10
I.2.1.3.2	Les colles .....	10
I.2.2	Comportement thermique des sandwiches... ..	10
I.2.3	Comportement mécanique des sandwiches... ..	12
I.2.3.1	Flexion trois-points.....	12
I.2.3.2	Flambement... ..	15
I.3	Les FGM pour les panneaux sandwichs... ..	20
I.3.1	Définition.....	20
I.3.1.1	Intérêts et domaine d'application des FGM .....	23
I.3.2	Propriétés effectives des matériaux à gradient fonctionnel... ..	25

I.3.2.1	La fraction volumique P-FGM.....	25
I.3.2.2	La fraction volumique E-FGM.....	26
I.3.2.3	La fraction volumique S-FGM.....	27
I.3.3	Comportement thermique des FGM.....	28
I.4	Les matériaux des FGM.....	30
I.4.1	FGM pour les semelles.....	30
I.4.2	FGM pour les âmes.....	31
I.4.3	Les matériaux du FGM proposé.....	33
I.4.3.1	Le plâtre.....	33
I.4.3.1.1	Comportement à la rupture du plâtre.....	34
I.4.3.1.2	Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau... ..	35
I.4.3.1.3	Comportement thermique du plâtre.....	36
I.4.3.2	Le liège.....	37
I.4.3.2.1	Composition chimique du Liège.....	37
I.4.3.2.2	Propriétés du Liège.....	39
I.4.3.2.3	Utilité du liège pour l'isolation... ..	40
I.4.3.3	Composite liège-plâtre.....	41
I.5	Conclusion... ..	42

## CHAPITRE II : Conception et procédure expérimentale

II.1	Introduction.....	43
II.2	Plan et matrice des essais.....	44
II.3	Matière première.....	44
II.3.1	Matrice plâtre.....	44
II.3.1.1	Comportement du plâtre à la compression et traction... ..	46
II.3.2	Liège.....	48
II.3.2.1	Traitement du liège récupéré.....	48
II.3.2.2	Propriétés du liège utilisé.....	49
II.3.3	Le PVC... ..	52
II.3.4	La résine... ..	54
II.4	Fabrication des panneaux.....	55
II.4.1	Elaboration des éprouvettes pour la caractérisation mécanique de l'âme.....	55

II.4.2	Elaboration des éprouvettes pour la caractérisation physique et thermique de l'âme.....	59
II.4.3	Préparation des panneaux .....	60
II.5	Conclusion... ..	60

### **CHAPITRE III : Essais de caractérisation physico-thermique et micrographique**

III.1	Introduction.....	62
III.2	Caractérisation physique.....	62
III.2.1	Procédure de calcul... ..	62
III.2.2	La porosité... ..	65
III.2.3	La masse volumique apparente... ..	65
III.2.4	L'absorption d'eau... ..	65
III.3	Caractérisation thermique .....	68
III.4	Analyse microstructurale .....	71
III.4.1	Image Macroscopiques.....	71
III.4.2	Image Macroscopiques MEB.....	72
III.5	Conclusion .....	75

### **CHAPITRE IV : Essais mécaniques sur les panneaux**

IV.1	Introduction.....	77
IV.2	Machine d'essais.....	78
IV.3	Essais mécanique sur l'âme... ..	80
IV.3.1	Présentation et interprétation des résultats des essais de compression .....	80
IV.3.2	Présentation et interprétation des résultats des essais de traction par flexion .....	84
IV.4	Chargement et acquisition des panneaux .....	87
IV.4.1	Résultats des essais sur les panneaux et discussion .....	89
IV.4.1.1	flexion trois points .....	89
IV.4.1.2	Compression perpendiculaire .....	91
IV.4.1.3	Flambement... ..	93
IV.4.2	Mode de rupture .....	95
IV.4.2.1	flexion trois-points .....	95
IV.4.2.2	Compression perpendiculaire .....	96

IV.4.2.3	Flambement...	97
IV.4.3	Confrontation des résultats avec la littérature .....	99
IV.5	Conclusion .....	100

## **CHAPITRE V : Modélisation analytique**

V.1	Introduction...	101
V.2	Modèle proposé .....	103
V.3	Modélisation tridimensionnelle .....	104
V.4	Variation de rigidité... ..	106
V.5	Méthode de résolution analytique .....	106
V.6	Résultats et analyses... ..	111
V.6.1	Variation du module de rigidité... ..	111
V.6.2	Evolution de la flèche selon le paramètre P et les théories... ..	112
V.6.3	Evolution des contraintes selon le paramètre P et les théories... ..	112
V.6.4	Evolution des contraintes selon les théories pour $P = 1$ ... ..	118
V.6.5	Comparaison entre les flèches expérimentales et analytiques .....	119
V.6.6	Confrontation des valeurs de contrainte de cisaillement .....	120
V.7	Conclusion... ..	121

<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>123</b>
--	------------

<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>127</b>
--	------------

## NOTATIONS & NOMENCLATURE

<b>Notation</b>	<b>Définition</b>
FGM	Functionally graded materials (matériaux à gradient fonctionnel).
PVC	Polychlorure de vinyle.
FSDBT	First-order Shear Deformation Beam Theory.
TSDBT	Trigonometric Shear Deformation Beam Theory.
SSDBT	Sinusoidal Shear Deformation Beam Theory.
ESDBT	Exponential Shear Deformation Beam Theory.
PTV	Principe des travaux virtuels.
MEB	Microscopie Électronique à Balayage.
M	Moment fléchissant de panneau sandwich.
T	L'effort tranchant de panneau sandwich.
$\sigma_f$	Contraintes de compression.
tc	Contraintes de traction.
$\sigma_{fmax}$	La contrainte de compression maximale.
D	Une grandeur caractéristique d'un matériau sandwich.
$\tau_c$	La contrainte de cisaillement de l'âme de sandwich.
$\tau_{cmax}$	La contrainte de cisaillement maximale de l'âme de sandwich.
$w_1$	Déplacement dû à la flexion.
$w_2$	Déplacement de cisaillement.
$w$	La flèche totale de panneau.
$P_{eu}$	La force maximale d'Euler-Peu appliquée sans instabilité.
$P_{cr}$	La charge critique de flambement.
S	La rigidité en cisaillement du sandwich.
E	Module de rigidité.
$\nu$	Coefficient de poisson.
P	Paramètre qui tient compte du changement du matériau.
U(x), W(x)	Le déplacement dans le plan et le déplacement transverse respectivement.

$w, x(x)$	La rotation de la section.
$\psi(z)$	La fonction de gauchissement.
$\phi_x$	La rotation suivant x.
$\Psi(z)$	La fonction de gauchissement.
$\mu$	Fraction volumique du composite.
$\sigma_x$	Contrainte normale de panneau.
$\varepsilon_x$	Déformations normales de panneau.
$\tau_{xz}$	Contraintes de cisaillements de panneau.
$\gamma_{xz}$	Coefficient de cisaillement.
$E(z)_{\text{âme}}$	Module de rigidité de l'âme de panneau sandwich.
$E(z)_{\text{panneau}}$	Module de rigidité de panneau sandwich.
$E_{si}$	Module de rigidité de la semelle inférieur.
$E_{ss}$	Module de rigidité de la semelle supérieur.
$\delta W_{int}$	Travail intérieur.
$\delta W_{ext}$	Travail extérieur.
$N_x$ et $M_x$	L'effort normal et le moment fléchissant respectivement.
$S_x$	Le moment supplémentaire dû au cisaillement transverse.
$Q_{xz}$	L'effort de cisaillement.
$L$	Longueur totale de panneau.
$A$	Portée effective de panneau.
$b$	Largeur de panneau.
$h_{ss}$	Épaisseur de la peau supérieure.
$h_{is}$	Épaisseur de la peau inférieur.
$h_a$	Épaisseur du noyau FGM.
$h$	Épaisseur totale de panneau.
$F$	Charge appliquée à mi-portée de panneau.
$G(z)$	La fraction volumique des matériaux à gradient fonctionnel.
$E_p$	Rigidité de la partie inférieure de panneau FGM (Plâtre).
$E_c$	Rigidité de la partie supérieure de panneau FGM (Liège).

$T_U$ et $T_L$	Les températures aux extrémités de panneau sandwich.
$M_V$	La masse volumique du liège.
$T_i$	La température initiale des éprouvettes.
$T_f$	La température finale des éprouvettes.
$\rho_p$	La densité de plâtre évaluée.
$\rho_c$	La densité du liège.
$M_s$	La masse sèche.
$M_{st}$	La masse saturée.
$M_{ph}$	La masse par poussé hydrostatique.
$P$	La porosité.
$M_{app}$	La masse volumique apparente.
$A$	L'absorption d'eau.
$\lambda_{moy}$	La conductivité thermique.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I

<b>Figure I.1.</b> Exemple de structure sandwich à âme en bois [5] .....	7
<b>Figure I.2.</b> Exemple de structure sandwich à âme ondulée [24] .....	7
<b>Figure I.3.</b> Exemple de structure sandwich à âme en nid d'abeille [6] .....	7
<b>Figure I.4.</b> Les différents tissus utilisés comme des peaux : a) Fibre de verre ; b) Fibre de carbone ; c) Fibre d'aramide (kevlar) ; d) Fibre de céramique [111] .....	9
<b>Figure I.5.</b> Panneaux sandwichs à base d'une âme en liège conçus par Lakreb et al [44]	11
<b>Figure I.6.</b> Les différentes méthodes d'évaluation la conductivité thermique : a) testeur de conductivité thermique CT-mètre, b) Méthode de la plaque chauffante protégée, c) la méthode de débitmètre de chaleur (CTMF) [44] .....	12
<b>Figure I.7.</b> Panneau sandwich chargé en flexion trois-points .....	13
<b>Figure I.8.</b> Répartition des contraintes de cisaillement [45] .....	14
<b>Figure I.9.</b> Déformation en cisaillement dans l'âme [45] .....	15
<b>Figure I.10.</b> a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich [46]	16
<b>Figure I.11.</b> Représentation schématique des essais mécaniques sur les panneaux sandwichs effectués par Lakreb et al. [5] .....	17
<b>Figure I.12.</b> Essais réalisés par Si Salem et al [1] : a) Flexion en trois points ; b) flambement.	18
<b>Figure I.13.</b> Essais de flexion en trois points réalisé par Łukasz et Bartosz. 2020 [49] .....	19
<b>Figure I.14.</b> Une comparaison de l'effondrement expérimental des poutres sandwichs multicouches testées par M. Kazemi [4]. .....	19
<b>Figure I.15.</b> Une comparaison de l'effondrement expérimental des poutres sandwichs bicouches testées par M. Kazemi [4] .....	19
<b>Figure I.16.</b> Une comparaison entre les courbes force-déplacement pour toutes les poutres sandwich réalisés par Kazemi. 2021 [4] .....	20
<b>Figure I.17.</b> Exemples des FGM dans la nature [111] .....	21
<b>Figure I.18.</b> Variation continue des propriétés de matériau FGM. ....	22
<b>Figure I.19.</b> Les principaux domaines d'application des FGM .....	24

<b>Figure I.20.</b> Exemple d'utilisation des FGM dans le domaine de construction [15] .....	24
<b>Figure I. 21.</b> Exemple d'utilisation des FGM dans le domaine d'industriel [22] .....	25
<b>Figure I. 22.</b> Modèle analytique d'un matériau à gradient fonctionnel .....	25
<b>Figure I.23.</b> Exemple de variation du module de Young dans le panneau P-FGM [65] .....	26
<b>Figure I.24.</b> La variation du module de Young dans un panneau E-FGM [66].....	27
<b>Figure I.25.</b> La variation du module de Young dans un panneau S-FGM [66].....	28
<b>Figure I.26.</b> Exemple de répartition de la température sur l'épaisseur de la céramique [67]...29	
<b>Figure I.27.</b> Exemple de répartition de la température pour différentes valeurs de fraction volumique [67] .....	29
<b>Figure I.28.</b> La structure sandwich en semelle FGM produite par Arslan et Gunes [6] .....	31
<b>Figure I.29.</b> La structure sandwich constituée par Dimitrios et al [68] .....	31
<b>Figure I.30.</b> La structure sandwich étudiée par Van Vinh [10] .....	31
<b>Figure I.31.</b> Le matériau Plâtre, photo prise par [82] .....	34
<b>Figure I.32.</b> Essai de flexion sur des éprouvettes de plâtre sèches et saturées en eau [83] .....	35
<b>Figure I.33.</b> Loi de comportement du plâtre selon [84] .....	36
<b>Figure I.34.</b> a) Liège à l'état brut ; b) la structure alvéolaire du liège [91] ; c) Coupe transversale d'une tige de chêne-liège .....	37
<b>Figure I.35.</b> Schéma de composition du Liège. [91] .....	38
<b>Figure I.36.</b> Isolation thermique et phonique en liège de la façade extérieure et intérieure..41	
<b>Figure I.37.</b> Isolation thermique et phonique de toiture par panneaux de liège [21].....	41
fraction volumique [67] .....	29

## Chapitre II

<b>Figure II.1.</b> Organigramme de l'approche expérimentale .....	45
<b>Figure II.2.</b> Le plâtre (Manhargyps) utilisé .....	46
<b>Figure II.3.</b> Mode d'essai sur le plâtre : a) Essais de compression ; b) Essais de flexion à 3 points... ..	46

<b>Figure II.4.</b> Courbes Force – déplacement des éprouvettes de plâtre testées sous compression.....	47
<b>Figure II.5.</b> Courbes Force – déplacement des éprouvettes de plâtre testées sous flexion .....	4
<b>Figure II.6.</b> Liège utilisé à l'état brut.....	48
<b>Figure II.7.</b> Traitement du liège : a) liège coupé ; b) machine de concassage ; c) Tamiseuse ; d) Granulats de liège obtenus.....	49
<b>Figure II.8.</b> Morceaux du liège pour caractérisation physique-thermique .....	49
<b>Figure II.9.</b> Le CT-mètre utilisé pour mesurer la conductivité .....	50
<b>Figure II.10.</b> Essai sur liège : a) Essais de compression ; b) Essais de flexion 3-points...	51
<b>Figure II.11.</b> Courbe Force-Déplacement de Liège testé en compression.....	52
<b>Figure II.12.</b> Courbe Force-Déplacement de Liège testé en Flexion à trois points .....	52
<b>Figure II.13.</b> Champ PVC utilisé pour les semelles .....	53
<b>Figure II.14.</b> Comportement à la traction de la peau en PVC testée .....	54
<b>Figure II.15.</b> La résine MEDAPOXY STR utilisée comme adhésif.....	54
<b>Figure II.16.</b> Présentation schématique du noyau des panneaux sandwichs : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3.....	56
<b>Figure II.17.</b> Les étapes suivies dans la réalisation du noyau des panneaux sandwichs : a) Préparation des moules ; b) Mélange de plâtre et de granulats du liège ; c) Moulage et coulage des éprouvettes.....	58
<b>Figure II.18.</b> Les différentes éprouvettes après démoulage : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3 ; f) L'ensemble des éprouvettes.....	58
<b>Figure II.19.</b> Eprouvette coulée dans le moule en bois .....	59
<b>Figure II. 20.</b> L'ensemble d'éprouvettes après démoulage : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3.....	60
<b>Figure II. 21.</b> L'ensemble des éprouvettes d'âme des panneaux sandwichs .....	61
<b>Figure II. 20.</b> Ensemble des panneaux sandwichs conçus : a) $(550 \times 50 \times 30)$ mm <sup>3</sup> de dimension pour essai de flexion ; b) $(350 \times 50 \times 30)$ mm <sup>3</sup> de dimension pour essai de flambement ; c) $(50 \times 50 \times 30)$ mm <sup>3</sup> de dimension pour essai de compression .....	61

### Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Procédé et dispositif de mesure de la porosité, de l'absorption d'eau et de la	
---	--

densité apparente.....	65
<b>Figure III.2.</b> Caractéristiques physiques des différents types d'éprouvettes : a) masse sèche ;b) masse saturée ; c) masse après la poussée hydrostatique ; d) la porosité ; e) l'absorption d'eau ; f) densité apparente. ....	67
<b>Figure III.3.</b> Procédure de mesure des conductivités thermiques .....	68
<b>Figure III.4.</b> Caractéristiques thermiques des différents types d'éprouvettes : a) conductivité thermique ; b) chaleur spécifiques ; c) Température initiale ; d) différence de température .....	69
<b>Figure III.5.</b> Vue macroscopique des sections transversales centrales des panneaux sandwichs: a) P-P; b) P-PC; c) FGM-2; d) FGM-1 et e) FGM-3 .....	72
<b>Figure III.6.</b> Images MEB de la matrice de plâtre (P): (a) grossissement de 100 $\mu\text{m}$ , b) grossissement de 50 $\mu\text{m}$ .....	73
<b>Figure III.7.</b> Images MEB de type P-C : (a) grossissement de 100 $\mu\text{m}$ , b) grossissement de 20 $\mu\text{m}$ .....	74
<b>Figure III.8.</b> Images MEB de type FGM-1 : (a) grossissement de 100 $\mu\text{m}$ , b) grossissement de 50 $\mu\text{m}$ .....	74
<b>Figure III.9.</b> Images MEB de type FGM-2 : (a) grossissement de 100 $\mu\text{m}$ , b) grossissement de 10 $\mu\text{m}$ .....	75
<b>Figure III.10.</b> Images MEB de type FGM-3 : (a) grossissement de 100 $\mu\text{m}$ , b) grossissement de 10 $\mu\text{m}$ .....	75

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1.</b> Machine d'essais IBERTEST .....	79
<b>Figure IV.2.</b> Essais mécanique : a) la compression ; b) la flexion en 3 points. ....	80
<b>Figure IV.3.</b> Confrontation des courbes : Charges moyennes vs. Déplacement sous compression .....	82
<b>Figure IV.4.</b> Charges moyenne de compression des différents types d'éprouvettes avec barres d'erreur .....	82
<b>Figure IV.5.</b> Courbes Force – déplacement de toutes les éprouvettes testées sous compression axiale : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3....	83
<b>Figure IV.6.</b> Confrontation des courbes : Charges moyennes vs. Déplacement des éprouvettes testées sous flexion 3-points... ..	84
<b>Figure IV.7.</b> Courbes Force – déplacement de toutes les éprouvettes testées sous flexion : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3....	85

<b>Figure IV.8.</b> Histogrammes des charges ultimes de flexion...	87
<b>Figure IV. 9.</b> Schéma des différents essais mécaniques effectués sur les panneaux sandwichs : a) Flexion trois points ; b) Compression axiale ; c) Flambement...	88
<b>Figure IV.10.</b> Configuration du chargement : a) compression dans le sens perpendiculaire ; b) Flambement ; c) Flexion trois points...	88
<b>Figure IV. 11.</b> Courbes de Force-déplacement à mi-portée de tous les panneaux testés sous Flexion 3-points : a) P-P ; b) P-C ; c) P-FGM...	90
<b>Figure IV. 12.</b> Confrontation des courbes de Force-déplacement des panneaux testés sous flexion 3-points...	90
<b>Figure IV. 13.</b> Comparaison des charges ultimes de flexion des panneaux sandwichs...	91
<b>Figure IV. 14.</b> Courbes Force-déplacement axial de tous les panneaux soumis à la compression : a) P-P ; b) P-C ; c) P-FGM...	92
<b>Figure IV. 15.</b> Confrontation des courbes moyennes : Force-déplacement axial des panneaux soumis à la compression...	92
<b>Figure IV. 16.</b> Charges ultimes de compression des différents panneaux sandwichs .....	93
<b>Figure IV. 17.</b> Confrontation des courbes de Force-déplacement axial des panneaux soumis au flambement...	93
<b>Figure IV. 18.</b> Courbes de Force-déplacement axial de tous les panneaux soumis au flambement : a) P-P; b) P-C; c) P-FGM...	94
<b>Figure IV.19.</b> Histogramme des charges de flambement des différents panneaux sandwichs.....	94
<b>Figure IV. 20.</b> Modes de rupture des panneaux sous flexion : a) P-P ; b) P-PC ; c) P-FGM...	96
<b>Figure IV. 21.</b> Modes de rupture des panneaux soumis à la compression : a) P-P ; b) P-PC ; c) P-FGM.....	96
<b>Figure IV. 22.</b> Modes de rupture des panneaux soumis au flambement : a) P-P ; b) P-PC ; c) P-FGM.....	98

## Chapitre V

<b>Figure V.1.</b> Organigramme de modèle analytique .....	104
<b>Figure V.2.</b> Représentation schématique de panneau sandwich modélisé .....	105
<b>Figure V.3.</b> Evolution de la rigidité en fonction de l'épaisseur du noyau...	111

<b>Figure V.4.</b> Évolution de la flèche à travers les âmes P-FGM : a) théorie de la fonction exponentielle ESDBT; b) Théorie de la fonction sinusoïdale SSDBT; c) Théorie des fonctions de déformation cubique TSDBT.....	112
<b>Figure V.5.</b> Évolution de la flèche à travers la portée du panneau sandwich: a) théorie des fonctions exponentielles ESDBT; b) Théorie de la fonction sinusoïdale SSDBT; c) Théorie des fonctions de déformation cubique TSDBT.....	113
<b>Figure V.6.</b> Distribution des contraintes normales et de cisaillement à travers l'épaisseur des âmes P-FGM: a) Contraintes normales (ESDBT); b) Contraintes de cisaillement (ESDBT); c) Contraintes normales (SSDBT); d) Contraintes de cisaillement (SSDBT); e) Contraintes normales (TSDBT); f) Contraintes de cisaillement (TSDBT).....	115
<b>Figure V.7.</b> Distribution des contraintes normales et de cisaillement à travers l'épaisseur des panneaux sandwichs.....	116
<b>Figure IV.8.</b> Distribution des contraintes à travers l'âme P-FGM selon chaque théorie utilisée: a) Contraintes normales, b) Contraintes de cisaillement .....	118
<b>Figure V.9.</b> Distribution des contraintes à travers les panneaux sandwichs selon chaque théorie utilisée: a) Contraintes normales, b) Contraintes de cisaillement .....	119
<b>Figure V.10.</b> Comparaison des déflexions expérimentales et analytiques des âmes.....	120
<b>Figure V.11.</b> Comparaison des flèches expérimentales et analytiques du panneau P-FGM-1 .....	121
<b>Figure V.12.</b> Comparaison des valeurs de contrainte ultime de cisaillement de panneau sandwich avec la norme NF 54-606 [119] et les données expérimentales.....	122

---

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I

---

<b>Tableau I.1.</b> Contraintes à la rupture en flexion 3-points sur du plâtre pris gâché à E/P = 0,82 mesurées par Coquard. 1992 [83] .....	34
<b>Tableau I.2.</b> Caractéristiques thermiques du plâtre [85] .....	36

## Chapitre II

---

<b>Tableau II.1 :</b> Résultats des essais de compression et de flexion en trois points sur le plâtre...47	
<b>Tableau II.2 :</b> Caractéristique de liège utilisé .....	50
<b>Tableau II.3.</b> Propriétés évaluées des peaux PVC et résine utilisées... ..	54
<b>Tableau II.4.</b> Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR [91] .....	55
<b>Tableau II.5.</b> Composition des éprouvettes en fonction des différentes épaisseurs et quantités.....	57

## Chapitre III

---

<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques physiques mesurées et évaluées... ..	66
<b>Tableau III.2.</b> Caractéristiques thermiques mesurées... ..	68
<b>Tableau III.3.</b> Résultats statistiques en fonction de la dégradation fonctionnelle.....	70

## Chapitre IV

---

<b>Tableau IV.1.</b> Résultats des essais de compression de toutes éprouvettes testées .....	81
<b>Tableau IV.2.</b> Résultats des essais de flexion 3-points de toutes les éprouvettes testées... ..	86
<b>Tableau IV.3.</b> Récapitulatif de tous les résultats obtenus sur les panneaux testés... ..	98
<b>Tableau IV.4.</b> Comparaison des résultats du panneau P-FGM avec les résultats de la littérature.....	99

---

**Chapitre V**

---

<b>Tableau V.1.</b> Propriétés géométriques et mécaniques des panneaux et âmes modélisés.....	105
<b>Tableau V.2.</b> Contrainte et fraction volumique de la théorie (ESDBT) pour $P = 1$ .....	117
<b>Tableau V.3.</b> Comparaison entre la flèche expérimentale et analytique de l'âme .....	119
<b>Tableau V.4.</b> Comparaison entre la flèche expérimentale et analytique des panneaux .....	120
<b>Tableau V.5.</b> Résumé des contraintes de cisaillement obtenues par chaque approche utilisée.....	122

**PUBLICATIONS INTERNATIONALES**

1. **S. Medjmadj**, A. Si Salem, S. Ait Taleb (2022). Experimental behavior of plaster/cork functionally graded sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials*, 344 (2022) 128257 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128257>
2. **Medjmadj, S.**, Ait Taleb, S. & Si Salem, A. (2023). Analytical Modeling of the Bending Behavior of Plaster/Cork Functionally Graded Core Sandwich Beams: Analysis and Experimental Validation. *Iranian journal of Science and Technology*. In press: <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00732-z>

**COMMUNICATIONS INTERNATIONALES**

1. **S. Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. NLFEA-based Post- Elastic Modeling of the Bending and Thermal Behavior of Polymer Foam FGM Core Sandwich Beams. International Conference on Trends and Innovations in Smart Technologies (ICTIST'22), 07-08 October 2022, LONDON, United Kingdom. <http://www.aieys.com/ictist.html>
2. **Sara Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Modelling the three-point bending response of multilayered sandwich members based on FGM polymer core. 2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences on 15-18 October in 2022 at Konya/Turkey. <https://www.iceans.org>
3. **Sara Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Buckling response of composited foam core sandwich walls: A nonlinear local approach analysis. 4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences on 10-13 November in 2022 at Konya/Turkey. <https://www.icaens.com/>
4. **Sara Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Modeling the core-skin bond interface of bio-based multilayered sandwiches under axial compression. 4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences on 10-13 November in 2022 at Konya/Turkey. [https://www.icaens.com/.](https://www.icaens.com/)
5. **Sara Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. A comparative study on mechanical performance evaluation of multilayered sandwich members. 1st International Conference on Scientific and Academic Research on 10-13 December in 2022 at Konya/Turkey. <https://www.icsarconf.com/>
6. **Sara Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb A. Si Salem and S. Ait Taleb Modeling the core-skin bond interface of bio-based sandwich panels under axial compression and buckling. 1st International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences. December 20-23, 2022, Konya, Turkey. <https://www.icensos.com/>
7. Souad Ait Taleb, **Sara Medjmadj** and Abdelmadjid Si Salem. Valorization of cork waste within a plaster matrix for designing a new green material under axial compression: Experimental and Numerical approaches. *Urban Planning and Architectural Design for*

Sustainable Development (UPADSD), 24-26 of October 2023, University of Florence, Italy.

<https://www.ierek.com/events/upadsd-8th#overview>

8. Abdelmadjid Si Salem, **Sara Medjmadj** and Souad Ait Taleb. A New Environmentally Friendly Plaster/Cork waste Functionally Graded Building Material: Thermal and Physical Characterization. Urban Planning and Architectural Design for Sustainable Development (UPADSD), 24-26 of October 2023, University of Florence, Italy. <https://www.ierek.com/events/upadsd-8th#overview>

9. Souad Ait Taleb, **Sara Medjmadj** and Abdelmadjid Si Salem Experimental design and numerical simulation of a new green material based-cork waste under centered compression. Green Urbanism, 11 – 12 December 2023, University of Rome Tor Vergata, Italy <https://www.ierek.com/events/green-urbanism-gu#overview>

10. Abdelmadjid Si Salem, **Sara Medjmadj** and Souad Ait Taleb. On the thermophysical, evaluation of novel ecofriendly Plaster/Cork Functionally Graded and insulated Materials. Green Urbanism, 11 – 12 December 2023, University of Rome Tor Vergata, Italy <https://www.ierek.com/events/green-urbanism-gu#overview>

## **COMMUNICATIONS NATIONALES**

1. **S. Medjmadj**, S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait Tahar. Behavior of graded-composite beams strengthened with GFRP face sheets: Analytical modeling. The first National Conference of Materials Sciences and Engineering (MSE'22). 28-29 June 2022 Khenchela, Algeria, <https://www.jetjournal.org>

2. **S. Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Modélisation analytique d'un panneau sandwich à base d'une âme fonctionnellement graduée et des semelles en polymère. 1st National Conference on Science & Technology, 27th-28th JUNE 2022, Mascara, Algeria. [https://www.univ-mascara.dz/evenementscientifique/pages/pres\\_evenement\\_en.php?q3=40](https://www.univ-mascara.dz/evenementscientifique/pages/pres_evenement_en.php?q3=40)

3. **S. Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Simulation numérique du comportement d'une structure multicouche à base de matériaux à gradient fonctionnel. Le 1er Séminaire National de Génie Civil et des Travaux Publics "SNGCTP-1" 15& 16 Février 2022 Khenchela, Algérie [univ-khenchela.com/](http://univ-khenchela.com/)

4. **Sara Medjmadj**, Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem. Bending behavior of eco-friendly graded sandwich core beams for building masonry: Experimental approach. 2 ème Séminaire National de Génie Civil "SNGC2022 "Université de Souk-Ahras. 18-19 Décembre 2022. <https://www.univ-soukahras.dz/fr/actualites/2eme-seminaire-national-de-genie-civil-sngc-2022>

5. **S. Medjmadj**, S. Ait Taleb, A. Si Salem (2022). Bending behavior of eco-friendly graded sandwich beams for building masonry: Experimental approach. International Conference on Energy and Material Sciences EMS'2022, 16-17 November 2022, University of Skikda. [Proceeding-of-the-International-Conference-on-Energy-and-Material-Sciences-EMS2022.pdf](https://www.univ-soukahras.dz/fr/actualites/2eme-seminaire-national-de-genie-civil-sngc-2022)

6. A. Si Salem, **S. Medjmadj**, S. Ait Taleb (2022). Physical and thermal characterization of bio-based FGM core sandwich walls for engineering insulation. International Conference on Energy and Material Sciences EMS'2022, 16-17 November 2022, University of Skikda. [Proceeding-of-the-International-Conference-on-Energy-and-Material-Sciences-EMS2022.pdf](#)
7. **Sara Medjmadj**, Souad Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem and Amar Kahil "Modeling the nonlinear bending behavior of functionally graded core sandwich panels with polypropylene skins" International Conference on Geotechnical, Structural and Advanced Materials Engineering, December 5-7, 2021, Biskra, Algeria. <https://icgsame.info>
8. **S. Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Recovery and valorization of agglomerated cork waste to design insulated members core. 1 st International Conference on Materials Sciences and Technology (MatScience-2022), Dec, 13-15th, 2022 Khenchela. <https://matscience2022.wixsite.com/uakh>
9. **S. Medjmadj**, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Thermal characterization of plaster matrix with cork aggregates inclusion for building insulation. Séminaire International en Génie Industriel et Mathématiques Appliquées (SGIMA'2022), Le 23-24 OCT 2022 Skikda. <http://ftech.univ-skikda.dz/sigima2022/>

## Résumé

Dans ce travail de thèse on s'intéresse à l'analyse du comportement de nouveaux panneaux sandwichs en âme graduée à base d'une conception respectueuse de l'environnement, constituée du plâtre avec des ajouts granulaires du liège et des peaux symétriques en polymère collées sur les deux faces de l'âme à l'aide d'une résine STR. La nouveauté de la présente recherche est de souligner l'apport des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des structures sandwichs et de mettre en évidence l'avantage de cette nouvelle technologie de conception pour répondre aux besoins des structures en termes d'isolation thermique et de capacité mécanique.

Un protocole expérimental a été mis au point afin de mettre en évidence les performances mécaniques, physiques et thermiques des panneaux sandwichs développés. En effet, cinq types d'éprouvette en fonction de la dégradation des matériaux ont été conçues pour les essais de caractérisation de l'âme. Ensuite, trois séries de panneaux sandwichs ont été élaborées et testées sous compression axiale, flambement et flexion 03-points. Les courbes de capacité, les modes de rupture, les mesures de conductivité thermique et de porosité de tous les échantillons testés ont été fournis et discutés pour mettre en évidence la configuration de l'âme graduée par rapport à la configuration conventionnelle.

Afin de compléter les essais mécaniques et physiques, une analyse microscopique des âmes de panneaux sandwichs est menée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Cette analyse permet de bien comprendre la microstructure des différents types d'éprouvette et notamment d'examiner la qualité de l'adhérence et la cohésion entre les granulats du liège et la matrice plâtre au niveau des phases de transition.

Une Modélisation analytique du comportement mécanique des panneaux élaborés est mise au point afin de transcrire la réponse des panneaux sous chargement de flexion. La variation de rigidité dans la direction de l'épaisseur des panneaux est modélisée à travers une nouvelle loi de puissance. Une étude comparative a été réalisée entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par le modèle analytique basé sur les théories des poutres d'ordre élevé. Après la validation du modèle, l'effet du changement du paramètre du matériau qui régit la nature de la transition de phase sur l'évolution de la flèche, les contraintes normales et de cisaillement est présenté et discuté.

L'analyse des résultats obtenus à travers la confrontation avec les travaux récents disponibles dans la littérature scientifique mis en exergue les avantages conceptuels des panneaux proposés en termes d'optimisation des paramètres de conception de ces matériaux de construction, qui peuvent être utilisés comme cloisons et panneaux de séparation dans les structures.

**Mots clés :** Panneaux sandwichs, Matériaux à gradient fonctionnel (FGM), Isolation thermique, Comportement mécanique, Analyse expérimentale, Modélisation analytique.

## Abstract

The present PhD thesis investigates the behavior of new functionally graded core based-sandwich panels manufactured according to an environmentally friendly design based on a plaster matrix with cork aggregates inclusion and symmetrical polymer skins bonded to both core faces using STR resin. The novelty of the present research is to highlight the contribution of functional gradient materials (FGM) on the physical and mechanical characteristics of sandwich structures, and to determine the advantage of this new design technology to respond to civil structures requirements in terms of thermal insulation and mechanical capacity.

An experimental procedure was carried out to highlight the mechanical, physical and thermal performance of the designed sandwich panels. Indeed, five different layouts of specimen were designed to characterize the panel's core according to the material degradation. Hence, three sets of sandwich panels were manufactured and tested under axial compression, buckling and 03-point bending. Capacity curves, failure modes, thermal conductivity and porosity measurements of all tested samples were provided and discussed to highlight the graded core configuration compared to the conventional one.

To complete the mechanical and physical tests, a microscopic analysis of the sandwich panel cores was carried out using a scanning electron microscope (SEM). This analysis provides a good understanding of the microstructure of the different types of specimen, and in particular examines the quality of adhesion and cohesion between the cork aggregates and the plaster matrix namely at the transition phases.

Analytical modeling of the mechanical behavior of the designed panels is established to transcribe the bending response of the panels. The stiffness variation through the panel thickness was modeled according to a new power-law approach. A comparative study was carried out between the experimental results and the predicted ones using the analytical model based on high-order beam theories. After the qualitative and quantitative validation of the model, the effect of material power-law parameter that governs the transition phase on the evolution of deflection, normal and shear stresses is presented and discussed.

the obtained outcomes analysis as well as the comparison with recent works available in the scientific literature highlights the conceptual advantages of the proposed panels in terms of design parameters optimization of the of these construction materials, which can be used as partitions and separation panels within civil structures.

**Keywords:** Sandwich panels, Functionally graded materials (FGM), Thermal insulation, Mechanical behavior, Experimental analysis, Analytical modeling.

## الملخص :

تحلل هذه الأطروحة سلوك ألواح الساندويتش الجديدة ذات النواة المتدرجة القائمة على تصميم صديق للبيئة، والتي تتكون من الجبس مع إضافات من الفلين الحبيبي وجلود البولييمر المتماثلة الملتصقة على جانبي النواة باستخدام الراتنج. تكمن حادثة هذا البحث في تسليط الضوء على مساهمة المواد المتدرجة الوظيفية في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للهياكل الشطائرية وإظهار ميزة هذه التقنية التصميمية الجديدة في تلبية احتياجات الهياكل المدنية من حيث العزل الحراري والقدرة الميكانيكية.

وقد تم تطوير بروتوكول تجريبي لإثبات الأداء الميكانيكي والفيزيائي والحراري للألواح العازلة المطورة. تم تصميم خمسة أنواع من عينات الاختبار، اعتماداً على تحلل المواد، لاختبارات التوصيف الأساسية. تم بعد ذلك تطوير ثلاث سلاسل من الألواح العازلة واختبارها تحت الضغط المحوري والالتواء والانحناء من 03 نقطة. تم تقديم ومناقشة منحنيات القدرة وأنماط الفشل والتوصيل الحراري وقياسات المسامية لجميع العينات المختبرة لتسليط الضوء على تكوين اللب المتدرج مقارنةً بالتكوين التقليدي.

ولإكمال الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية، تم إجراء تحليل مجهري لقلب الألواح العازلة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح. يوفر هذا التحليل فهماً جيداً للبنية المجهرية للأنواع المختلفة من العينات، وعلى وجه الخصوص، يتيح لنا فحص جودة الالتصاق والتماسك بين ركام الفلين ومصفوفة الجبس في المراحل الانتقالية.

تم تطوير نمذجة تحليلية للسلوك الميكانيكي للألواح المنتجة من أجل نسخ استجابة الألواح تحت التحميل بالثني. تم نمذجة التباين في الصلابة في اتجاه سُمك الألواح باستخدام قانون قوة جديد. تم إجراء دراسة مقارنة بين النتائج التجريبية وتلك التي تنبأ بها النموذج التحليلي القائم على نظريات الحزم عالية الترتيب. بعد التحقق من صحة النموذج، تم عرض ومناقشة تأثير تغيير معلمة المادة التي تحكم طبيعة الانتقال الطوري على تطور الانحراف والضغط العادية والقصية.

يسلط تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من خلال المقارنة مع الأعمال الحديثة المتوفرة في الأدبيات العلمية الضوء على المزايا المفاهيمية للألواح المقترحة من حيث تحسين معايير تصميم مواد البناء هذه، والتي يمكن استخدامها كقواطع وألواح فصل في الهياكل.

**الكلمات الرئيسية:** ألواح الساندويتش، مواد التدرج الوظيفي، العزل الحراري، السلوك الميكانيكي، التحليل التجريبي، النمذجة التحليلية

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

Les structures sandwiches ont un grand rôle dans la construction des éléments composites, en raison de leurs propriétés importantes et de leur configuration qui confèrent aux matériaux de sandwich une résistance et une rigidité spécifique pour une faible densité. Ceci constitue un des critères de première importance dans plusieurs domaines, par opposition aux composites monolithiques traditionnels [1-5]. En effet, lors de la modification de l'épaisseur et de la nature de l'âme, il est possible de conférer à la structure le matériau approprié. Cependant, l'inconvénient de ces structures est l'existence de concentration des contraintes au niveau des interfaces entre les couches grâce au changement brutal des propriétés mécaniques d'une couche à l'autre qui conduit au décollage et la fissuration matricielle. Dans cette optique, les matériaux à gradient de propriété (FGM) ont connu de nos jours leur utilisation comme un noyau dans les structures sandwich en raison des avantages de réduire les contraintes de cisaillement inter-faciales [6,7] tels que les surfaces libres, des racines de fissures et des coins et diminuer la disparité dans les propriétés matérielles, ce qui va conférer au matériau un comportement optimisé [6-8].

Les matériaux fonctionnellement gradués (FGM) sont caractérisés par une microstructure et une spécificité de composition qui varie progressivement et continuellement selon une loi de fonction à travers l'épaisseur. Ces matériaux légers et durables sont largement utilisés dans plusieurs domaines du génie civil pour éviter les contraintes de cisaillement induites par la discontinuité de rigidité à l'interface entre le parement et l'âme [7-10].

L'originalité et la principale problématique posée dans ce travail de thèse est de souligner l'apport des FGM sur les caractéristiques physiques, thermiques et mécaniques des structures sandwiches en utilisant des matériaux naturelles et respectueux de l'environnement. La conception proposée permet d'associer deux matériaux compatibles pour l'élaboration de l'âme, à savoir : une matrice plâtre et des ajouts granulaires du liège, ce qui confère à la fois légèreté, rigidité et isolation thermique. La fonction résistance des panneaux proposés est assurée par deux peaux symétriques en polymère renforcé collées sur les deux faces de l'âme à l'aide d'une résine STR. En effet les objectifs visés pour répondre à ces préoccupations sont les suivants :

- Mettre en évidence l'effet des FGM sur le comportement global des structures sandwiches, notamment l'élimination des interfaces de collage et la concentration des efforts dans les structures multicouches ;

- Proposition d'une nouvelle technologie de conception de panneau sandwich qui répond aux exigences environnementales et socio-économiques et plus particulièrement, capable de pallier aux besoins des structures civiles en termes d'isolation, légèreté et résistance.
- Développement d'un outil analytique pour modéliser et prédire la résistance et la ductilité des panneaux sandwichs à base des FGM.
- Validation des modèles proposés à travers un protocole expérimental basé sur la caractérisation mécanique, physique et thermique de tous les matériaux constitutifs, et étudier le comportement mécanique de panneau sandwich en FGM.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons structuré la présente thèse en cinq chapitres. Le **premier chapitre** propose une revue et analyse bibliographique permettant de définir les structures sandwiches, leurs constituants et leur comportement mécanique et physico-thermique. Les matériaux à gradient fonctionnel FGM sont ensuite introduits en présentant leurs domaines d'application, propriétés matérielles et comportements thermiques.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation de la matrice des essais et les différentes matières premières utilisées pour l'élaboration des panneaux sandwichs, à savoir : le plâtre, les granulats de liège, les feuilles PVC et la résine STR. Les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques de chacun de ces matériaux sont séparément évaluées. Par la suite, la description détaillée des étapes d'élaboration des panneaux sandwichs, le mode opératoire et la désignation des variantes d'étude sont soulignées.

Dans le **troisième chapitre**, la caractérisation physique et thermique est réalisé au niveau du laboratoire de génie civil. Les essais sont réalisés sur cinq types d'âmes de dimension normalisée à savoir : éprouvettes témoins constituées d'une matrice plâtre, éprouvettes conçues à base d'une mixture aléatoire entre la matrice plâtre et les granulats de liège, éprouvettes en âme fonctionnellement graduée, différentes l'une à l'autre selon la dégradation de phase dans la direction de l'épaisseur et la quantité de matériau utilisé. La conductivité thermique, la porosité, la masse volumique apparente et l'absorption d'eau ont été calculées afin de bien comprendre le comportement thermique et physique de la nouvelle conception proposée. L'observation et l'analyse microscopique des différentes âmes de panneaux sandwichs est conduite à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) afin de visualiser la microstructure et l'adhérence entre les particules des âmes.

Le **quatrième chapitre** se focalise sur l'étude du comportement mécanique des âmes, à travers des essais de compression et de traction par flexion. Après la caractérisation de l'âme, trois séries de panneaux sandwichs ont été testées sous compression avec une dimension de ( $50 \times 50 \times 30$  mm<sup>3</sup>), flambement ( $350 \times 50 \times 30$  mm<sup>3</sup>) et flexion 03-points ( $550 \times 50 \times 30$  mm<sup>3</sup>). Les courbes forces-déplacements et les modes de rupture des différents éprouvettes sont illustrés et discutés. Les résultats obtenus sont explicitement accentués et confrontés aux progrès récents de la littérature scientifique.

Après l'investigation expérimentale sur les nouveaux panneaux sandwichs développés, le **cinquième chapitre** a pour objectif de compléter les observations expérimentales par une prédiction théorique en utilisant les théories d'ordre élevé (loi exponentielle ESDBT, loi sigmoïdal SSDBT et la loi de puissance TSDBT). À cet égard, l'originalité de la procédure analytique est de confronter les résultats de modèle analytique aux observations expérimentales. La variation du module de Young en fonction de paramètre de matériau P dans le panneau FGM ont été décrits par une nouvelle loi de type power-law. Ensuite, l'effet du changement de ce paramètre sur l'évolution de la flèche, les contraintes normales et les contraintes de cisaillement est présenté et discutés selon la théorie des poutres d'ordre élevé utilisée. Enfin, les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux et ceux prédits par la norme française NF T 54-606 [119] dans le but de mettre en évidence l'avantage de cette nouvelle technologie de conception et de valider le modèle proposé.

Des conclusions relatives à chaque chapitre sont listées. Néanmoins, une **conclusion générale** qui résume les principaux résultats obtenus, et propose des perspectives pour de futurs travaux de recherche dans le domaine de fabrication des panneaux sandwichs fonctionnellement graduée est dressée.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

## **I.1. Introduction**

Les structures sandwichs sont considérées parmi les composites les plus utilisés grâce à leurs légèretés, performances et propriétés mécaniques élevées qui offrent de grandes potentialités aux concepteurs dans des secteurs d'ingénierie. Leur concept a été introduit depuis 1820 [1], bien que leur utilisation massive ait été concentrée après un siècle ou des décennies [2]. Récemment, l'utilisation des sandwichs dans la construction a augmentée, notamment dans certains éléments d'isolation intérieure dans le secteur du bâtiment et les projets de réhabilitation d'infrastructures routières, tels que la fabrication de tabliers de pont où la légèreté, la durabilité et la résistance à la corrosion sont fortement recommandées [3-5].

Les applications spécifiques et les conditions environnementales conduisent les constructeurs à choisir un nouveau matériau qui garantisse l'économie, performance et la durée de vie prolongée. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repositionner le problème et envisager de nouveaux matériaux. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à *un matériau à gradient fonctionnel*.

Par conséquent, ce chapitre présente une recherche bibliographique permettant de définir les structures sandwichs et de comprendre leurs différents constituants (peaux et âme) à travers une description de ses rôles ainsi que leur comportement mécanique, physique et thermique dans le but de la réalisation des panneaux renforcées par des matériaux naturels. Par la suite, nous nous sommes attachés à présenter et définir les matériaux à gradient fonctionnelle (FGM) à travers une synthèse détaillée sur ces matériaux : domaine d'application, leurs principales propriétés effectives et le pouvoir isolant (Analyse thermique). En effet, une revue de la littérature récente est effectuée concernant le comportement mécanique des structures sandwichs et les matériaux en FGM.

## **I.2. Structures sandwichs**

### **I.2.1. Constituants des structures sandwichs**

On appelle structure sandwich un assemblage de deux peaux de grande rigidité avec une faible épaisseur et de très bonnes propriétés mécaniques en flexion (grande résistance, module élevé) pour assurer la fonction de charge, séparées par une âme qui présente à la fois des qualités de légèreté et de performances physiques avec une forte épaisseur, en gardant une distance

constante entre les deux peaux. L'insertion de cette âme permet d'augmenter le moment d'inertie de la structure, et par conséquent sa rigidité en flexion, tout en minimisant la masse de l'ensemble. Les structures sandwiches combinent donc les propriétés des différents constituants pour former un ensemble ayant des propriétés globalement supérieures à celles de chaque composant considéré séparément.

Le troisième composant dans les structures sandwiches est l'adhésif qui assure un bon assemblage de la structure, une meilleure résistance au cisaillement et une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre.

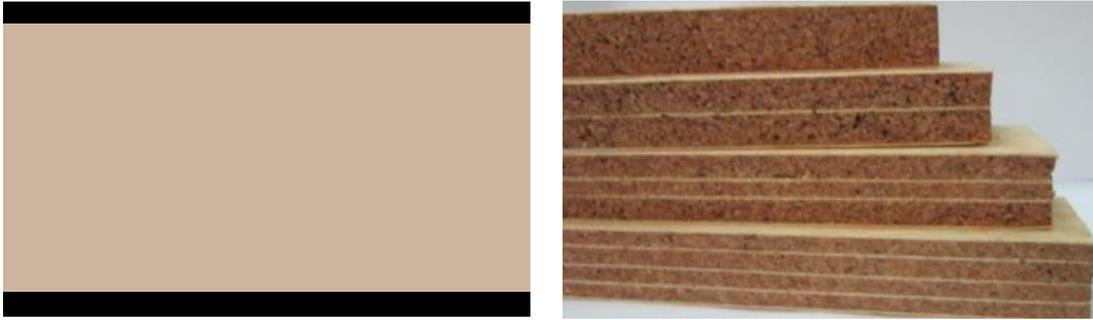
### **I.2.1.1. L'âme**

L'âme est connue par sa légèreté, leurs propriétés de retard au feu [11], excellente isolation thermique [12] et peuvent également contribuer à l'amortissement des vibrations [13]. Dans le cas d'une sollicitation en flexion, l'âme a un but de reprendre les efforts de cisaillement et les efforts de compression (par exemple les applications de type planchers) dans le cas d'une sollicitation en compression perpendiculaire.

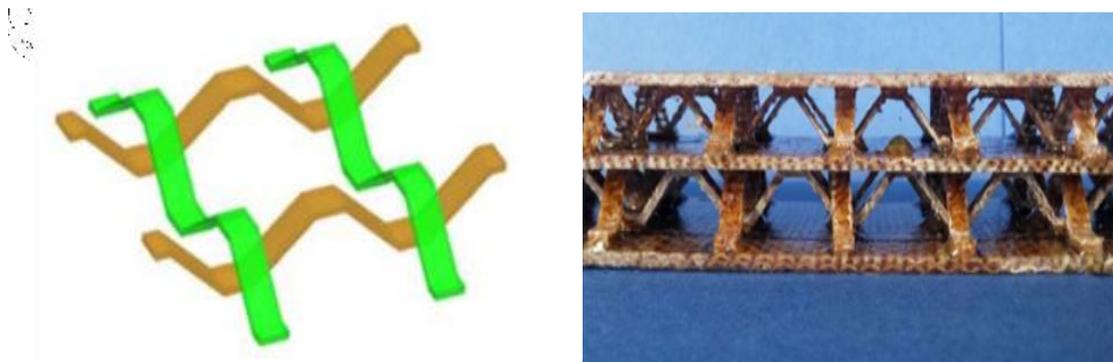
Les matériaux d'âme se répartissent en trois classes telles que **les matériaux solides à faible densité**, parmi les matériaux solides les plus cités figurent les mousses cellulaires et syntactiques qui sont des résines chargées de microsphères creuses de verres, l'un des matériaux solides les plus souvent mentionnés et reconnu pour ses propriétés spécifiques très intéressantes est le balsa et le liège. Le balsa (bois cellulaire) possède des propriétés mécaniques liées à la masse, notamment en compression et en cisaillement, est utilisé comme un matériau d'âme dans les sandwichs [14-17]. Le liège apprécié pour ses excellentes propriétés thermiques, absorption d'énergie (choc, vibration, etc.), sa nature qui facilite leur mise en forme, légèreté, imperméabilité et la résistant à la friction [18-21].

La deuxième classe est essentiellement **le nid d'abeille**, connu sous le terme "Nida", un matériau léger et flexible composé d'une maille hexagonale et de divers matériaux tels que l'aluminium, le papier et certains thermoplastiques. Représente un matériau à haute densité se présentant sous une forme cellulaire. Le nid d'abeille est largement utilisé dans l'industrie aérospatiale en raison de sa rigidité, sa bonne résistance à la chaleur, son rapport résistance/poids élevé et la bonne isolation phonique. Le sandwich en nid d'abeille peut donc accepter une déformation sévère et absorber l'énergie sans se rompre.

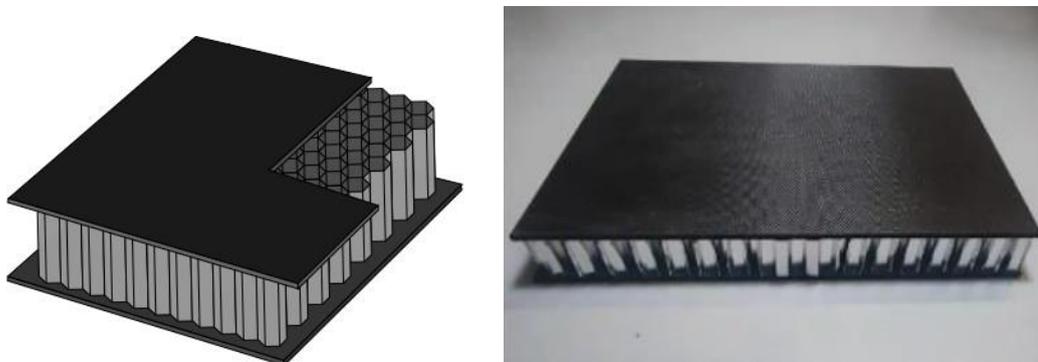
La troisième classe comprend les matériaux denses riches en formes **ondulées** (tôles ondulées) [22-24]. Les Figures I.1, I.2 et I.3 montre des exemples de matériaux d'âme pour chaque classe.



**Figure I.1.** Exemple de structure sandwich à âme en bois [5].



**Figure I.2.** Exemple de structure sandwich à âme ondulée [24].



**Figure I.3.** Exemple de structure sandwich à âme en nid d'abeille [6].

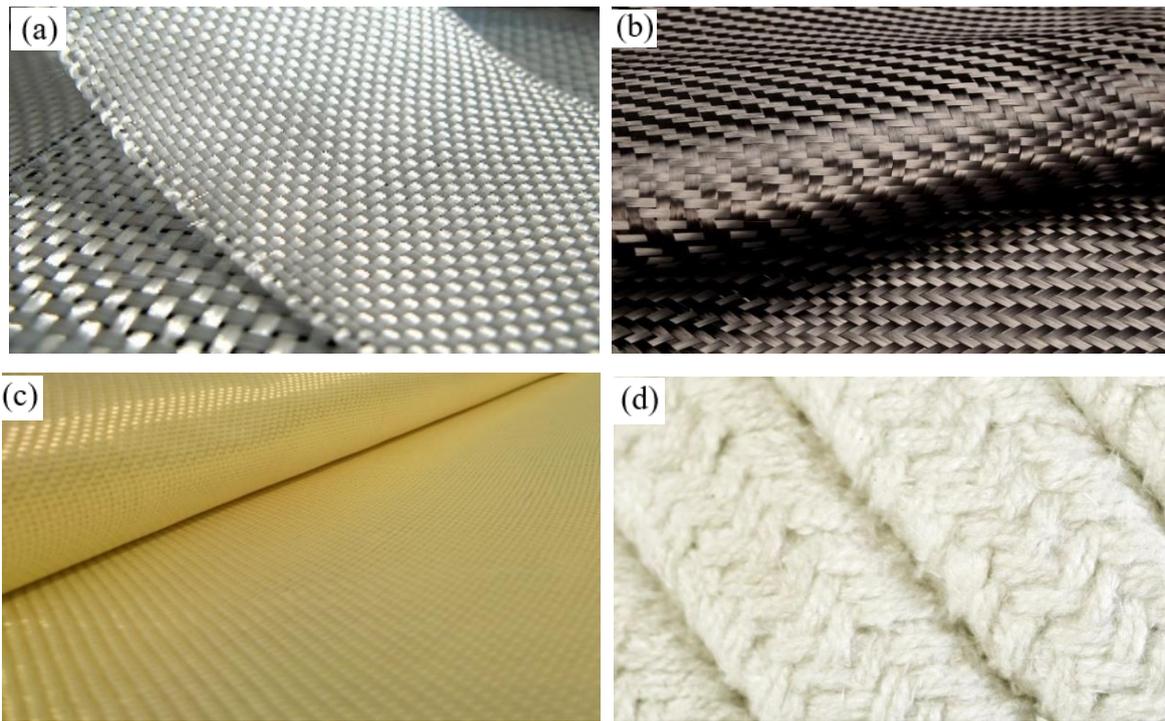
### I.2.1.2. Les peaux (Semelles)

La peau est une barrière de faible épaisseur qui protège l'âme et le reste de la structure des agressions extérieures, comme les attaques chimiques, l'humidité, les impacts...etc., tel qu'elle possède de très bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent également conférer à la structure sandwich un aspect esthétique lorsque les pièces sont visibles.

Le choix et le type de matériau utilisé comme peau dans les sandwichs est important car il dépend du composite utilisé. Il peut s'agir de bois stratifié [5,25], contreplaqué, de tôle métallique (le titane [26-27], l'aluminium [28-29], acier [30-32], de fibres renforcées de manière organique ou inorganique (composites), ou des composites stratifiés tels que les thermoplastiques ou principalement les thermodurcissables renforcés de fibres. Ils sont disponibles sous forme de nappes unidirectionnelles, broyés, tissés, non-tissés, textiles filés, de rubans ou de tissus tricotés. Parmi les principales fibres les plus utilisées :

- **Les fibres de verre** [33-36], produit par un procédé appelé fusion directe à partir de verre filable, appelé verre textile. Elle est spécifiquement composée de silice, d'alumine, de chaux et de magnésium. Ont un diamètre d'environ 10  $\mu\text{m}$  et sont connues pour leurs propriétés mécaniques et thermiques (haute résistance, module d'élasticité, masse volumique modérés et faible conductivité thermique).
- **Les fibres de carbone** [37-39] : est une fibre synthétique, appartenant à la famille des fibres minérales artificielles et ne contenant pas de silicium. Elles sont fabriquées à partir de précurseurs de polymères, sous forme de fibres orientées et réticulées, 10 à 20 fois plus chère que la fibre de verre, est donc utilisée dans des applications nécessitant des propriétés comparables à celles de l'acier. Elles présentent de bon propriétés mécaniques (haute résistance, haut module, faible dilatation thermique) son diamètre est d'environ de 5  $\mu\text{m}$ .
- **Les fibres d'aramide** (kevlar) [40-41] : est une fibre synthétique haute performance, produite à partir de polyamides aromatisés qui assurant la résistance au délaminage, tolérance à l'endommagement grâce au tissage des fibres et les propriétés mécaniques dans le sens transverse. Le diamètre d'une fibre d'aramide est du même ordre de grandeur que celui d'une fibre de verre.

La Figure I.4 montre les différents tissus de fibre utilisés comme des peaux dans les structures sandwichs.



**Figure I.4.** Les différents tissus utilisés comme des peaux : a) Fibre de verre ; b) Fibre de carbone ; c) Fibre d'aramide (kevlar) ; d) Fibre de céramique [111].

La peau supérieure des structures sandwiches a pour but de reprendre les efforts de compression par contre la peau inférieure les efforts de traction. Par conséquent, la semelle composite doit résister aux forces de traction/compression dans le sens de flexion du sandwich, ce qui est important dans la sélection des composants.

### I.2.1.3. L'adhésif

Le troisième composant du sandwich est l'adhésif, responsable du transfert des efforts entre la peau et l'âme pour assurer un bon assemblage de la structure, qui peut être réalisé par soudage, collage ou brasage, celle-ci doit être assez malléable et présenter des propriétés mécaniques spécifiques élevées. L'adhésif est connu pour sa caractéristique principale d'une bonne résistance au cisaillement qui conduit à une bonne qualité de l'interface. Parmi les éléments essentiels :

- L'état de surface peau/âme requis pour améliorer l'adhérence ;
- Le dimensionnement de l'interface ;
- Viscosité des adhésifs avant leur polymérisation ;
- La compatibilité de l'adhésif avec d'autres ingrédients doit également être prise en compte pour garantir l'adhérence.

### **I.2.1.3.1 Les résines**

Le rôle des résines utilisées dans les composites est de transférer les contraintes mécaniques aux fibres et de les protéger du milieu extérieur. Les résines sont donc assez malléables, doivent avoir une bonne compatibilité avec la fibre. De plus, afin de maintenir les propriétés mécaniques spécifiques élevées des composites, ceux-ci doivent avoir une faible densité. Il existe de nombreux types de résines, qui se répartissent en deux grandes familles : thermoplastiques et thermodurcissables.

### **I.2.1.3.2 Les colles**

Les colles sont des produits de consistance liquide, pâteuse ou gélatineuse utilisées pour assembler des pièces par contact. Les colles synthétiques sont essentiellement fabriquées à partir d'hydrocarbures. Étant donné que les colles sont principalement composées d'un liant et d'une phase en solution, la nature de ces deux composants détermine si la colle est organique ou naturelle. Il existe deux grandes catégories des colles :

- Colles à base de solvants dits « solutions » : Ce sont des composés organiques volatils nocifs pour l'organisme. Les éthers de glycol sont également présents dans la composition dans des proportions plus importantes que dans les produits dits (à l'eau).
- Colles en phase aqueuse appelées « dispersions aqueuses » ou « émulsions » : Le principal solvant à l'eau, mais moins de 5% de solvants organiques sont potentiellement nocifs pour la santé. L'eau a pour rôle de disperser les petites particules de résine et les solvants organiques peuvent former des films adhésifs lors du séchage. Ces colles sont aussi efficaces que les colles contenant des solvants organiques, mais leur utilisation est généralement limitée au carton, au papier, au verre, au bois et au PVC.

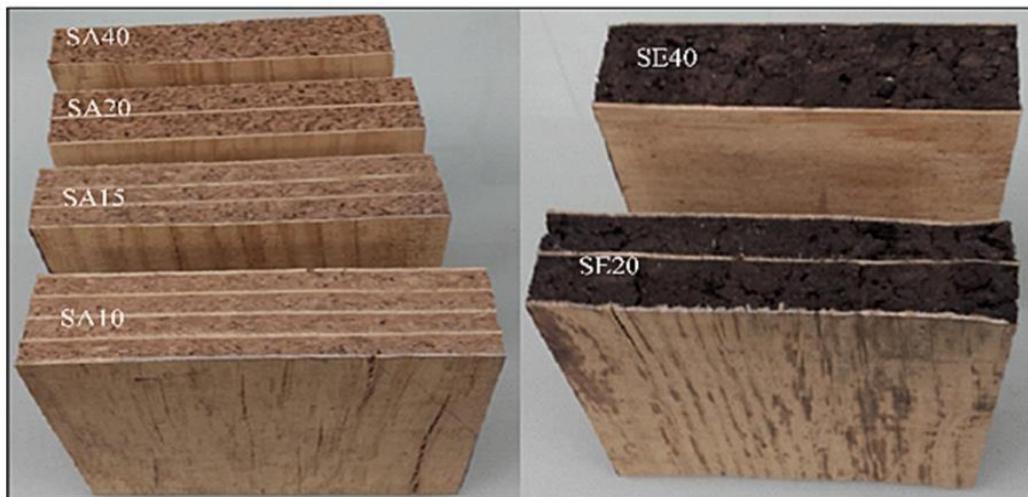
## **I.2.2. Comportement thermique des sandwichs**

La conductivité thermique, qui caractérise le comportement des matériaux en transfert de chaleur, est faible dans les composites structuraux, notamment dans les structures sandwichs, de sorte que les échanges thermiques entre deux matériaux de températures différentes, tel que la conductivité thermique de l'âme de ce dernier est faible, ce qui en fait un excellent isolant. Cela aide à garder la chaleur ou le froid dans divers endroits et objets utilisés dans la vie quotidienne.

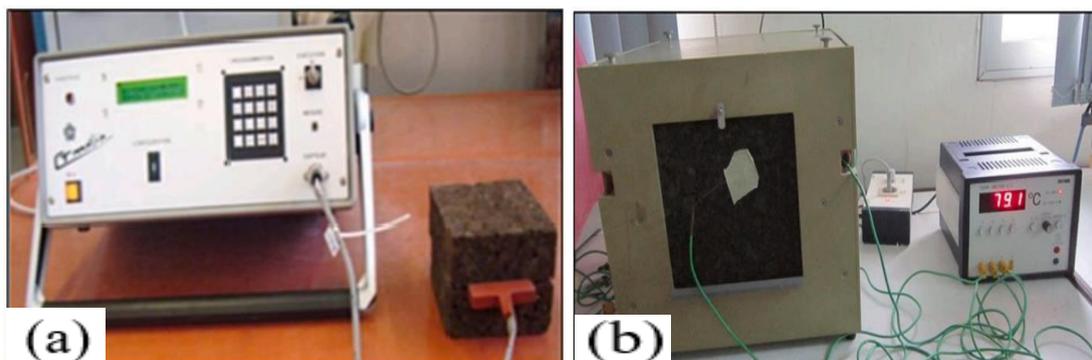
Un avantage majeur des structures sandwichs est donc leur faible conductivité thermique et très dépendante des propriétés du matériau (densité et humidité). Ce dernier réduit le risque de propagation du feu par conduction thermique et le rend moins déformable en réponse à la pression et à la température. C'est l'un des principaux défis pour les matériaux dans l'aviation commerciale. Moins sensible à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion.

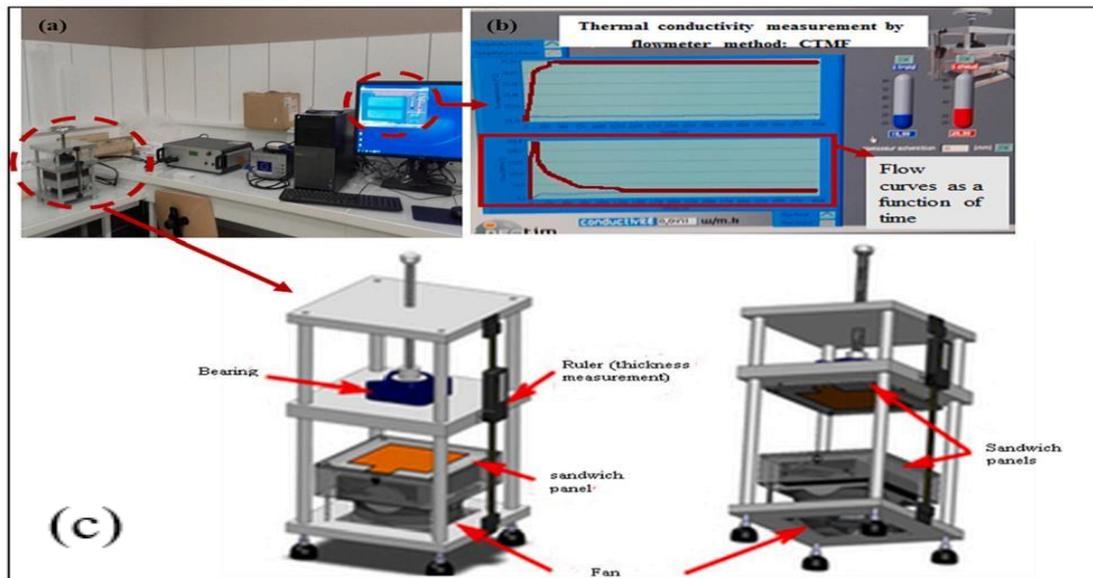
Parmi les matériaux des structures sandwichs les plus utilisés dans la construction : le bois, sa la conductivité thermique est de (0,10 à 0,21 W/Km), à 12% d'humidité selon le Wood Handbook [43].

**N. Lakreb et al [44]** ont montré que les panneaux sandwichs écologiques à base de liège (Figure I.5) sont des isolants thermiques efficaces et peuvent être utilisés pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments grâce à sa faible conductivité thermique qui a été évaluée par trois méthodes différentes : la plaque chauffante protégée, le conductimètre thermique et la méthode de débitmètre de chaleur (CTMF) (Voir Figure I.6).



**Figure I.5:** Panneaux sandwichs à base d'une âme en liège conçus par Lakreb et al [44]





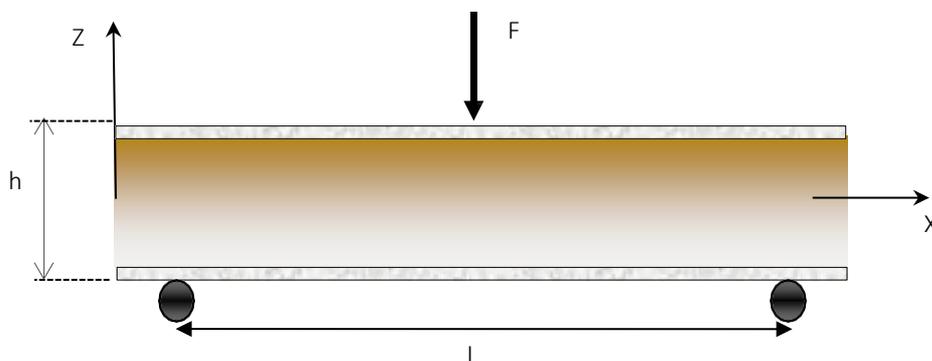
**Figure I.6** Les différentes méthodes d'évaluation la conductivité thermique : a) testeur de conductivité CT-mètre, b) Méthode de la plaque chauffante protégée ; c) la méthode de débitmètre de chaleur (CTMF) [44].

Les résultats globaux des différentes méthodes de calcul suggèrent que la conductivité thermique montre une augmentation linéaire avec l'augmentation de nombre de couches de panneau sandwich, et peuvent être considérés comme un matériau efficace et durable pour l'isolation thermique intérieure.

### I.2.3. Comportement mécaniques des sandwichs

#### I.2.3.1. Flexion trois-points

La Figure I.7 montre un panneau sandwich posé sur deux appuis simples, une charge concentrée est appliquée au milieu de ce panneau. Le contact de la charge et les appuis sur le panneau est considéré comme une liaison ponctuelle, les coordonnées (x) et (z) définissent le plan de panneau de longueur entre appuis (L) et d'hauteur totale h.



**Figure I.7.** Panneau sandwich chargé en flexion trois-points

Sous chargement central, le moment fléchissant de panneau est :

$$M = \frac{Fx}{2} \quad \text{Pour} \quad 0 < x < \frac{L}{2} \quad (\text{I.1})$$

$$M = \frac{F(L-x)}{2} \quad \text{Pour} \quad \frac{L}{2} < x < L \quad (\text{I.2})$$

Avec :

F : étant la charge appliquée,

x : est la distance par rapport à l'origine.

L'effort tranchant T est donné comme suit :

$$T = -\frac{F}{2} \quad \text{Pour} \quad 0 < x < \frac{L}{2} \quad (\text{I.3})$$

$$T = \frac{F}{2} \quad \text{Pour} \quad \frac{L}{2} < x < L \quad (\text{I.4})$$

Les contraintes de compression ou de traction dans les semelles sont alors :

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \quad \text{Pour} \quad \frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{tc}{2} \quad (\text{I.5})$$

La contrainte maximale étant obtenue pour  $z = \pm \frac{h}{2}$  et  $x = \frac{L}{2}$ , on obtient :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{FLh}{8D} E_f \quad (\text{I.6})$$

Avec D : une grandeur caractéristique d'un matériau sandwich est sa rigidité en flexion.

Pour l'âme nous obtenons :

$$\sigma_c = \pm \frac{Mz}{D} E_c \quad \text{Si} \quad -\frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{tc}{2} \quad (\text{I.7})$$

Les contraintes planes maximales supportées par l'âme donné alors par :

$$\sigma_{cmax} = \pm \frac{FLtc}{8D} E_c \quad (\text{I.8})$$

En raison de l'hétérogénéité de la structure, les modifications du module d'élasticité de la section transversale sont prises en compte dans la contrainte de cisaillement de l'âme  $\tau_c$  d'où :

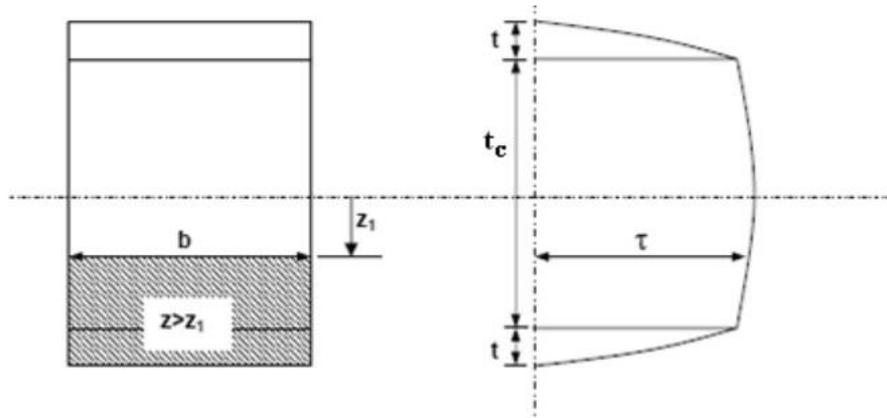
$$\tau_c = \frac{T}{Db} \sum S. E \quad (\text{I.9})$$

Où :

b : est largeur au niveau  $z_1$  ;

S : est le moment statique par rapport à l'axe Oy pour lequel  $z > z_1$ .

La distribution des contraintes de cisaillement est illustrée sur la Figure I.8.



**Figure I.8.** Répartition des contraintes de cisaillement [45]

$\Sigma S.E$  : est la somme des produits de toutes parties de la section pour lesquelles  $z < z_1$ .

Cette somme est donnée par la formule suivante :

$$\Sigma S.E = E_f \frac{bt_f d}{2} + \frac{E_c b}{2} \left( \frac{tc}{2} - z \right) \left( \frac{tc}{2} + z \right) \quad (\text{I.10})$$

D'où la contrainte de cisaillement dans l'âme au niveau  $z$  est :

$$\tau_c = \frac{T}{D} \left( E_f \frac{t_f d}{2} + \frac{E_c}{2} \right) \left( \frac{tc^2}{4} - z^2 \right) \quad (\text{I.11})$$

Cette contrainte est maximale au centre du sandwich et vaut :

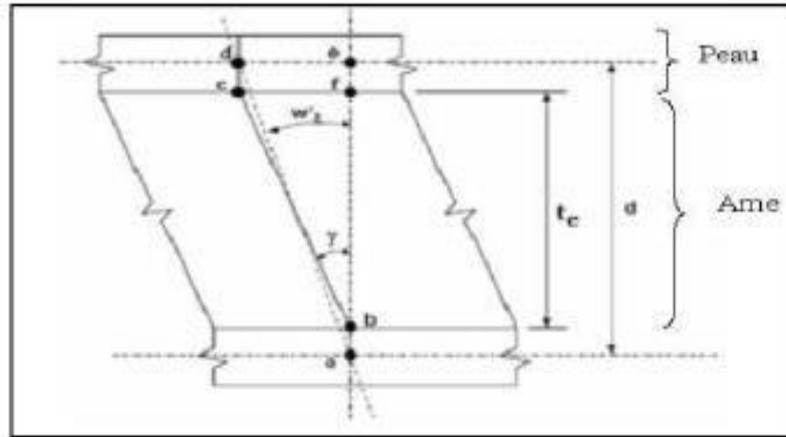
$$\tau_{c\max} = \frac{F}{4D} \left( E_f t_f d + E_c \frac{tc^2}{4} \right) \quad (\text{I.12})$$

Puisque nous savons que  $E_f > E_c$ , nous ignorons ce terme compte tenu du module d'Young de l'âme sandwich. La contrainte de cisaillement maximale s'écrit alors :

$$\tau_{c\max} = \frac{F}{2bd} \quad (\text{I.13})$$

$\tau_{c\max}$  : est dit constant sur toute l'épaisseur de l'âme.

En regardant maintenant la partie de la poutre soumise à la flexion (Figure I.9), nous pouvons voir que les points a, b, c et d qui étaient alignés avant le chargement ne restent pas les mêmes. La partie rectiligne de la peau autour de son propre axe neutre est préservée droit. Ce n'est pas le cas pour les noyaux qui subissent de fortes déformations par cisaillement.



**Figure I.9.** Déformation en cisaillement dans l'âme [45]

La mesure du déplacement d'un matériau multicouche soumis à une flexion trois points montre que ce dernier est constitué de deux parties indépendantes.

- Déplacement  $w_1$  dû à la flexion ;
- Déplacement de cisaillement  $w_2$  ; Avec :

$$w = w_1 + w_2$$

La flèche due à la flexion peut être calculée à l'aide de la théorie classique de la flexion.

$$W_1 = \frac{FL^3}{48D} \quad (\text{I.14})$$

Le déplacement de cisaillement  $w_2$  est obtenu à partir de l'intégration de l'expression  $\frac{\partial W_2}{\partial x} = \gamma \frac{c}{d}$  ce qui donne :

$$W_2 = \frac{FL}{4S} \quad (\text{I.15})$$

Finalement la flèche totale s'exprime par :

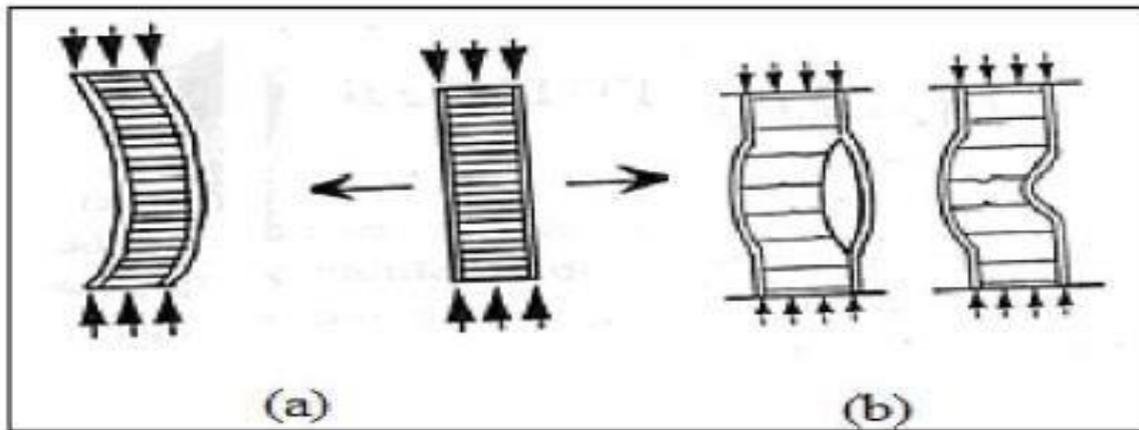
$$W = W_1 + W_2 = \frac{FL^3}{48D} + \frac{FL}{4S} \quad (\text{I.16})$$

### I.2.3.2. Flambement

Le flambement est le phénomène d'instabilité d'une structure en compression normale, ayant tendance à se déformer et à se plier dans la direction perpendiculaire de l'axe de compression. La déformation due à la pression ne joue pas toujours un rôle décisif dans la composante verticale. En revanche, au-delà d'une certaine charge, fonction de la relation section-hauteur de l'élément considéré, un phénomène d'instabilité appelé "flambement" apparaît, est un type

d'instabilité inhérent aux éléments compressifs allongés tels que les entretoises, les colonnes et les poutres compressives.

Le flambement est possible selon les deux axes principaux de la section transversale de l'élément, l'utilisation des mêmes conditions d'appui le long de ces deux axes entraînera un flambement le long de l'axe avec la plus faible inertie [46]. Ce cas de charge peut conduire à des instabilités globales (flambement de poutre) ou locales (voilement des semelles) si les charges superposées sont trop élevées. La Figure I.10 montre une poutre sandwich chargée sur son axe.



**Figure I.10.** a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich [46].

La force maximale appliquée sans instabilité est appelée charge d'Euler-Peu  $P_{Eu}$ . Cette charge dépend de la longueur  $L$  de la poutre sandwich testée et de sa rigidité en flexion  $D$  :

$$P_{Eu} = \frac{I^2 D}{L^2} \quad (\text{I.17})$$

Pour les sandwichs minces, la déformation par cisaillement doit être prise en compte. Il a pour effet de réduire la charge limite. La charge critique de flambement  $P_{cr}$  dépend de la rigidité en cisaillement  $S$  du sandwich [47].

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_{Eu}} + \frac{1}{S} \quad \text{Avec} \quad S = P_c = \frac{bd^2}{c} G \quad (\text{I.18})$$

Pour les sandwichs à semelle épaisse, la charge d'Euler de la peau doit être considérée (Éq I.19).

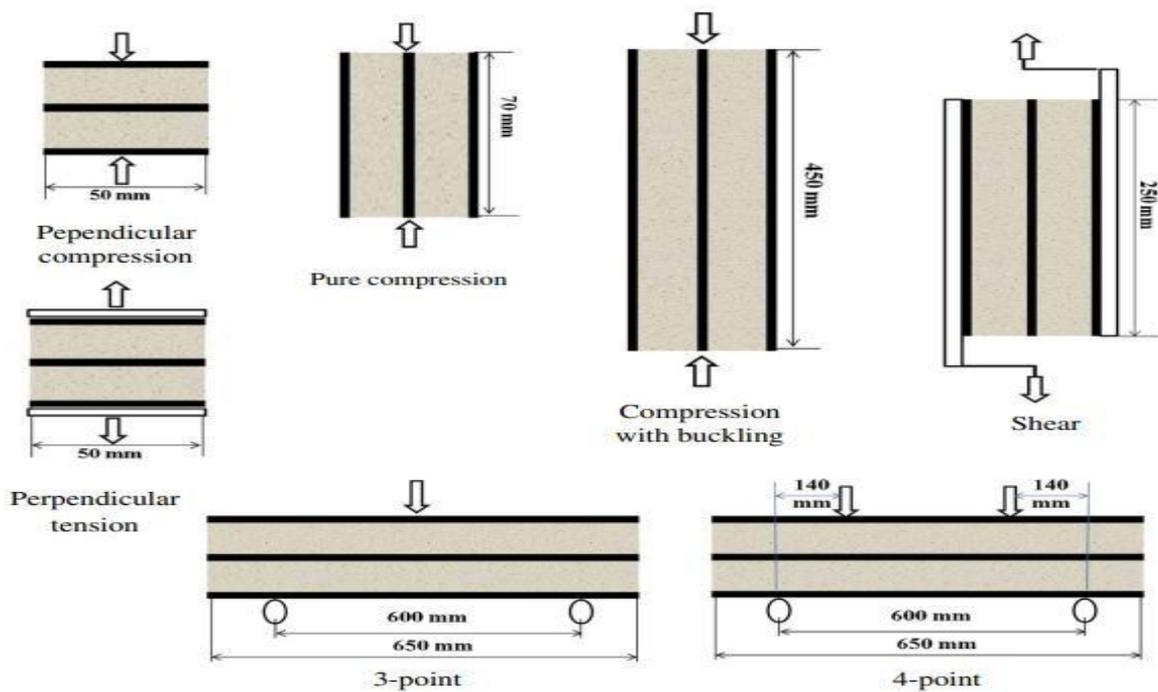
$$P_{Eu} = \frac{I^2 EI_f}{L^2} \quad (\text{I.19})$$

Cela crée une charge critique exprimée par la formule :

$$P_{cr} = P_{EU} \left\{ \frac{1 + \frac{P_{Eu} P_{Eu}}{P_c} - \frac{P_{Eu} P_{Eu}}{P_c P_{Eu}}}{1 + \frac{P_{Eu} P_{Eu}}{P_c} - \frac{P_{Eu} P_{Eu}}{P_c}} \right\} \quad (\text{I.20})$$

Récemment, de nombreuses études ont porté sur l'utilisation d'expérience mécaniques sur les structures sandwichs qui montrent leur importance dans la construction et leur haute résistance, On peut citer :

**N. Lakreb et al [5]** ont testés des panneaux sandwichs innovants en placage de bois de pin d'Alep comme semelles et de l'agglomérat de liège comme noyau, le comportement mécanique des panneaux a été testé sous traction, cisaillement, compression perpendiculaire et longitudinale, la flexion à trois et quatre points (Voir figure I.11).



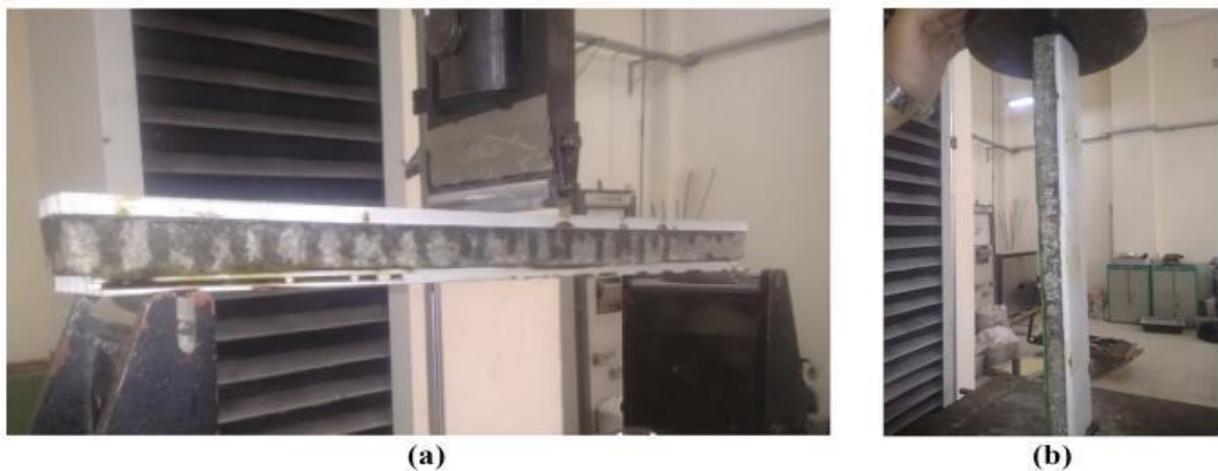
**Figure I.11.** Représentation schématique des essais mécaniques sur les panneaux sandwichs effectués par Lakreb et al. [5].

Ces panneaux sandwichs multicouches ont montré une résistance plus élevée et un nombre accru de couches a amélioré les performances mécaniques de la structure composite.

**Yongguang Guo et al [36]** sont intéressés à la réalisation d'une structure sandwich cylindrique composée de peaux composites thermoplastiques renforcées de fibres de verre et de noyau hiérarchique en nid d'abeille basée sur l'enroulement et l'emboîtement des filaments, ce qui fournit une idée pour la fabrication rapide, la structure été soumise à un essai de compression axiale pour évaluer la capacité portante et révéler les modes de rupture. Leurs résultats montrent que le flambage local et l'écrasement de taille étaient les principaux modes de rupture pour les structures sandwichs cylindriques qui sont également plus performantes en termes d'efficacité de capacité de charge que les structures de références.

**Kumar Sahu et al [48]** ont fabriqués des poutres sandwiches hybrides en nylon PCTPE (Plasticized Co-polyamide Thermoplastic Elastomer) qui est utilisé pour fabriquer le noyau en nid d'abeille en raison de sa flexibilité et de sa résistance aux chocs. Les semelles ont été préparées avec une matrice de polyéthylène haute densité (PEHD) avec une charge égale de nano-plaquettes de graphite et de système de remplissage hybride nano-diamant. Ces poutres sandwichs été soumises à des tests de différentes propriétés mécaniques telles que l'évaluation de la flexion, de la compression, de la capacité d'amortissement et le comportement vibratoire dans le plan.

**A. Si Salem et al [1]** ont démontré que l'utilisation de composites et des matériaux naturels dans les structures sandwiches réduit les enjeux du réchauffement climatique et satisfait les performances mécaniques. Ils montrent ainsi tout le mérite d'enquêter davantage grâce à des approches avancées afin de permettre une meilleure compréhension du comportement de cette conception de panneaux. Ces chercheurs ont réalisé des nouveaux panneaux sandwichs composites conçus avec du mortier modifié à base de sciure de bois comme matériau de base (âme) et des plaques polypropylène (PP) renforcé comme peaux. Les performances de flexion et de flambage de nouveaux panneaux sandwich fabriqués montré que la capacité portante ; la résistance au flambement ; la ductilité et les mécanismes de ruptures étaient généralement satisfaisants par rapport aux valeurs expérimentales rapportées dans la littérature. L'alternance des peaux supérieures et inférieures a amélioré la résistance et la rigidité moyennes des panneaux de près de 80% et 40% respectivement.



**Figure I.12.** Essais réalisés par Si Salem et al [1] : a) Flexion en trois points ; b) flambement.

**B. Sobczyk et L. Pyrzowski [49]** se sont basés sur des expériences pour trouver des descriptions pratiques permettant d'obtenir des informations efficaces et des estimations précises de la

réponse élastique, des dommages et de la rupture des poutres sandwichs laminées constitués des feuilles frontales en plastique renforcé de fibres de verre (GFRP) et d'une âme en mousse (PET), ayant des densités différentes. Des essais de flexion en trois points sont réalisés avec trois types de carottes PET pour montrer une meilleure compréhension du comportement des sandwichs, en particulier au-delà de la plage de réponse linéaire (Figures I.12).

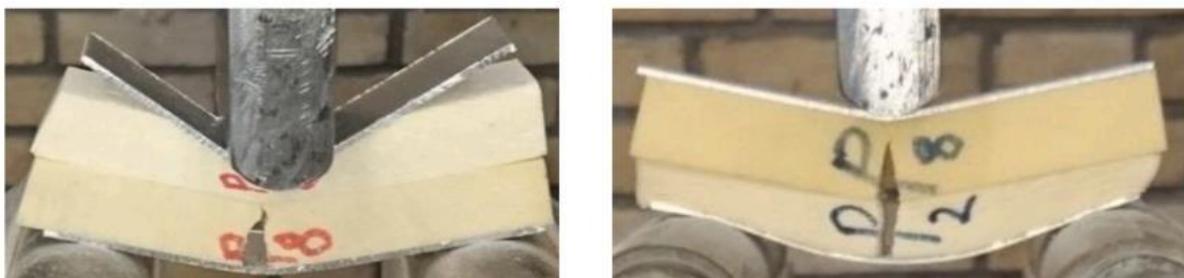


**Figure I.13.** Essais de flexion en trois points réalisé par Łukasz et Bartosz. 2020 [49].

**M. Kazemi** [4] ont étudié expérimentalement la résistance à la flexion des poutres sandwichs avec des feuilles frontales en aluminium et une âme en mousse de polyuréthane gradué avec différentes densités (Figures I.14 et 15)

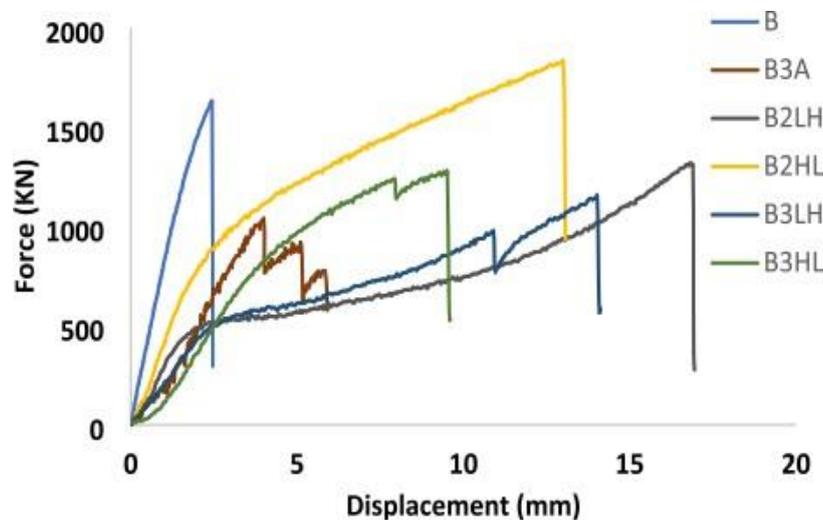


**Figure I.14.** Une comparaison de l'effondrement expérimental des poutres sandwichs multicouches testées par M. Kazemi [4].



**Figure I.15.** Une comparaison de l'effondrement expérimental des poutres sandwichs bicouches testées par M. Kazemi [4].

Les résultats de cette étude ont montré qu'avec l'augmentation du nombre de couche et la modification de ces dispositions, la capacité d'absorption d'énergie et les déplacements ont augmenté. En effet, l'efficacité de la force de rupture est augmentée de 20 %, et l'absorption d'énergie spécifique peut augmenter environ sept fois.



**Figure I.16.** Une comparaison entre les courbes force-déplacement pour toutes les poutres sandwichs réalisées par Kazemi, 2021 [4].

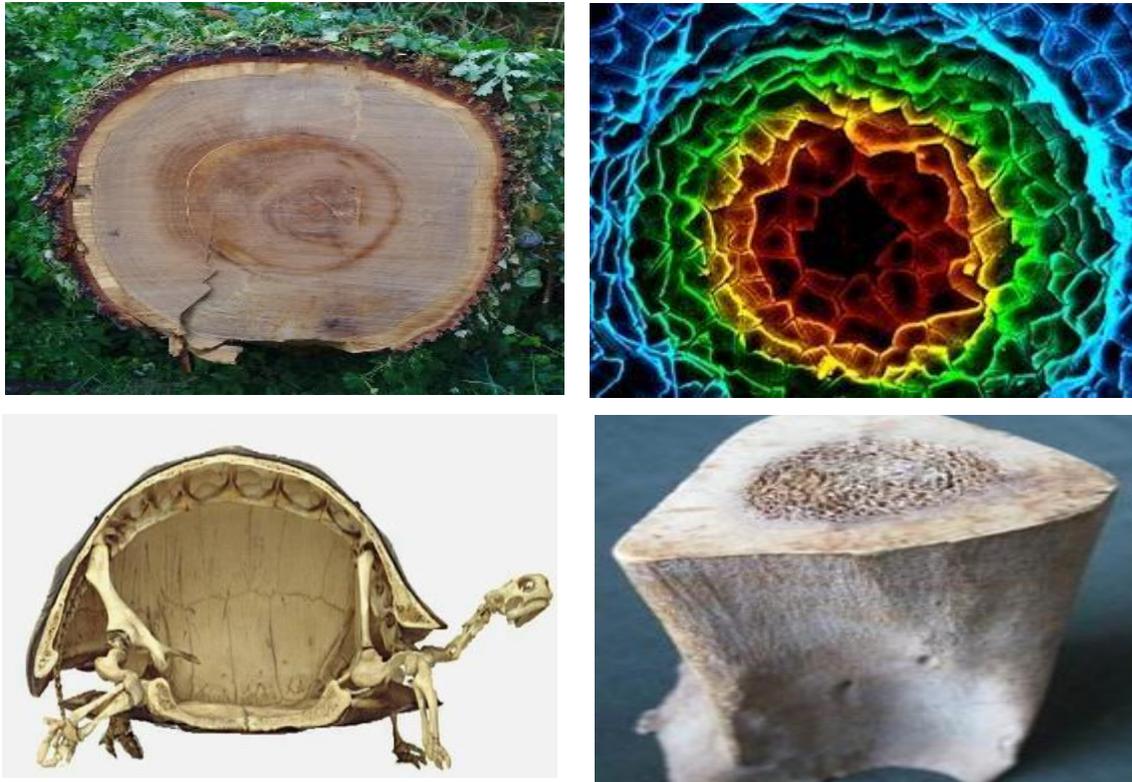
Toutes ces études expérimentales visaient à obtenir la meilleure conception de base et de choisir les matériaux adéquats qui assurent un niveau de capacité portante des structures sandwichs. Cependant, une incohérence en termes de caractéristiques thermiques et mécaniques aux interfaces de stratification du noyau qui constituent des structures sandwichs multicouche classiques est significativement observée. À cet égard, l'une des solutions les plus répandues consistait à prendre en compte les matériaux de qualité fonctionnelle dans la conception et la fabrication des sandwichs. Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) ont suscité une attention particulière et un intérêt croissant concernant l'avantage de la continuité des propriétés physiques dans une ou plusieurs directions spatiales.

### I.3. Les FGM pour les panneaux sandwichs

#### I.3.1. Définition

Dans une certaine mesure, les matériaux à gradient fonctionnel (en anglais : **Functionally Graded Materials " F.G.M "**) peuvent être compris comme matériaux composites avec un gradient de propriétés afin de créer un matériau avec une propriété globale optimisée. Par exemple, les matières biologiques dans la nature sont des matériaux fonctionnels, afin de

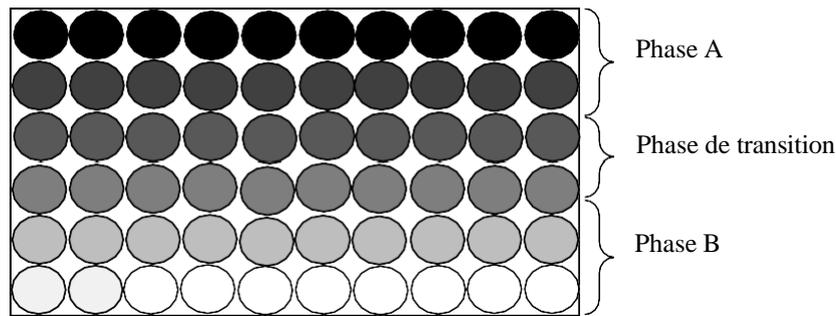
s'adapter au milieu de vie, le bambou, les arbres, les animaux, les os et les carapaces de tortue [50-55] (voir Figure I.17), ont un gradient de densité qui permet d'atteindre à la fois une résistance élevée et haute ténacité avec une faible densité.



**Figure I.17.** Exemples des FGM dans la nature [111]

Les matériaux à gradient de propriété sont définis comme une nouvelle classe de matériaux composites constitués de deux couches ou plus avec des constituants différents. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement hétérogènes et des propriétés thermomécaniques qui varient selon une loi de fonction continue à travers l'épaisseur [56] (Figure I.18).

Historiquement, la technologie FGM était une technologie de matériaux de fabrication originale proposée pour la première fois en 1984 à Sendai, au Japon [2]. Ces nouveaux matériaux peuvent être utilisés comme moyen de préparation des matériaux de barrière thermique dans les plans spatiaux pour résister aux charges thermomécaniques [57]. Ils sont capables de résister à des environnements à gradient de température élevé tout en conservant l'intégrité structurelle, c'est pourquoi ils utilisent des céramiques réfractaires du côté chaud et du carbure cémenté à haute conductivité thermique du côté froid, avec des compositions allant des céramiques aux métaux.



**Figure I.18.** Variation continue des propriétés de matériau FGM.

En 1990, la première conférence internationale sur les FGM s'est tenue à Sendai, au Japon. En 1992, Functionally Gradient Materials ont été sélectionnés parmi les dix premières technologies de pointe au Japon et actuellement la technologie la plus avancée au monde [55].

Les matériaux à gradient fonctionnel diffèrent des matériaux composites en ce qu'il n'y a pas de concentrations de contraintes aux interfaces entre les couches causées par des changements brusques des propriétés mécaniques d'une couche à l'autre, entraînant un délaminage et une fissuration matricielle [54], qui travaille alors sur la réduction des contraintes de cisaillement interfaciales tels que les surfaces libres, des racines de fissures et des coins [58] et diminuer la disparité dans les propriétés matérielles, ce qui se traduit par un comportement optimisé [59-60] et les matériaux sont obtenus avec des propriétés chimiques et mécaniques supplémentaires respectueuses de l'environnement.

Plusieurs théories efficaces utilisées par des chercheurs pour prévoir exactement les caractéristiques structurales des panneaux ou poutres en FGM qui basent sur des approches analytiques aux problèmes à savoir : la théorie de premier ordre d'Euler-Bernoulli (CBT) qui néglige l'effet du cisaillement transverse, La théorie de Timoshenko (FSDBT) a prolongé la théorie d'Euler-Bernoulli et introduit un coefficient correcteur pour mieux prendre en compte l'effet de cisaillement transverse.

Les théories d'ordre élevé qui sont plus réalistes, ont pour objectif de faire face aux limites des théories du premier ordre, elles vérifient la nullité des contraintes de cisaillement sur les limites supérieures et inférieures de la structure [59], en utilisant la fonction sinus (SSDBT) développée par Touratier [61], la fonction Exponentielle (ESDBT) par Afaq [62] et fonction de gauchissement cubique (TSDBT) telle que celle employée par Reddy [63] qui donne une bonne approximation pour les contraintes de cisaillement transversal et parabolique dans l'épaisseur.

### I.3.1.1. Intérêts et domaine d'application des FGM

La structure spéciale de FGM qui constituée de deux matériaux au minimum contenant des composants différents possède un certain nombre d'avantages excédant que les composés stratifiés, y compris la tendance d'efforts [64]. Les FGM permettent donc de créer de nouveaux matériaux répondant à des besoins industriels spécifiques. Par conséquent, il peut être appliqué dans de nombreux domaines (Figure I.19). Actuellement, on les trouve dans le domaine des **matériaux de construction** tel qu'utilisés pour les murs structurels qui combinent des propriétés d'isolation thermiques et sonores (Figure I.20).

D'autre part, les FGM ont été utilisés dans des industries telles que **l'industrie aérospatiale** (voir la Figure I.21), où les matériaux FGM ont d'abord été appliqués aux structures de fuselage d'engins spatiaux, aux pièces d'avion, aux engrenages de fusée, aux navettes spatiales.

L'utilisation des FGM dans **l'industrie automobile** est limitée en raison des coûts de production élevés. Cependant, ce matériau est utilisé dans des pièces automobiles très importantes où le coût élevé actuel justifie son utilisation. Les applications actuelles incluent les couvercles de cylindre de moteur pour les pistons de moteur diesel.

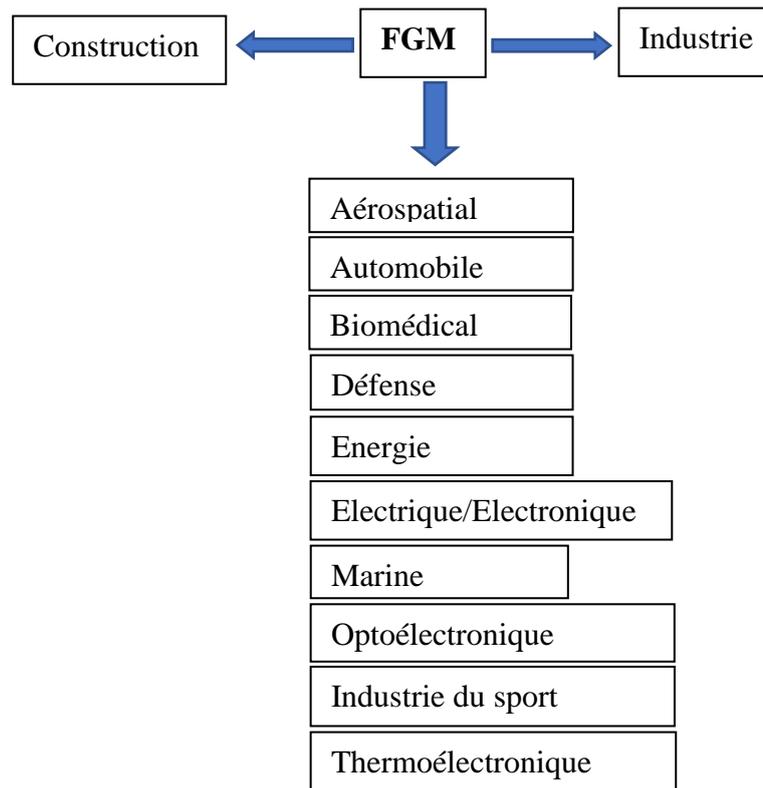
Les FGM jouent également un rôle dans **l'industrie biomédicale**, car le corps humain est composé d'une variété de matériaux FGM, y compris les dents et les os les plus couramment remplacés. Pour cette raison, la plupart des matériaux FGM utilisés dans l'industrie biomédicale sont des implants, tels que des implants pour le remplacement squelettique permanent. La porosité graduée permet une protection minimale contre les contraintes.

**L'industrie de la défense** a constamment besoin de divers types de FGM pour des applications telles que les armures, les épées japonaises traditionnelles et les gilets pare-balles, et les carapaces pour les véhicules pare-balles.

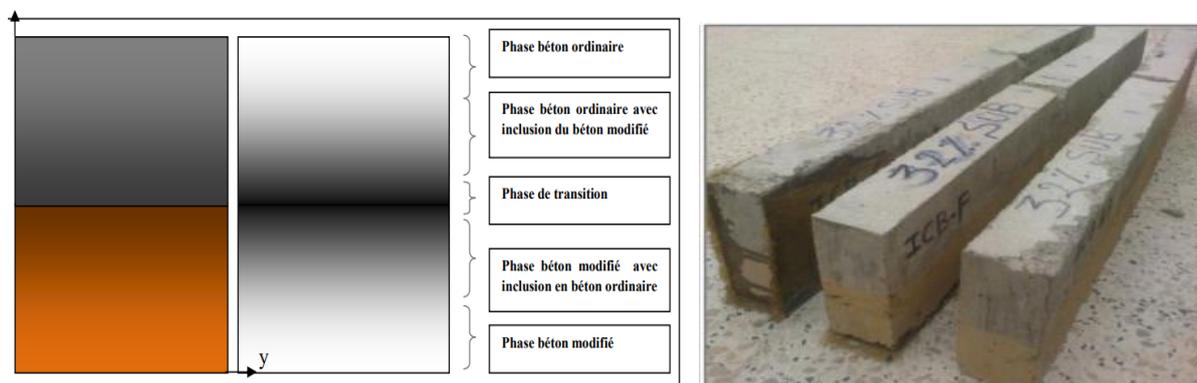
Les matériaux FGM peuvent être utilisés dans **l'industrie électrique et électronique** pour la relaxation des champs de contrainte dans les électrodes et les interfaces d'écart de champ, les semi-conducteurs, les diodes et pour fabriquer des capteurs.

**L'industrie du transport maritime** s'intéresse également à l'utilisation des matériaux FGM exemple, cylindres de plongée, puits de moteur, systèmes de tuyaux composites, dômes de sonar, coques à pression cylindriques.

La Figure I.21 montre un exemple d'utilisation des FGM dans l'industrie.



**Figure I.19.** Les principaux domaines d'application des FGM.



**Figure I.20.** Exemple d'utilisation des FGM dans le domaine de construction [15]

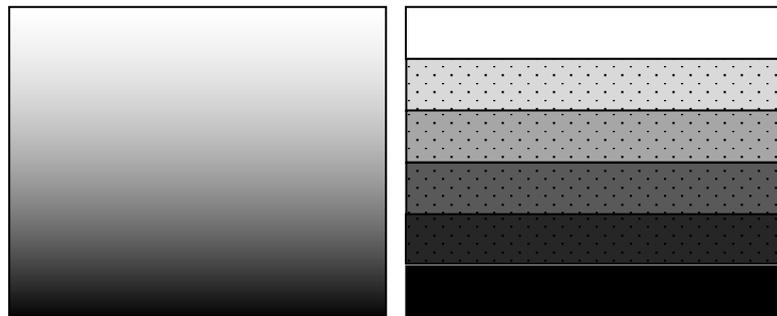


**Figure I.21.** Exemple d'utilisation des FGM dans le domaine d'industriel [128]

### I.3.2. Propriétés effectives des matériaux à gradient fonctionnel

Les FGM sont fabriqués à partir de microstructures variant dans l'espace et se composent généralement de deux phases de matériau aux propriétés différentes. Conçu pour optimiser l'exécution des éléments structurels en distribuant les propriétés appropriées.

Il existe deux approches possibles des modèles FGM : une variation continue de la fraction volumique de matériau considéré (Figure I.22: a), et une variation par morceaux tel que le FGM est pris pour être posé avec la même fraction volumique dans chaque région (couche quasi-homogène, Figure I.22: b).



**Figure I.22.** Modèle analytique d'un matériau à gradient fonctionnel.

Jin et Batra (1996) [42] soulignent que l'effet du coefficient de Poisson sur la déformation est négligeable par rapport à celui du module de Young [54]. Par conséquent, le coefficient de Poisson des FGM est supposé constant. Tandis que la fraction volumique de chaque phase varie graduellement dans la direction des structures en FGM qui varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM).

#### I.3.2.1. La fraction volumique P-FGM

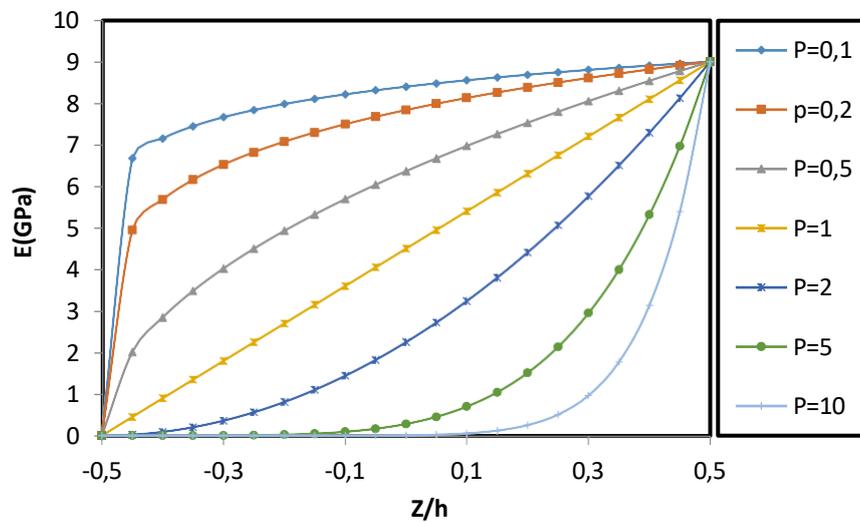
Selon cette fraction volumique, la rigidité du panneau est supposée variable suivant sa hauteur et supposée obéir à une fonction en loi de puissance qui donné par (l'équation I.21) :

$$G(z) = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^p \quad (\text{I.21})$$

Où P est le paramètre qui tient en compte du changement du matériau dans le panneau P-FGM. Une fois la fraction volumique locale  $G(z)$  été définie, les propriétés matérielles peuvent être déterminées par la loi des mélanges [149] (Équation I.22), où  $E_p$  et  $E_C$  sont des modules de Young qui représente la rigidité de la partie inférieure et supérieure respectivement.

$$E(z)_{P-FGM} = E_C + \left(\frac{z}{hc} + \frac{1}{2}\right)^p (E_P - E_C) \quad (\text{I.22})$$

La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur des panneaux P-FGM est représentée sur la Figure (I.23).



**Figure II.23.** Exemple de variation du module de Young dans le panneau P-FGM [65]

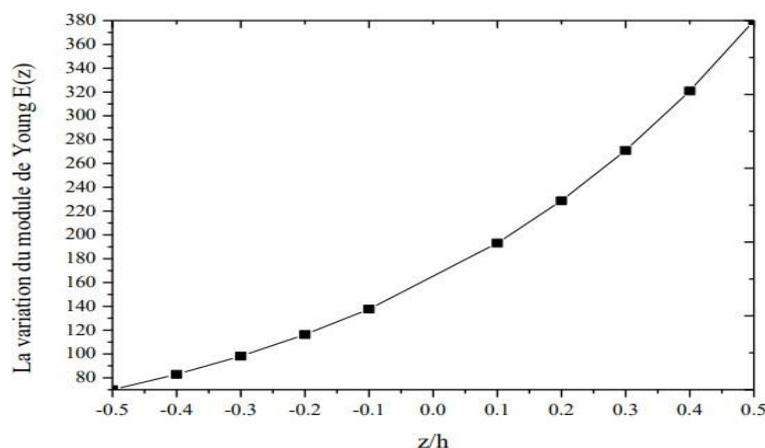
### I.3.2.2. La fraction volumique E-FGM

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent une fonction exponentielle décrite sous la forme de la relation (I.23).

$$E(z) = E_p \cdot e^{B \cdot (z+h/2)} \quad (I.23)$$

$$\text{Avec : } B = \frac{1}{h} \cdot \ln \left( \frac{E_l}{E_p} \right) \quad (I.24)$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur est représentée dans la Figure I.24



**Figure I.24.** Exemple de variation du module de Young dans un panneau E-FGM [66]

### I.3.2.3. La fraction volumique S-FGM

Afin de définir la fraction de volume de panneau S-FGM, deux fonctions de loi de puissance sont utilisées pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par :

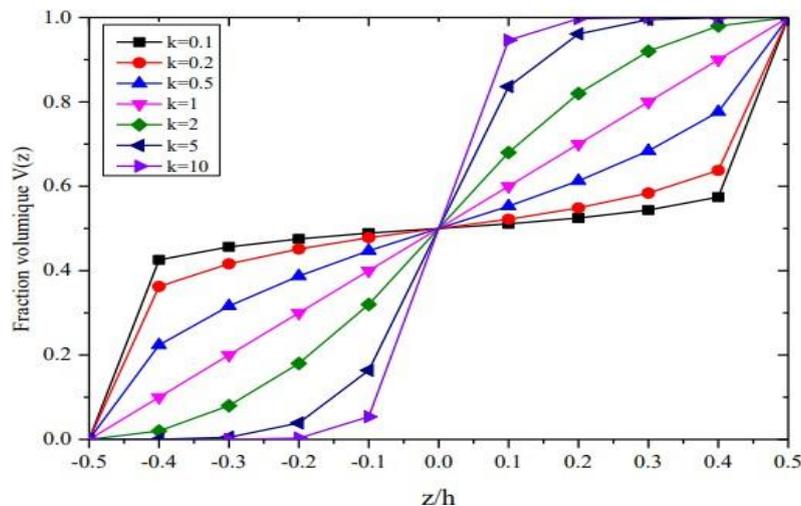
$$g_1(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{h/2+z}{h/2} \right)^p \quad \text{pour} \quad -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{I.25})$$

$$g_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h/2-z}{h/2} \right)^p \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I.26})$$

En utilisant la loi de mélange, le module de Young de panneau S-FGM peut être calculé par la relation (I.27) et (I.28), sa variation est représentée sur la Figure I.25 :

$$E(z) = g_1(z) \cdot E_l + [1 - g_1(z)] \cdot E_p \quad \text{pour} \quad -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{I.27})$$

$$E(z) = g_2(z) \cdot E_l + [1 - g_2(z)] \cdot E_p \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I.28})$$



**Figure I.25.** Exemple de variation du module de Young dans un panneau S-FGM [66]

### I.3.3. Comportement thermique des FGM

La plupart des applications des structures FGM dans des environnements à haute température, les phases à faible conductivité thermique dominent la région qui supporte les charges thermiques. Par exemple, structure FGM (métal-céramique), Les particules de céramique (phase céramique) se concentrent près de la surface exposée, Par contre, la fraction volumique de la phase métallique augmente progressivement vers surface la plus froide.

Supposons que le changement de température se fasse dans la direction de l'épaisseur et le champ de température est supposé constant dans le plan. Dans de tels cas, la chaleur est transmise uniquement dans le sens de l'épaisseur est unidimensionnel et la distribution de température peut être répartie le long de l'épaisseur, peut être obtenu comme suit :

$$-\frac{d}{dz} \left[ k(z) \frac{dT}{dz} \right] = 0 \quad (\text{I.29})$$

Cette équation est résolue en imposant des conditions aux limites :  $T = T_U$  à  $Z = \frac{h}{2}$  et  $T = T_L$  à  $Z = -\frac{h}{2}$ . La solution de cette équation à l'aide d'un ensemble de polynômes est :

$$T = T_U + (T_L - T_U)\eta(z) \quad (\text{I.30})$$

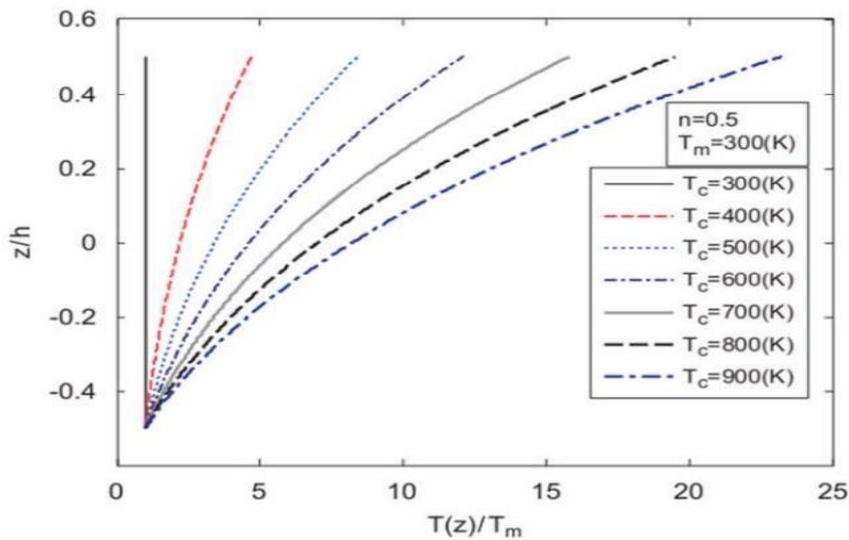
Où  $T_U$  et  $T_L$  sont les températures aux extrémités du panneau, et :

$$\eta(z) = \frac{1}{C} \left[ \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) - \frac{k_{mc}}{(n+1)k_c} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{n+1} + \frac{k_{mc}^2}{(2n+1)k_c^2} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{2n+1} - \frac{k_{mc}^3}{(3n+1)k_c^3} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{3n+1} + \frac{k_{mc}^4}{(4n+1)k_c^4} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{4n+1} - \frac{k_{mc}^5}{(n+1)k_c^5} \left( \frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^{5n+1} \right] \quad (\text{I.31})$$

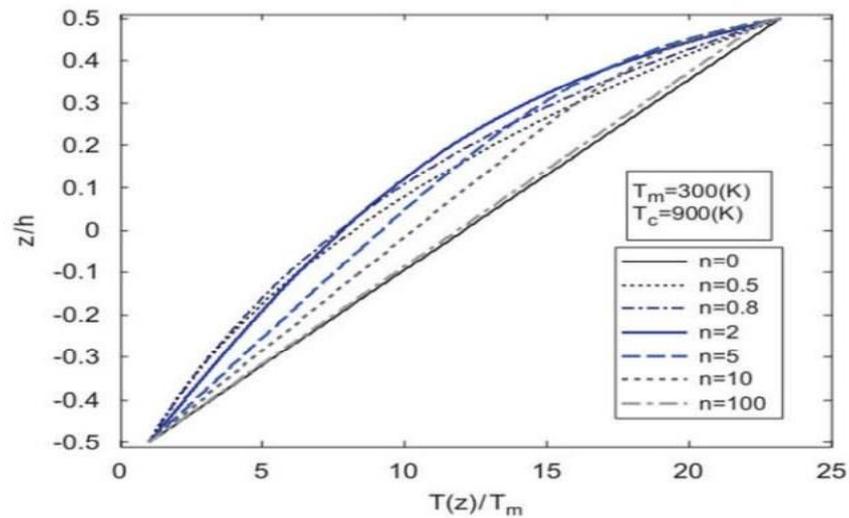
$$C = 1 - \frac{k_{mc}}{(n+1)k_c} + \frac{k_{mc}^2}{(2n+1)k_c^2} - \frac{k_{mc}^3}{(3n+1)k_c^3} + \frac{k_{mc}^4}{(4n+1)k_c^4} - \frac{k_{mc}^5}{(n+1)k_c^5} \quad (\text{I.32})$$

$$k_{mc} = k_m - k_c \quad (\text{I.33})$$

Les Figures I.26 et I.27 montrent un exemple de la distribution de température le long de l'épaisseur de la plaque d'aluminium-alumine FGM pour différentes valeurs de température  $T$  et de fraction volumique  $N$ .



**Figure I.26.** Exemple de répartition de la température sur l'épaisseur de la céramique [67].



**Figure I.27.** Exemple de répartition de la température pour différentes valeurs de fraction volumique [67]

## I.4. Les matériaux des FGM

### I.4.1. FGM pour les semelles

Les matériaux à gradient fonctionnel peuvent être utilisés dans les semelles d'une structure sandwich pour assurer la résistance aux chocs, rigidité et l'absorption d'énergie.

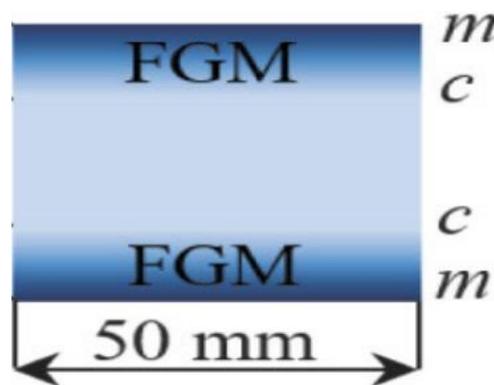
**Arslan et Gunes [6]** ont évalué les dommages expérimentaux des structures sandwiches en nid d'abeille avec des plaques frontales Aluminium/Cérame FGM soumises à des charges d'impact à grande vitesse (Figure I.28), ces chercheurs ont examiné l'effet de la variation de la composition matérielle des plaques frontales FGM sur la performance d'impact.



**Figure I.28.** La structure sandwich en semelle FGM produite par Arslan et Gunes [6].

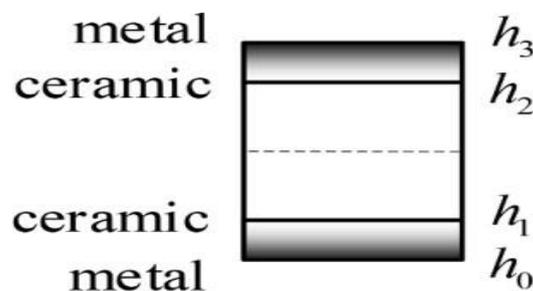
Les échantillons avec les plaques frontales FGM ont montré une meilleure performance d'impact et la variation de la composition matérielle était considérablement efficace sur les modes et mécanismes de dommage, la capacité d'absorption d'énergie et la résistance aux chocs de la structure sandwich.

**Dimitrios et al [68]** ont analysé une poutre sandwich avec des semelles en FGM sous charge de flexion (Figure I.29). La méthode des éléments finis est utilisée pour étudier numériquement le problème de deux types des poutres sandwiches (âme métallique, âme céramique). L'avantage de cette étude est l'utilisation d'éléments iso-paramétriques quadrilatères bidimensionnels à 8 nœuds dans les feuilles frontales FGM, l'analyse numérique a montré que dans le cas du noyau en céramique et des semelles FGM, l'indice de fraction volumique augmente et la concentration de contrainte à l'interface entre le noyau et les semelles est créée.



**Figure I.29.** La structure sandwich constituée par Dimitrios et al [68].

**Van Vinh [10]** a étudié le comportement de flexion statique des poutres sandwiches constituées d'un noyau céramique homogène et de deux peaux fonctionnellement graduées (Figure I.30) en utilisant un nouvel élément de poutre mixte basé sur la théorie de la déformation par cisaillement du premier ordre.



**Figure I.30.** La structure sandwich étudiée par Van Vinh [10].

**Singh et al [8]** ont étudié l'influence des incertitudes matérielles sur le comportement en flexion des plaques sandwiches FGM asymétriques, la théorie de la déformation par cisaillement d'ordre supérieur (HSDT) de **Reddy [63]** est appliquée en utilisant l'isoparamétrie pour modéliser le champ de déplacement.

**Murat Aydin et M. Kemal Apalak [69]** ont révélé que la variation de composition d'épaisseur affectait considérablement les performances des plaques sandwiches fonctionnellement graduées à base de carbure d'aluminium et de silicium, les chercheurs ont également montré que les panneaux sandwichs en FGM ont les meilleures performances.

#### **I.4.2. FGM pour les âmes**

L'analyse et objective des travaux suscités a montré l'intérêt des FGM dans les semelles pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures sandwiches. Néanmoins, plusieurs chercheurs ont souligné l'importance des FGM dans les noyaux de ce dernier afin de rehausser les performances physiques et thermiques. À cet égard, des études expérimentales et analytiques en utilisant les différentes méthodes et théories ont été menées :

**Novak et al [70]** ont confirmé que l'absorption d'énergie des panneaux sandwichs avec noyaux cellulaires TPMS (Triply Periodical Minimal Surface) fonctionnellement gradués était jusqu'à 25% plus élevée que dans les panneaux sandwichs avec le même noyau classique de densité relative. Cette étude a également montré que l'influence d'un noyau gradué pourrait être encore plus considérable dans les noyaux avec une transition plus élevée, ce qui entraînera une déformation plus faible du noyau et un rapport de rigidité noyau/plaque plus élevé.

**Vuong et al [71]** ont présenté une étude analytique sur le comportement non linéaire de flambage et de post-flambage de structures sandwiches déformables par cisaillement avec un noyau fonctionnellement gradué et des semelles homogènes soumis à une compression axiale et à des charges thermiques. Une nouvelle solution de la méthode de Galerkin est utilisée pour résoudre un système d'équations aux dérivées partiels et pour obtenir des expressions des contraintes de flambement et post-flambement.

**Jörg Hohe et al [73]** se sont basés sur des recherches expérimentales et numériques pour formuler une conception combinée de matériaux cellulaires gradués dans des sandwichs pour une application aérospatiale. Cette étude a exploré le potentiel des matériaux fonctionnellement gradués en tant que noyaux dans les structures sandwiches pour une application multifonctionnelle, tel que la performance du matériau optimisé est comparée à la performance d'un noyau sandwich non gradué à l'aide d'une expérience sous chargement d'impact.

**Jing et al [74]** ont amélioré expérimentalement la résistance aux chocs de panneaux sandwichs fabriqués avec des noyaux de mousse métallique fonctionnelle en modifiant la disposition des couches de noyaux, les résultats trouvés sont utiles pour guider la conception et l'évaluation des structures sandwichs à gradient fonctionnel dans les applications d'ingénierie.

**Aman Garg et al [7]** ont utilisés une nouvelle théorie en zigzag d'ordre élevé pour étudier la flexion des poutres sandwichs FGM composées de différentes lois de variation des propriétés matérielles sur son épaisseur, à savoir la loi de puissance, la loi exponentielle et la loi sigmoïdale. Ce modèle satisfait aux conditions de continuité des contraintes transversales inter laminaires ainsi qu'à une valeur nulle en haut et en bas de la poutre pour les contraintes de cisaillement transversales.

**Shinde et al [9]** ont présenté une analyse statique de la flexion et du flambage des coquilles sandwichs FGM simplement appuyées en utilisant une nouvelle théorie du cisaillement d'ordre élevé et de la déformation normale prenant en compte les effets du cisaillement transversal.

*Dans la littérature ouverte, de nombreux chercheurs ont ignoré les effets des contraintes normales transversales ( $\sigma_z$ ) pour simplifier le calcul des théories des structures FGM. Cependant, il est fortement recommandé que pour prédire le comportement précis en flexion des poutres épaisses, il est nécessaire de tenir compte des effets des contraintes/déformations normales transversales. Pour cette raison, la présente étude considère l'effet des contraintes normales transversales.*

*Dans les cas généraux, les façades de structure et la maçonnerie des murs sont réalisées avec des matériaux en briques, ce qui conduit à surestimer le poids propre de la structure et le temps de réalisation, et l'isolations thermiques et acoustiques ne sont pas vraiment assez satisfaisantes, À cette fin, le choix des matériaux en FGM utilisés dans la présente recherche est formulé afin de garantir ces caractéristiques à savoir : le plâtre et le liège.*

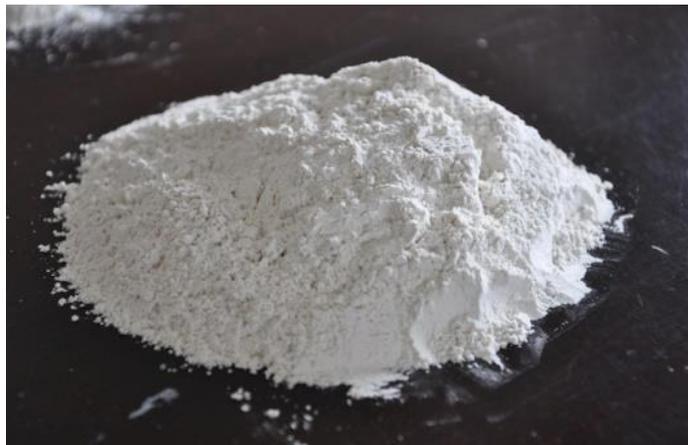
### **I.4.3. Les matériaux du FGM proposé**

Le choix des matériaux utilisés pour la fabrication des structures civiles représente un défi considérable pour la réduction de la consommation d'énergie, réchauffement climatique et le respect de l'environnement. En effet, la durabilité et les questions économiques sont à l'origine principale de la prise de conscience de la nécessité d'utiliser des matériaux innovants. À cet effet, l'utilisation de matériaux naturels et économiques est un objectif essentiel pour assurer la qualité des structures et un environnement intérieur sain et confortable [1,75-77].

### I.4.3.1. Le plâtre

Le plâtre est un matériau qui fait prise avec l'eau, issu du gypse sous forme de sulfate de calcium hydraté de formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , présent à l'état naturel sous forme de cristaux d'albâtre ou de sélénite. Le minerai de gypse est généralement extrait de carrières souterraines, puis partiellement déshydraté par calcination à une température d'environ  $110^\circ\text{C}$ - $150^\circ\text{C}$ . Il est ensuite broyé pour donner de la poudre blanc (Figure I.31), nous obtenons du  $\text{CaSO}_4$  semi-hydraté,  $1/2\text{H}_2\text{O}$ .

Le plâtre à faible coût [78], qui constitue le composant principal du noyau de panneau étudié, est largement utilisé dans la construction. Il présente de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux [79-80], notamment ses remarquables propriétés fonctionnelles et décoratives, sa teneur élevée en eau, sa faible densité apparente qui favorise la régulation de l'hygrométrie ainsi que sa grande porosité [81-82].



**Figure I.31.** Le matériau Plâtre, photo prise par [82].

#### I.4.3.1.1. Comportement à la rupture du plâtre

Une étude des propriétés de rupture permet de prendre en compte les paramètres défauts qui provoquent une rupture microstructurale, en particulier dans le plâtre durci.

Coquard [83] a utilisé trois géométries d'échantillons pour déterminer la contrainte ultime du plâtre mixte en flexion trois points à  $E/P = 0,82$ . Les valeurs obtenues dépendent de la taille de l'échantillon : des volumes plus importants diminuant la contrainte de rupture.

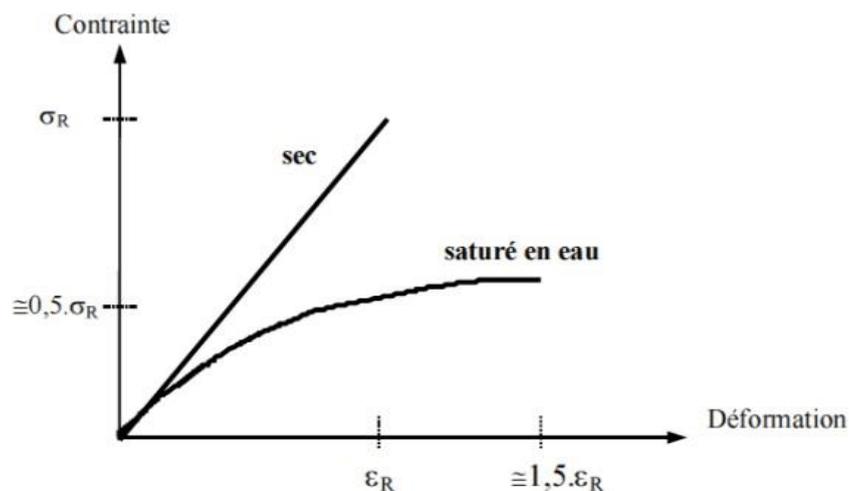
Les mesures sont faibles et le plâtre pris n'est pas très stable mécaniquement. La variation des valeurs expérimentales est de 10-15% pour une taille donnée. Pour examiner cette variabilité, Coquard [83] a appliqué les statistiques de Weibull au plâtre sec.

**Tableau I.1.** Contraintes à la rupture en flexion 3-points sur du plâtre pris gâché à E/P = 0,82 mesurées par Coquard. 1992 [83]

Géométrie de l'éprouvette (cm <sup>3</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Contrainte à la rupture (MPa)	Ecart-type (MPa)
4x1,2x1,5	9	4.5	0.66
6x1,5x3	27	3,85	0,44
10x1,5x5	75	3,65	0,38

#### I.4.3.1.2. Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau

Les lois de comportement du plâtre sec et saturé en eau sont bien connues depuis longtemps. Coquard [83] l'a déterminée pour une flexion 3 points avec une vitesse de traverse de 1 mm.mn<sup>-1</sup> (Voir Figure I.32).



**Figure I.32.** Essai de flexion sur des éprouvettes de plâtre sèches et saturées en eau [83]

Les lois matérielles du plâtre varient fortement avec la masse d'eau absorbée par le matériau. À une vitesse d'essai donnée, le plâtre pris sorti d'étuve présente un comportement élastique linéaire, tandis que le plâtre pris saturé d'eau présente des dommages importants. Peu de matériaux présentent une telle différence de comportement simplement en modifiant la quantité d'eau absorbée.

En effet, la loi de comportement en flexion trois points à différentes humidités relatives a été documentée par Badens [84] (Figure.I.33).

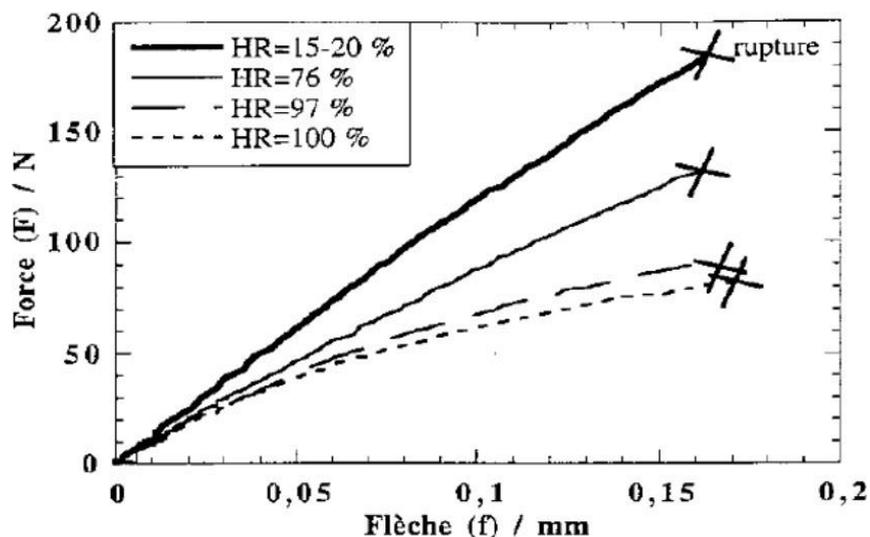


Figure I.33. Loi de comportement du plâtre selon [84].

Encore une fois, la quantité d'eau initialement absorbée conduit à une réduction significative de la contrainte de rupture, mais ne conduit pas à une non-linéarité significative de la loi de comportement, alors qu'à une humidité relative plus élevée (97%), la non-linéarité peut être vue diminuer. Cela se remarque car la chute de résistance ne se produit pas aussi rapidement. En résumé, la dissolution des contacts entre cristaux et les changements de phases cristallines ne semblent affecter les propriétés mécaniques qu'après au moins quelques jours.

#### I.4.3.1.3. Comportement thermique du plâtre

Le plâtre est un excellent isolant thermique, il a une faible conductivité thermique en raison de sa structure poreuse, qui résulte du départ d'eau lors du séchage et subsiste après déshydratation. L'isolation thermique est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique  $\lambda=0,35$  W/m.K pour le plâtre en moyenne. Le tableau I.2 [85] montre les propriétés thermiques du plâtre. L'effet d'isolation thermique du plâtre est maintenant bien connu, deux à trois fois celle du sol et trois à quatre fois celle du béton [86-87].

Tableau I.2. Caractéristiques thermiques du plâtre [85]

Masse Volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique utile $\lambda(\text{w.m}^{-1}\text{k}^{-1})$	Capacité thermique massique $c_p$ (J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Facteur de résistance à la vapeur d'eau $\mu$	
			Sec	Humide
600	0.18	1000	10	4
900	0.30	1000	10	4
1200	0.43	1000	10	4
1500	0.56	1000	10	4

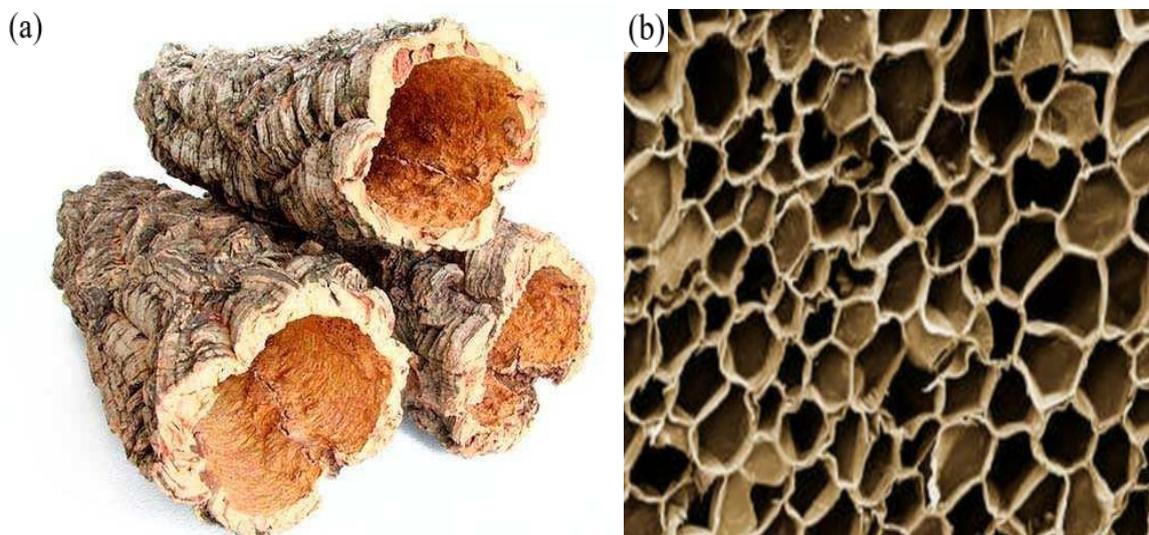
### I.4.3.2. Le Liège

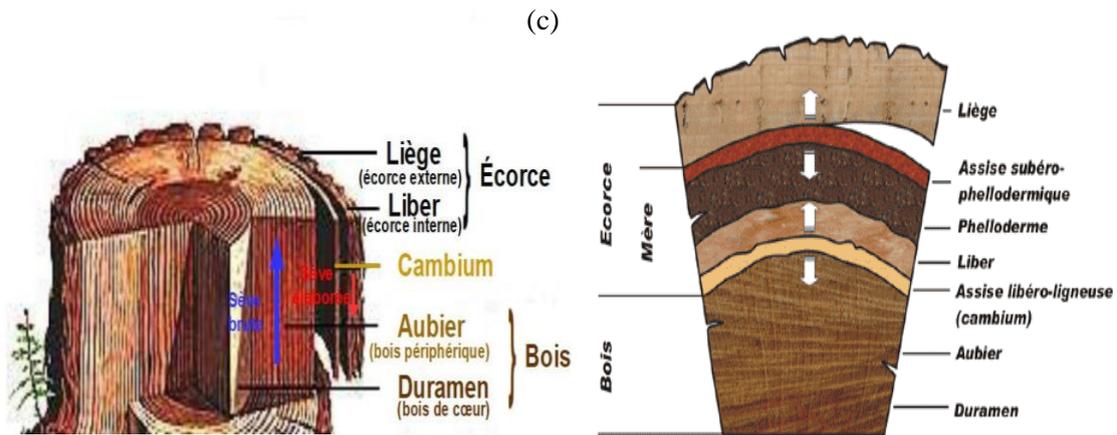
Le liège (Figure I.34.a) est un tissu végétal, il se développe à partir de l'assise subéropellodermique (Figure I.34.c), a généralement une morphologie multivalente composé de cellules microscopiques avec un diamètre de  $50 \pm 10$  nm [152] (on dénombre 40 millions de cellules par  $\text{cm}^3$ ). Il dispose d'une structure alvéolaire semblable à un nid d'abeille (Figure I.34-b) qui le distingue avec un ensemble de propriétés qui répond en grande partie aux exigences des différents domaines.

L'importance environnementale du liège est le rôle clé qu'il joue dans les processus écologiques tels que la rétention d'eau, la conservation des sols et le stockage du carbone [88]. C'est une matière première renouvelables et recyclable issues d'un système de production durable, contribuant ainsi à l'intention actuelle d'accroître l'écoconstruction et il pertinent pour plusieurs applications industrielles pour réduire la pollution de l'environnement causée par les matériaux synthétiques [89].

De nombreuses applications du liège sont fabriquées à partir de granulat du liège, fabriqués à partir de déchets générés par ces processus de fabrication, ainsi que de déchets forestiers, dans le cadre d'une stratégie d'économie circulaire visant à optimiser l'utilisation des matières premières et à minimiser les impacts environnementaux [90]

Les composites à base de liège peuvent être préparés soit en liant les particules de liège avec des adhésifs (liège blanc ou agglomérat de liège), soit en exposant les particules de liège à la chaleur et à la pression pour obtenir des agglomérats noirs auto-collés (liège expansé).

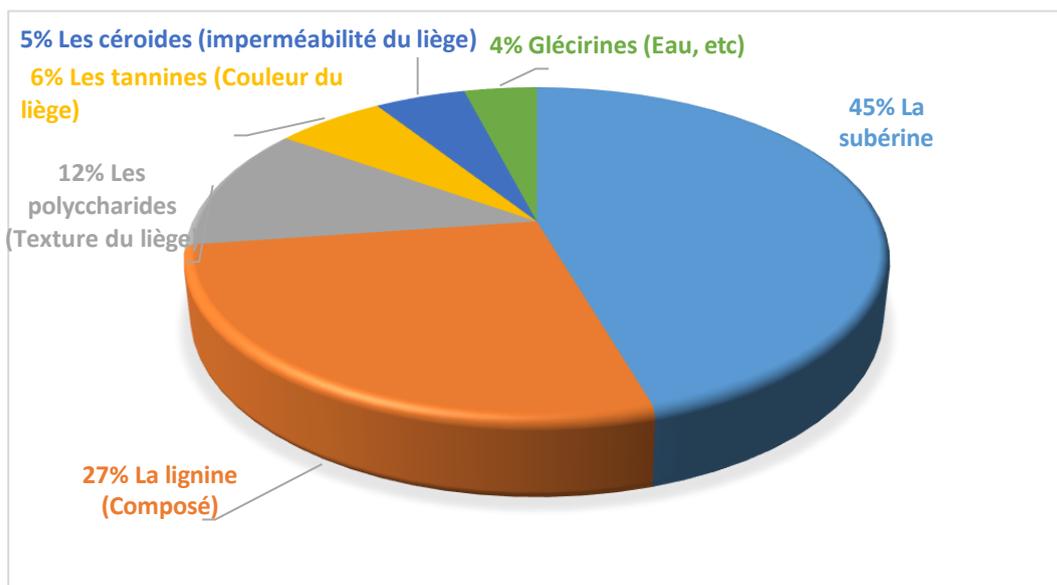




**Figure I.34.** a) Liège à l'état brut ; b) la structure alvéolaire du liège [91] ; c) Coupe transversale d'une tige de chêne-liège [151]

#### I.4.3.2.1. Composition chimique du Liège

La composition organique du liège joue un rôle important dans la détermination de ses propriétés. Des recherches sur sa composition chimique ont été menées dans de nombreuses études, de sorte qu'ils ont prouvé que les proportions des composants du liège varient en fonction de l'âge et de l'habitat du chêne-liège. Cependant, on pense généralement que le liège est composé d'environ 45% de subérine, 27% de lignine, 12% de polysaccharides et 16% de divers composés tels que des cires, l'eau et la matière minérale. (Figure I.35)



**Figure I.35.** Schéma de composition du Liège. [91]

- **La subérine** : La subérine est l'un des principaux composants du liège, ce qui lui confère une excellente compressibilité et flexibilité. C'est une substance originale très complexe et une sorte de polymère lipidique. La subérine présente dans les plantes qui lui confèrent des propriétés telles que le contrôle de la perte d'eau, l'isolation contre le changement climatique et la protection contre les attaques d'organismes non vivants, ce qui explique ses propriétés d'isolation.
- **La lignine** : La lignine, substance qui imprègne les parois cellulaires du bois et leur donne de la dureté, joue un rôle important dans la structure rigide des parois cellulaires, est un produit de poids moléculaire élevé formé par le couplage de polymères polyphénoliques répartis de manière aléatoire et elle permet la liaison entre les différents composants.
- **La cellulose et les polysaccharides** : La cellulose est formée exclusivement par condensation linéaire d'unités de glucose liées [91], et les polysaccharides forment les parois de la cellule et aident à définir sa texture.
- **Les tannins** : Ils sont chargés de déterminer la couleur
- **Les céroïdes** : Ce sont des composés hydrophobes qui assurent l'imperméabilité.

#### I.4.3.2.2. Propriétés du Liège

Le liège a des propriétés uniques et inégalées qui ne peuvent être imitées ou surpassées par aucune invention humaine aujourd'hui,

- **L'isolation** : Le liège est considéré comme l'un des isolants thermique, acoustique et vibratoire les plus importants [21, 92-99], grâce à ses qualités physiques et mécaniques en font un dominateur dans toutes les catégories d'isolation. En effet, les éléments gazeux contenus dans ce matériau sont piégés dans une petite chambre étanche et isolée qui résiste à l'humidité, c'est à dire il est isolé par des matériaux non hygroscopiques et de faible poids spécifique du fait que l'air reste emprisonné dans ses alvéoles.

Au sens thermique, l'isolant est un matériau à faible conductivité thermique, c'est-à-dire un matériau qui peut fournir une résistance thermique élevée au flux de chaleur qui le traverse. Le liège est un bon isolant en raison de sa texture et de sa légèreté. Il fait partie des matériaux connus pour ses propriétés isolantes (en moyenne, 1 cm de liège transmettra les mêmes calories que 38 cm de béton, 12 cm de brique creuse, ou 25 cm

de pierre tendre). Dans un milieu compressible (généralement de l'air), le son se propage sous forme de fluctuations de pression produites par la source. Seule la compression se déplace, pas de molécules d'air à l'exception de quelques microns.

Le son se propage également à travers les solides sous forme de vibrations atomiques. Le son et la propagation du bruit dépendent de nombreux facteurs (type de bruit, fréquence, type de matériau, isolation, etc.). En général, plus le matériau est dense, plus il est acoustiquement isolant (loi de masse). Cependant, si le matériau n'est pas rigide (tôle, plaque mince, etc.), il faut tenir compte des effets de peau et de résonance. Le liège combine un effet « amortisseur » qui en fait un très bon absorbant acoustique [100] et un effet « volumineux » qui est à la base de l'isolation acoustique.

- **La légèreté** : tel que pesant seulement 0,16 gramme par centimètre cube, c'est un matériau flottant et ne craint aucune attaque de parasites.
- **L'imperméabilité** [100] : Grâce à la présence d'une forte proportion de substances grasses (subérine, céroïde,...) dans la paroi cellulaire qui garantit l'imperméabilité aux liquides et aux gaz, sa résistance à l'humidité lui permet de vieillir sans se détériorer.
- **Résistances aux frictions** : Le liège est durable et a un coefficient de frottement élevé. Grâce à sa structure en nid d'abeille, le liège est moins sensible aux chocs et aux frottements que les autres matériaux à surface dure.
- **Faible Combustibilité** : Le liège est particulièrement résistant au feu, son épaisseur importante lui permet de retenir l'humidité, ce qui le protège efficacement contre les incendies.
- **Propriétés mécaniques** : Le liège présente plutôt des propriétés mécaniques particulières, il peut être comprimé rapidement dans sa limite élastique et à la moitié de sa longueur sans perdre sa souplesse et retrouver sa forme et son volume d'origine lorsque la pression est relâchée. C'est le seul solide qui comprime un côté et n'augmente pas le volume de l'autre côté. Grâce à cette élasticité inhérente, le liège est fortement affecté aux changements de température dans l'air de sorte qu'il a un effet important sur les propriétés de compression. Rosa et Fortes [101] ont rapporté que la résistance du liège est significativement réduite lorsqu'il est traité à 100-300°C. Des études ont également montré que le traitement thermique à l'eau (un procédé industriel d'ébullition [102]) affecte les propriétés mécaniques du liège, Le piégeage de l'eau lors de la cuisson ramollit les parois cellulaires, tandis que la différence de pression entre les cellules

adjacentes induit une contrainte de traction suffisante pour redresser les parois [103].

- **La densité** : la densité du liège peut varier entre 110 et 300 kg/m<sup>3</sup> selon le traitement du liège, l'âge et le pourcentage lenticelles et peut également être liée aux dimensions des cellules [104-106]. En effet, selon Gibson et al [94], une densité élevée correspond à des parois lourdes épaisses et à une faible hauteur cellulaire (15 µm), Selon Pereira [106], cette densité peut atteindre 1250 kg/m<sup>3</sup> sous forte compression (55 MPa). Cela signifie que le liège peut également être utilisé pour amortir les vibrations (chocs).
- **L'absorption des chocs** : Il offre la capacité d'absorber les chocs [107-108], une grande stabilité dimensionnelle et résistance à l'écrasement [109].

#### I.4.3.2.3. Utilité du Liège pour l'isolation

Les matériaux isolants sont d'une grande importance pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'impact des constructions sur l'environnement. Par conséquent, ils sont de plus en plus importants dans les installations de construction et industrielles. De nos jours, le liège a été largement utilisé dans une variété d'applications de construction, Isolation des murs intérieurs ou extérieurs des bâtiments (Figure I.36), des plafonds, toiture (Figure I.37) et d'isolation sous-jacente pour minimiser la transmission du bruit réverbérant [105-110]. Un certain nombre d'études scientifiques ont mesuré la performance thermique des composites à base de liège [96-97] montrant les avantages du liège comme isolant thermique dans la construction, en particulier dans les noyaux de fabrication de panneaux sandwichs [2,5,21,112].



**Figure I.36.** Isolation thermique et phonique en liège de la façade extérieure et intérieure [21]



**Figure I.37.** Isolation thermique et phonique de toiture par panneaux de liège [21]

### I.4.3.3. Composite liège-plâtre

Sur la base d'une analyse expérimentale, Hernandez-Olivares et al [113] ont proposé un nouveau matériau composite liège/plâtre, les auteurs ont montré que le liège et le plâtre sont compatibles entre eux, et que de nombreux nouveaux matériaux de construction peuvent être produits en mélangeant des matériaux mutuellement compatibles avec différentes fractions volumiques. Néanmoins, les propriétés mécaniques de ce mélange sont généralement faibles et d'autres agents de renforcement (comme la fibre de verre) semblent nécessaires pour augmenter la résistance à la compression et à la flexion de ces composites.

**Hernandez-Olivares et al [113]**, selon les mesures de conductivité thermique, les propriétés d'isolation sont très bonnes telles qu'ils ont trouvé une conductivité thermique correspondante à une densité élevée du composite :  $0,1255 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$  pour  $578 \text{ (kg.m}^{-3})$ ,  $0,1869 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$  pour  $600 \text{ (kg.m}^{-3})$  et  $0,1995 \text{ (W.m}^{-1}.\text{K}^{-1})$  pour  $864 \text{ (kg.m}^{-3})$ . En termes de propriétés acoustiques, ce composite est un matériau acoustique réfléchissant non absorbant, il nécessite une sorte de perforation pour fonctionner comme un matériau de construction absorbant le son et le bruit. Ce nouveau matériau est recommandé pour les applications de fabrication telles que les cloisons, faux plafond...

**Sair et al. [114]** ont assuré la bonne isolation thermique du composite liège-plâtre en étudiant les caractéristiques thermiques et hygrométriques d'un matériau biosourcé écoenvironnemental en mélangeant des déchets de liège dans une matrice de plâtre.

**Chekri et al. [98]** ont examiné la faisabilité d'utiliser des composites à base de liège-plâtre à travers une étude exhaustive sur l'amélioration des caractéristiques thermiques et de la légèreté

du plâtre avec l'ajout de liège granulaire destiné à être utilisé dans les panneaux de faux plafond au lieu des plaques de plâtre. La diffusivité thermique, la conductivité et la capacité thermique de ce composite étaient relativement bonnes.

## **I.5. Conclusion**

Ce chapitre présente une analyse bibliographique menée pour bien comprendre les structures sandwichs, les matériaux à gradient fonctionnel "FGM" et les principales caractéristiques des différents matériaux utilisés pour la fabrication des panneaux légers. L'objectif est de créer une base de connaissances qui pourra ensuite être utilisée pour faire une étude expérimentale et analytique de ces nouveaux panneaux sandwichs en FGM. Rappelons tout d'abord les termes et définitions les plus importants liés aux différents composants (peau et âme) de la structure sandwich et son comportement mécanique et thermique. Nous passons en revue de la littérature qui traite spécifiquement de l'utilisation d'expériences mécaniques sur des structures sandwichs pour démontrer leur importance et leur haute résistance dans la construction. Puis on s'intéresse à définir les matériaux à gradient fonctionnel FGM, leurs intérêts et domaines d'application, propriétés matérielles, leur comportement thermique ainsi que les différents constituants naturels utilisés.

**Chapitre II**

**Conception et procédure  
expérimentale**

## II.1 Introduction

La qualité conceptuelle des structures utilisées dans la construction est l'une des conditions de base pour assurer une bonne résistance et performance. De ce fait, le choix des matériaux utilisés dans ces conceptions représente un défi considérable pour la réduction de la consommation d'énergie, réchauffement climatique et le respect du secteur environnemental. Par conséquent, l'utilisation de matériaux naturels et économiques constitue un objectif essentiel pour garantir la qualité des bâtiments et un environnement intérieur sain et confortable.

La conception FGM proposée consiste à disposer la phase plâtre connu par sa résistance à la traction dans la partie tendue du panneau. Une dégradation de phase est ensuite considérée avec plusieurs configurations de transition jusqu'à atteindre la phase liège connu par sa résistance à la compression dans la partie comprimée du panneau. Les âmes graduées ainsi conçues sont confrontées à des âmes témoins à base d'une matrice plâtre et d'un mélange aléatoire plâtre/liège.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le mode opératoire de la réalisation de ces nouveaux panneaux sandwichs, tels que les différentes étapes d'élaboration des éprouvettes et la fabrication des panneaux. À cet égard, la caractérisation des différents matériaux utilisés pour l'élaboration des panneaux est réalisée, à savoir, le plâtre et liège comme des matériaux d'âme et le PVC comme un matériau de semelle. On s'intéressera au comportement mécanique, physique et thermique de ces matériaux, pour pouvoir ensuite déterminer les caractéristiques de son assemblage. L'étude de l'époxy qui est utilisé comme adhésif intérieur pour ces panneaux est également effectuée.

## II.2. Plan et matrice des essais

Cette section présente l'ensemble des procédures expérimentales à suivre (Voir Figure II.1). Une description détaillée sur les étapes d'élaboration des différentes éprouvettes réalisées, la composition optimisée et le procédé de confection sont présentés et discutés dans ce chapitre.

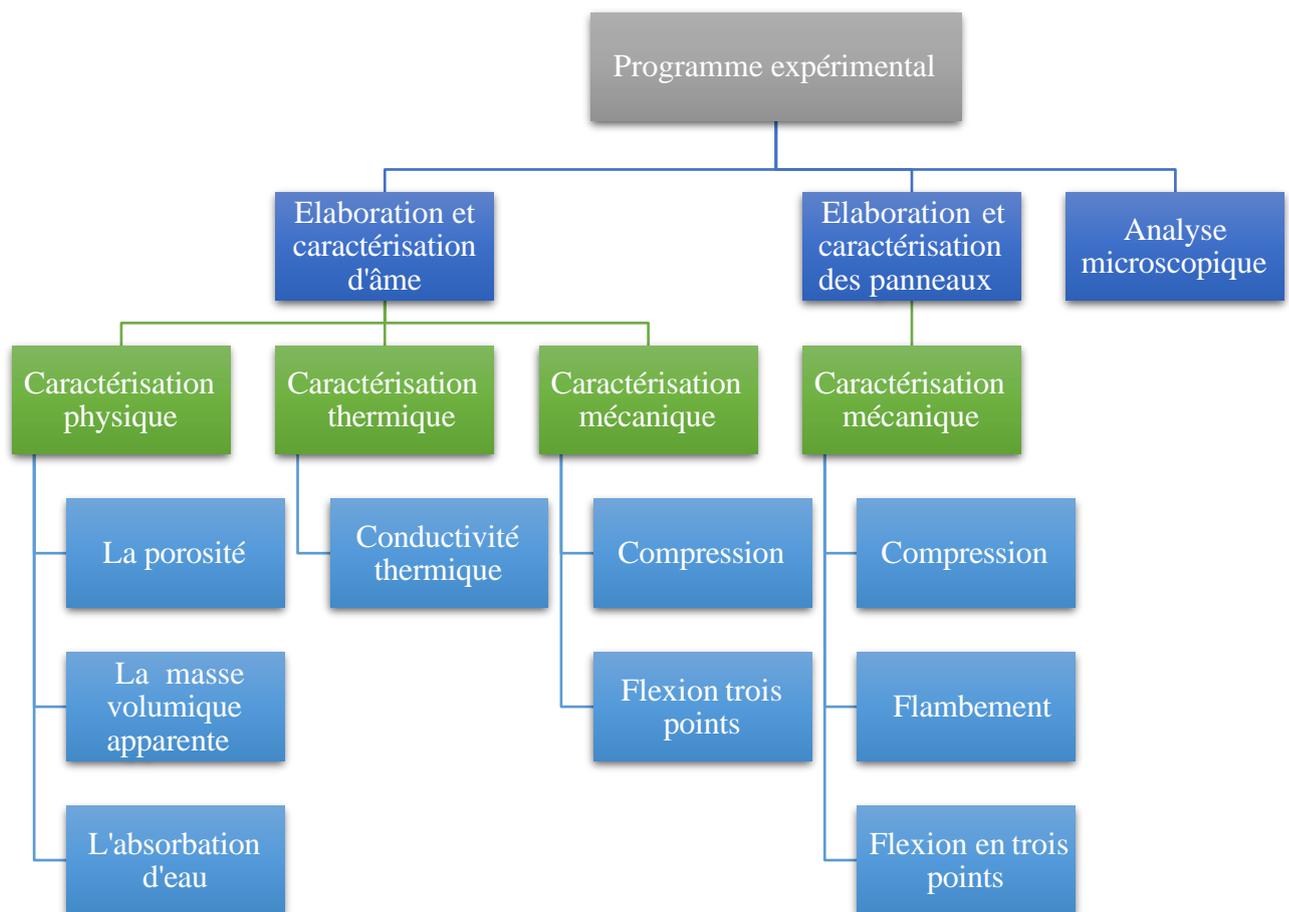
## II.3. Matières premières

### II.3.1. Matrice plâtre

Le plâtre de construction dénommé « Manhargyps Construction » (Figure II.2) certifié selon la norme européenne EN 13279-1 [115] a été utilisé dans ce travail.

Destiné au revêtement et au rendu intérieur des murs et plafonds de tous types de substrats avec une préparation manuelle facile, le plâtre utilisé prend un temps de prise régulier et progressif avec moins d'effort physique. Les principales caractéristiques du plâtre usagé résident essentiellement dans :

- Faible densité apparente qui est mesurée à  $1,4 \text{ g / cm}^3$
- Un excellent isolant thermique, est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique qui est égal  $\lambda=0,65 \text{ W/m.K}$
- Une finition et un lissage en douceur
- Rendement de 4 à 6  $\text{m}^2/\text{sac}/\text{cm}$  d'épaisseur
- Taux de gâchage 100% E/P
- Dureté Shore C/revêtement sec : 80 (Fournisseur)
- Le temps de manipulation est de 30 minutes.



**Figure II.1.** Organigramme de l'approche expérimentale.



Figure II.2. Le plâtre (Manhargyps) utilisé

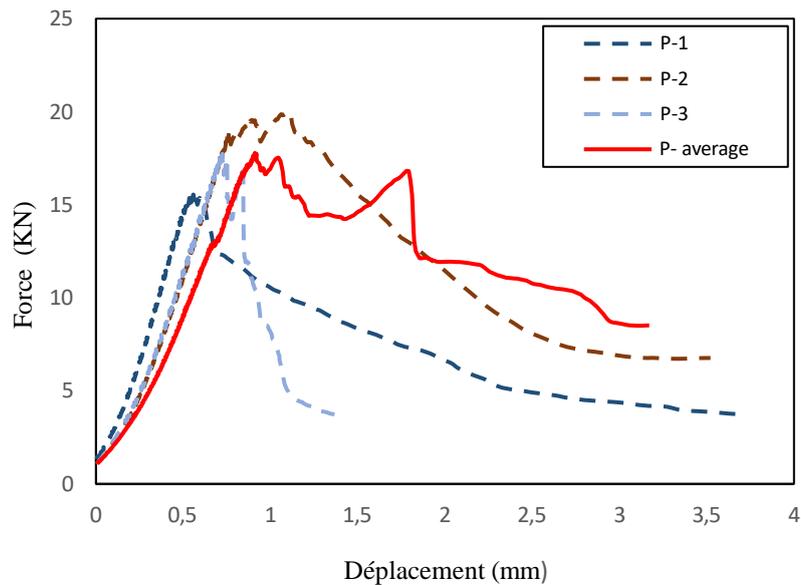
### II.3.1.1. Comportement du plâtre à la compression et traction

Afin de caractériser le matériau plâtre utilisé en traction, un moule métallique prismatique de dimension intérieure  $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$  est utilisé selon la norme NF EN 196-1 [116]. Les essais de compression sont menés sur des éprouvettes cubiques de dimension  $(40 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$  selon la norme NFT54- 604 [118]. Les éprouvettes destinées aux essais de compression et de flexion 3-points sous la machine d'essai sont montrées sur la Figure II.3.

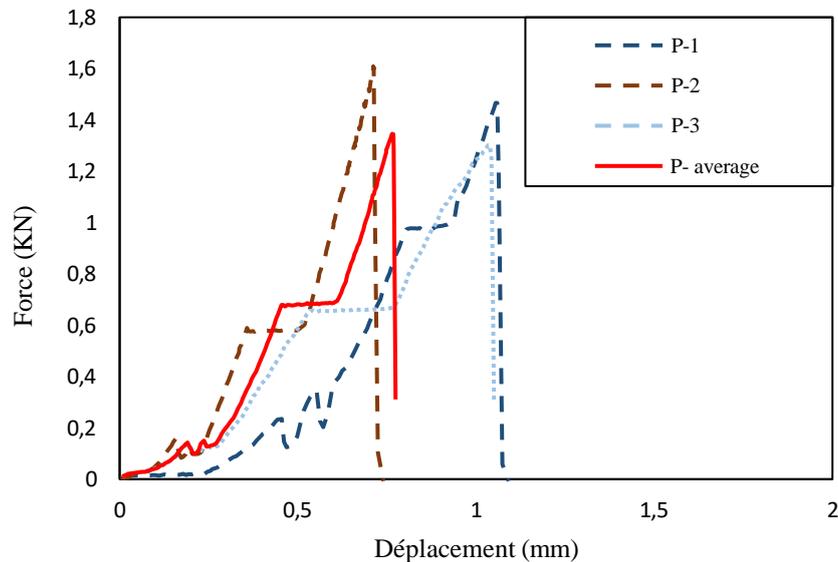


Figure II.3. Mode d'essai sur le plâtre : a) Essais de compression ; b) Essais de flexion à 3 points

Les Figures II.4 et II.5 présentent les lois de comportement expérimentales en compression et traction obtenues sur chacune des éprouvettes testées, ainsi que les courbes moyennes. Cependant, le Tableau II.1 résume les résultats de la résistance en compression et flexion en trois points du plâtre utilisé.



**Figure II.4.** Courbes Force – déplacement des éprouvettes de plâtre testées sous compression



**Figure II.5.** Courbes Force – déplacement des éprouvettes de plâtre testées sous flexion à 3 points

**Tableau II.1.** Résultats des essais de compression et de flexion en trois points sur le plâtre

Charge de compression (KN)	Contrainte de compression (Mpa)	Charge de flexion (KN)	Contrainte de flexion (Mpa)	Module d'élasticité (Mpa)
17.7817	11.09	1.34021	3.78	9000

Les résultats obtenus à partir des essais mécaniques montrent que le plâtre est caractérisé par une rigidité axiale élevée et un mécanisme de rupture par compression fragile. Par conséquent, on peut conclure que le plâtre représente une bonne résistance en flexion avec une force maximale d'environ 1340 N, ce qui correspond à une résistance à la traction de 3,78 Mpa.

### II.3.2. Liège

Le liège utilisé est à 100 % naturel, il a été extrait de forêts gérées durablement dans la région d'AOKAS (Bejaia, Algérie) et récupéré à l'état brut tel que montré sur la Figure II.6.



**Figure II.6.** Liège utilisé à l'état brut

#### II.3.2.1. Traitement du liège récupéré

Le liège récupéré est broyé avec un concasseur spécial (broyeur), comme le montre la Figure II.7 :(b). Après avoir obtenu un matériau sous forme d'agrégats, le liège a été tamisé à l'aide d'une Tamiseuse, comme illustré à la Figure II.7: (c).



**Figure II. 7.** Traitement du liège : a) liège coupé ; b) machine de concassage ; c) Tamiseuse ; d) Granulats de liège obtenus.

La machine est équipée d'une série de tamis de différents diamètres superposés les uns sur les autres dans la machine, du plus petit diamètre au plus grand. Les vibrations fournies par la machine permettent aux agrégats obtenus de se dissiper à travers les tamis, et déterminent ainsi les quantités de refus retenues dans chaque tamis. Afin d'assurer une inclusion efficace du liège dans la matrice de plâtre de l'échantillon, un diamètre de 1.25 mm a été envisagé (Figure II.7.d).

### II.3.2.2. Propriétés du liège utilisé

Afin d'obtenir les propriétés physiques et thermiques du liège utilisé, des morceaux de dimensions  $(50*80*30) \text{ mm}^3$  selon la norme NF EN1946-2 [117] ont été formés avec une masse moyenne de 27.5 g (Figure II.8).



**Figure II.8:** Morceaux du liège pour caractérisation physique-thermique

#### ➤ Masse volumique

La masse volumique du liège est donnée par la relation :

$$M_V = \frac{m}{v} \quad (\text{II.1})$$

Nous avons : La masse du liège :  $m=27.5 \text{ g}$  ; Le volume de l'éprouvette :  $V= 140 \text{ cm}^3$

$$M_V = \frac{m}{v} \Rightarrow \frac{27.5}{140} = 0.23 \text{ g/cm}^3$$

Ainsi la masse volumique de liège est :  $0.23 \text{ g/cm}^3$

#### ➤ La conductivité thermique

Afin de mesurer la conductivité thermique, le CT-mètre illustré à la Figure II.9 a été utilisé. En effet, une plaque a été positionnée entre deux éprouvettes identiques selon la norme NF EN1946-2 [117]. La température initiale des éprouvettes est supposée être  $T_i$ . La température a été uniformément augmentée jusqu'à une valeur finale  $T_f$ . Le changement de température est donné par :

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (\text{II.2})$$

Les résultats de la caractérisation de liège utilisé sont résumés dans le Tableau II.2



**Figure II.9.** Le CT-mètre utilisé pour mesurer la conductivité

**Tableau II.2.** Caractéristique de liège utilisé

Caractéristiques/Paramètres	Valeur/Tolérance
Granulométries	1.25 mm
Densités	0.23g/cm <sup>3</sup>
différence de température $\Delta T$	1.53 k
Chaleur spécifique h	637 KJ/m <sup>3</sup> °C
Coefficient de conductivité thermique à 20°C	$\lambda = 0,11$ W/Mk
Résistance à la conductibilité de la chaleur	R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25m <sup>2</sup> K/W
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm <sup>2</sup>
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm <sup>2</sup>

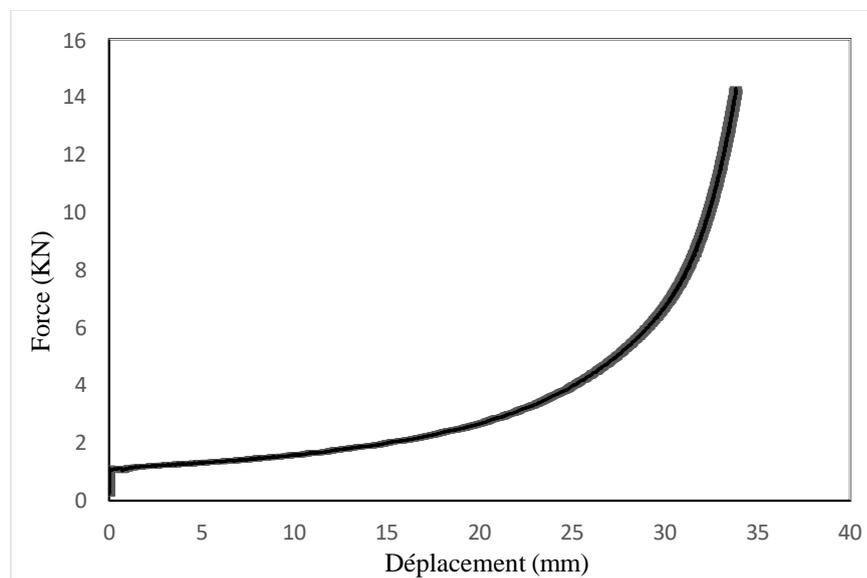
### ➤ Comportement mécanique

Le liège utilisé a été caractérisé suivant des essais de compression et de flexion 3-points (Figure II.10). Les essais sont réalisés suivant les normes : NF T 54-604 [118] en compression et NF T 54-606 [119] en flexion. Les différents résultats obtenus nous ont permis de calculer les propriétés mécaniques intrinsèques du liège et de tracer les courbes qui régissent son comportement (force-déplacement) sur les Figures II.11 et 12.

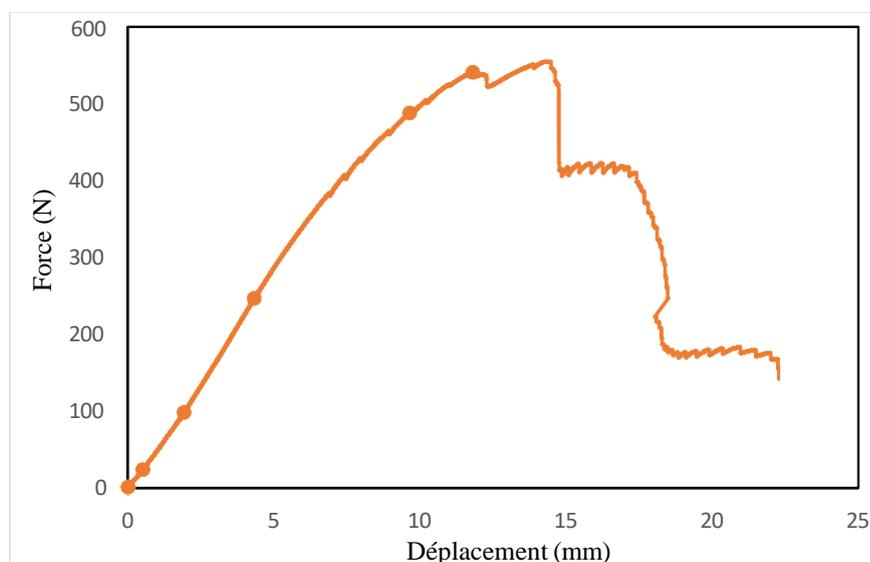
La courbe force-déplacement du Liège testé en compression montre une allure en trois phases. Une phase linéaire représentant le domaine élastique. Cette phase est suivie d'un palier qui correspond au flambement des cellules et qui s'étale jusqu'à 23 mm de déplacement environ. Enfin, il y a lieu d'un domaine où le matériau se condense en montrant ainsi une forte rigidité face aux force appliquées et ductilité élevée.



**Figure II.10.** Essai sur liège : a) Essais de compression ; b) Essais de flexion 3-points



**Figure II.11.** Courbe Force-Déplacement de Liège testé en compression



**Figure II.12.** Courbe Force-Déplacement de Liège testé en Flexion à trois points

En ce qui concerne l'essai de flexion, nous observons une augmentation linéaire de la charge appliquée dans la première phase qui représente une zone élastique jusqu'à une valeur de déplacement de 11 mm environ et correspondant à une valeur de force de 540 N. Après avoir atteint la charge maximale qui caractérise la résistance ultime de l'échantillon, une diminution brutale de la charge est observée.

### II.3.3. Le PVC

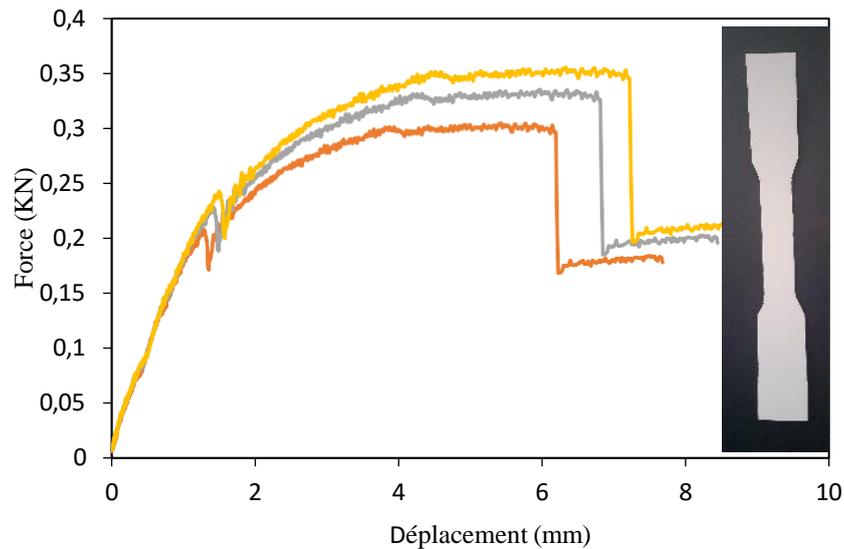
Le PVC possède des propriétés isolantes et amortissantes qui doivent être utilisées pour les applications d'isolation industrielle des cloisons et des plafonds dans la construction (âme ou peaux dans les structures sandwiches). De plus, le PVC a des bonnes propriétés mécaniques et physiques, L'ensemble de ses propriétés et son aptitude à être modifié selon les besoins en font un matériau adapté à de nombreux usages, tels que l'aspiration de liquides corrosifs (eau de pluie et eaux usées), distribution d'eau chaude ou froide, fabrication de profilés et de tuyaux par des méthodes d'extrusion ainsi que dans l'industrie de l'habillement et des tapisseries.

Concernant notre étude, les plaques de polychlorure de vinyle (PVC) ont été utilisées comme revêtements de panneaux. Le PVC utilisé représentée à la Figure II.13 a été fourni sous forme de rouleau de 50 mm largeur et épaisseur de 1 mm. Le recours aux plaques de PVC comme peau de panneaux est justifié par son coût relativement modéré et les bonnes propriétés mécaniques. En effet, le PVC est flexible, souple et présente une bonne résistance aux chocs.

Afin d'évaluer les propriétés de traction des semelles utilisées, un essai de traction directe a été effectué conformément à la norme NF EN ISO 527-1 [120]. La Figure II.14 représente les courbes contrainte-déformation de trois coupons identiques, tandis que, Tableau II.3 recapitalise les principales valeurs de traction obtenues.



**Figure II.13.** Champ PVC utilisé pour les semelles



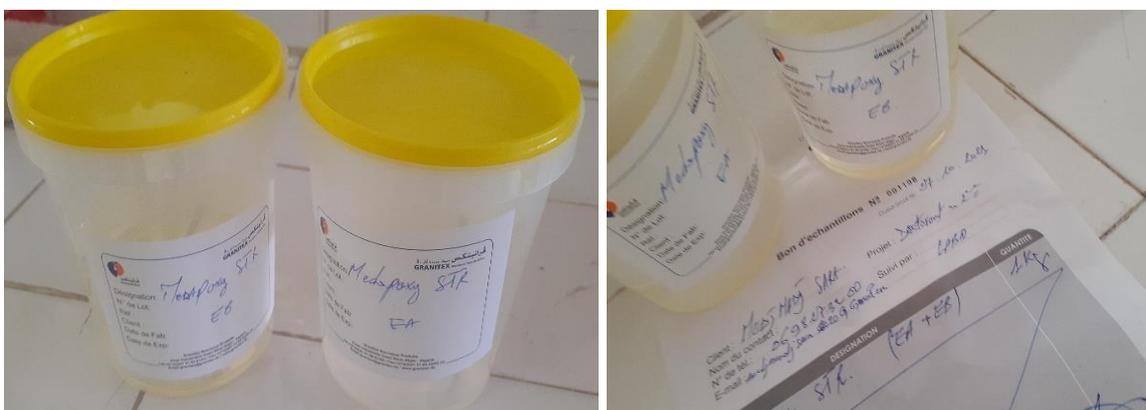
**Figure II.14** Comportement à la traction de la peau en PVC testée

**Tableau II.3.** Propriétés de la matrice résine-époxy STR et des plaques en PVC

Peaux composites	Épaisseur (mm)	Charge de traction (N)	Déplacement à la charge ultime (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (MPa)
<b>PVC</b>	1.0	316.16	7.68	29.01	1081.09
<b>Résine-époxy STR</b>	0.97	98.40	2.05	35	2.800-3.200

### II.3.4. La Résine

Les semelles utilisées dans cette étude (plaques de PVC) sont collées en utilisant une résine MEDAPOXY STR. La résine époxy utilisée est destinée à la stratification, elle contient deux composantes, à savoir : un élément imprégnateur (EA) et un élément durcisseur (EB) comme illustrés à la Figure II. 15.



**Figure II.15.** La résine MEDAPOXY STR utilisée comme adhésif

Les caractéristiques de la résine utilisée issues des essais de caractérisation sous traction directe sont données dans le Tableau II.3. D'autres caractéristiques sont également fournies par le fournisseur et elles sont résumées dans le Tableau II.4.

**Tableau II.4.** Caractéristiques de la résine MEDAPOXY STR [91]

<b>Rapport pondéral</b>	Elément EA : 1 kg Elément EB : 0.666 kg
<b>Densité (ISO758)</b>	1.1±0.05
<b>Viscosité (NF T76-102)</b>	11000 mPaS à 25°C
<b>DPU (NFP18 810)</b>	1h 15min à 20°C et 65% HR
<b>Temps de durcissement</b>	à 20°C et 65%HR : Hors poisse : 6h Dur : 16h
<b>2Adhérence sur béton (NFP18 858)</b>	>3 Mpa
<b>Durée de mise en service</b>	10 j 20°C

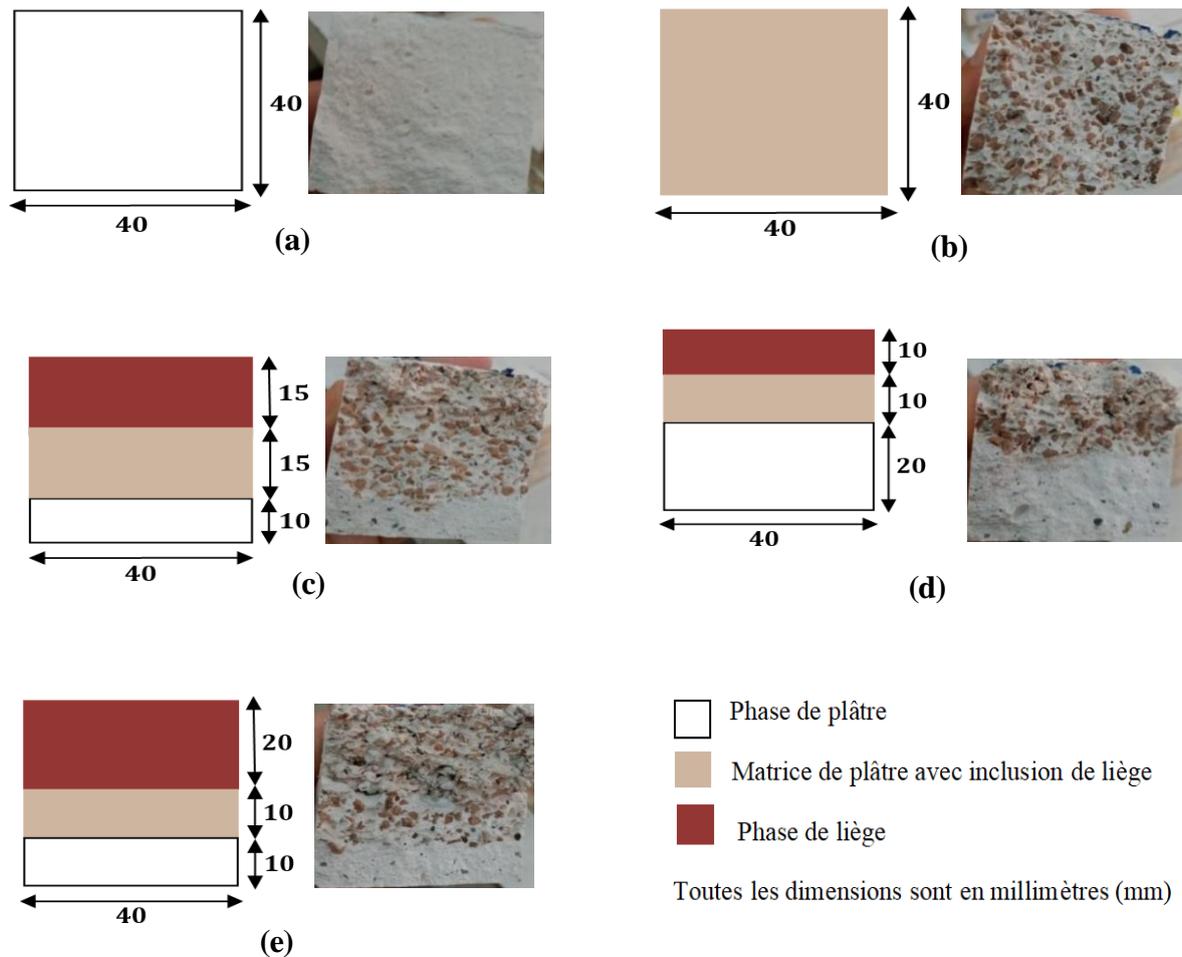
## II.4. Fabrication des panneaux

### II.4.1. Elaboration des éprouvettes pour la caractérisation mécanique de l'âme

Cinq types d'éprouvettes sont prises en compte dans la caractérisation de l'âme, désignées : (P) éprouvette témoin constituée d'une matrice 100% plâtre ; (P-C) : éprouvettes à base d'un mélange aléatoire entre le plâtre et les granulats de liège ; (FGM-1), (FGM-2) et (FGM-3) sont des éprouvettes gradués fonctionnellement, différentes à l'un des l'autre en fonction de dégradation, l'épaisseur et la quantité du matériau utilisé.

Trois variantes pour chaque type d'éprouvette ont été préparées. Plusieurs moules métalliques prismatiques de dimensions intérieures (160x40x40) mm<sup>3</sup> sont utilisés selon la norme NF EN 196-1 [116] (Figure II.17 : a) pour la fabrication des éprouvettes destinées aux essais de compression et de flexion 3-points.

La transition de phase de la matrice plâtre à celle du liège a été effectuée progressivement avec différentes configurations, à savoir : (FGM-1) avec une transition linéaire, dans laquelle l'épaisseur de la couche de la phase de transition (15 mm) est égale à celle de liège (15 mm), (FGM-2) à faible taux de transition, dans laquelle l'épaisseur de la couche de phase de plâtre (20 mm) est supérieure à celle du liège (10 mm). Alors que (FGM-3) correspond à un taux de transition élevé, dans lequel l'épaisseur de la couche de phase de plâtre (10 mm) est inférieure à celle du liège (20 mm) (Figure II.16).



**Figure II.16.** Présentation schématique du noyau des panneaux sandwichs : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3

Pour spécifier la quantité de plâtre utilisé dans chaque éprouvette, la densité de plâtre évaluée expérimentalement  $\rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3$  est utilisé. D'après les normes NF P 18-554 [121] et NF P 18-555 [122], la densité du liège est  $\rho_c = 240 \text{ kg/m}^3$ , pour le cas de cette étude, la densité moyenne du liège est d'environ  $230 \text{ kg/m}^3$ .

Le groupe (FGM-1) présente trois couches continues, couche de plâtre comme fond d'éprouvette de 10 mm d'épaisseur et couche intermédiaire de 15 mm d'épaisseur conçue avec 94% de plâtre et 6% d'agréats de liège, la couche supérieure de 15 mm d'épaisseur est conçue avec 80% de plâtre et 20% granulats de liège. Cependant, le groupe (FGM-2) présente une couche de plâtre comme fond de l'échantillon avec 20 mm d'épaisseur et une couche intermédiaire de 10 mm d'épaisseur conçue avec 94% de plâtre et 6% des granulats de liège. La couche supérieure de 10 mm d'épaisseur est conçue avec 80% de plâtre et 20% granulats de liège. En ce qui concerne l'éprouvette (FGM-3), une couche de plâtre comme fond de 10 mm d'épaisseur et une couche intermédiaire de 10 mm d'épaisseur, la couche supérieure de 20 mm d'épaisseur est conçue avec 80 % plâtre et 20% des granulats de liège.

Il est important de noter que les différents pourcentages considérés sont basés sur le volume global de l'éprouvette et les densités des matières premières utilisées. En effet, les couches sont conçues conformément au concept des matériaux fonctionnellement gradués, chaque volume de phase est déterminé en fonction de la dégradation (configuration donnée à la Figure II. 16).

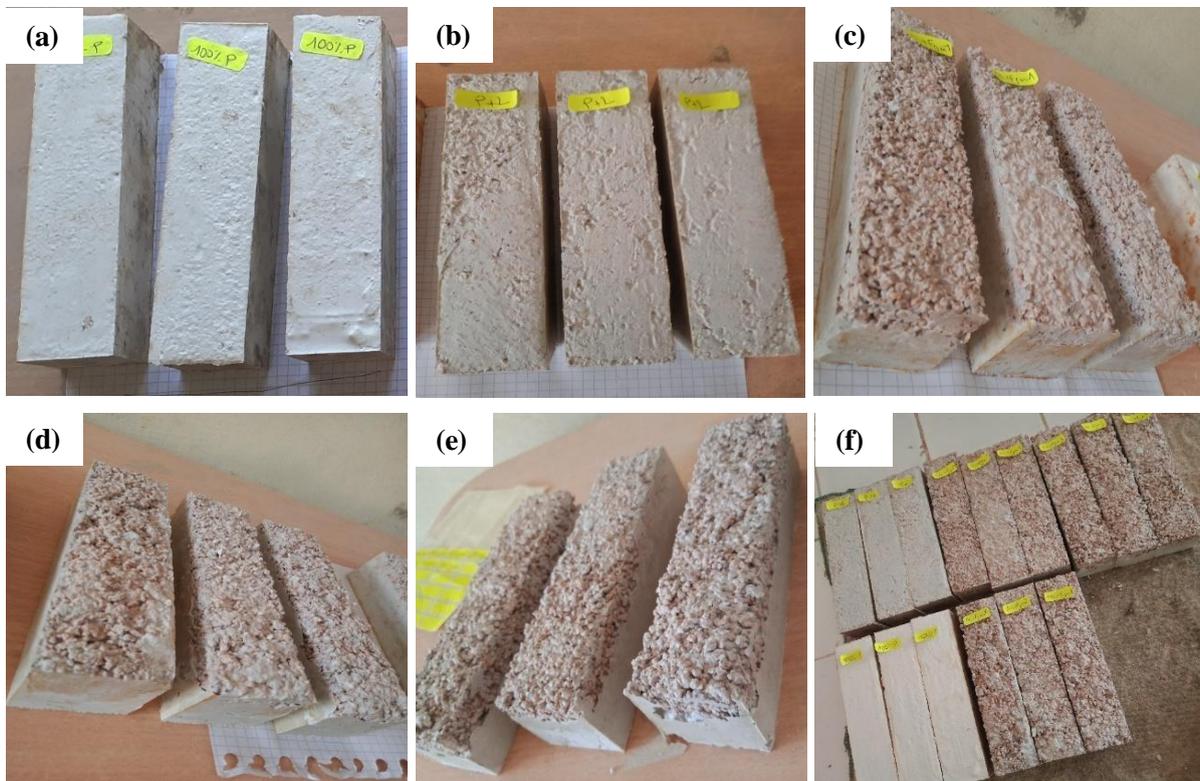
Dans la phase de liège, le plâtre assure uniquement la connexion entre les particules de liège, à cet égard, les 20 % du liège a été conçu de manière optimale pour obtenir une inclusion maximale pour laquelle le plâtre peut assurer cette connexion. Toutefois, les 6 % d'inclusion de liège dans la phase de transition intermédiaire a été conçue pour obtenir l'ajout optimal en pourcentage afin d'assurer une répartition homogène et une maniabilité permettant la transition et la dégradation sans discontinuité et concentration des particules causée par le mélange aléatoire. Néanmoins, le type (P-C) contient la même quantité totale de liège de (FGM-1) avec inclusion aléatoire. Les différents constituants de chaque éprouvette et les fractions volumiques de chaque composant est résumée dans le Tableau II.5. L'ensemble des éprouvettes fabriqués sont représentés à la Figure II.18.

**Tableau II.5.** Composition des éprouvettes en fonction des différentes épaisseurs et quantités

Désignation	Composants	Volume (cm <sup>3</sup> )	Quantité de Plâtre (P) et Liège (C) (g)	Quantité d'eau (g)
<b>P</b>	Plâtre	(4x4x16)	P : 400	200
<b>P-C</b>	Plâtre et liège	(4x4x16)	P : 238.28 C : 17.82	119.68
<b>FGM-1</b>	Plâtre	(4x16x1)	P : 100	50
	Plâtre et liège	(4x16x1.5)	P : 90.68 C : 5.81	45.68
	Plâtre et liège	(4x16x1.5)	P : 47.6 C : 12.01	24
<b>FGM-2</b>	Plâtre	(4x16x2)	P : 200	100
	Plâtre et liège	(4x16x1)	P : 60.45 C : 3.87	30.45
	Plâtre et liège	(4x16x1)	P : 31.73 C : 8.00	16
<b>FGM-3</b>	Plâtre	(4x16x1)	P : 100	50
	Plâtre et liège	(4x16x1)	P : 60.45 C : 3.87	30.45
	Plâtre et liège	(4x16x2)	P : 63.46 C : 16	32



**Figure II. 17.** Les étapes suivies dans la réalisation du noyau des panneaux sandwichs : a) Préparation des moules ; b) Mélange de plâtre et de granulats du liège ; c) Moulage et coulage des éprouvettes.



**Figures II.18.** Les différentes éprouvettes après démoulage : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3 ; f) L'ensemble des éprouvettes.

Pour l'élaboration des éprouvettes, les étapes suivantes ont été suivies :

- Préparation des moules représentés à la (Figure II.17 : a) avec une huile imprégnée pour faciliter le démoulage ;
- Procéder au mélange du plâtre avec les granulats de liège, comme le montre la (Figure II.17 : b) ;
- Ajouter 10% de la quantité de mélange considéré comme une perte de masse ;

- Faire vibrer le mélange pour 02 min, et gratter les côtés du moule pour assurer une dispersion complète ;
- Après l'obtention d'un mélange homogène, le mélange a été introduit dans les moules, puis l'étaler pour éviter les bulles d'air. Le moulage de de chaque éprouvette est illustré sur la (Figure II. 17 :c) ;
- En ce qui concerne la préparation des échantillons de FGM, les trois couches de l'éprouvette ont été appliquées directement les unes sur les autres sans attendre que la sous-couche sèche et durcisse pour éviter de créer une interface et assurer une bonne consistance et adhérence entre les granulats de liège et le plâtre permettant un meilleur encrage ;
- Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et laissées dans des conditions de laboratoire pendant 3 jours. Les échantillons sont ensuite conservés dans l'étuve pour dégager toute l'eau qui est à l'intérieure et obtenir des masses constantes.

#### II.4.2. Elaboration des éprouvettes pour la caractérisation physique et thermique de l'âme

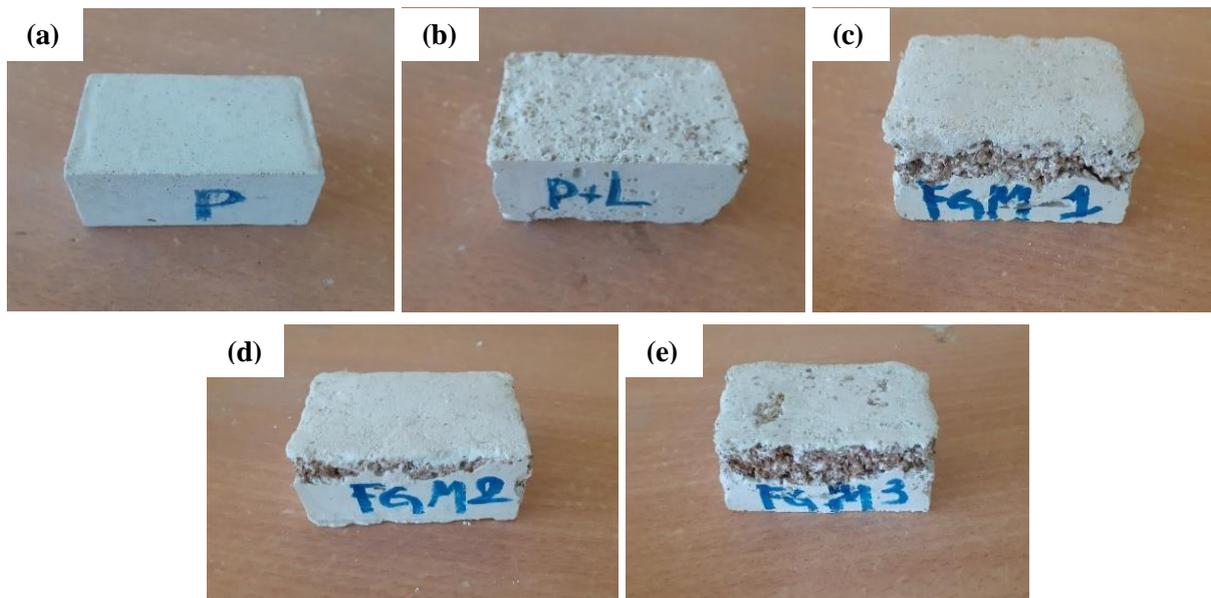
Des moules en bois avec une dimension interne de  $(80 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> ont été utilisés selon la norme NF EN1946-2 [117] afin de fabriquer des échantillons pour la caractérisation physique et thermique (Figure II.19).

Les mêmes types, étapes et ingrédients de matériaux définis précédemment ont été préparés mais cette fois dans un moule différent, avec deux éprouvettes identiques pour chaque variante d'étude. En effet, une telle étude permet de mettre en évidence la réduction de poids propre et de densité des échantillons fabriqués.



**Figure II.19.** Eprouvette coulée dans le moule en bois

Les différents échantillons après démolition et lissage de la surface supérieure sont présentés à la Figure II.20.



**Figure II.20.** L'ensemble d'éprouvettes après démoulage : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3.

#### II.4.3. Préparation des panneaux

L'ossature des panneaux sandwichs proposés a été conçu par :

- Un âme FGM à base d'un mélange de granulats du liège de 1,25 mm de diamètre et une matrice du plâtre d'une épaisseur de 30 mm ;
- Des plaques de polychlorure de vinyle renforcé (PVC) d'une largeur de 50 mm et 1 mm d'épaisseur sont utilisées comme semelles de panneaux, similaires en termes de matériaux et de dimensions en haut et en bas des panneaux ;
- Une résine MEDAPOXY STR imprégnée à un durcisseur comme adhésif.

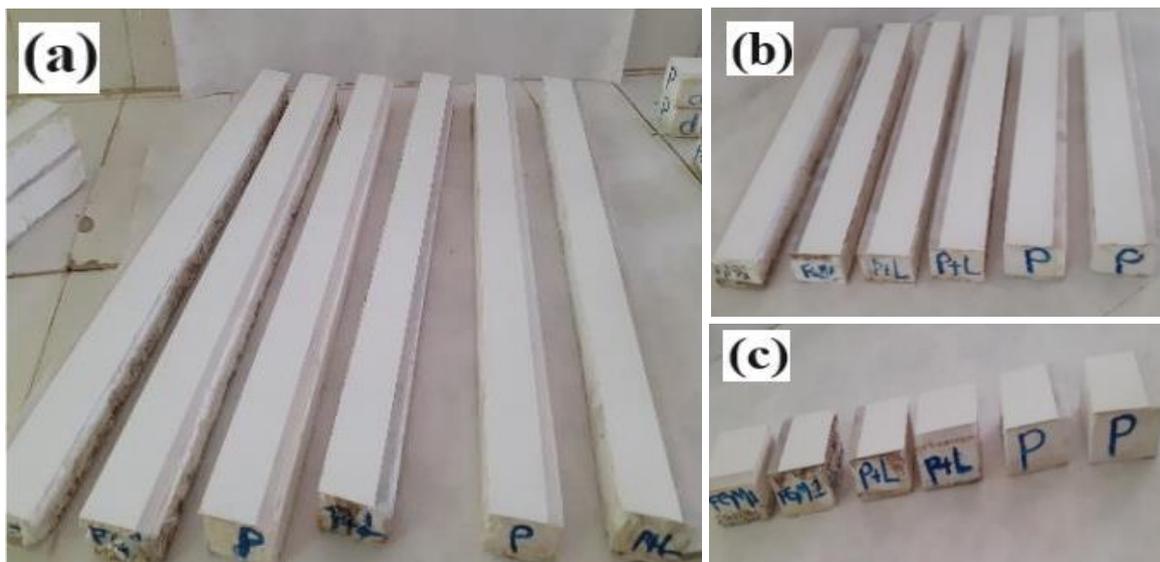
Après la préparation des noyaux, nous allons maintenant procéder à la fabrication des panneaux sandwichs en utilisant un moule en bois. À ce stade, 3 types d'éprouvettes ont été préparés, à savoir : le type (P-P) comme des échantillons témoins, (P-PC) regroupent les échantillons fabriqués à base d'un mélange aléatoire du plâtre et des granulats du liège) et le type FGM constitué d'une âme fonctionnellement graduée à base de composite plâtre/liège. Il est important de noter que seule la disposition de type FGM-1 est considérée dans l'âme des panneaux gradués car elle présente des propriétés thermiques et mécaniques meilleures selon les résultats des essais de caractérisation.

Un total de 18 panneaux divisés en 3 groupes ont été conçus. Les dimensions des panneaux sont :  $(50 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> ;  $(350 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> et  $(550 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> respectivement pour essai de compression, flambement et flexion, avec trois éprouvettes identiques pour chaque série (Figure II.21).



**Figure II.21.** L'ensemble des éprouvettes d'âme des panneaux sandwichs

Après avoir préparé les éprouvettes de l'âme, les plaques de PVC sont collées en utilisant une résine MEDAPOXY STR. Afin d'obtenir une bonne adhérence et un contact optimal entre le noyau et les peaux, la surface de contact doit être dépoussiérée et séchée conformément à la norme NF P 74-203/ DTU 59-3 [123].



**Figure II.22.** Ensemble des panneaux sandwichs conçus : a)  $(550 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> de dimension pour essai de flexion ; b)  $(350 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> de dimension pour essai de flambement ; c)  $(50 \times 50 \times 30)$  mm<sup>3</sup> de dimension pour essai de compression.

Tous les panneaux sandwichs conçus sont représentés dans Figure II.22. En effet, l'épaisseur de l'âme de 30 mm a été suffisamment prise pour assurer la dégradation fonctionnelle. La ligne directrice utilisée pour déterminer la géométrie des échantillons est conforme aux normes NF T54-606 [119] et NFT54- 604 [118], qui recommandaient d'évaluer la longueur des panneaux comme suit : entre 15 et 20 fois la hauteur totale des panneaux y compris l'épaisseur des peaux pour la flexion, moins de 2 fois l'épaisseur totale du panneau pour la compression et entre 10 et 12 fois l'épaisseur totale du panneau pour les essais de flambement.

### III.5. Conclusion

Les résultats de ce chapitre visent à présenter et étudier les principales caractéristiques des différents matériaux utilisés pour la fabrication des nouveaux panneaux sandwichs fonctionnellement gradués (FGM). Cette étude nous a permis de répertorier les principaux avantages de ces matériaux respectueux de l'environnement :

- Le plâtre utilisé présente une résistance à la traction de l'ordre de 3,78 MPa avec une conductivité thermique égale à 0,65 W/m.K, ce qui en fait un excellent isolant thermique.
- Le liège possède des qualités spécifiques, son utilisation a assuré à la fois la légèreté des structures et l'isolation thermique grâce à sa faible conductivité thermique qui est estimée à 0.11 W/m.K et distingue avec un ensemble de propriétés mécaniques telles qu'il présente une bonne résistance à la compression et une forte rigidité face aux forces appliquées (14.2 KN).
- L'utilisation des plaques en polymère (PVC) comme semelles dans les panneaux sandwichs fabriqués est un bon choix en raison de sa flexibilité et la bonne résistance à la traction dépassant les 290 MPa.
- La résine époxy utilisée a des propriétés mécaniques élevées grâce à sa bonne résistance à la traction qui est égale 10.33 MPa, ce qui permet d'assurer la rigidité des panneaux fabriqués.

Par conséquent, l'objectif assigné dans le chapitre suivant est de déterminer expérimentalement le comportement physique et thermique des panneaux qui ont été fabriqués pour mettre en évidence tous les aspects positifs d'une telle combinaison des performances de matériaux d'origine différente avec une certaine compatibilité pour répondre aux exigences de la réglementation en vigueur et notamment le respect de l'environnement.

## **Chapitre III**

# **Essais de caractérisation physico-thermique et micrographique**

### **III.1. Introduction**

Ce chapitre permet d'identifier les différentes caractéristiques physiques, thermiques et microscopiques de la nouvelle conception des âmes en FGM proposée pour élaborer des panneaux sandwichs. L'étude expérimentale est réalisée au niveau du laboratoire de Génie de la Construction et d'Architecture de l'université de Bejaia, et le laboratoire de Génie civil de l'université de Tizi Ouzou.

Concernant la caractérisation thermique, la conductivité thermique est bien mesurée sur tous les types d'éprouvette à l'aide d'un CT-mètre. La porosité, la masse volumique apparente et l'absorption d'eau ont été calculé afin de bien comprendre le comportement physique de la nouvelle conception proposée. Ces mesures sont complétées par des ajustements statistiques afin d'évaluer les incertitudes liées aux erreurs de mesure et de conception. Ensuite, l'observation et l'analyse microscopique des différentes âmes de panneaux est conduite à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) afin de visualiser la microstructure et l'adhérence entre les particules des âmes.

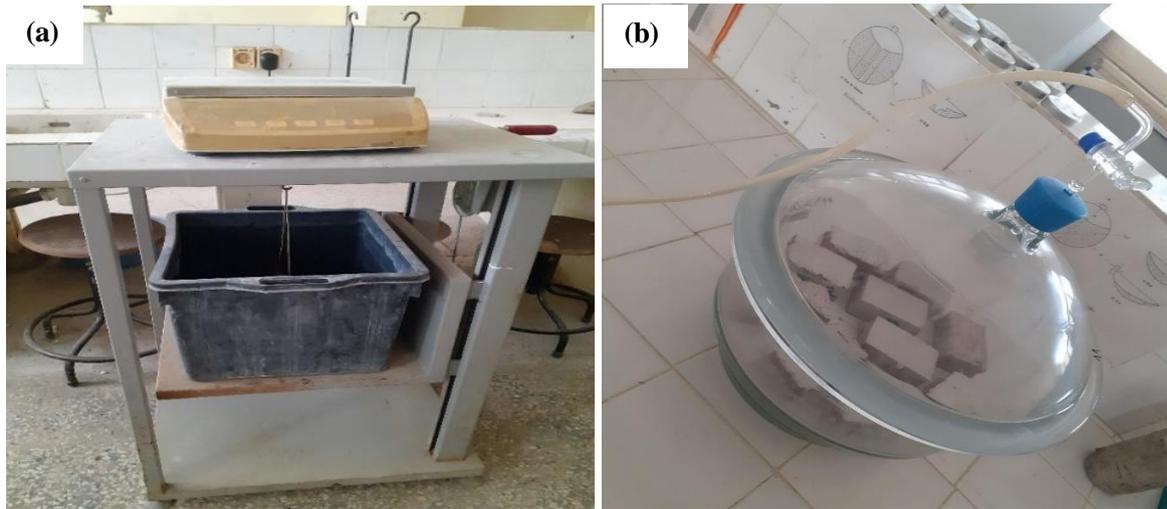
### **III.2. Caractérisation physique**

En ce qui concerne la caractérisation physique : les masses sèches, saturées et hydrostatiques ont été mesurées. La porosité, l'absorption d'eau et la densité apparente ont été évaluées selon les normes européennes en vigueur. Les différents résultats obtenus sont récapitulés et confrontés sous forme d'histogramme avec barres d'erreur.

#### **III.2.1. Procédure de calcul**

Tout d'abord, la masse sèche ( $M_s$ ) de chaque échantillon est déterminée. Les échantillons ont été maintenus immergés dans l'eau sous vide pendant 24 h, les échantillons sont ensuite placés sur une ligne sèche avec laquelle ils sont soigneusement et rapidement essuyés, puis la masse saturée ( $M_{st}$ ) est mesurée.

Enfin, les éprouvettes sont pesées dans l'eau pour la pesée hydrostatique ( $M_{ph}$ ) comme montré sur la Figure III.1: a. En outre, la Figure III.1 montre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la masse saturée et hydrostatique des échantillons. Les différentes masses mesurées pour tous les types des éprouvettes sont résumées dans le Tableau III.1.



**Figure III.1.** Procédé et dispositif de mesure de la porosité, de l'absorption d'eau et de la densité apparente.

### III.2.2. La porosité

Selon NF P18-459 [124], la porosité de chaque éprouvette qui signifie le rapport du volume global, y compris les vides ouverts du matériau sur le volume apparent, est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$P = \frac{M_{st} - M_s}{M_{st} - M_{ph}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$M_{st}$  : masse saturée ;

$M_{ph}$  : masse par poussé hydrostatique ;

$M_s$ : masse sèche.

### III.2.3. La masse volumique apparente

Selon la norme NF P18-459 [124], la masse apparente est évaluée par l'équation :

$$M_{app} = \frac{M_s}{M_{st} - M_{ph}} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

### III.2.4. L'absorption d'eau

L'absorption d'eau de chaque échantillon est évaluée conformément à la norme NF EN 1015-18 [125] à l'aide de l'équation :

$$A = \frac{M_{st} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{III.4})$$

Le Tableau III.1 résume toutes les mesures des propriétés physiques de toutes les éprouvettes considérées.

**Tableau III.1.** Caractéristiques physiques mesurées et évaluées

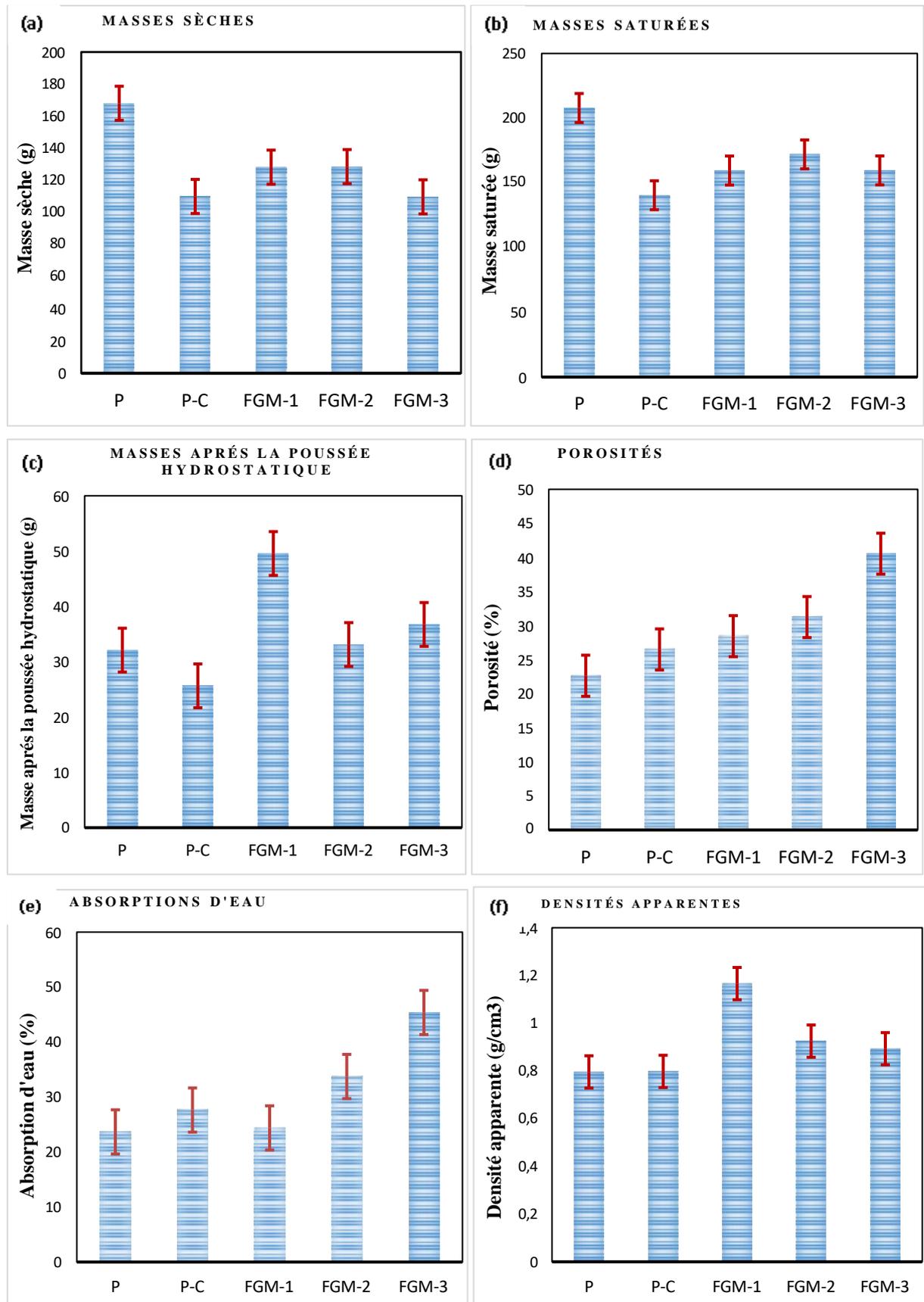
Désignation	Masse sèche (g)	Masse saturée (g)	Masse (poussée hydrostatique) (g)	Porosité (%)	Absorption D'eau (%)	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )
<b>P</b>	168.1	207.89	32.10	22.63	23.67	0.798
<b>P-C</b>	110.07	140.51	25.64	26.49	27.65	0.786
<b>FGM-1</b>	128.30	159.60	49.57	28.44	24.39	1.166
<b>FGM-2</b>	128.65	172.07	33.10	31.24	33.75	0.925
<b>FGM-3</b>	109.83	159.69	36.74	40.55	45.39	0.893

La Figure III.2 montre des histogrammes qui représente l'ensemble des caractéristiques physiques des différents types d'éprouvettes.

L'analyse des résultats obtenus à partir de la caractérisation physique montre d'une part une réduction significative en termes de poids propre des échantillons gradués fonctionnellement par rapport aux composites classiques [1], de sorte que les masses des types FGM-1, FGM-2 et FGM-3 sont respectivement de 128,30 g, 128.65 g et 109,83 g, c'est ce qui permet d'atteindre l'efficacité de cette nouvelle conception en termes de légèreté et de facilité de mise en forme.

Les résultats montrent également une amélioration en termes de densité apparente, tel que sa valeur est avérée faible pour toutes les variantes. En effet, le type P-C qui contient un mélange entre les granulats du liège et le plâtre représente la plus faible valeur de densité de l'ordre de 0.786 g/cm<sup>3</sup>, est inférieure à 1.42 g/cm<sup>3</sup> obtenu par Si Salem et al [1], qui ont fabriqués deux types d'éprouvettes à base du plâtre et du liège (50% Plâtre – 50 % Liège) et (40% plâtre – 60% Liège).

D'autre part, la contribution des granulats du liège à améliorer la porosité et la capacité d'absorption d'eau. Par exemple : le type FGM-3 sachant qu'il contient la plus grande quantité de liège par rapport aux d'autres types se caractérise par une absorption d'eau élevée supérieur à tous les échantillons considérés, soit environ 45,39 %.



**Figure III.2.** Caractéristiques physiques : a) masse sèche ; b) masse saturée ; c) masse après la poussée hydrostatique ; d) la porosité ; e) l'absorption d'eau ; f) densité apparente.

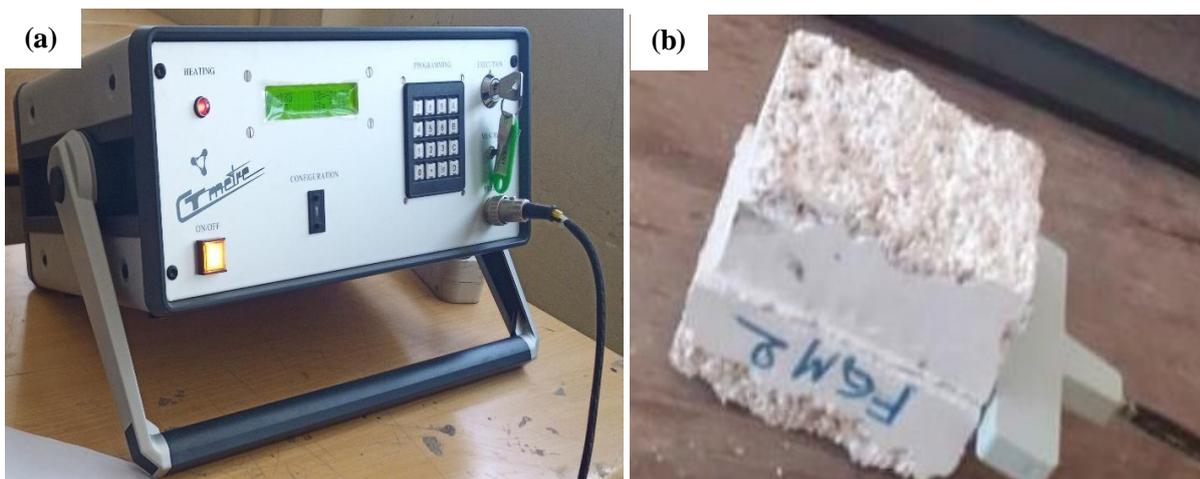
### III.3. Caractérisation thermique

Le CT-mètre a été utilisé pour mesurer la conductivité thermique et la chaleur spécifique ou la chaleur massique qui représente la capacité thermique de chaque matériau lié à sa masse. En effet, une plaque a été positionnée entre deux éprouvettes identiques selon la norme NF EN1946-2 [117] (voir la Figure III.3: b).

La température initiale des éprouvettes est supposée être  $T_i$ . La température a été uniformément augmentée jusqu'à une valeur finale  $T_f$ . Le changement de température est donné par :

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (\text{III.5})$$

Le Tableau III.2 résume les propriétés thermiques mesurées et déterminées pour les échantillons considérés.

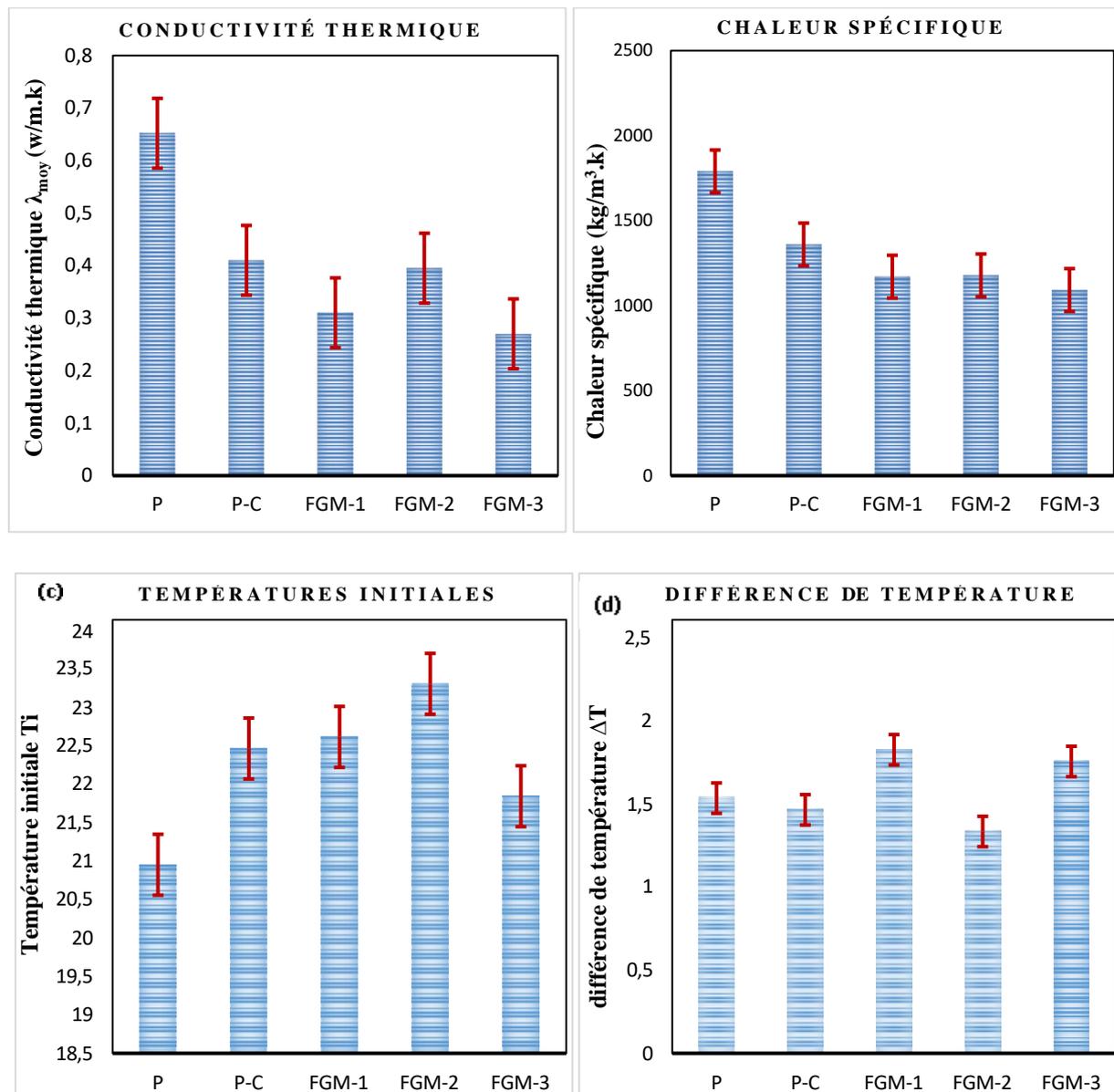


**Figure III.3.** Procédure de mesure des conductivités thermiques.

**Tableau III.2.** Caractéristiques thermiques mesurées.

Désignation des panneaux	Conductivité thermique $\lambda_{\text{moy}}$ (w/m.k)	Chaleur spécifique (kg/m <sup>3</sup> .k)	Température initiale $T_i$ (°C)	différence de température $\Delta T$ (°C)
<b>P</b>	0.652	1790	20.95	1.53
<b>P-C</b>	0.410	1360	22.46	1.46
<b>FGM-1</b>	0.310	1170	22.61	1.82
<b>FGM-2</b>	0.359	1178	23.30	1.33
<b>FGM-3</b>	0.270	1092	21.84	1.75

Pour plus de clarté, les résultats du Tableau III.2 sont représentés sous forme des histogrammes sur la Figure III.4.



**Figure III.4.** Caractéristiques thermiques des différents types d'éprouvettes : a) conductivités thermiques ; b) chaleurs spécifiques ; c) Températures initiales ; d) différence de température.

D'après les résultats de Tableau III.2 et l'analyse des histogrammes (Figure III.4), on constate que la composition de l'éprouvette influe sur ses caractéristiques thermiques. En effet, le type FGM-3 a une meilleure conductivité avec une valeur moyenne de  $\lambda_{moy} = 0,29$  (W/m.K). De plus, la valeur de la chaleur spécifique augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique.

Par conséquent, on peut conclure à partir de ces résultats que la conception avec l'utilisation du liège et du plâtre comme matériaux de base souligne un rôle primordial dans l'isolation thermique et la conception fonctionnelle graduée peut améliorer les caractéristiques thermiques.

Afin de mettre en évidence de manière statistique l'influence de la transition fonctionnelle sur les conductivités thermiques mesurées, une analyse de variance (ANOVA) à un facteur couplée au post-hoc de Newman-Keuls a été réalisée sous le logiciel R, tel qu'utilisé par (Si Salem et al, 2015) [75], (Ait Taleb et al, 2020) [126]. En effet, le test de normalité de Shapiro-Wilk a été d'abord réalisé pour vérifier la distribution de probabilité normale des données de conductivités thermiques. Une valeur de probabilité (p-value) de 0,0863 a été obtenue, ce qui confirme que les données testées suivent une distribution gaussienne ; si l'on tolère un taux d'erreur de mesure de l'ordre de 5 %. Une hypothèse nulle et une hypothèse alternative ont été formulées, selon lesquelles la transition fonctionnelle n'a aucune conséquence importante sur la conductivité thermique des échantillons.

Les résultats statistiques récapitulés dans le tableau 3 révèlent une différence hautement significative entre les dégradations des échantillons considérés, la valeur de probabilité (p-value) de l'ANOVA obtenue étant de  $0,0031 < 5\%$ . En conséquence, on peut conclure que la dégradation a une influence importante sur les conductivités thermiques mesurées.

**Tableau III.3.** Résultats statistiques en fonction de la dégradation des échantillons

	<b>Df</b>	<b>Sum sq</b>	<b>Mean sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>FGM-Transition</b>	2	0.017366	0.008683	17.436	0.003164 ***
<b>Residuals</b>	6	0.002988	0.00498		
<b>Homogeneous groups</b>					
<b>SNK-Parameters</b>	FGM-1		FGM-2		FGM-3
	A		B		B

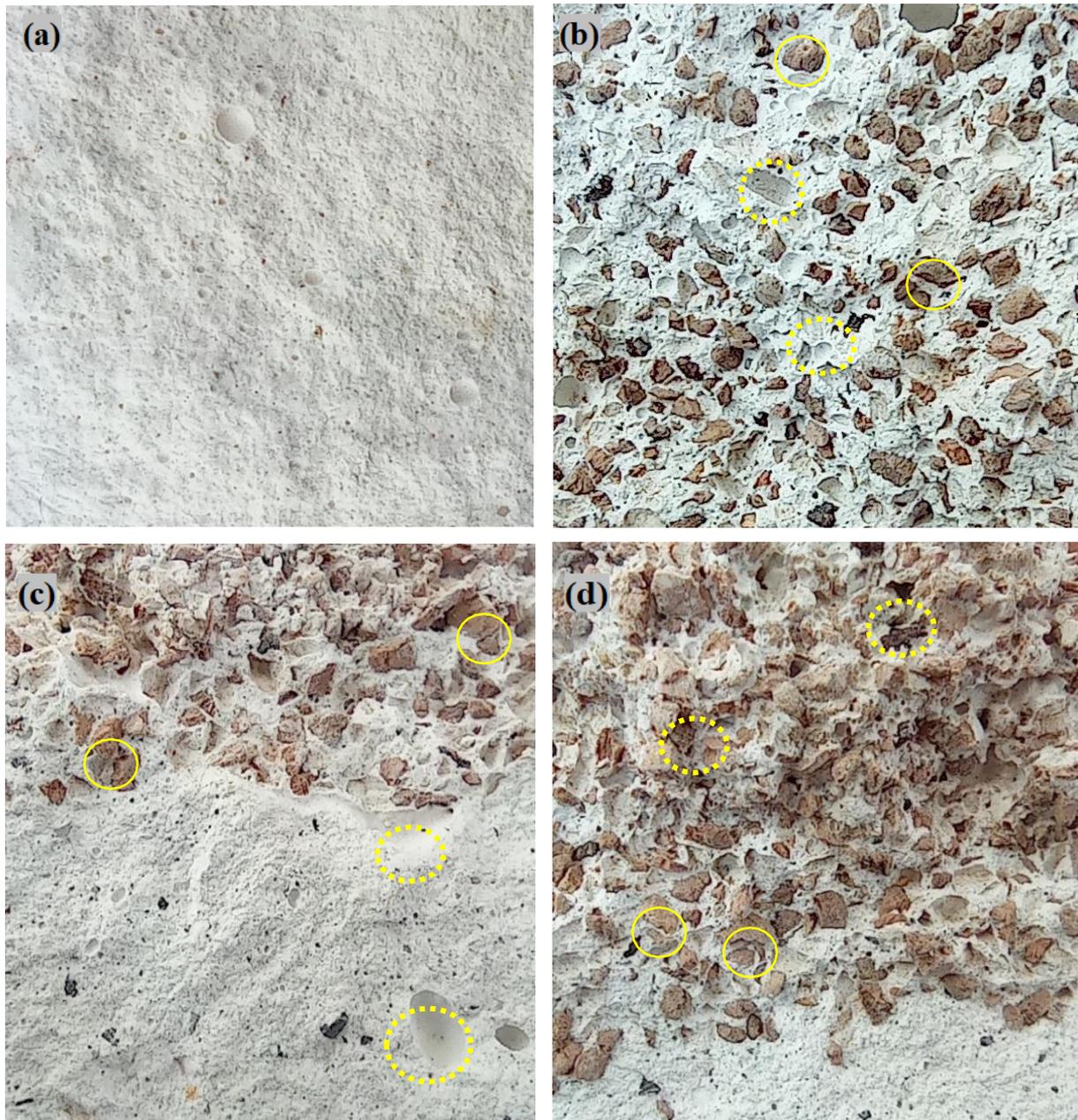
\*\*\* : Effet hautement significatif de la transition FGM sur les conductivités thermiques.

En outre, les paramètres du test de Student-Newman-Keuls (SNK) classent le type de dégradation fonctionnelle en fonction de leurs effets. Il est conclu que le groupe homogène B couvre les échantillons FGM-2 et FGM-3, ce qui confirme que la transition haute et moyenne a été décrite avec des conductivités thermiques comparables. Cependant, la configuration FGM-1 a été caractérisée par un effet différent sur la conductivité thermique, puisqu'elle a été classée dans un groupe homogène différent.

### III.4. Analyse microstructurale

Afin d'étudier complètement la disposition et les zones de transition de la section transversale des âmes de FGM représentées à la Figure III.5, une analyse microstructurale a été effectuée dans cette section. Les échantillons ont été coupés selon le sens de l'épaisseur et séchés sous vide. Les surfaces de l'âme ont été observées avec un microscope électronique à balayage (MEB) à un grossissement de 10 à 100  $\mu\text{m}$ .

#### III.4.1. Images Macroscopiques





**Figure III.5.** Vue macroscopique des sections transversales centrales des panneaux sandwichs : a) P-P ; b) P-PC ; c) FGM-2 ; d) FGM-1 et e) FGM-3

La vue macroscopique des sections transversales centrales des panneaux sandwichs montre une différence en terme de quantité et de taille des pores. De sorte qu'un grand nombre des pores sont concentrés dans la zone supérieure de type FGM-3 dues au grande quantité du liège et la dégradation sur le long de l'épaisseur.

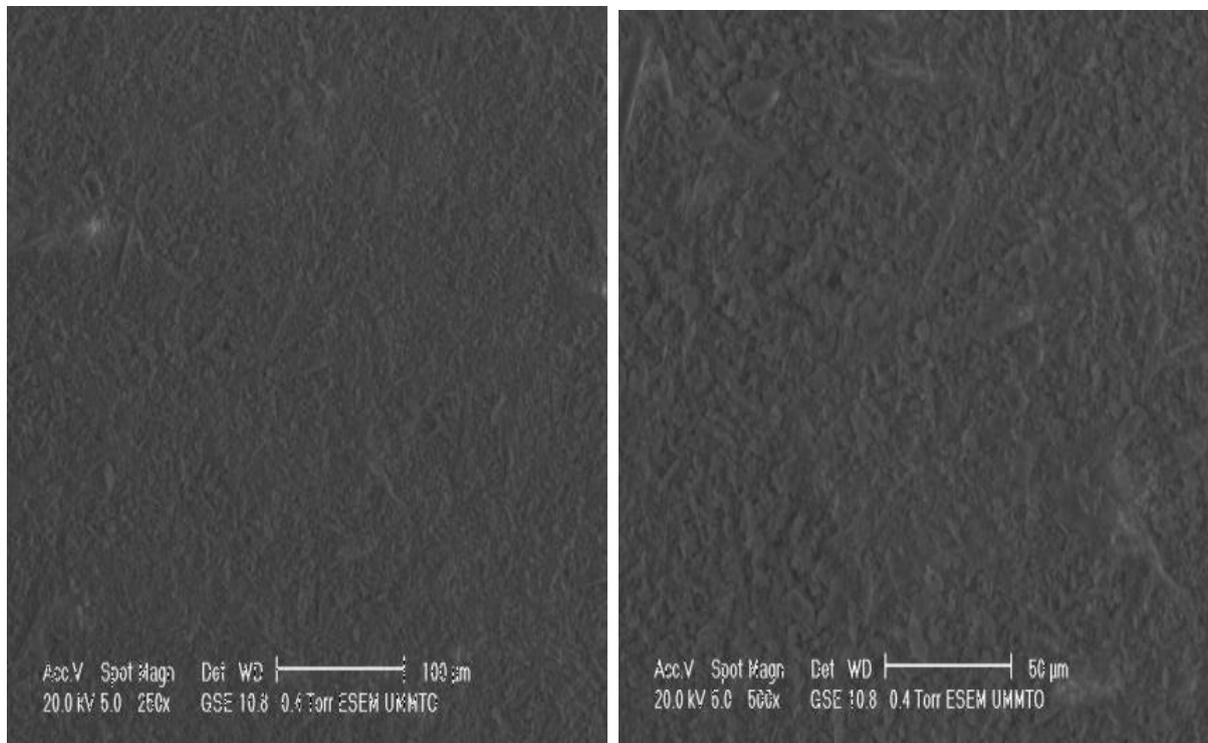
#### III.4.2. Images microscopiques MEB

La structure lenticulaire de chaque échantillon observé par microscopie électronique à balayage est donnée à la Figure III.6-10.

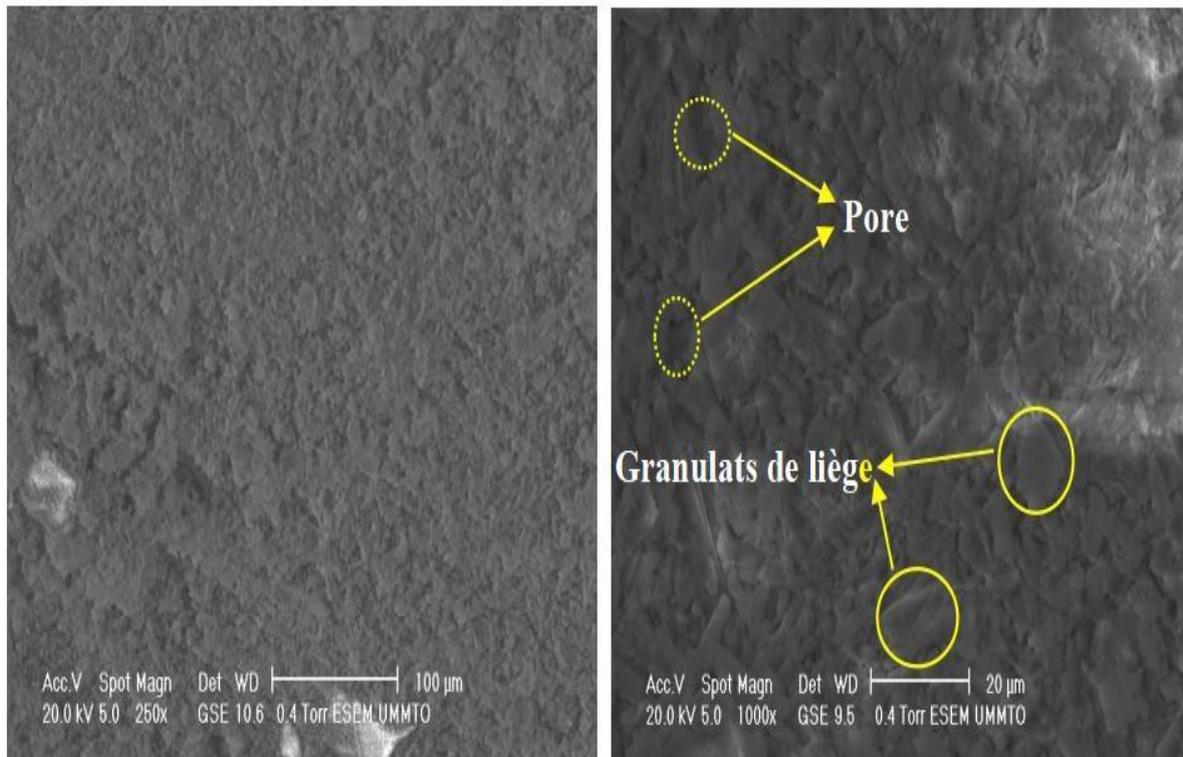
Récemment, de nombreuses études ont été publiées concernant les analyses microscopiques pour étudier les phases du plâtre et du liège et les structures fonctionnellement graduées afin de définir et expliquer les propriétés physiques et chimiques de matériau, améliorant ainsi les performances macroscopiques des structures. L'observation des images de la figure III.6 présente une structure faite d'aiguilles enchevêtrées et accolées sans orientation privilégiée les unes aux autres, c'est ce qui a été affirmé dans la littérature scientifique[150]. La présence des vides est observable sur cette image, témoin de sa grande porosité ce qui permet de favoriser son caractère d'isolant thermique comme l'ont confirmé F. Betene Ebanda [150], de sorte qu'il a montré que les textures sont limitées à des porosités comprises entre 30 et 55%, il a également

prouvé que la microstructure du plâtre dépend fortement des conditions de son hydratation, tel que le taux de gâchage E/P, égal au rapport massique entre eau et semi hydrate, est un paramètre important qui détermine la porosité du matériau, et le volume d'air entré dans l'échantillon en cours d'hydratation est un autre paramètre important qui détermine la microstructure du matériau. Coquard [83] a présenté des image MEB de la microstructure de plâtre dans laquelle il a assuré que le plâtre se présente sous la forme d'un matériau poreux à texture désordonnée, tel que sa microstructure est formée d'un assemblage de cristaux de gypse, aléatoirement enchevêtrés. Il doit sa bonne cohésion à cet enchevêtrement et aux interactions inter cristallines.

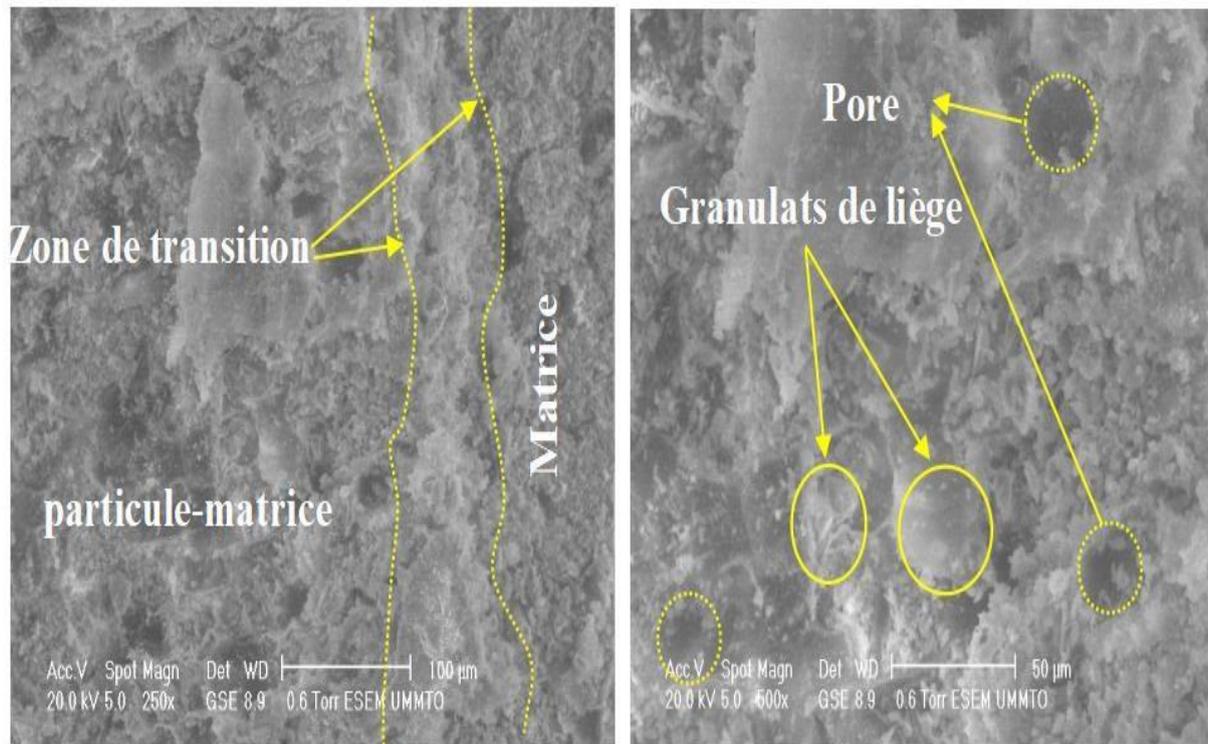
D'autre part, la Figure III.7 montre une adhérence satisfaisante entre la matrice du plâtre et les granulats de liège. Cela est dû à la forme cellulaire des granulats de liège ainsi qu'à leur diamètre de 1,25 mm, ce qui a permis de réduire les cavités et les pores. Hernández-Olivares et al. [113] ont mis au point des composites liège- plâtre pour des applications de construction, Ils présentent de microstructure qui assure l'adhérence et les propriétés physiques et mécaniques de ce composite. Ils ont constaté que cette consistance donne une conductivité thermique correspondant à une densité élevée des composites :  $0,1255 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  pour  $578 \text{ (kg m}^{-3})$ ,  $0,1869 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  pour  $600 \text{ (kg m}^{-3})$  et  $0,1995 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  pour  $864 \text{ (kg m}^{-3})$ .



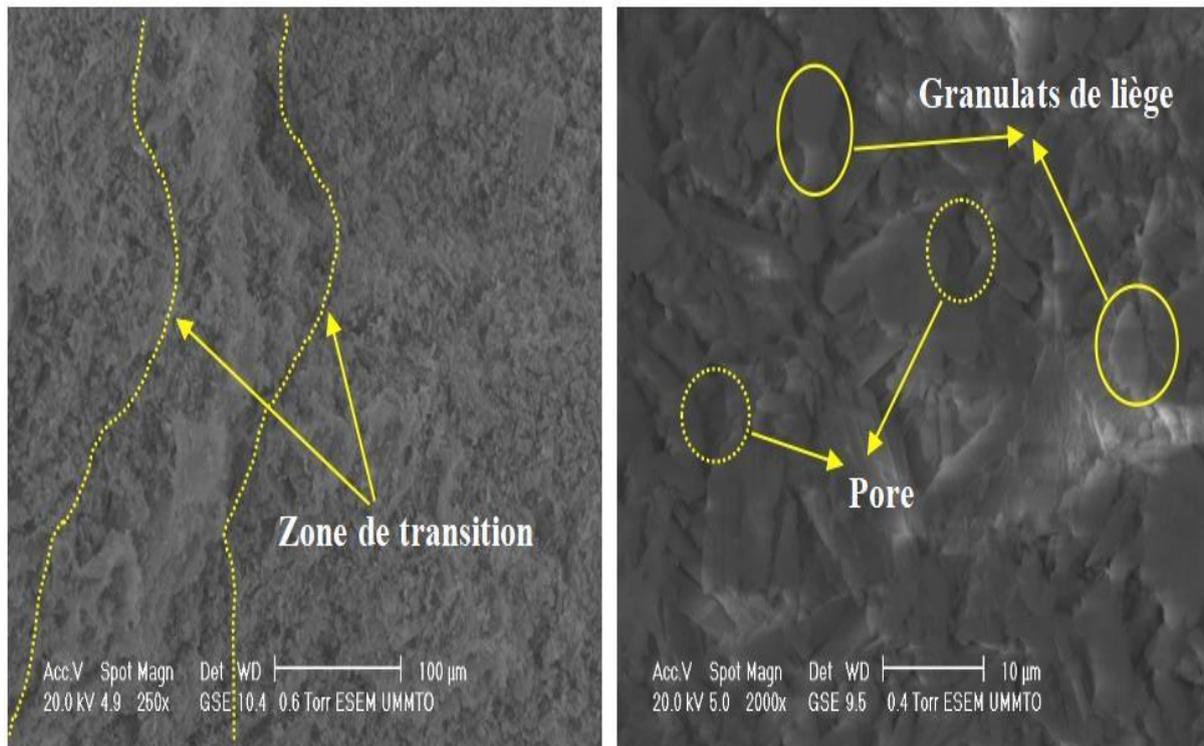
**Figure III.6.** Images MEB de la matrice de plâtre : (a) Zoom de 100  $\mu\text{m}$ , b) Zoom de 50  $\mu\text{m}$



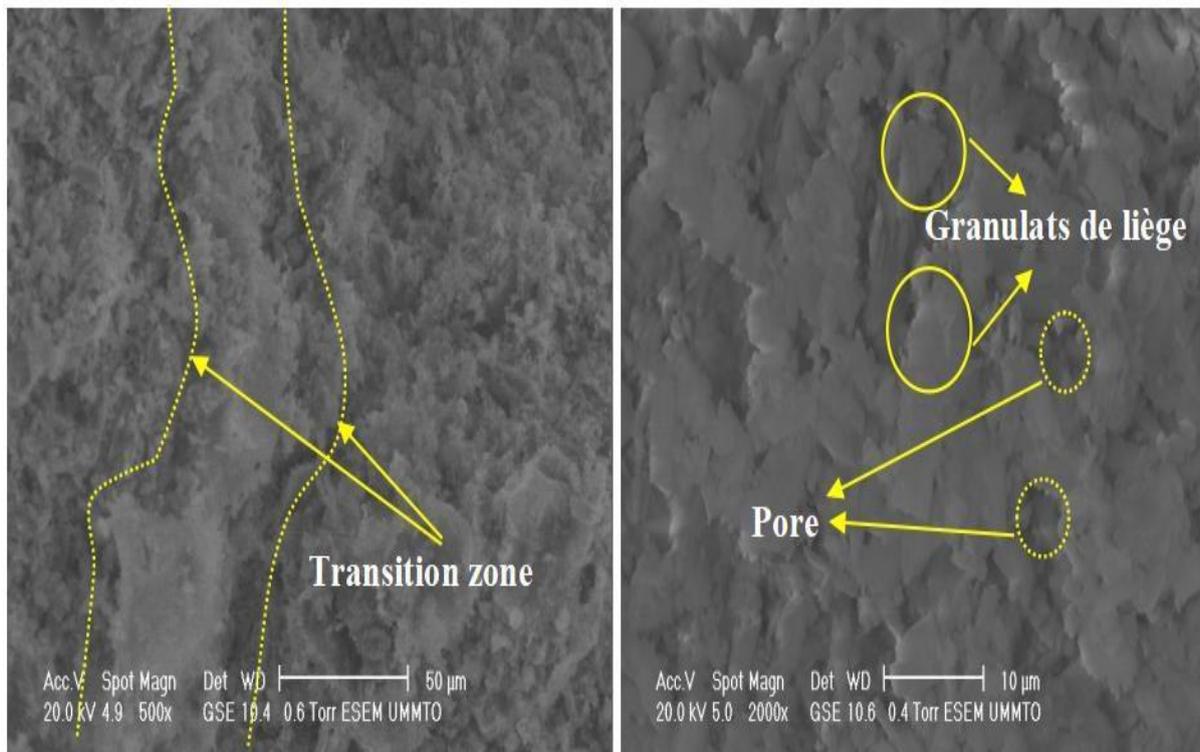
**Figure III.7.** Images MEB de type P-C : (a) Zoom de 100 µm, b) Zoom de 20 µm



**Figure III.8.** Images MEB de type FGM-1 : (a) Zoom de 100 µm, b) Zoom de 50 µm



**Figure III.9.** Images MEB de type FGM-2 : (a) Zoom de 100 μm, b) Zoom de 10 μm



**Figure III.10.** Images MEB de type FGM-3 : (a) Zoom de 100 μm, b) Zoom de 10 μm

D'après les observations microstructurales, on voit clairement que les images des noyaux FGM-1, FGM-2 et FGM-3 sont décrites avec une transition hétérogène et progressive due à la dégradation fonctionnelle de la fraction volumique des matériaux constitutifs dans laquelle les propriétés intrinsèques varient progressivement et continuellement d'une couche à l'autre, comme indiqué dans des études expérimentales antérieures [127-129]. En comparaison avec les travaux de Ananta Bhaskararao et Ranga Janardhana [128] qui ont fabriqués des matériaux à quatre couches de qualité fonctionnelle (FGM) avec du nickel (Ni) et l'alumine ( $Al_2O_3$ ) comme matériaux principaux, leurs résultats sont la preuve évidente d'une microstructure variable avec différents pourcentages de matières premières et apparaissent avec des transitions non uniformes, indiquent que les densités diminuent régulièrement avec l'augmentation de la composition de l'alumine et la dureté augmente avec la teneur en alumine. De même, Farahmand et al [129] qui ont réalisées des structures en FGM sur la base d'une matrice céramique, dans laquelle l'aluminium a été utilisé comme deuxième phase de composite, ont montré que les propriétés inhérentes évoluant progressivement d'une couche à l'autre.

Trois phases principales en fonction de l'épaisseur de l'âme de FGM ont été aperçues : une phase du plâtre, un plâtre avec inclusion du liège comme phase de transition et une phase du liège. Une phase de faible concentration représente les zones de la matrice d'agrégats, tandis que la zone intermédiaire ou de transition a été décrite avec une phase d'interface, comme schématisé à la Figure III.8-10. Cependant, les images microscopiques de type P-C données à la Figure III.7 montrent une disposition aléatoire des granulats de liège dans la matrice du plâtre représentée à la Figure III.6.

La dégradation microstructurale de la composition continue de l'âme FGM-3 donne une meilleure dégradation en raison de la taille de pores, comme illustré dans la légende des figures. Cette conclusion est en bonne conformité avec la caractérisation physique et thermique obtenue, dans laquelle des valeurs de porosité plus élevées et une faible conductivité thermique respectivement ont été obtenues pour le type FGM-3.

Même si les âmes en FGM ont été composés des mêmes matières premières, les dispositions microstructurales dépendaient néanmoins du mode de transition fonctionnelle, comme l'ont confirmé Chartier et Huttepain [130], qui ont démontré que dans certains cas, il est possible d'avoir un FGM constitué d'un même matériau mais des propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent.

### III.5. Conclusion

Les résultats des travaux de ce chapitre ont montré que les structures conçues en FGM à base de produits naturels à des faibles coûts de production, et une empreinte écologique favorable ont manifesté des performances physiques et thermiques très satisfaisantes. L'objectif principal est de mettre en évidence le comportement physique et thermique d'un nouveau matériau plâtre/liège fonctionnellement gradué afin d'améliorer la réponse de ces structures pouvant être utilisées dans la construction. Les résultats de ce chapitre nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La nouvelle conception proposée fournit une isolation thermique élevée, ce qui confirme le rôle des granulats du liège qui représentent une très faible conductivité thermique, car tous les éprouvettes graduées ont achevé des caractéristiques thermiques améliorées.
- Le poids propre des différents éprouvettes a montré l'efficacité de cette nouvelle conception en termes de légèreté et de facilité de mise en forme.
- Les résultats d'analyse de la caractérisation physique a montré une amélioration en termes de densité apparente et de porosité. Leur faible densité et leurs propriétés d'isolation thermique conduisent à valoriser l'usage de ces structures pour des applications intérieures dans la construction.
- Les résultats de MEB de l'âme des panneaux sandwichs montrent que la dégradation fonctionnelle a un effet considérable en termes d'arrangement micro-structurelle. Pour cette raison, ce type particulier de FGM a été pris en compte pour réaliser des études paramétriques et comparatives dans la suite des essais et les modélisations analytiques en flexion.

Par conséquent, sur le chapitre suivant on s'intéresse à étudier le comportement mécanique des âmes et des panneaux sandwichs en FGM pour bien comprendre la nouvelle technologie proposée et identifier leurs paramètres mécaniques intrinsèques.

## **Chapitre IV**

### **Essais mécaniques sur les panneaux**

## IV.1. Introduction

Afin de comprendre le comportement global des structures sandwiches fonctionnellement graduées, une étude de caractérisation mécanique est effectuée sur les panneaux sandwichs en FGM. La caractérisation mécanique est réalisée tout d'abord sur l'âme qui comporte les essais de compression et de flexion en 3 point. Ensuite, les essais de flambement, compression et flexion en 3 points pour les panneaux (âme et semelles combinées). Tous les essais mécaniques sont réalisés au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Tizi Ouzou.

Ce chapitre commencera par la présentation de la machine d'essai ainsi que la désignation des variantes d'étude, puis les courbes de capacité Force-Déplacement et les modes de rupture ont été fournis et discutés pour mettre en évidence la configuration fonctionnelle par rapport à la configuration conventionnelle. Enfin, Les résultats obtenus sur les panneaux sandwichs soumis à la compression axiale, flambement et flexion sont explicitement soulignés et confrontés aux progrès récents de la littérature scientifique.

## IV.2. Machine d'essai

Après sept jours de conservation des éprouvettes dans les conditions de laboratoire, les tests sont réalisés à l'aide d'une machine universelle de marque IBERTEST (Figure IV.1), équipée de contrôle et acquisition automatique de donnée via le logiciel Win-test et d'une cellule de force maximale de 200 KN. Elle est commandée par microordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (Force/déplacement et Force/temps) avec une bonne précision et un ajustement statistique sur chaque série d'essai.

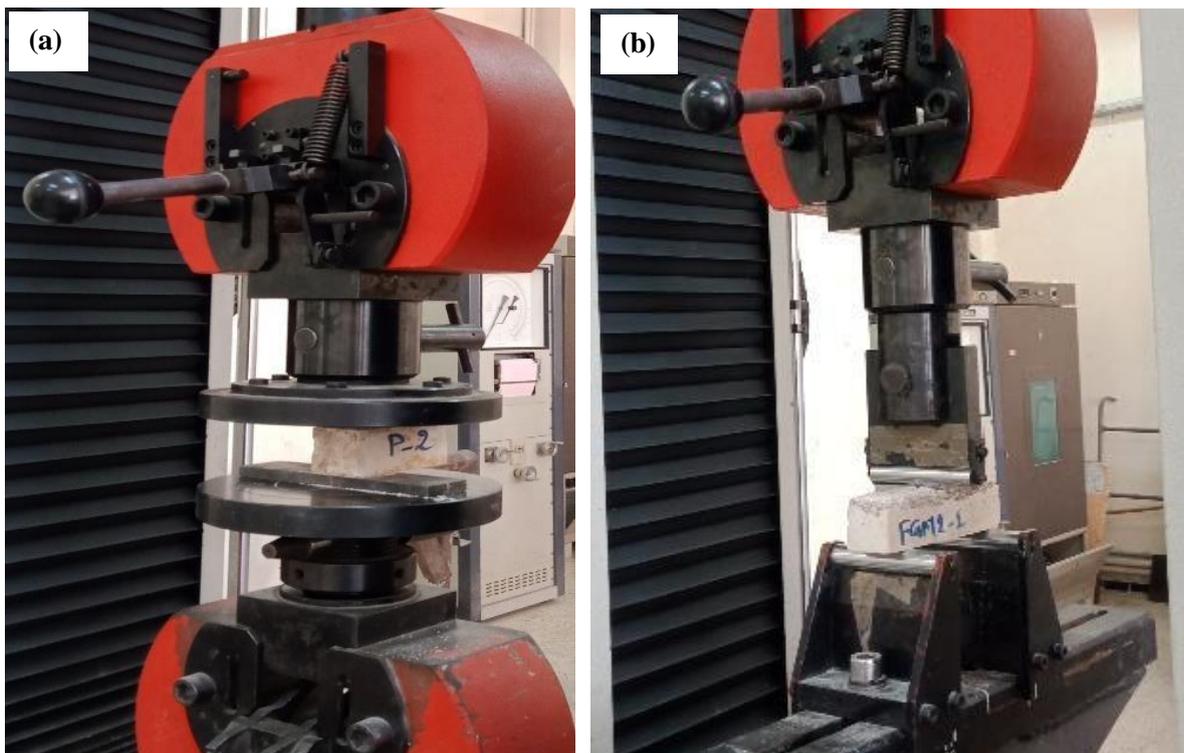


**Figures IV.1.** Machine d'essai IBERTEST

### IV.3. Essais mécaniques sur l'âme

Les essais de compression et de flexion 3-points sont effectués sur la machine IBERTEST suivant la norme NF T 54-604 [118] et NF T 54-606 [119] et avec des vitesses de chargement respectives de 0,5 kN/s et 0,1 kN/s. En premier lieu, les essais de traction par flexion sont réalisés sur des éprouvettes de dimension ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ). Les spécimens issus des essais de flexion sont ensuite découpés et testés sous compression axiale avec une dimension de ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ), comme illustré sur la (Figure IV.2). Pour la flexion, le déplacement vertical a été automatiquement mesuré au niveau de la mi-portée d'éprouvette. Pour la compression, le déplacement axial dans la direction de la charge appliquée est enregistré.

L'ensemble des essais sont réalisés à température ambiante. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer les valeurs moyennes des forces pour chaque série d'éprouvettes et de tracer les courbes Force-déplacement.



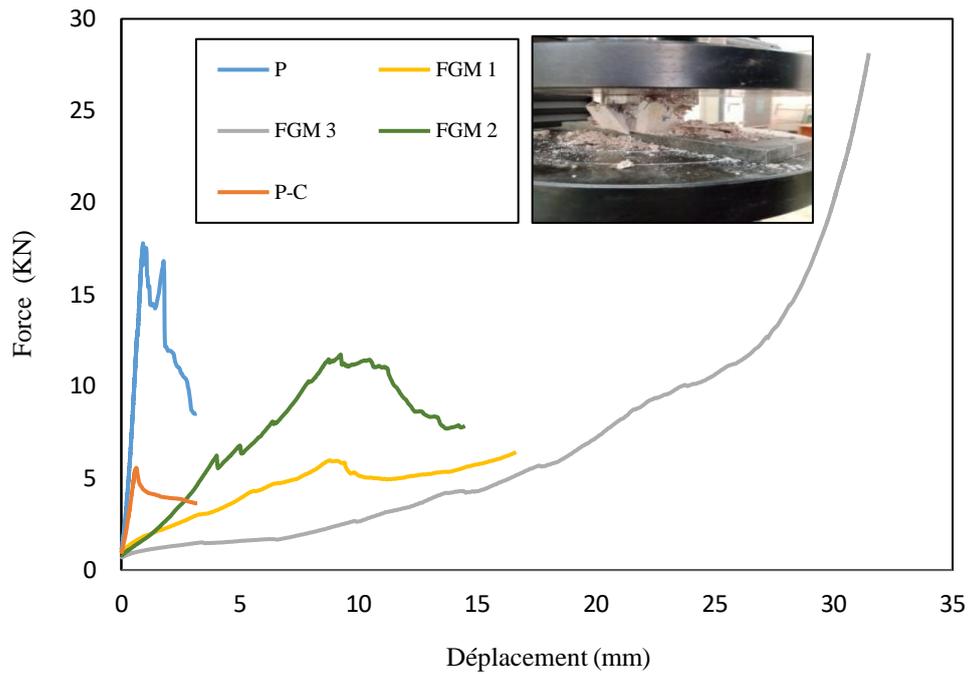
**Figures IV.2.** Essais mécaniques : a) la compression ; b) la flexion 3-points.

#### IV.3.1. Présentation et interprétation des résultats des essais de compression

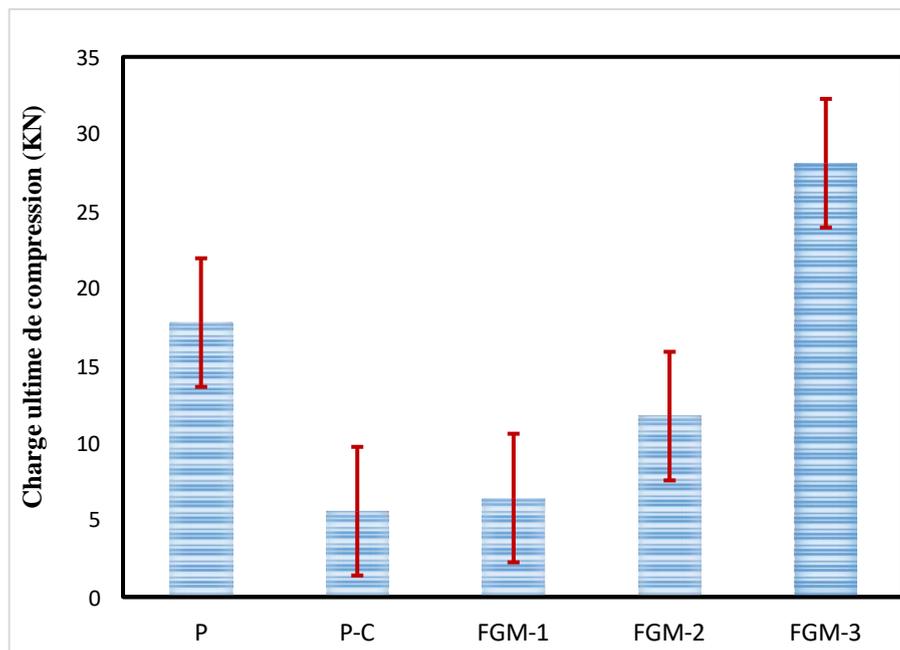
Les résultats obtenus lors des essais de compression nous ont permis de déterminer les valeurs moyennes des forces de chaque série d'échantillons déclarées dans le Tableau IV.1 et de tracer les courbes force-déplacement illustrées dans les Figure IV.3 et Figure IV.5.

**Tableau IV.1.** Résultats des essais de compression sur toutes les éprouvettes testées

Désignation des éprouvettes	Charge de compression ultime (KN)	Contrainte de compression moyenne (Mpa)
P-1	16.6608	<b>11.09</b>
P-2	18.3683	
P-3	18.3161	
<b>P- moyenne</b>	<b>17.7817</b>	
<b>Écart type</b>	<b>±0.971</b>	
P-C-1	5.98241	<b>3.48</b>
P-C-2	6.52132	
P-C-3	4.18977	
<b>P-C- moyenne</b>	<b>5.56450</b>	
<b>Écart type</b>	<b>±1.220</b>	
FGM-1-1	6.19915	<b>4.01</b>
FGM-1-2	6.52133	
FGM-1-3	6.51573	
<b>FGM-1- moyenne</b>	<b>6.41207</b>	
<b>Écart type</b>	<b>±0.184</b>	
FGM-2-1	12.8494	<b>7.33</b>
FGM-2-2	11.8253	
FGM-2-3	10.4922	
<b>FGM-2- moyenne</b>	<b>11.7223</b>	
<b>Écart type</b>	<b>±1.181</b>	
FGM-3-1	28.9047	<b>19.45</b>
FGM-3-2	27.4209	
FGM-3-3	28.0315	
<b>FGM-3- moyenne</b>	<b>28.1191</b>	
<b>Écart type</b>	<b>±0.745</b>	

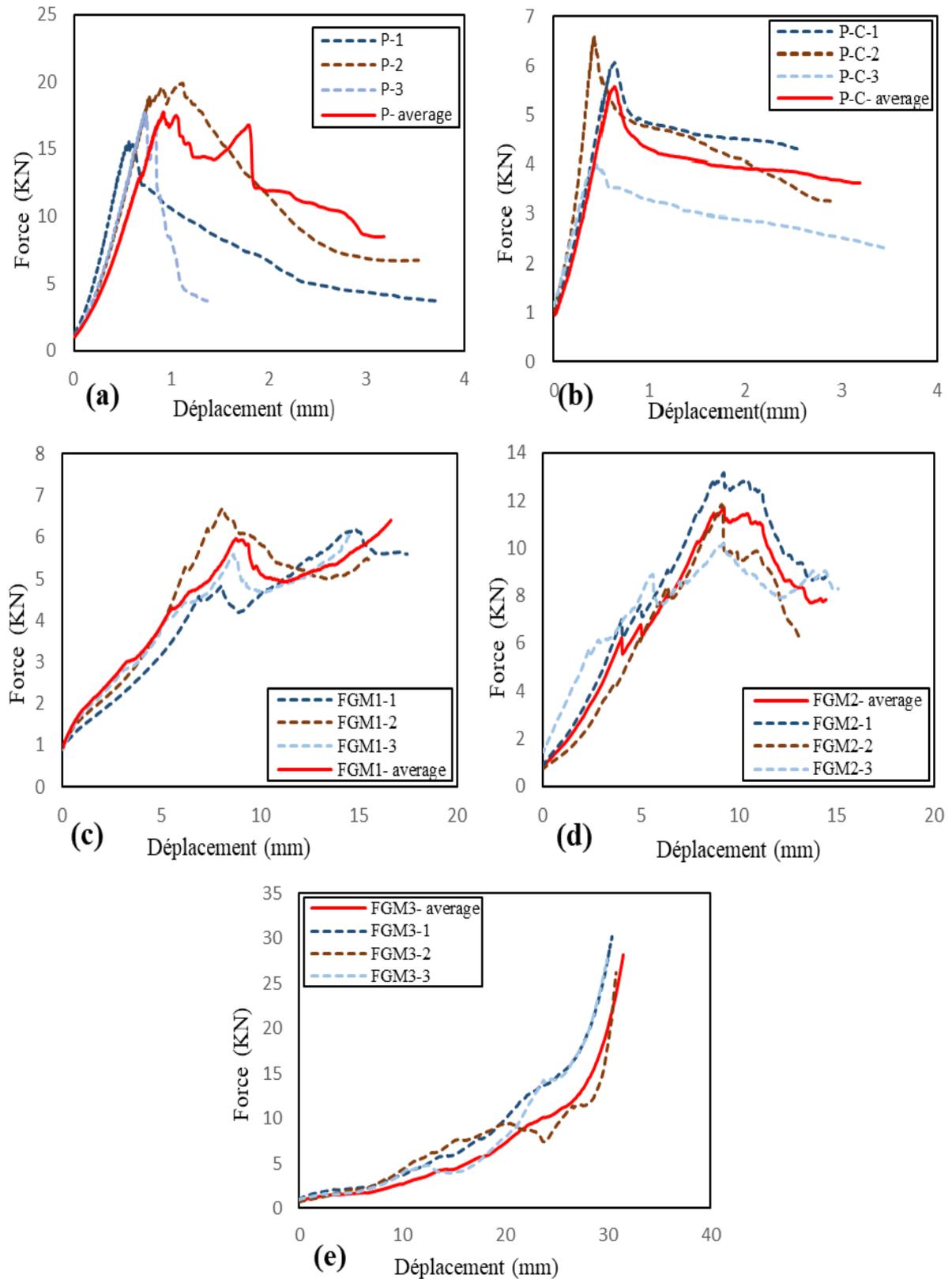


**Figures IV.3.** Confrontation des courbes : Charges moyennes vs. Déplacement sous compression.



**Figures IV.4.** Charges moyenne de compression des différents types d'éprouvettes avec barres d'erreur.

La comparaison des courbes de force-déplacement montrent que le type FGM-3 présente un meilleur résultat à la compression, tel qu'il atteint une charge ultime de 28120 N avec une résistance à la compression correspondante de 19,45 Mpa.



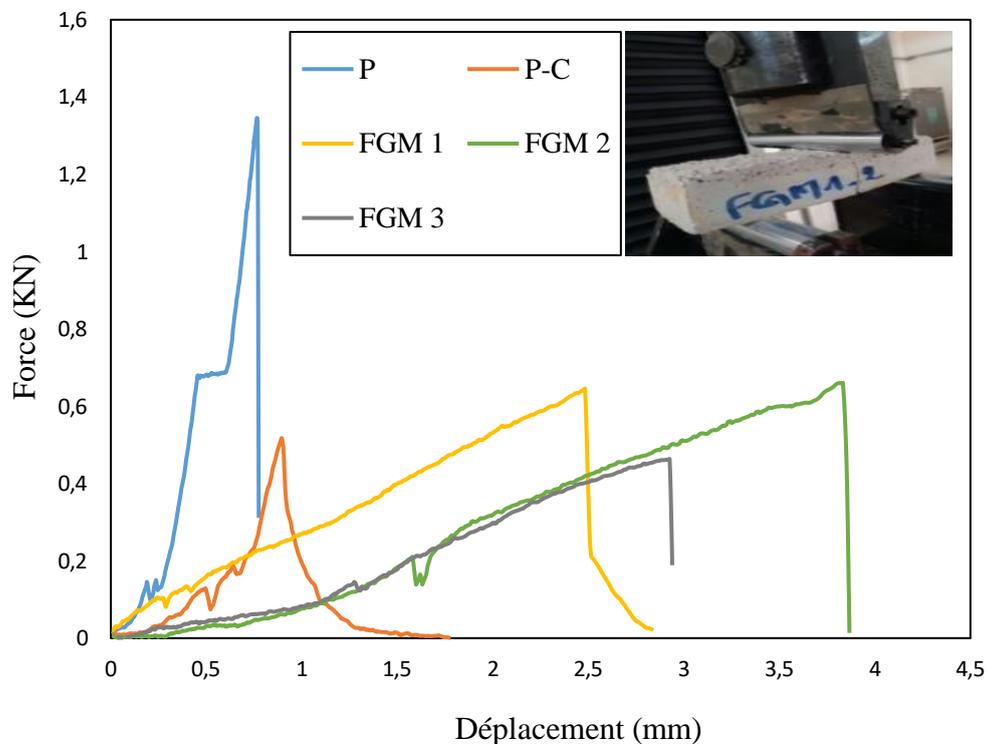
**Figures IV.5.** Courbes Force – déplacement de toutes les éprouvettes testées sous compression axiale : a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3.

Ces résultats sont pratiquement justifiés par la concentration de contrainte dans la phase du liège de l'échantillon, qui présente une haute résistance à la compression par rapport aux autres phases et ce qui confirme la bonne résistance du liège à la compression. Cependant, les éprouvettes en plâtre de type (P) sont caractérisées par une rigidité axiale élevée et un mécanisme de rupture par compression fragile. D'après l'analyse de ces résultats, on constate que la composition et la quantité des matériaux dans l'éprouvette influent sur sa résistance.

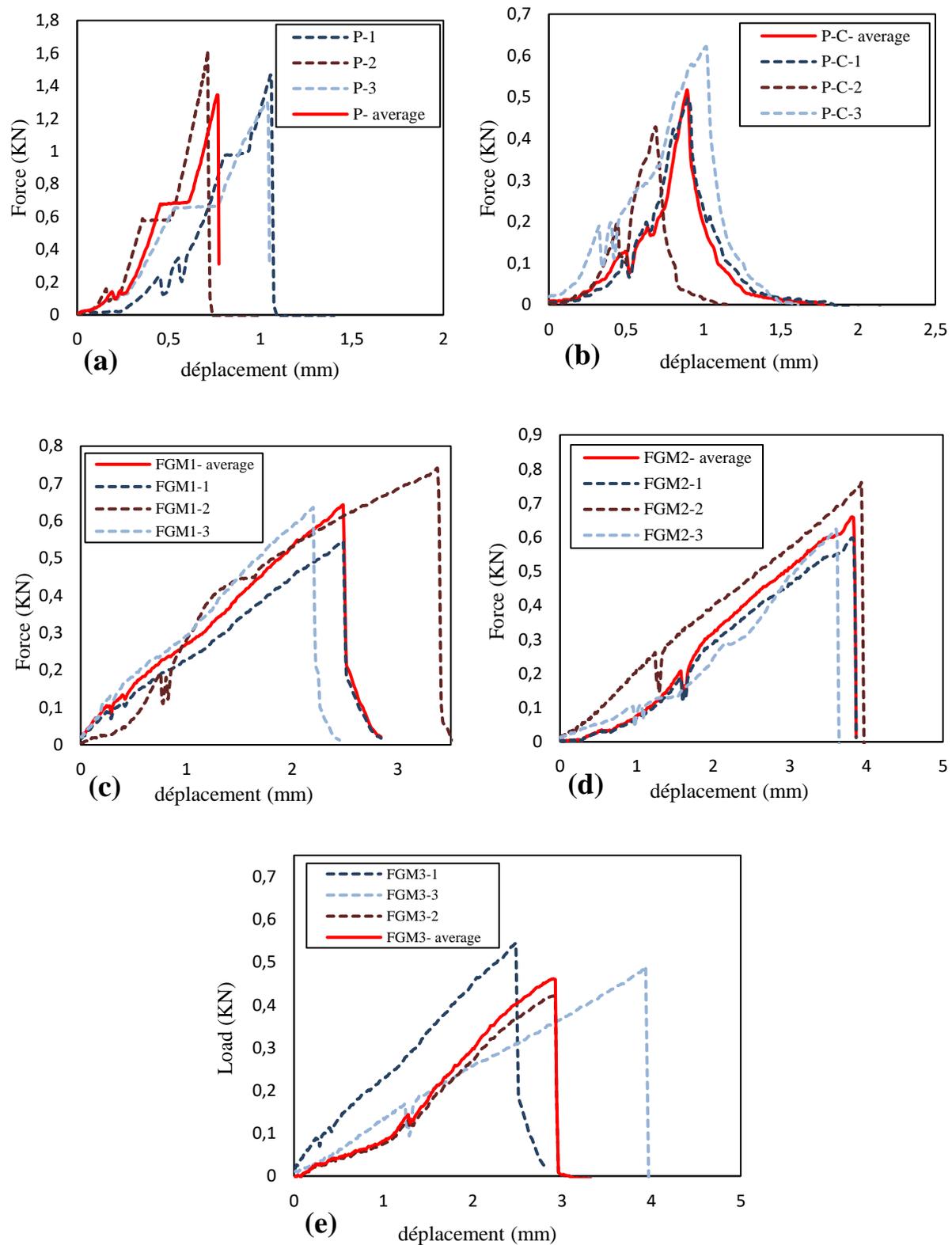
### IV.3.2. Présentation et interprétation des résultats des essais de traction par flexion

L'analyse des courbes Force-déplacement et les histogrammes des résistances en traction obtenus lors des essais de flexion sont rapportés. Les Figures IV.6,7 et 8 montre que le mode de rupture des éprouvettes testées sous un effort de flexion est fragile pour toutes les variantes considérées.

La meilleure résistance des éprouvettes en flexion est donnée par la variante (P) avec une force maximale d'environ 1340 N, qui correspond à une résistance à la traction de 3,78 MPa. Ceci est expliqué par la bonne résistance à la traction du plâtre déterminée lors de essais de caractérisation menés dans le chapitre précédent.



**Figures IV.6.** Confrontation des courbes : Charges moyennes vs. Déplacement des éprouvettes testées sous flexion 3-points.



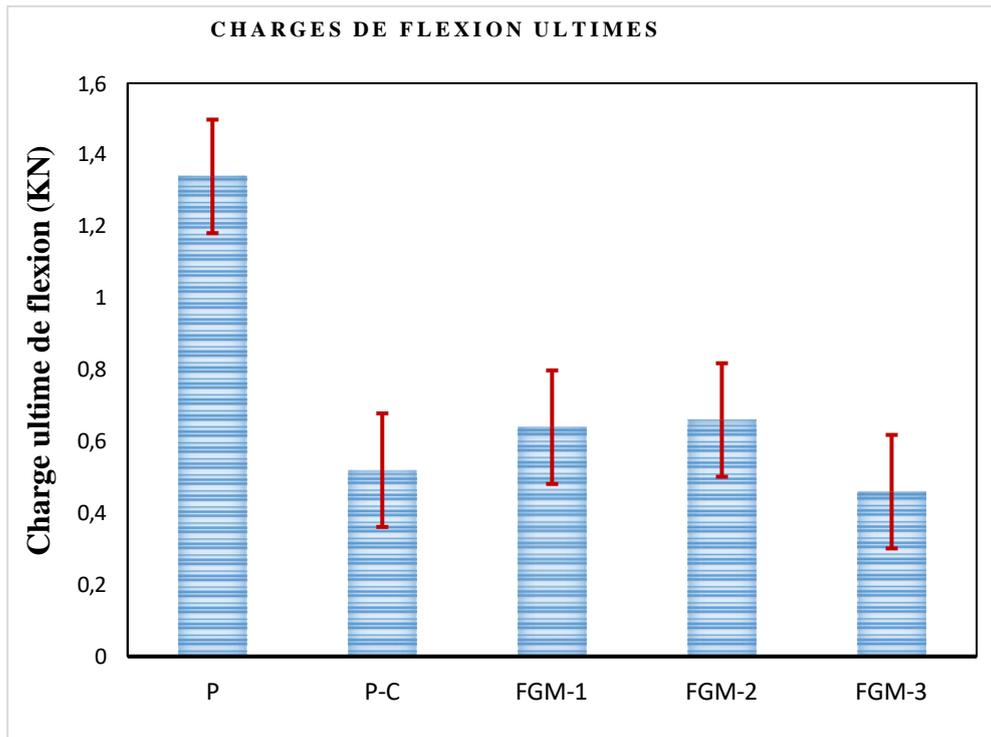
**Figures IV.7.** Courbes Force – déplacement de toutes les éprouvettes testées sous flexion :  
a) P ; b) P-C ; c) FGM-1 ; d) FGM-2 ; e) FGM-3.

En effet, les valeurs de l'écart-type présentées (Tableau IV. 2) indiquent une dispersion expérimentale normale des résultats obtenus.

En raison des paramètres de disposition des phases, l'échantillon FGM-2 donne un meilleur comportement sous flexion 3-points que les autres échantillons testés. En effet, les contraintes de flexion sont centrées dans un plus grande proportion dans la phase de plâtre de l'échantillon, qui présente haute résistance à la traction par rapport aux autres phases.

**Tableau IV.2.** Résultats des essais de flexion 3-points de toutes les éprouvettes testées

Désignation des éprouvettes	Charge de flexion ultime (KN)	Contrainte de flexion moyenne (Mpa)
<b>P-1</b>	1.46614	<b>3.78</b>
<b>P-2</b>	1.25023	
<b>P-3</b>	1.30426	
<b>P- moyenne</b>	<b>1.34021</b>	
<b>Écart type</b>	$\pm 0.112$	
<b>P-C-1</b>	0.50234	<b>1.45</b>
<b>P-C-2</b>	0.42851	
<b>P-C-3</b>	0.62932	
<b>P-C- moyenne</b>	<b>0.52005</b>	
<b>Écart type</b>	$\pm 0.101$	
<b>FGM-1-1</b>	0.54398	<b>1.90</b>
<b>FGM-1-2</b>	0.74060	
<b>FGM-1-3</b>	0.63581	
<b>FGM-1- moyenne</b>	<b>0.64013</b>	
<b>Écart type</b>	$\pm 0.098$	
<b>FGM-2-1</b>	0.62346	<b>1.85</b>
<b>FGM-2-2</b>	0.76163	
<b>FGM-2-3</b>	0.59515	
<b>FGM-2- moyenne</b>	<b>0.66008</b>	
<b>Écart type</b>	$\pm 0.089$	
<b>FGM-3-1</b>	0.50978	<b>1.30</b>
<b>FGM-3-2</b>	0.41611	
<b>FGM-3-3</b>	0.45477	
<b>FGM-3- moyenne</b>	<b>0.46022</b>	
<b>Écart type</b>	$\pm 0.047$	



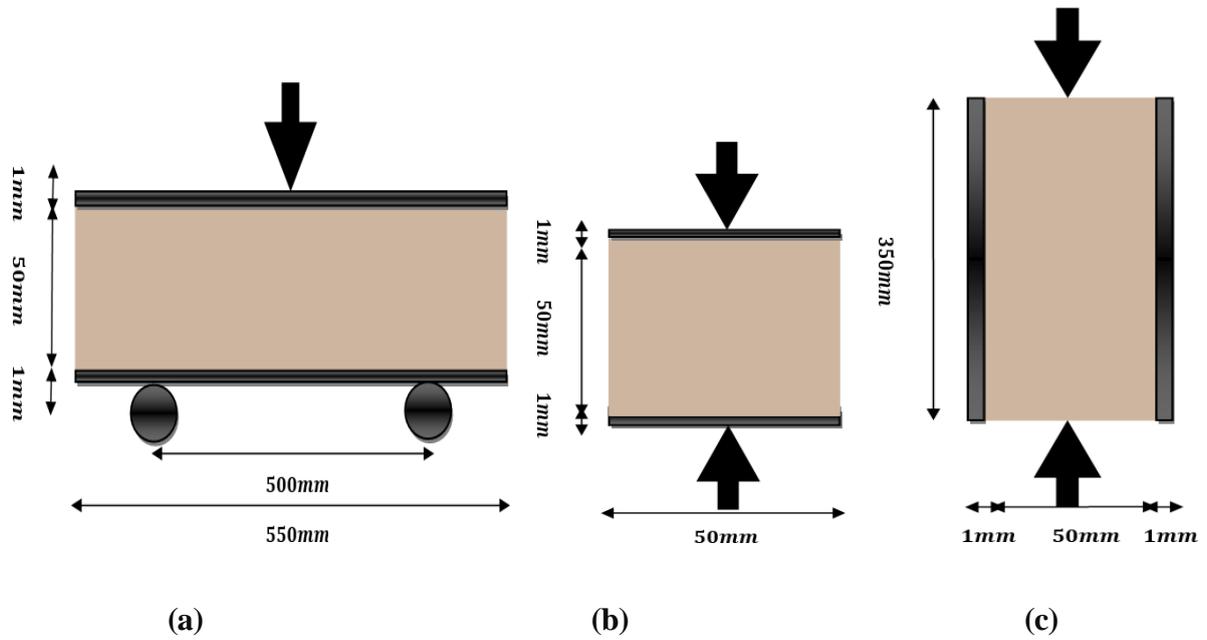
Figures IV.8. Histogrammes des charges ultimes de flexion

#### IV.4. Chargement et acquisition des panneaux

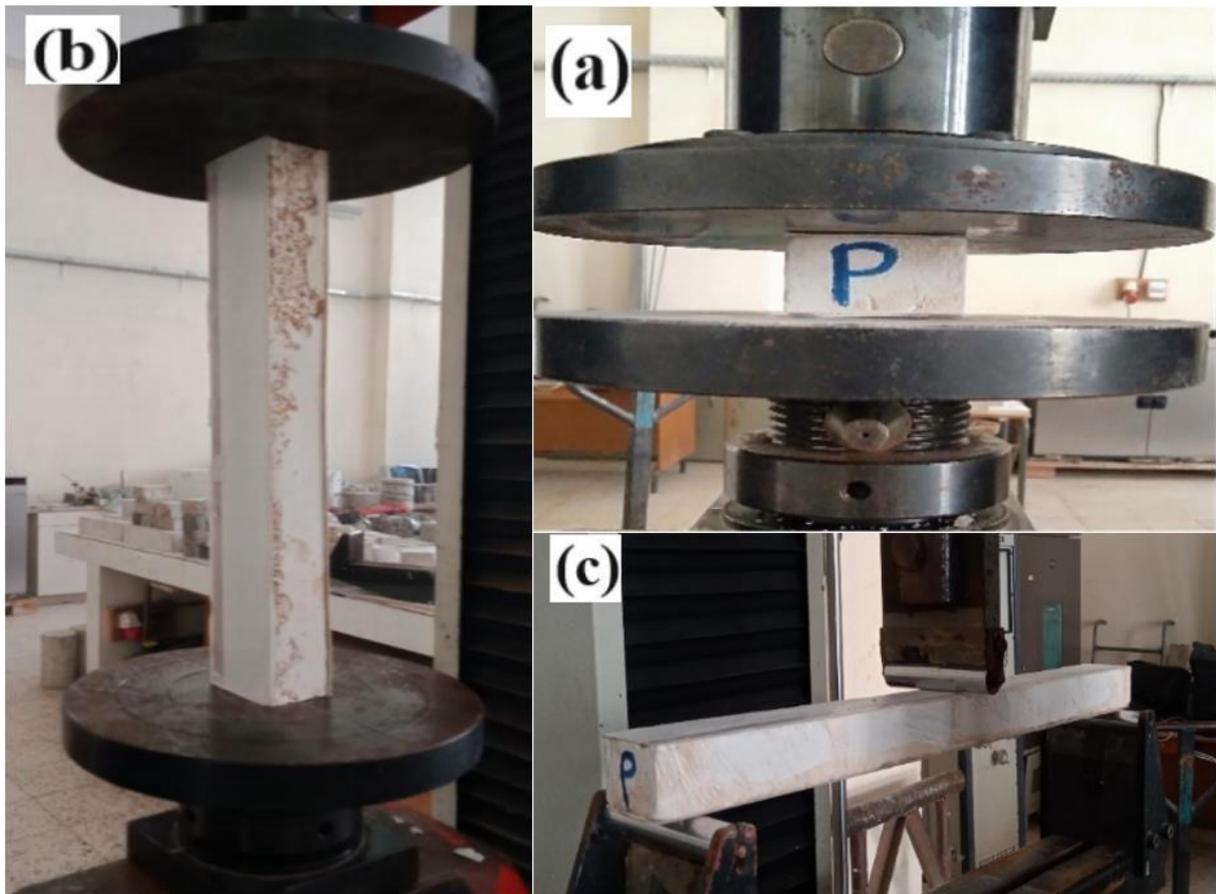
Tous les tests mécaniques ont été effectués sur une machine IBERTEST ELE. Les diagrammes force-déplacement ainsi que la résistance avec une bonne précision a été enregistrée. La machine est équipée d'une cellule de force maximale de 200 KN, Elle effectue les essais de flambement, compression et de flexion. De plus, les tests ont été effectués à température ambiante avec une humidité standard.

Les mesures de charge en fonction du déplacement ont été automatiquement enregistrées au niveau de la surface d'application de la charge avec le logiciel Win-Test intégré dans la machine utilisée. Le déplacement à mi- travée de chaque panneau a été enregistrée dans la zone de charge appliquée pour la flexion, tandis que le déplacement axial a été mesuré dans la direction de la charge appliquée à l'extrémité de la surface pour la compression et le flambement.

La Figue.IV.9 représente un schéma des différents essais mécaniques qui ont été effectués sur les panneaux sandwichs. Cependant, la Figure. IV.10 montre la configuration et la procédure typique de chargement sous la machine d'essai.



**Figure.IV.9.** Schéma des différents essais mécaniques effectués sur les panneaux sandwichs :  
 a) Flexion trois points ; b) Compression axiale ; c) Flambement



**Figure.IV.10.** Configuration du chargement : a) compression dans le sens perpendiculaire ; b) Flambement ; c) Flexion trois points.

Selon la norme NF T54-606 [119], le comportement de flexion a été étudié sur des panneaux sandwichs de dimension ( $550 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ ). La charge de flexion est appliquée au milieu de la portée des panneaux avec une distance de  $500 \text{ mm}$  entre les supports. Les essais de compression dans la direction perpendiculaire a été effectuée sur des panneaux de dimension ( $50 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ ) conformément à la norme NFT54-602 [131]. La direction perpendiculaire signifie dans ce cas, parallèle à la peau en PVC ou à la longueur des panneaux. Afin de tenir compte du flambage, des essais de compression dans le sens longitudinal des panneaux selon la norme NF T54-604 [118] ont été effectués sur des sandwichs de dimension ( $350 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ ). A rappeler que l'épaisseur des semelles en PVC sont de l'ordre de  $1 \text{ mm}$ .

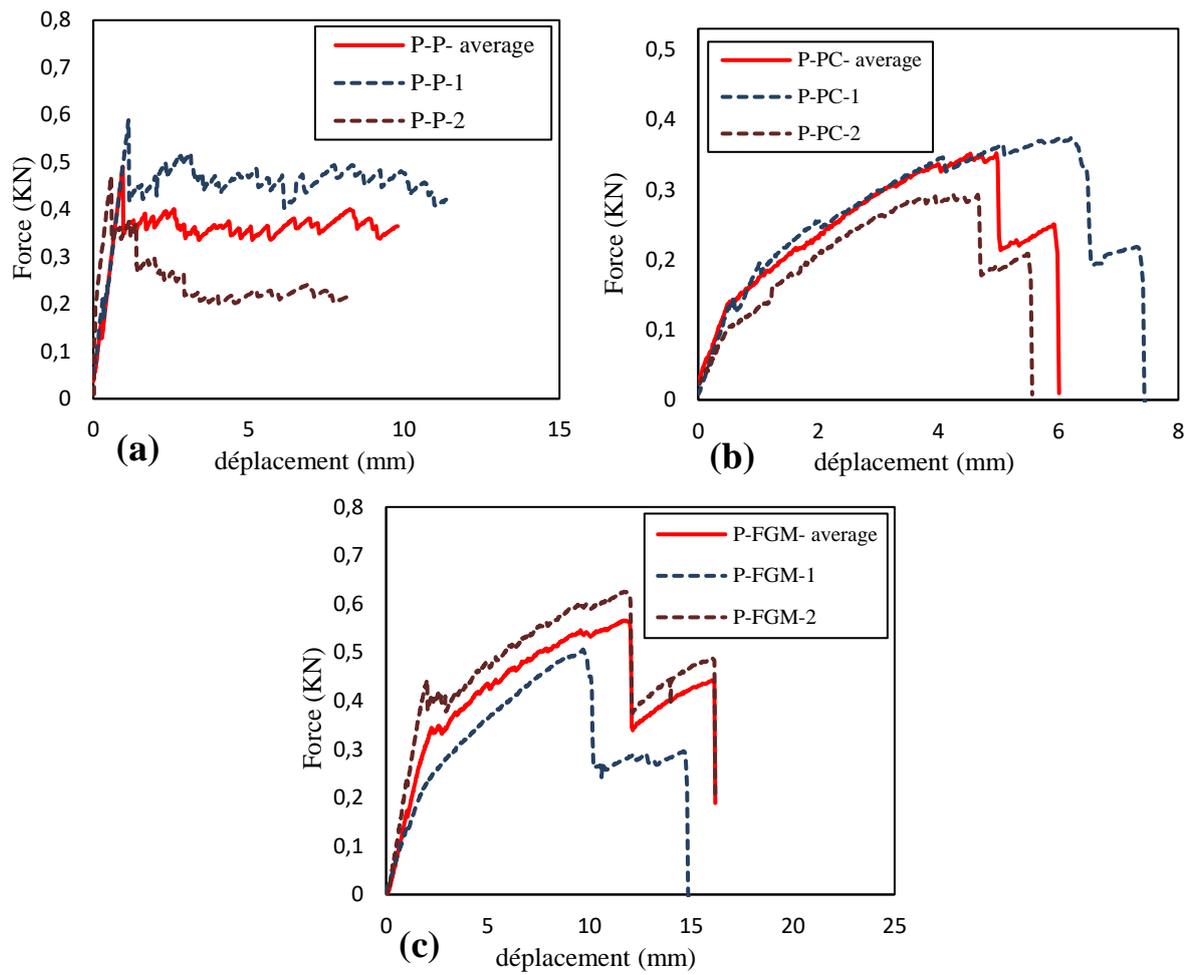
On peut noter que deux ensembles différents d'échantillons ont été considérés en compression, afin de prendre en considération les effets du flambement et de leurs modes de rupture associés sur les nouveaux panneaux sous charge axiale, tels que fournis par les normes utilisées et étudiés par Lakreb et al [5], Ferreira et al [132] et Mohamed et al [133].

#### **IV.4.1. Résultats des essais sur les panneaux et discussions**

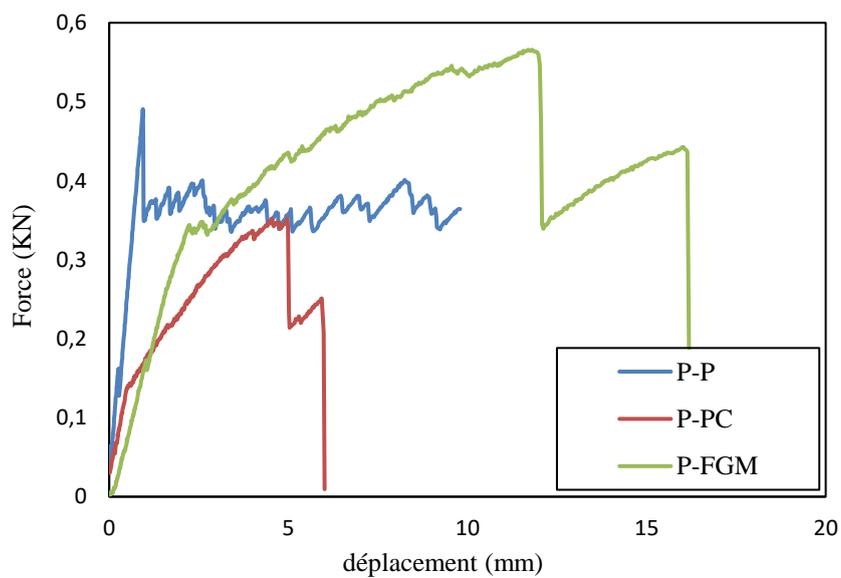
Les résultats des tests sont soulignés sous forme de courbes force-déplacement qui nous permettent d'analyser la différence entre chaque type de panneaux sandwichs testés dans le contexte de la résistance, de la rigidité et de la ductilité. En outre, les modes de rupture de tous les panneaux testés sont administrés sur des conclusions complètes sur la conception proposée en termes de comportement global et local.

##### **IV.4.1.1. Flexion trois points**

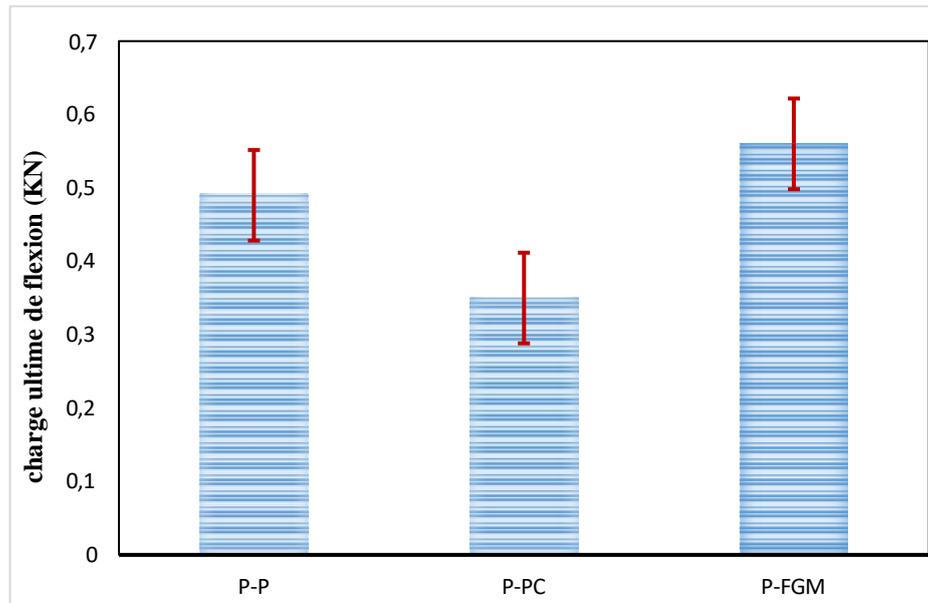
La réponse moyenne et la confrontation des trois types de panneaux sandwich testés sous flexion trois points sont représentées aux Figures IV.11, IV.12 et IV.13. Les panneaux (P-P) et (P-PC) se sont comportés de manière similaire selon trois phases principales, une augmentation linéaire de la charge appliquée a été observée dans la première phase, après avoir atteint la charge maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux, une diminution brutale de la charge est observée. Cependant, les panneaux FGM se comportent de manière ductile et la charge diminue après une phase non linéaire. En effet, la charge moyenne des panneaux de FGM testés est d'environ  $566 \text{ N}$  avec un déplacement correspondant de  $11,81 \text{ mm}$  et une résistance maximale de  $8,29 \text{ MPa}$ . Les valeurs de force obtenues sur les panneaux (P-P) et (P-PC) sont respectivement de  $491 \text{ N}$  et  $352 \text{ N}$  correspondant respectivement à une résistance à la flexion de  $7,19 \text{ MPa}$  et  $5,16 \text{ MPa}$ .



**Figure IV.11.** Courbes de Force-déplacement à mi-portée de tous les panneaux testés sous Flexion 3-points : a) P-P ; b) P-C ; c) P-FGM



**Figure IV.12.** Confrontation des courbes de Force-déplacement des panneaux testés sous flexion 3-points



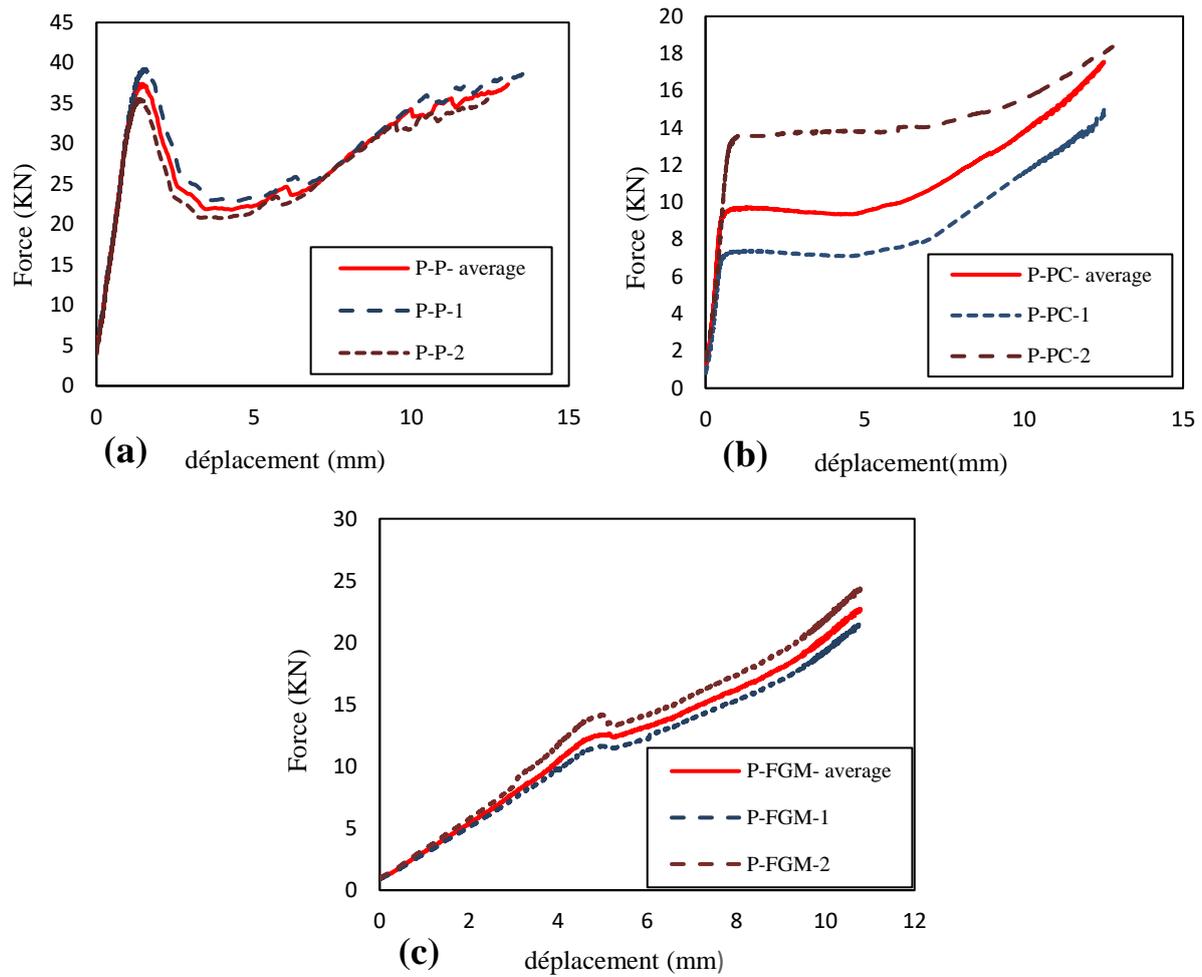
**Figure IV.13.** Comparaison des charges ultimes de flexion des panneaux sandwichs

En raison de l'inclusion de liège avec transition graduée, le type de panneaux (P-FGM) a montré des propriétés de traction plus élevées par rapport aux autres panneaux conventionnels. En effet, l'inclusion des granulats du liège dans la phase de traction du plâtre contribue à retarder les fissures initiées à l'interface de collage, permet ainsi d'améliorer les propriétés de l'interface de liaison et d'atteindre la capacité portante ultime de l'âme FGM. Cependant, l'inclusion aléatoire de liège de panneaux (P-PC) entraîne une concentration de fissures et une rupture prématurée de l'âme et de l'interface.

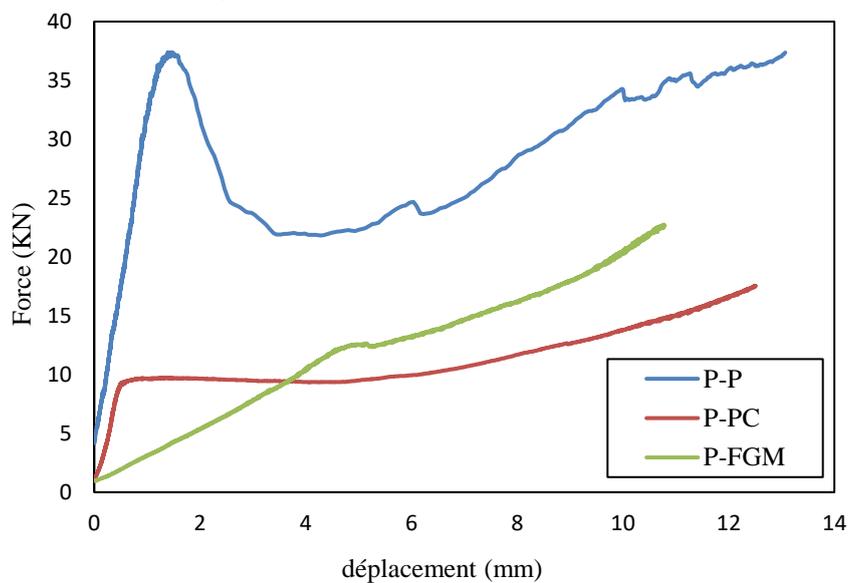
#### IV.4.1.2. Compression perpendiculaire

Les Figures IV.14, IV.15 et IV.16 montrent respectivement la confrontation des courbes force-déplacement axial et histogrammes de tous les panneaux testés sous compression perpendiculaire.

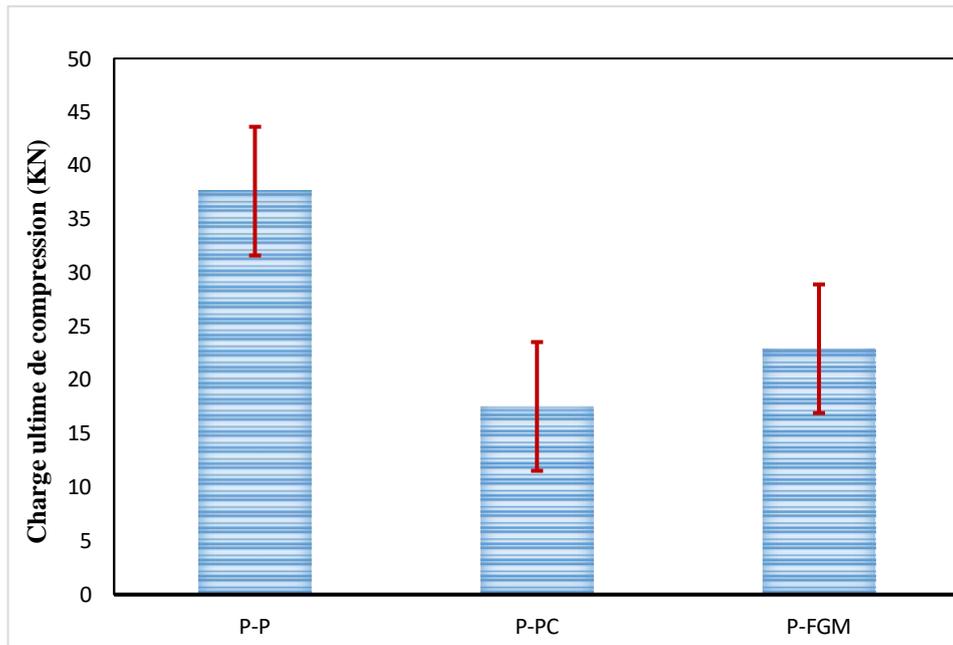
Les panneaux (P-P) présentent une rigidité et une résistance axiales élevées. La résistance à la compression est de 15,05 Mpa correspondant à un déplacement axial de 13,16 mm. En effet, le délaminage des phases du liège et du plâtre en couches provoqué par les déformations latérales sous compression évite la conjugaison des performances de base des panneaux (P-C) et FGM, qui donnent des valeurs de résistance de 7,02 et 9,09 MPa avec des déplacements axiaux respectifs de 12,49 et 10,77 mm. Ces valeurs sont dans tous les cas, supérieures aux valeurs obtenues par Lakreb et al [5] sur les panneaux à base d'une âme en liège, qui varient entre 0,11 et 0,41 Mpa.



**Figures IV.14.** Courbes Force-déplacement axial de tous les panneaux soumis à la compression : a) P-P ; b) P-C ; c) P-FGM



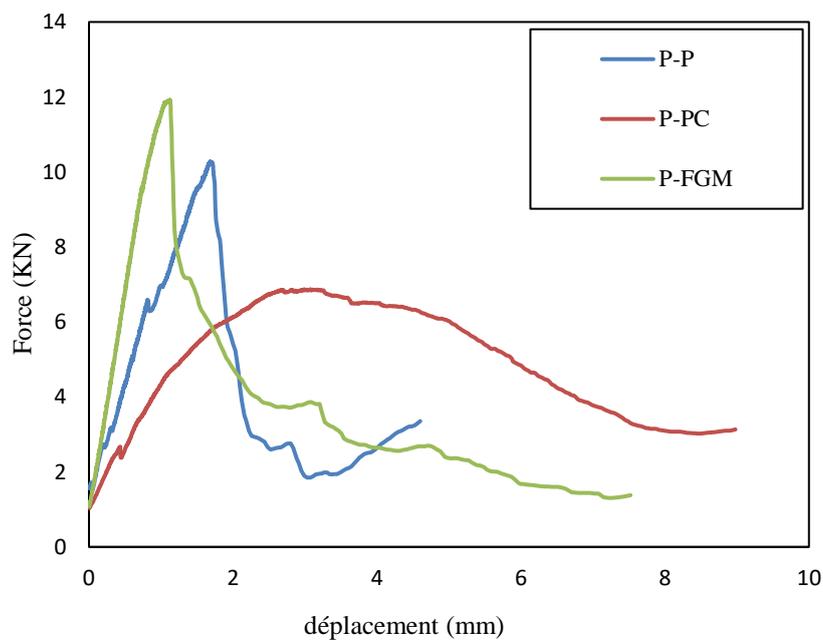
**Figures IV.15.** Confrontation des courbes moyennes : Force-déplacement axial des panneaux soumis à la compression



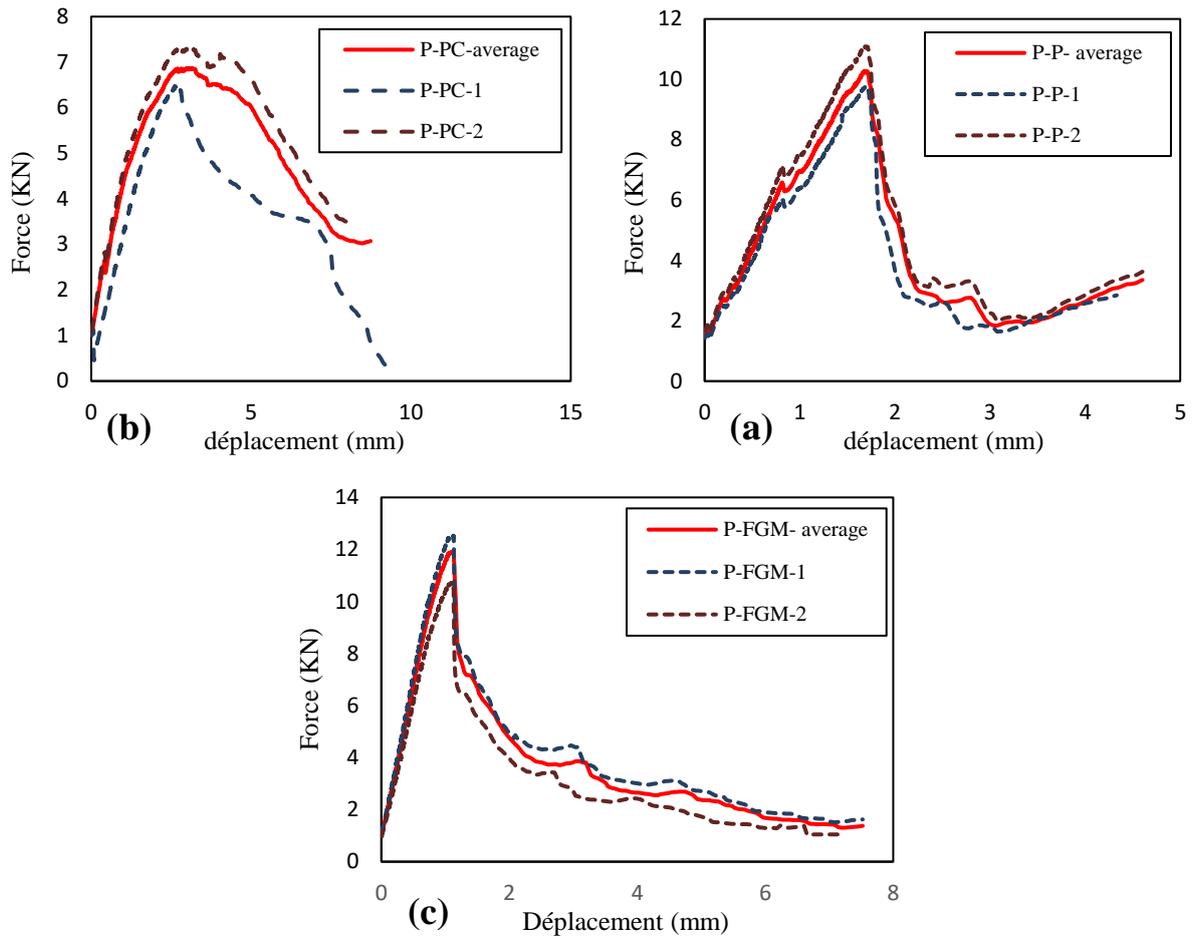
Figures IV.16. Charges ultimes de compression des différents panneaux sandwichs

#### IV.4.1.3. Flambement

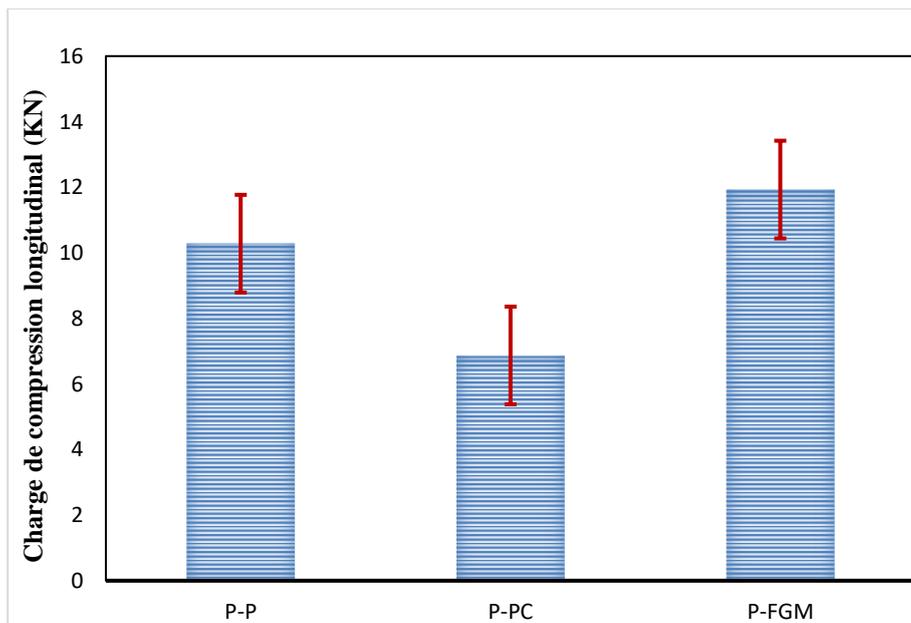
Les Figures IV.17, IV.18 et IV.19 montrent les courbes force-déplacement axial et les histogrammes des charges de compression avec flambage des panneaux fabriqués. Les réponses de chaque panneau testé sous flambement sont rapportées et les valeurs moyennes ainsi que les barres d'erreur sont également mises au évidence.



Figures IV.17. Confrontation des courbes de Force-déplacement axial des panneaux soumis au flambement



**Figures IV.18.** Courbes de Force-déplacement axial de tous les panneaux soumis au flambement : a) P-P; b) P-C; c) P-FGM



**Figures IV.19.** Histogramme des charges de flambement des différents panneaux sandwichs

Ces panneaux sandwichs présentent des résistances mécaniques au flambement très améliorées, leur comportement est caractérisé par une partie élastique linéaire, jusqu'à l'atteinte un pic qui définit la force maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux lors du flambage. Une chute considérable de la charge ultime est observée au-delà du pic.

L'histogramme de la Figure IV.19 montre que le renforcement du panneau avec des semelles en polymère (PVC) d'épaisseur 1 mm, peut augmenter la capacité ultime du panneau en flambement, en effet, les propriétés mécaniques du PVC affectent cette augmentation.

Selon le comportement général des panneaux, la réponse au flambement des trois types de panneaux a montré quelques différences. Les panneaux FGM présentent plus de résistance et de rigidité par rapport aux autres types avec une force maximale de 11930 N, correspondante à un déplacement axial de 1,12 mm et une résistance à la compression de 7,46 Mpa.

#### IV.4.2. Modes de rupture

##### IV.4.2.1. Flexion trois-points

Les mécanismes de rupture des panneaux sandwichs testés sous flexion sont représentés à la Figure IV.20. En effet, tous les panneaux testés présentent un mode de rupture similaire.



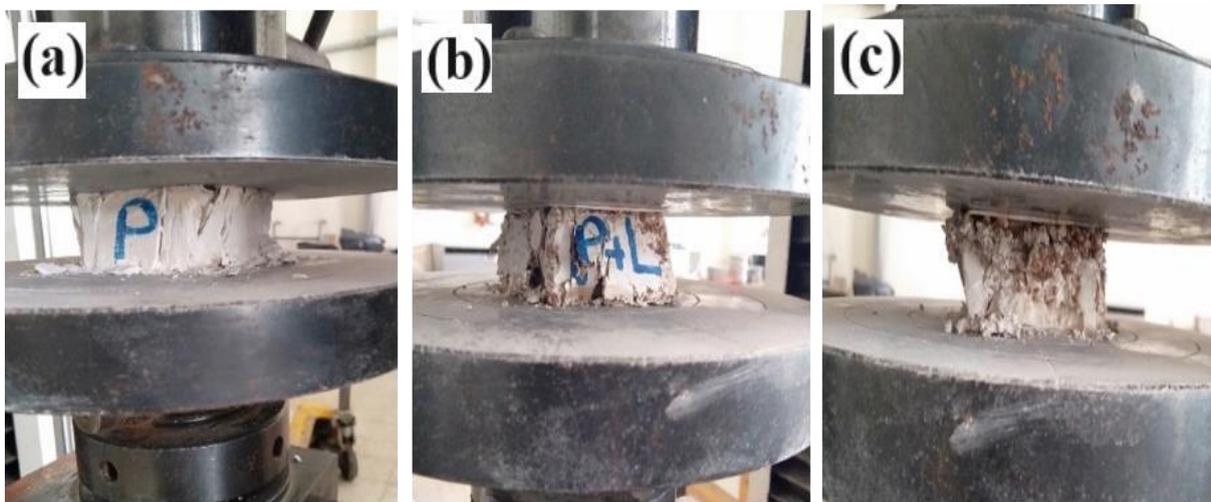
**Figure IV.20.** Modes de rupture des panneaux sous flexion : a) P-P ; b) P-PC ; c) P-FGM

Des fissures de flexion apparaissent d'abord au niveau de la zone de traction qui tendent à se propager rapidement vers la zone de compression, induisant l'effondrement de l'âme en deux parties. Aucune fissure enregistrée dans les autres zones de panneaux, cela reflète les composants de l'âme des panneaux et la bonne adhérence entre la matrice plâtre et les granulats du liège. Cependant, un décollement de la semelle PVC est observé après la rupture de l'âme. La raison du délaminage de l'interface âme/peaux pourrait être reflétée par l'adhérence entre l'âme et les peaux, comme rapporté par Shivakumar et al [134].

Le comportement global des panneaux sous flexion 3-points est satisfaisant par rapport aux études expérimentales rapportées dans la littérature par Si Salem et al [1], Wang et al [135] et Smardzewski et al [112]. Selon les résultats présentés dans le Tableau IV.3, la dégradation et la composition des matériaux de l'âme affectent de manière significative la résistance et la ductilité des panneaux, ce qui est observé dans les études sus-citées menées sur des structures sandwichs [1, 5].

#### IV.4.2.2. Compression perpendiculaire

La Figure IV.21 récapitule les principaux modes de rupture des sandwichs testés sous compression. Tous les échantillons présentent un mode de rupture semblable. En effet, l'effondrement est toujours localisé dans l'âme, et la rupture entre la matrice et les granulats de liège n'a jamais eu lieu. La première fissure est apparue dans l'âme et s'est propagée parallèlement à la charge axiale appliquée. En outre, pas de séparation entre l'âme et la peau dans tous les échantillons testés.



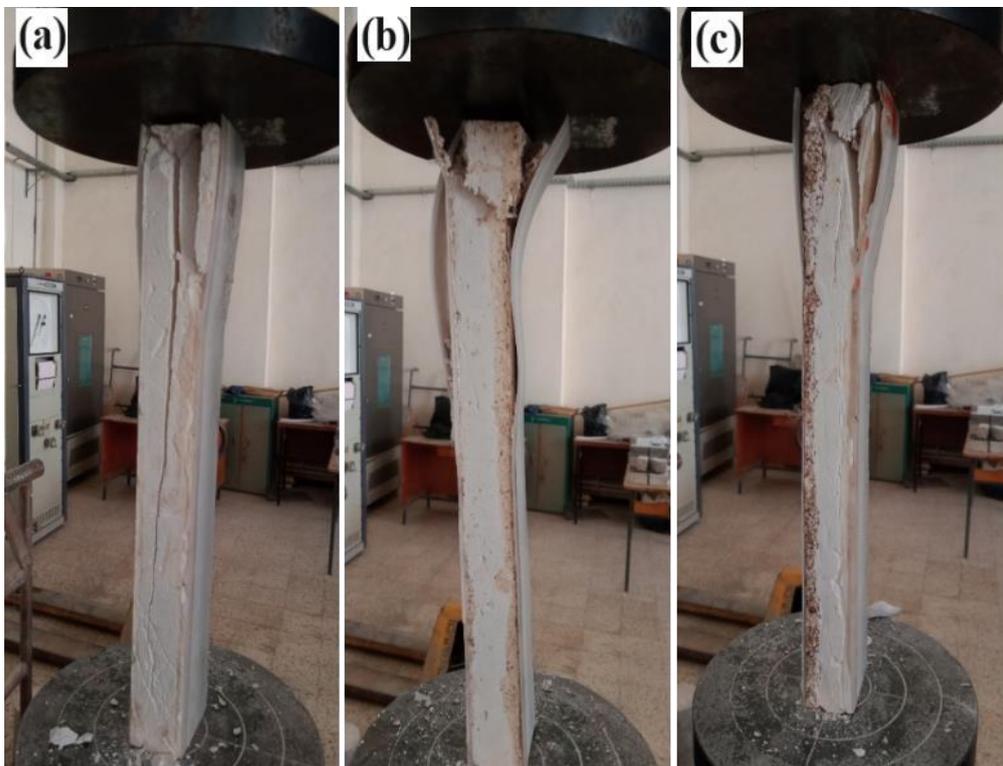
**Figure IV.21.** Modes de rupture des panneaux soumis à la compression : a) P-P ; b) P-PC ;  
c) P-FGM

### IV.4.2.3. Flambement

La Figure IV.22 montre les principaux modes de rupture des panneaux sandwichs testés sous flambement. On peut observer qu'une fissuration longitudinale s'initie dans l'âme des panneaux (P-P), qui présentent un mode de sertissage par cisaillement (Wrinkling), généralement considéré comme un mode de rupture d'instabilité. Cette rupture est due au fait que le module de cisaillement du plâtre est faible. Cependant, une densification des fissures est observée dans les bords des panneaux (P-PC) et (P-FGM).

La rupture de ces panneaux est obtenue par un flambage local. Contrairement à la flexion, aucune rupture de la peau de PVC n'est observée dans tous les panneaux testés. Les résultats obtenus sous flambement en termes de comportements observés sont également prometteurs par rapport aux études sur les panneaux sandwichs rapportées dans la littérature [5,1].

Les panneaux FGM offrent les meilleures performances mécaniques en flambement, permettant à la fois de maintenir une rigidité aux flambement et de diminuer la vitesse de propagation des fissures. L'utilisation des semelles en PVC permet le passage d'un mécanisme de rupture fragile à un mode de rupture ductile. Cet apport en ductilité confère au panneau sandwich une capacité portante très importante.



**Figure IV.22.** Modes de rupture des panneaux soumis au flambement : a) P-P ; b) P-PC ;  
c) P-FGM

Le tableau IV.3 récapitule les caractéristiques mécaniques des différentes variantes de panneau sandwich obtenues à partir des courbes forces-déplacements. L'analyse de ces résultats montre clairement que les panneaux sandwichs gradués fonctionnellement (P-FGM) présentent un comportement ductile et des déformations très importantes comparativement aux autres types de panneau. Cette propriété de gradation fonctionnelle permet de renforcer et protéger les structures en terme de dommage et les dégâts, tels que les résistances en compression, flambement et la flexion en trois points sont respectivement 9.09, 7.46 et 8.29 MPa.

**Tableau IV.3.** Récapitulatif de tous les résultats obtenus sur les panneaux testés

Panneaux testés	Dimension (mm <sup>3</sup> )	Force maximal (KN)	Résistance ultime (MPa)	Test effectué	Mode de rupture
P-P-1 P-P-2 P-P- moyenne Écart type	(50x50x30)	38.9379 36.3221 <b>37.6300</b> ±1.842	<b>15.05</b>	Compression perpendiculaire	Rupture de l'âme
P-PC-1 P-PC-2 P-PC- moyenne Écart type	(50x50x30)	17.0622 18.0390 <b>17.5506</b> ±0.690	<b>7.02</b>		
P-FGM-1 P-FGM-2 P-FGM- moyenne Écart type	(50x50x30)	22.0774 23.7830 <b>22.9302</b> ±1.206	<b>9.09</b>		
P-P-1 P-P-2 P-P- moyenne Écart type	(350x50x30)	9.73901 10.8216 <b>10.2803</b> ±0.765	<b>6.42</b>	Compression longitudinale (Flambement)	Cisaillement et fissuration de l'âme
P-PC-1 P-PC-2 P-PC- moyenne Écart type	(350x50x30)	6.48841 7.25205 <b>6.87023</b> ±0.539	<b>4.30</b>		Flambement local à l'extrémité des panneaux
P-FGM-1 P-FGM-2 P-FGM- moyenne Écart type	(350x50x30)	12.1221 11.7385 <b>11.9303</b> ±0.271	<b>7.46</b>		Flambement local à l'extrémité des panneaux
P-P-1 P-P-2 P-P- moyenne Écart type	(550x50x30)	0.52880 0.45324 <b>0.49102</b> ±0.053	<b>7.19</b>	Flexion trois points	Rupture en flexion de l'âme et décollement de la peau
P-PC-1 P-PC-2 P-PC- moyenne Écart type	(550x50x30)	0.37422 0.32999 <b>0.35211</b> ±0.031	<b>5.16</b>		
P-FGM-1 P-FGM-2 P-FGM- moyenne Écart type	(550x50x30)	0.62498 0.50712 <b>0.56605</b> ±0.083	<b>8.29</b>		

### IV.4.3. Confrontation des résultats avec la littérature

Une étude comparative des résultats obtenus dans cette recherche par rapport aux autres travaux les plus récents et pertinents rapportés dans la littérature est réalisée dans le tableau IV.4.

L'analyse et la confrontation des résultats, montrent que le comportement mécanique des panneaux testés sous compression et flexion est amélioré et satisfaisant par rapport aux panneaux sandwichs classique, permettant ainsi de mettre en exergue l'avantage de la nouvelle conception proposés pour diminuer la dispersion des propriétés matérielles et souligner son rôle important dans les structures.

**Tableau IV. 4.** Comparaison des résultats du panneau P-FGM avec les résultats de la littérature.

Références	Matériaux de l'âme	Portée totale x largeur (mm <sup>2</sup> )	Résistance ultime (Mpa)	Force ultime (KN)	Déplacement maximal (mm)
<b><u>Compression perpendiculaire</u></b>					
P-FGM	Liège/plâtre	50 x 50	9.09	22.93	10.77
Lakreb, et al [5]	Granulats du liège	50 x 50	0.11 – 0.41	0.27– 1.025	27.77 –39.21
Ferreira, et al [132]	Granulats du liège	100 x 100	0.053 – 0.063	0.54 – 0.64	1.65 – 1.66
Mohamed, et al [133]	Mousse Polyuréthane	44.45 x 54.61	1.21 – 3.81	2.35 – 9.23	6.03 –21.29
Soares, et al [136]	Composite Liège/Polymère	25 x 25	0.215	0.134	1.25
Soares, et al [136]	Composite Liège/Polymère	50 x 50	0.564	1.41	3.01
Smardzewski et al [112]	Bois-auxétique	50.23 x 50.35	3.49	8.851	1.15
<b><u>Flambement</u></b>					
P-FGM	Liège/plâtre	350 x 50	7.46	11.93	1.12
Lakreb, et al [5]	Granulats du liège	450 x 50	1.26 – 2.56	2.52 – 5.12	1.17 – 2.16
Si Salem, et al [1]	Mortier à base de sciure de bois	450 x 50	0.86 – 1.79	0.95 – 2.52	4.51 – 6.25
Ferreira, et al [132]	Granulats du liège	500 x 200	18.9 – 35.7	7.28 –15.01	4 – 4.9
Mohamed et al [133]	Mousse polyuréthane	203.2 x 101.6	62.37 – 76.4	20.67– 29.2	3.01 – 3.2
<b><u>Flexion trois points</u></b>					
P-FGM	Liège/plâtre	550 x 50	8.29	0.566	11.81
Lakreb, et al [5]	Granulats de liège	650 x 50	9.7 – 33.2	0.47 – 0.68	10.0 – 18.1
Ferreira, et al [132]	Granulats de liège	500 x 200	10.24 – 13.73	1.38 – 1.98	12.1 – 18.8
Si Salem, et al [1]	Mortier à base de sciure de bois	650 x 50	/	0.37 – 0.84	5.11 – 22.1
Soares, et al [136]	Composite Liège/Polymère	211.2 x 44	0.61 – 1.24	/	27.5 – 28
Min, et al [137]	Mousse renforcée de bande	200 x 30	/	2.003–5.91	5.32 – 22.82
Reis, et al [120]	Fibre de verre/liège	100 x 10	/	0.51_0. 52	2.0 – 2.3
Smardzewski et al[112]	Ame bois/auxétique	450 x 50.18	/	1.037	16.2

Il est constaté que la résistance à la flexion des panneaux P-FGM qui est égale 8.29 MPa est amélioré par rapport aux valeurs trouvés par Soares, et al [136] et convergente aux résultats obtenues par Lakreb, et al [5] et Ferreira, et al [132]. La résistance à la compression de panneau P-FGM est de 9.09 Mpa correspondante à un déplacement axial de 10,77 mm est supérieures dans tous les cas aux valeurs obtenues par Lakreb et al [5], Ferreira, et al [132], Mohamed, et al [133], Soares, et al [136] et Smardzewski et al [112].

Les résultats permettent ainsi de conclure que l'utilisation de composite Liège/plâtre dans les âmes des panneaux sandwichs est bénéfique, de sorte qu'il montre un excellent comportement mécanique par rapport au composite de Liège/Polymère et Fibre de verre/liège réalisé par Soares, et al [136] et Reis, et al [120] respectivement.

### III.5. Conclusion

L'objectif principal de l'étude expérimentale réalisée est de mettre en évidence le comportement mécanique d'un nouveau panneau sandwich à base d'une âme fonctionnellement graduée en plâtre/liège avec des peaux symétriques en PVC. Les tests réalisés au laboratoire sur les différents échantillons ont permis de mieux comprendre le comportement global des panneaux proposés. En effet, le mélange entre la matrice du plâtre et les granulats du liège, et la dégradation fonctionnelle ont fourni une rigidité élevée, tandis que les plaques de PVC protégeait les matériaux de base et augmentait la résistance des panneaux. A cet égard, les résultats intéressants obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les panneaux à base d'une âme à haute dégradation fonctionnelle de type FGM-3 donnent de meilleurs résultats en compression, atteignant une charge ultime de 28120 N et correspondante à une résistance à la compression de 19,45 Mpa ;
- La meilleure résistance des éprouvettes d'âmes testés sous flexion est donnée par les panneaux conçus à base du plâtre de type (P) avec une charge maximale d'environ 1340 N, correspondante à une résistance à la traction de 3,78 Mpa ;
- Les panneaux P-FGM testés sous flexion se comportent avec plus de ductilité par rapport aux autres types grâce à l'inclusion des granulats du liège dans la phase de traction du plâtre qui contribue à retarder les fissures initiées à l'interface de collage. La charge moyenne est d'environ 566 N avec une flèche correspondante de 11,81 mm et une résistance maximale de 8,29 Mpa ;

- Le type de panneaux conçus à base du plâtre (P-P) présentent une rigidité et une résistance axiales élevées, atteignant une valeur de compression de 15,05 Mpa correspondante à un déplacement axial de 13,16 mm ;
- Selon les caractéristiques générales des panneaux sandwichs, la réponse au flambement des trois types de panneaux montre que le type P-FGM présentent une résistance et une rigidité plus élevées de l'ordre de 7,46 Mpa.
- Le comportement mécanique global des panneaux sandwichs testés sous compression et flexion sont en accord avec les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.

# **Chapitre V**

## **Modélisation analytique**

## V.1. Introduction

Après l'investigation expérimentale sur les nouveaux panneaux sandwichs développés, ce chapitre est consacré à une modélisation analytique du comportement flexionnel de ces structures. Le modèle statique proposé est basé sur les théories d'ordre élevé (loi exponentielle ESDBT, loi sigmoïdal SSDBT et la loi de puissance TSDBT), ce modèle analytique validé par les résultats des essais et les lois préconisées par les normes en vigueur est capable de fournir expérimentalement les lois de variation matérielle de la loi de puissance utilisée dans la littérature scientifique.

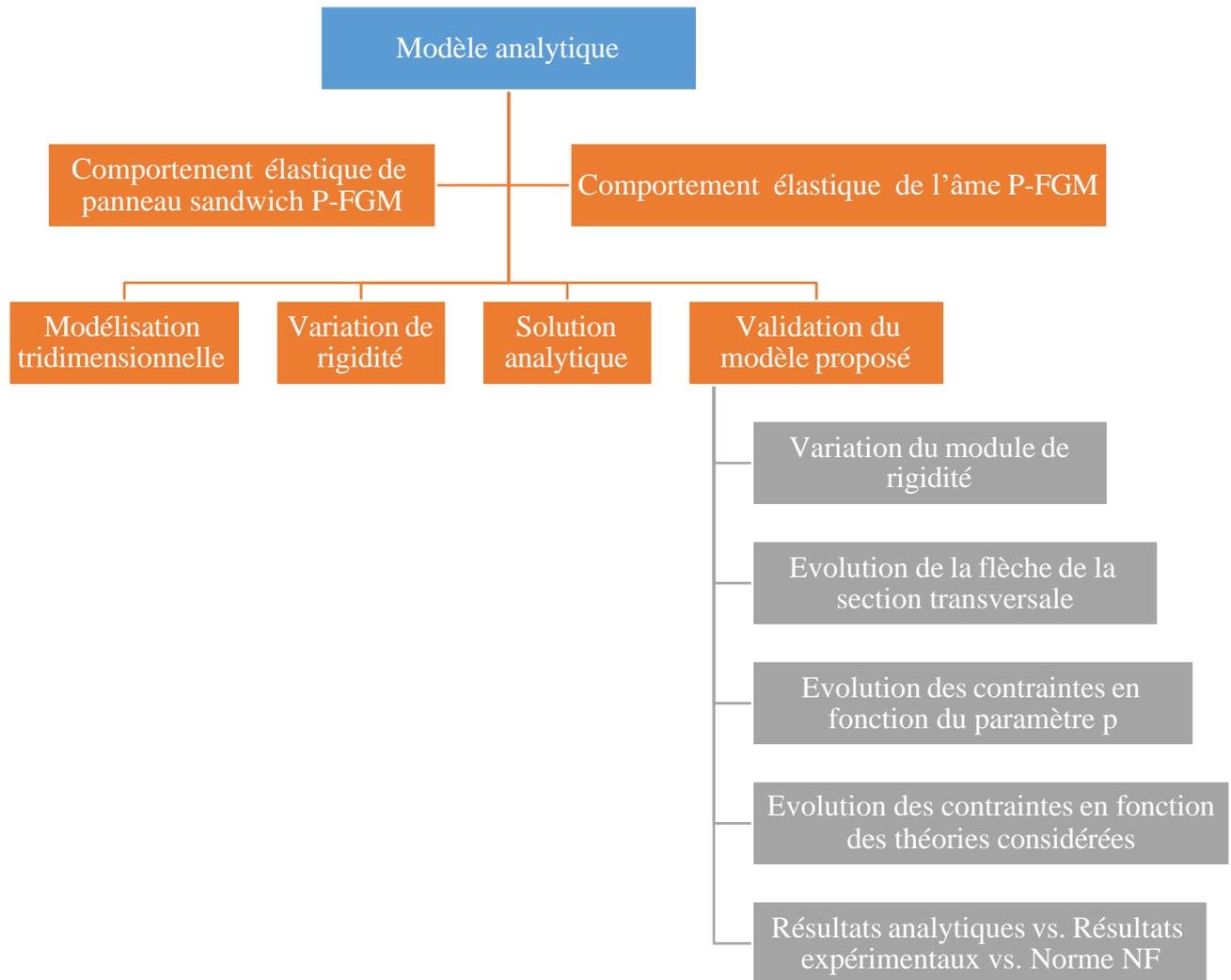
Le modèle proposé suppose que le module de Young des panneaux FGM est varié de façon continue selon une distribution de loi de puissance simple (P-FGM), il sert au calcul des contraintes normales et de cisaillement. Les relations de déplacement de chaque théorie utilisée qui tiennent compte de la fonction de cisaillement ont été introduites. Le principe du travail virtuel a été utilisé pour obtenir les équations d'équilibre, qui ont été résolues à l'aide de la méthode des séries de Navier. La transition fonctionnelle le long du noyau des panneaux a été modélisée selon la fonction de loi de puissance, en fonction du paramètre du matériau qui décrit le type de dégradation des FGM.

Dans un premier temps, la variation de la rigidité du panneau en fonction du paramètre de matériau P a été décrite. Ensuite, l'effet du changement de ce paramètre sur l'évolution de la flèche, la contrainte normale et la contrainte de cisaillement est présenté et discuté, puis une comparaison entre les différentes théories d'ordre élevé est réalisée. Enfin, les résultats analytiques ont été comparés aux résultats expérimentaux et la norme de conception en vigueur afin de vérifier la fiabilité de la procédure analytique et de montrer l'efficacité du modèle proposé en termes de contrainte, dégradation de rigidité et de déformabilité.

## IV.2. Modèle proposé

Le modèle proposé dans cette étude a été développé dans le but de modéliser analytiquement le comportement mécanique des panneaux sandwichs FGM soumis à une flexion statique en trois points. Étant donné que les échantillons testés expérimentalement et modélisés analytiquement présentent les mêmes caractéristiques géométriques et matérielles, une comparaison des résultats fournis par les deux approches a été effectuée.

La Figure IV.1 présente un récapitulatif des étapes suivies pour développer et valider le modèle et la conception proposée dans cette étude.

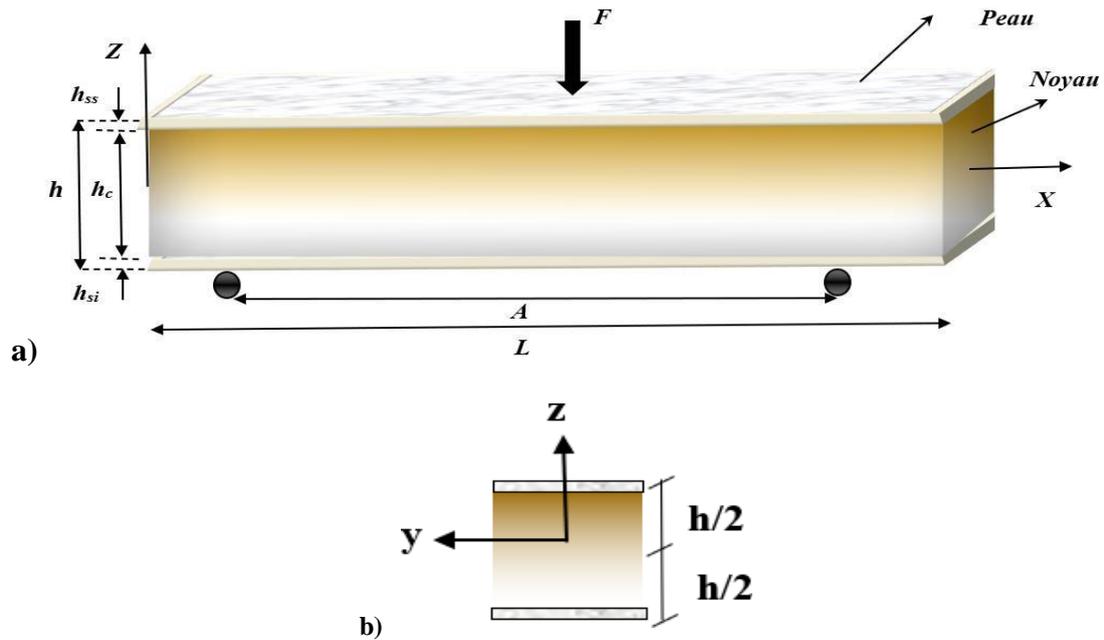


**Figure V.1.** Organigramme de modèle analytique.

### IV.3. Modélisation tridimensionnelle

Une représentation schématique des vues longitudinales et transversales du panneau modélisé est donnée sur la Figure V.2. Les coordonnées ( $x$ ) et ( $y$ ) définissent le plan du panneau avec une longueur totale ( $L$ ), une hauteur totale ( $h$ ), une épaisseur de noyau ( $h_c$ ) et des peaux faisant face à l'épaisseur ( $h_s$ ). Alors que l'axe ( $z$ ) est l'origine à la surface de la hauteur du milieu du panneau dans la direction de l'épaisseur.

Les caractéristiques géométriques et les propriétés des matériaux qui constituent les panneaux étudiés sont résumées dans le Tableau 1. Il est à noter que ces propriétés ont été évaluées dans la caractérisation expérimentale menée dans les chapitres précédents.



**Figure V. 2.** Représentation schématique de panneau sandwich modélisé.

**Tableau V.1.** Propriétés géométriques et mécaniques des panneaux et âmes modélisés

Spécimen modélisé	Désignation et annotation	Valeur
Panneau Sandwich de dimension de $32 \times 50 \times 550 \text{ mm}^3$	Longueur totale de panneau : L (mm)	<b>550</b>
	Portée effective de panneau : A (mm)	<b>500</b>
	Largeur de panneau: b (mm)	<b>50</b>
	Epaisseur de la peau supérieure : $h_{ss}$ (mm)	<b>1</b>
	Epaisseur de la peau inférieure : $h_{is}$ (mm)	<b>1</b>
	Epaisseur du noyau FGM : $h_a$ (mm)	<b>30</b>
	Epaisseur totale de panneau : h (mm)	<b>32.5</b>
	Module de Young de plâtre : $E_p$ (MPa)	<b>9000</b>
	Module de Young du liège : $E_C$ (MPa)	<b>20</b>
	Module de Young de la peau en PVC : (MPa)	<b>1081.09</b>
Charge appliquée à mi- portée de panneau : F (N)	<b>200</b>	
Ame en FGM de dimension de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$	Longueur totale de l'éprouvette : L (mm)	<b>160</b>
	Portée effective de l'éprouvette: A (mm)	<b>100</b>
	Largeur de l'âme (mm)	<b>40</b>
	Epaisseur totale de l'âme : $h_a$ (mm)	<b>40</b>
	Charge appliquée à l'entraxe de l'âme : F (N)	<b>80</b>

## V.4. Variation de rigidité

L'influence de la variation du coefficient de Poisson sur la déformation des structures FGM est beaucoup moins importante que le module d'Young [138]. A cet effet, la valeur du coefficient de Poisson est considérée comme constante en tous points du panneau inhomogène. En conférant aux lois sur les FGM fournies par la littérature, la fraction volumique donnée dans l'équation V.1 a été supposée varier continuellement suivant une distribution de loi de puissance simple, comme l'ont principalement utilisé par plusieurs auteurs [9,77, 139-142] :

$$G(z) = \left(\frac{2z+hc}{2hc}\right)^p \quad (V.1)$$

P : est le paramètre qui prend en compte la transition fonctionnelle du matériau à travers la hauteur du noyau FGM.

Dans notre cas, la rigidité du matériau de l'âme conçu est déterminée par la loi des mélanges en équation V.2, telle qu'utilisée par la majorité des travaux analytiques [55,142-147].

$$E(z)_{\text{âme}} = E_C + \left(\frac{z}{hc} + \frac{1}{2}\right)^p (E_P - E_C) \quad (V.2)$$

Tels que :

$E_P$  : le module de Young du plâtre.

$E_C$  : le module de Young du liège.

Les valeurs  $E_P$  et  $E_C$  évalués expérimentalement et donné dans le tableau 1.

La rigidité totale de panneau sandwich modélisé est évaluée à l'aide de l'équation (V.3), proposée dans la présente étude qui représente la combinaison de rigidité de l'âme et des peaux en supposant une interaction parfaite, comme suit :

$$E(z)_{\text{panneau}} = \int_{-hc/2}^{-hc/2} E_{si} dz + \int_{-hc/2}^{hc/2} E(z)_{\text{âme}} dz + \int_{hc/2}^{hc/2} E_{ss} dz \quad (V.3)$$

## V.5. Méthode de résolution analytique

Dans la base orthonormale (O, x, y, z), le déplacement de tout point M (x, y, z) du panneau considéré est donné par Eq. (V.4), tel qu'utilisé dans des nombreuses recherches [60,77,140].

$$U(M) = \begin{cases} u_x(x) = u(x) - zw, x(x) + \psi(z)\varphi_x \\ u_z(x, z) = w(x) \end{cases} \quad (V.4)$$

Dans laquelle :

$u(x)$  : le déplacement dans le plan ;

$w(x)$  : le déplacement transversal ;

$w,x(x)$  : la rotation de la section ;

$\phi_x$  : est la rotation le long de l'axe ( $x$ ).

La fonction de gauchissement  $\Psi(z)$  permet de remplir les conditions de cisaillement sans contrainte sur les surfaces supérieure et inférieure des sandwichs par la distribution de la contrainte de cisaillement transversale. Par conséquent, les théories d'ordre élevé suivantes ont été utilisées dans la présente étude, comme indiqué dans [59,73,77, 147] :

- TSDBT:  $\Psi(z) = z(1 - 4z^2/3h_c^2)$
- SSDBT:  $\Psi(z) = h_c \sin(\pi z/h_c)/\pi$
- ESDBT:  $\Psi(z) = ze^{-2(z/h_c)^2}$

Compte tenu de l'hypothèse des déformations relativement faibles, les relations de la déformation ont été simplifiées en utilisant la théorie de l'élasticité à la formulation donnée par l'équation (V.5).

$$\begin{cases} \varepsilon_x(x, z) = \frac{\partial u(x)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \Psi(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \gamma_{xz}(x, z) = \Psi'(z) \cdot \phi_x \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

Dans le cas d'un comportement élastique linéaire, l'expression des contraintes de panneau sandwich et de l'âme peut être déterminée en fonction des déformations précédemment évaluées, telles que données respectivement par les équations (V.6) et (V.7).

$$\begin{cases} \sigma_x = E(z)_{\text{panneau}} \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = \frac{E(z)_{\text{panneau}}}{2(1+\nu)} \gamma_{xz} \end{cases} \quad (\text{V.6})$$

$$\begin{cases} \sigma_x = E(z)_{\text{âme}} \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = \frac{E(z)_{\text{âme}}}{2(1+\nu)} \gamma_{xz} \end{cases} \quad (\text{V.7})$$

Afin d'établir les équations d'équilibre, le principe du travail virtuel qui suppose que la somme du travail interne ( $\delta W_{\text{int}}$ ) et du travail externe appliqué ( $\delta W_{\text{ext}}$ ) est nulle a été utilisé.

$$\delta W_{ext}(\delta u) + \delta W_{int}(\delta u) = 0, \forall \delta u \quad (\text{Déplacement virtuel})$$

Les forces volumiques sont négligées, l'expression du travail extérieur et intérieur est résumée sous cette forme :

$$\delta W_{ext} = q\delta W = q \frac{L}{L} \delta W = \int_0^L \frac{q}{L} \delta W dx \quad (\text{V.8})$$

$$\delta W_{int} = - \int_0^L \int_S [\sigma_x \delta \varepsilon(x) + \tau_{xz} \delta \gamma_{xz}(x)] dS \quad (\text{V.9})$$

En remplaçant l'expression des déformations dans l'équation du travail intérieur on obtient :

$$\delta W_{int} = - \int_0^L [\int_S \sigma_x (\delta \varepsilon_0 + z \delta k + \Psi(x) \delta \eta_x) dS + \int_S \tau_{xz} \Psi'(z) \delta \gamma_{xz} ds] dx \quad (\text{V.10})$$

$$\delta W_{int} = - \int_0^L [N_x \frac{\partial \delta u}{\partial x} + M_x \frac{\partial^2 \delta w}{\partial x^2} + S_x \frac{\partial \delta \phi_x}{\partial x} + \phi_{xz} \delta \phi_x] dx \quad (\text{V.11})$$

Tell que :

$N_x$  et  $M_x$  : Sont l'effort normal et le moment fléchissant respectivement.

$S_x$  et  $Q_{xz}$  : Sont le moment supplémentaire dû au cisaillement transverse et à l'effort de cisaillement respectivement.

Les expressions des efforts internes  $N_x$ ,  $M_x$ ,  $S_x$  et  $Q_{xz}$  respectivement : effort normal, moment fléchissant, moment dû au cisaillement transverse et effort de cisaillement sont données par les relations (V.12, V.13, V.14 et V.15) :

$$N_x = \int_S \sigma_x \cdot dS = \int_S \left( E(z) \frac{\partial u(x)}{\partial x} - E(z) z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E(z) \Psi(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right) dS \quad (\text{V.12})$$

$$= A_{11} \frac{\partial u(x)}{\partial x} - B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + C_{11} \frac{\partial \phi_x}{\partial x}$$

$$M_x = - \int_S z \sigma_x dS = - \int_S z \left( E(z) \frac{\partial u(x)}{\partial x} - E(z) z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E(z) \Psi(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right) dS \quad (\text{V.13})$$

$$= -B_{11} \frac{\partial u(x)}{\partial x} + D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{11}^a \frac{\partial \phi_x}{\partial x}$$

$$S_x = \int_S \Psi(z) \sigma_x dS = \int_S \Psi(z) \left( E(z) \frac{\partial u(x)}{\partial x} - E(z) z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E(z) \Psi(z) \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \right) dS \quad (\text{V.14})$$

$$= C_{11} \frac{\partial u(x)}{\partial x} - D_{11}^a \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + F_{11}^a \frac{\partial \phi_x}{\partial x}$$

$$Q_{xz} = \int_S \Psi'(z) \tau_{xz} dS = \int_S (\Psi'(z) G(z) \phi_x) dS = A_{11}^a \phi_x \quad (\text{V.15})$$

Les coefficients de rigidité introduits ( $A_{11}$  et  $B_{11}, \dots, A_{11}^a$ ) ont été définis selon les modules  $E(z)$  et  $G(z)$ , comme suit :

$$\{A_{11}, B_{11}, C_{11}\} = b \int_{-h/2}^{h/2} E \{1, z, z^2\} dz \quad (\text{V.16})$$

$$\{A_{11}, B_{11}, D_{11}\} = b \int_{-h/2}^{h/2} E \{1, z, z^2\} dz \quad (\text{V.17})$$

$$A_{11}^a = b \int_{-h/2}^{h/2} G(z) \Psi'^2(z) dz \quad (\text{V.18})$$

La résolution du problème fait appel au principe des travaux virtuels qui exprime l'égalité entre le travail externe des charges appliquées sur le panneau sandwich (FGM) et le travail des forces interne au long des lignes de rupture.

Cette méthode est appliquée en soumettant le système à n'importe quel déplacement  $\delta$ , représentant les déplacements et rotations produits pour les lignes de rupture, puis en égalant le travail des forces extérieurs et des efforts intérieurs, on obtient l'expression suivante :

$$\delta W_{ext} + \delta W_{int} = 0 \quad (\text{V.19})$$

$$- \int_0^L \left[ -\frac{\partial N}{\partial x} \delta u + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} \delta w - \frac{\partial S_x}{\partial x} \delta \varphi_x + \phi_{xz} \delta \varphi_x \right] dx + \left[ -N_x \delta u - M_x \frac{\partial \delta w}{\partial x} + \frac{\partial M_x}{\partial x} \delta w - S_x \delta \varphi_x \right]_0^L + \int_0^L \frac{q}{L} \delta w dz = 0 \quad (\text{V.20})$$

$$\forall \delta w, \delta u, \delta \varphi_x$$

L'équation (V.21) doit vérifier :

$$\begin{cases} \frac{\partial N_x}{\partial x} = 0 \\ -\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{q}{L} = 0 \\ \frac{\partial S_x}{\partial x} - \phi_{xz} = 0 \end{cases} \quad (\text{V.21})$$

Les conditions aux limites en  $x=a$  et  $x=L-a$  qui sont exprimées soit en déplacement soit en force sont données comme suit :

$$\begin{cases} \delta u = 0 \\ \frac{\partial \delta w}{\partial x} = 0 \\ \delta w = 0 \\ \delta \varphi_x = 0 \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} -N_x = 0 \\ -M_x = 0 \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} = 0 \\ -S_x = 0 \end{cases} \quad (\text{V.22})$$

Enfin, les équations différentielles d'équilibre régissant la réponse à la flexion de l'âme FGM étudié et du panneau sandwich soumis à une flexion trois points sont données par l'équation (V.23).

$$\begin{cases} A_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + C_{11} \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} = 0 \\ B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + D_{11}^a \frac{\partial^3 \varphi_x}{\partial x^3} = -\frac{q}{L} \\ C_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - D_{11}^a \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + F_{11}^a \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2} - A_{11}^a \varphi_x = 0 \end{cases} \quad (\text{V.23})$$

Afin de résoudre les équations différentielles d'équilibre, la méthode des séries de Navier qui suppose une solution approximative analytique a été utilisée. En effet, l'efficacité de cette méthode a été largement fournie dans la littérature [73, 77, 59, 133, 135].

Le déplacement dans le plan et transversal ainsi que la rotation de la section efficace considérée sont évalués à l'aide de l'équation suivante :

$$\begin{cases} u(x) \\ w(x) \\ \varphi(x) \end{cases} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{cases} u_m \cos(\lambda x) \\ w_m \sin(\lambda x) \\ \varphi_m \cos(\lambda x) \end{cases} \quad (\text{V.24})$$

Avec:  $\lambda = \frac{m\pi}{L}$

$m$  : est le nombre total de séries

$u_m$ ,  $w_m$  et  $\varphi_m$  sont des paramètres indéterminés.

A noter que la charge de flexion externe a été transformée en utilisant la même approximation, comme suit :

$$q_z(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_m}{L} \sin(\lambda x) \quad (\text{V.25})$$

Les équations finales de la contrainte normale ( $\sigma_x$ ) et du cisaillement transversal ( $\tau_{xz}$ ) selon le module de Young du panneau modélisé sont données par l'équation (V.26). Il est important de noter que le nombre de séries Navier considérées dans la résolution analytique est  $m=100$ .

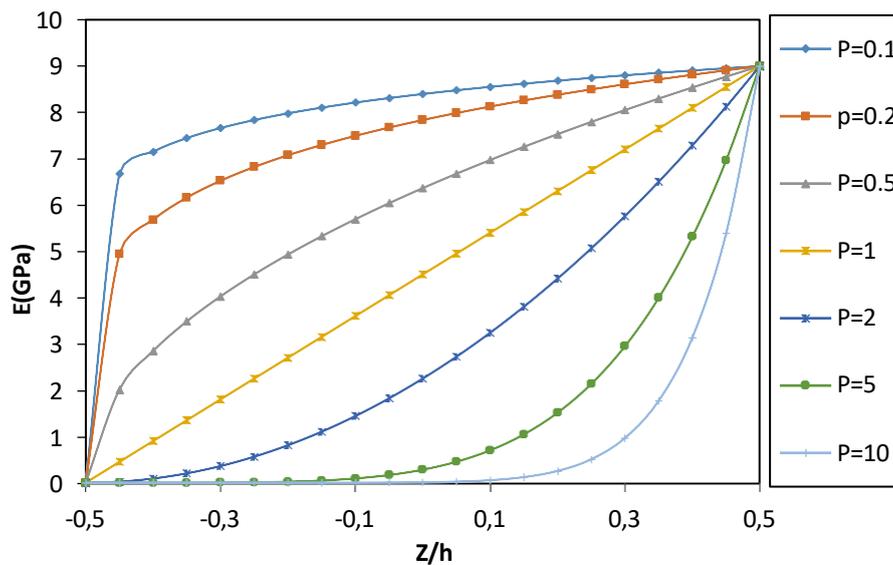
$$\begin{cases} \sigma_x = -E(z)_{\text{panneau}} \sum_{m=1}^{\infty} [\lambda(u_m + z\varphi_m) - \lambda^2 z w_m] \sin(\lambda x) \\ \tau_{xz} = \frac{E(z)_{\text{panneau}}}{2(1+\nu)} \sum_{m=1}^{\infty} [\varphi_m] \cos(\lambda x) \end{cases} \quad (\text{V.26})$$

## V.5. Résultats et analyses

Les équations différentielles qui régissent la réponse des structures étudiées ont été programmées dans le code Matlab afin de fournir une résolution rapide et efficace. Par conséquent, les résultats analytiques tels que : les flèches, l'évolution des contraintes normales et de cisaillement en fonction de la dégradation fonctionnelle et de la théorie utilisée sont mis en évidence et discutés. De plus, les valeurs obtenues ont été validées expérimentalement et théoriquement sur la base des données expérimentales et des lois préconisées de la NF 54-606 (1987) [119]. En outre, l'effet de la transition du matériau à travers l'épaisseur du noyau de panneau sandwich a été concentré.

### V.5.1. Variation du module de rigidité

L'évolution du module de Young du panneau en fonction de l'épaisseur du noyau pour différentes valeurs du paramètre de matériau P est illustrée à la figure V.3.



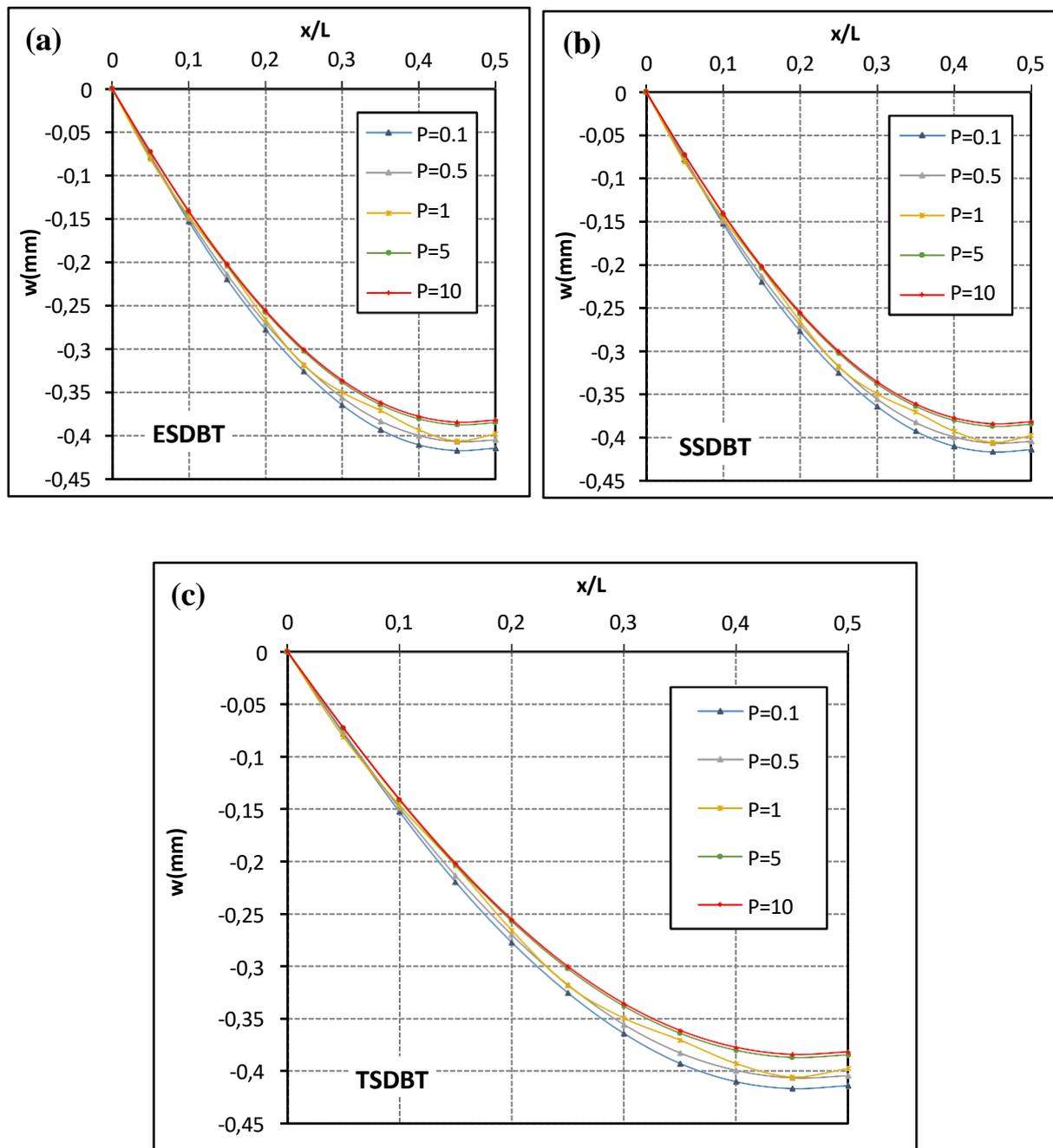
**Figure V.3.** Evolution de la rigidité en fonction de l'épaisseur du noyau

Il apparaît clairement que la fraction volumique transite principalement près de la surface supérieure de l'âme lorsque  $P > 5$  et près de la surface inférieure de l'âme pour  $P < 0,5$ . Expérimentalement, cette transition a été présumée élevée pour (FGM-3) et faible pour (FGM-2) respectivement. Pour  $P=1$ , la fraction volumique varie linéairement, ce qui correspond à une transition moyenne (FGM-1).

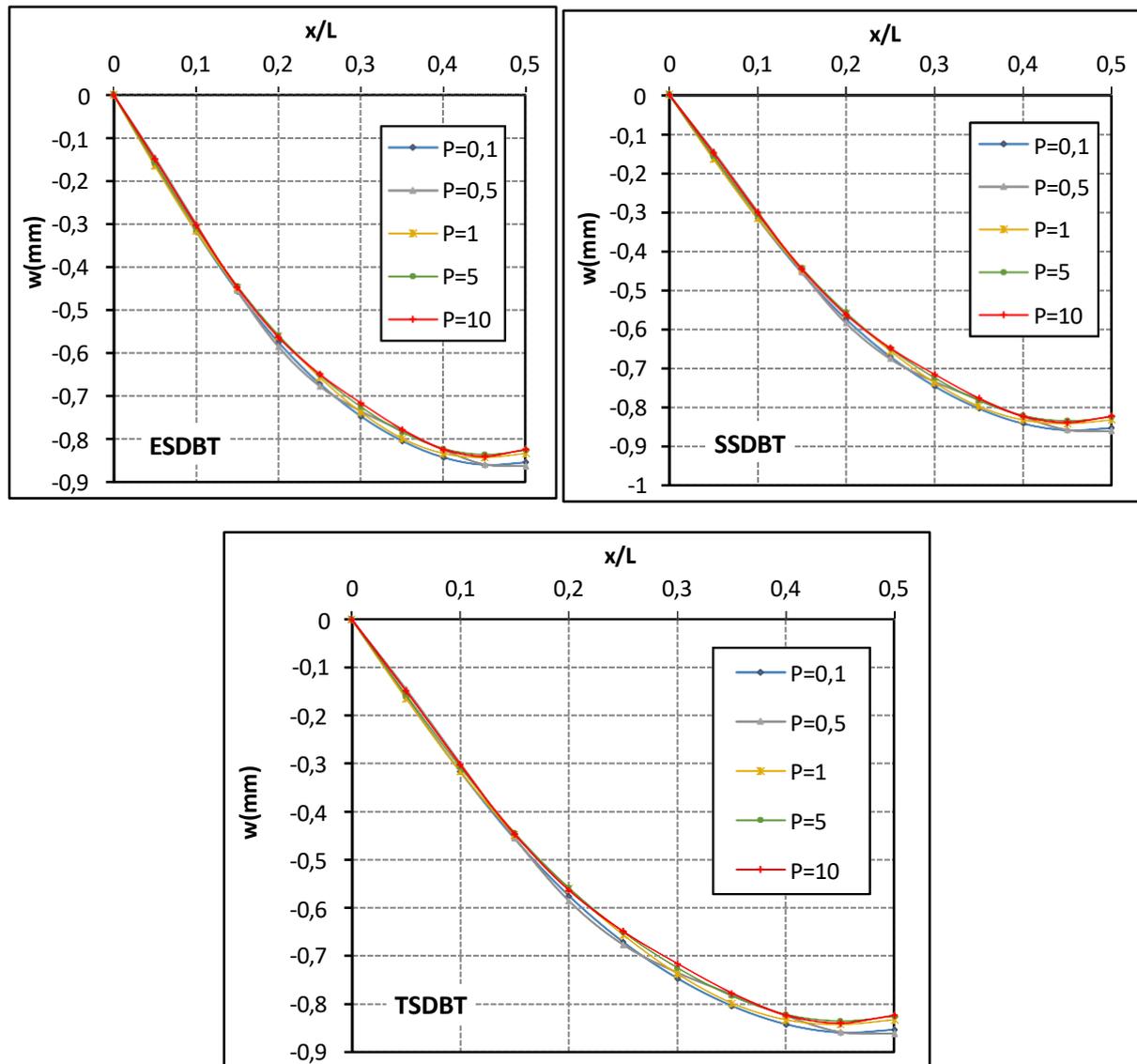
On peut voir que le paramètre de matériau P influence principalement sur la rigidité de l'âme des FGM, comme été soulignée dans la littérature [73, 77, 80, 139, 113, 129].

### V.5.2. Evolution de la flèche selon le paramètre P et les théories

Les Figures V.4 et V.5 montrent respectivement l'évolution du déplacement global généré sous flexion 3 points en fonction de la portée des âmes P-FGM et des panneaux sandwichs pour divers paramètres de matériau P et différentes théories d'ordre élevé utilisées.



**Figure V.4.** Évolution de la flèche à travers les âmes P-FGM : a) théorie de la fonction exponentielle ESDBT ; b) Théorie de la fonction sinusoïdale SSDBT ; c) Théorie des fonctions de déformation cubique TSDBT.



**Figure V.5.** Évolution de la flèche à travers la portée du panneau sandwich : a) théorie des fonctions exponentielles ESDBT ; b) Théorie de la fonction sinusoïdale SSDBT ; c) Théorie des fonctions de déformation cubique TSDBT.

Selon les conditions d'essai de flexion, les valeurs de la flèche pour tous les éprouvettes modélisées sont maximales à mi-portée des panneaux. Les courbes montrent le même schéma pour toutes les valeurs de paramètre  $P$ . Les flèches de panneau sandwich sont largement supérieure à celle de l'âme, ce qui est dû à la résistance et au renforcement fournis par les peaux en PVC.

La comparaison des courbes montre clairement que la flèche ultime augmente croît avec La diminution du paramètre de matériau  $P$ . Analytiquement, cela s'explique par le module de Young du plâtre plus élevé par rapport au module du liège.

Physiquement, le paramètre  $P$  décroissant correspond à une faible transition de la phase du plâtre à la phase du liège, ce qui permet à la résistance à la traction élevée du plâtre concentrée dans la zone de traction du panneau de fournir des valeurs de déplacement élastique élevées.

On peut voir que l'évolution de la flèche est très dépendante du paramètre du matériau  $P$  et la comparaison des résultats obtenus par les différentes théories considérées permet de valider l'approche proposée.

La différence dans les résultats de la déflexion entre les courbes des panneaux sandwichs est faible par rapport aux courbes de l'âme, ceci est dû aux peaux en PVC qui se caractérisent par un renforcement, permettant de rapprocher les valeurs de la flèche dans tous les types des panneaux étudiés.

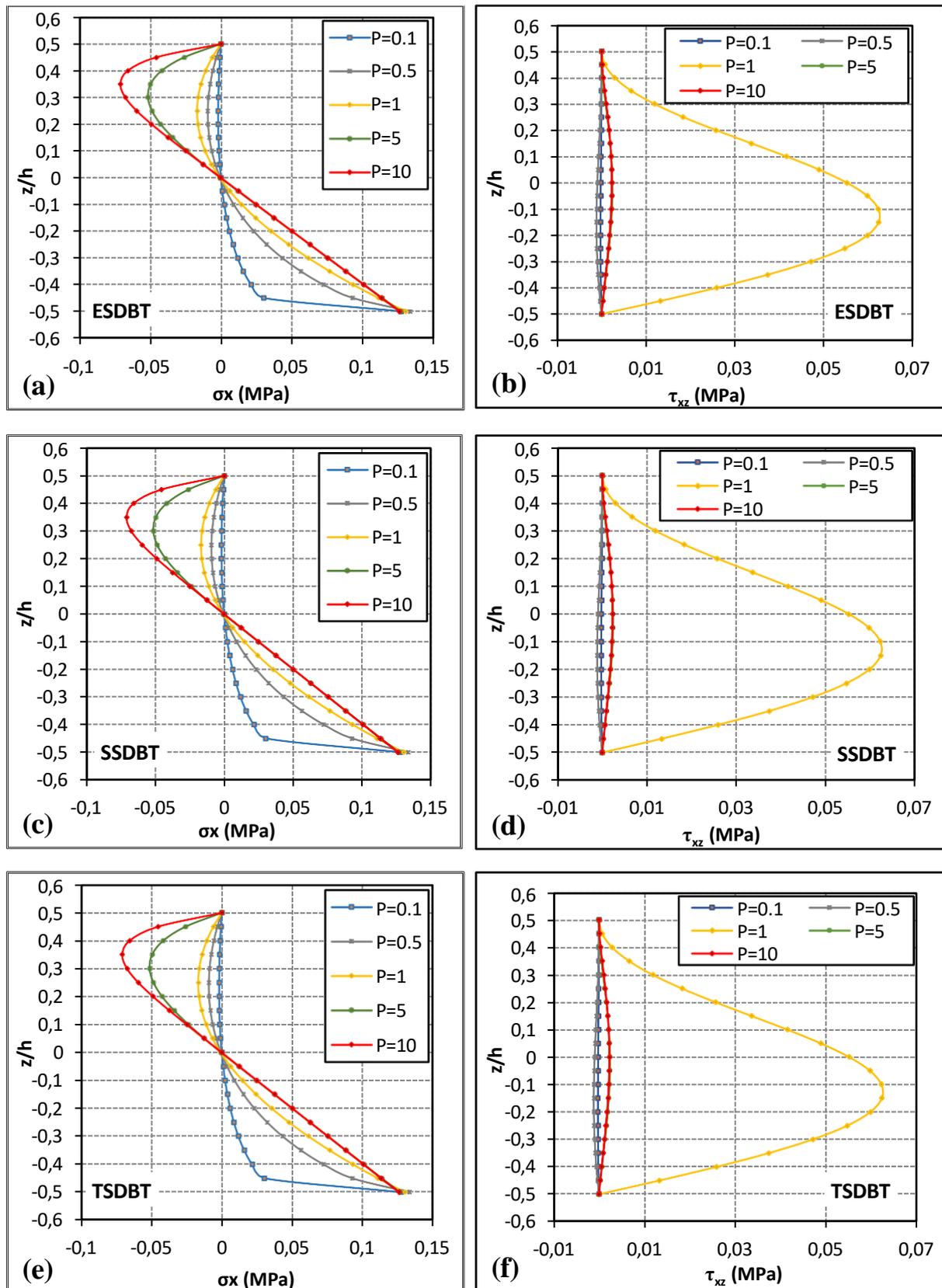
### **V.5.3. Evolution des contraintes selon le paramètre $P$ et les théories**

L'effet de la dégradation fonctionnelle sur la disposition des contraintes normales et de cisaillement à travers la hauteur des éprouvettes étudiées a été analysé. A cet effet, l'évolution des contraintes normales et de cisaillement à travers l'épaisseur de l'âme et des panneaux sandwichs est représentée sur les Figures V.6 et V.7 pour les différentes valeurs du paramètre  $P$  et des théories d'ordre élevé (ESDBT, SSDBT, TSDBT).

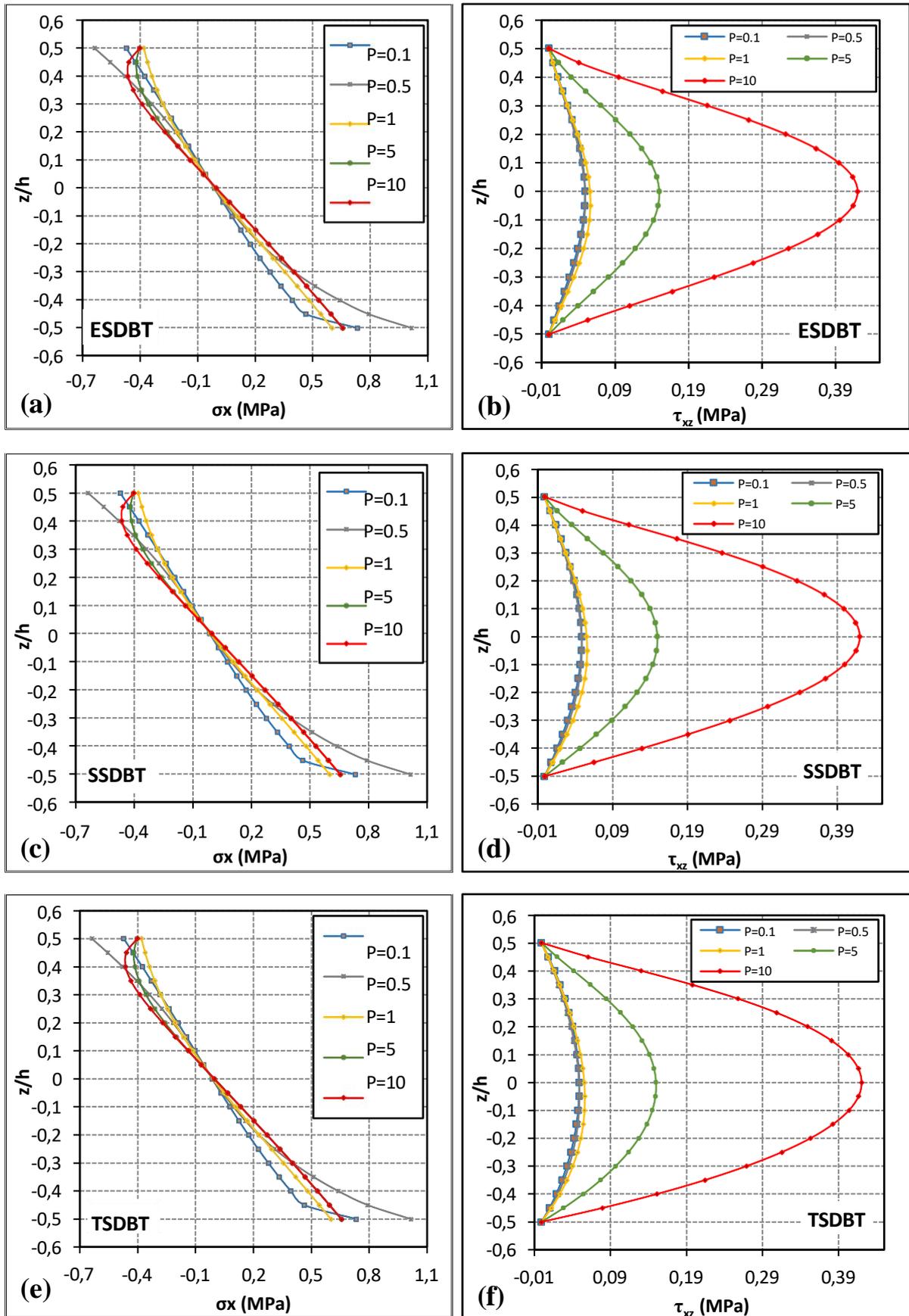
On peut observer à partir de ces figures que les résultats obtenus valident les différentes théories prises en considération. Selon la fonction de gauchissement considérée, on observe clairement que la distribution des contraintes normales et de cisaillement n'est pas linéaire pour tous les paramètres de matériau  $P$  et aussi pour les théories utilisées.

L'amplitude des contraintes est largement influencée par la transition fonctionnelle qui a été modélisée par le paramètre de matériau  $P$ , comme confirmé et souligné par [9, 144, 146]. De plus, les contraintes normales sont plus importantes que la contrainte de cisaillement dans les deux cas (âme et panneau), c'est ce que s'aligne avec une parfaite concordance avec la plupart des travaux dans la littérature [7-9, 144, 147, 148].

Les contraintes de compression normales ultimes sont situées sur la surface supérieure de l'âme (phase de liège) et les contraintes de traction ultimes sont concentrées sur la surface inférieure de l'âme (phase de plâtre). On peut observer que la distribution des contraintes de traction a été grandement améliorée lorsque le paramètre  $P$  est augmenté, comme obtenu par [7, 144, 147].



**Figure V. 6.** Distribution des contraintes normales et de cisaillement à travers l'épaisseur des âmes P-FGM : a) Contraintes normales (ESDBT) ; b) Contraintes de cisaillement (ESDBT) ; c) Contraintes normales (SSDBT) ; d) Contraintes de cisaillement (SSDBT) ; e) Contraintes normales (TSDBT) ; f) Contraintes de cisaillement (TSDBT).



**Figure V. 7.** Distribution des contraintes normales et de cisaillement à travers l'épaisseur des panneaux sandwichs

Puisque l'allure des courbes des contraintes normales et de cisaillement des trois théories sont très proches, nous résumons ces résultats des contraintes et la fraction volumique de l'âme et le panneau d'une seule théorie (ESDBT) dans le Tableau V.2 en fixant le paramètre de matériaux P à P=1 correspondant à la configuration FGM-1 de la partie expérimentale.

**Tableau V.2.** Contrainte et fraction volumique de la théorie (ESDBT) pour P = 1

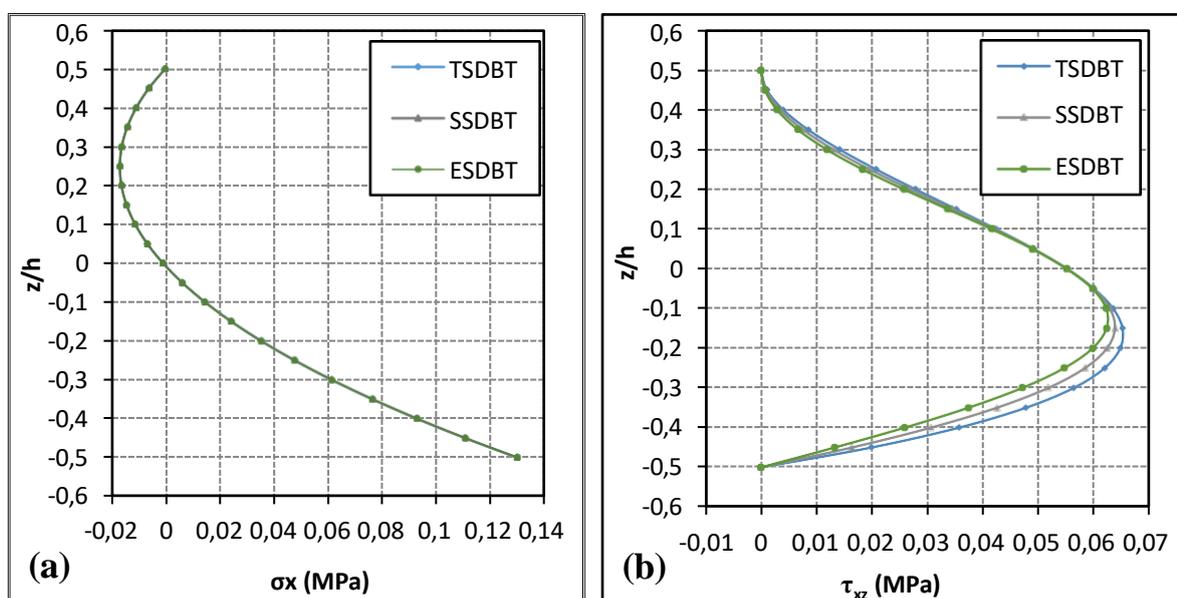
$z/h$	$E(z)_{P-FGM}$ (MPa)	$G(z)_{P-FGM}$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa) (âme)	$\tau_{xz}$ (MPa) (âme)	$\sigma_x$ (MPa) (panneau)	$\tau_{xz}$ (MPa) (panneau)
-0.5	20	10	0.13000965	0	0,60078273	0
-0.45	469	234,5	0,11077807	0,0132505	0,54055727	0,00865374
-0.4	918	459	0,09292785	0,02589831	0,47953797	0,01749578
-0.35	1367	683,5	0,0764536	0,03735517	0,41777731	0,02617337
-0.3	1816	908	0,06134801	0,04709032	0,3554407	0,03432403
-0.25	2265	1132,5	0,04760218	0,05467022	0,29280374	0,04159783
-0.2	2714	1357	0,03520617	0,05979167	0,23024246	0,04767971
-0.15	3163	1581,5	0,02414953	0,06230521	0,16821685	0,05231007
-0.1	3612	1806	0,0144219	0,06222616	0,10724866	0,05530185
-0.05	4061	2030,5	0,00601371	0,05973224	0,04789492	0,05655261
0	4510	2255	-0,0010833	0,05514772	-0,0092808	0,05605056
0.05	4959	2479,5	-0,0068756	0,04891564	-0,0637378	0,05387398
0.1	5408	2704	-0,0113676	0,04156082	-0,1149851	0,05018426
0.15	5857	2928,5	-0,0145612	0,03364715	-0,1626058	0,04521316
0.2	6306	3153	-0,016456	0,02573336	-0,2062747	0,03924548
0.25	6755	3377,5	-0,0170495	0,01833132	-0,2457709	0,03259883
0.3	7204	3602	-0,0163372	0,01187063	-0,2809823	0,02560219
0.35	7653	3826,5	-0,0143131	0,00667248	-0,3119039	0,01857508
0.4	8102	4051	-0,0109702	0,00293442	-0,3386293	0,01180898
0.45	8551	4275,5	-0,0063012	0,00072676	-0,3613376	0,00555234
0.5	9000	4500	-0,0002985	6,5872E-20	-0,3802754	1,1435E-17

Expérimentalement, cela est dû à la résistance élevée à la traction du plâtre et à la résistance à la compression élevée du liège. Lorsque la transition faible a été prise en compte, une grande quantité de plâtre a été concentrée dans la zone de traction des panneaux, ce qui a permis d'améliorer les performances de flexion des panneaux.

En ce qui concerne la distribution des contraintes de cisaillement, les valeurs finales obtenues sur les panneaux sandwichs ne correspondent pas à la position de l'axe neural causée par les peaux qui fournissent des contraintes supplémentaires. Sinon, la valeur ultime de la contrainte de cisaillement de l'âme a été enregistrée à  $z = -0,1h$ , est située dans la partie inférieure de l'âme et s'adapte à la phase de plâtre qui est plus résistant à la traction par rapport au liège et modélisée avec un module de Young plus élevé.

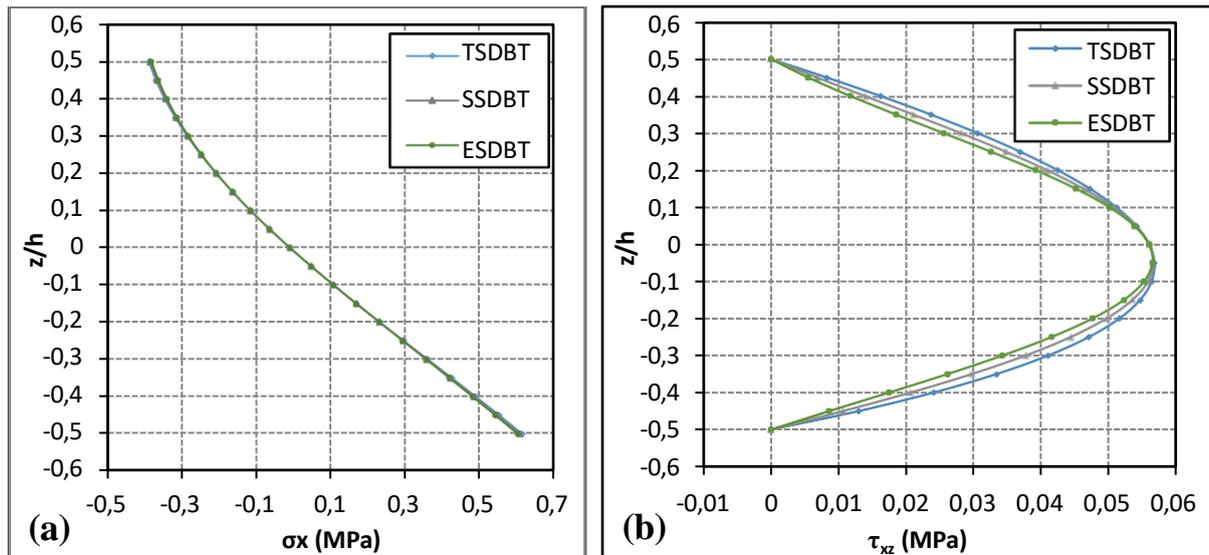
#### V.5.4. Evolution des contraintes selon les théories pour $P = 1$

Afin d'évaluer la précision des valeurs prédites, une confrontation entre les théories d'ordre élevé utilisées a été effectuée pour un paramètre de matériau constant  $P= 1$ , comme illustré dans les Figures V.8 et V.9.



**Figure V. 8.** Distribution des contraintes à travers l'âme P-FGM selon chaque théorie utilisée  
a) Contraintes normales, b) Contraintes de cisaillement

A partir de ces figures, on peut voir que toutes les courbes correspondantes aux trois théories ont la même apparence et proches les unes des autres, ce qui indique l'efficacité et la convergence entre les théories d'ordre élevé.



**Figure V. 9.** Distribution des contraintes à travers les panneaux sandwichs selon chaque théorie utilisée : a) Contraintes normales, b) Contraintes de cisaillement

On peut conclure que les courbes fournies par chaque théorie sont fortement ajustées et convergent vers les observations expérimentales effectuées. Cette convergence est due à la présence de l'effet de cisaillement qui donne une bonne approximation des contraintes de cisaillement transversales et paraboliques en fonction de l'épaisseur du noyau.

### V.5.5. Comparaison entre les flèches expérimentales et analytiques

Les Tableaux V.3 et V.4 montrent respectivement les valeurs de déformation expérimentales et analytiques obtenues sur les âmes graduées et les panneaux sandwichs en fonction du paramètre du matériau.

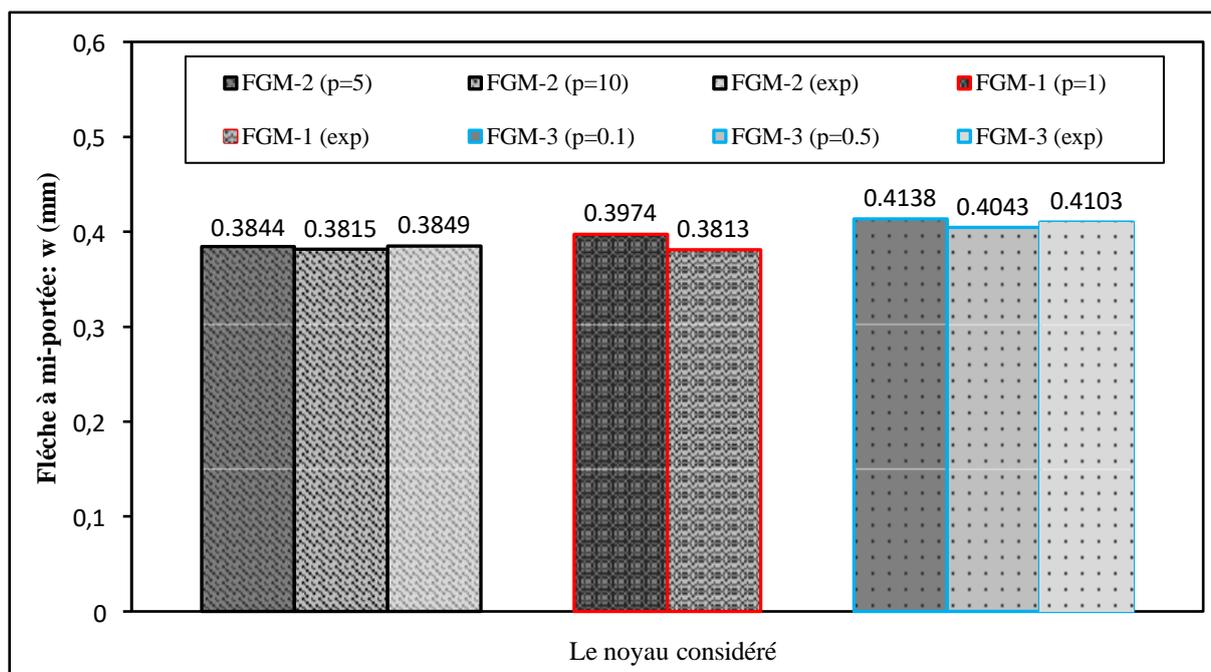
**Tableau V.3.** Comparaison entre la flèche expérimentale et analytique de l'âme

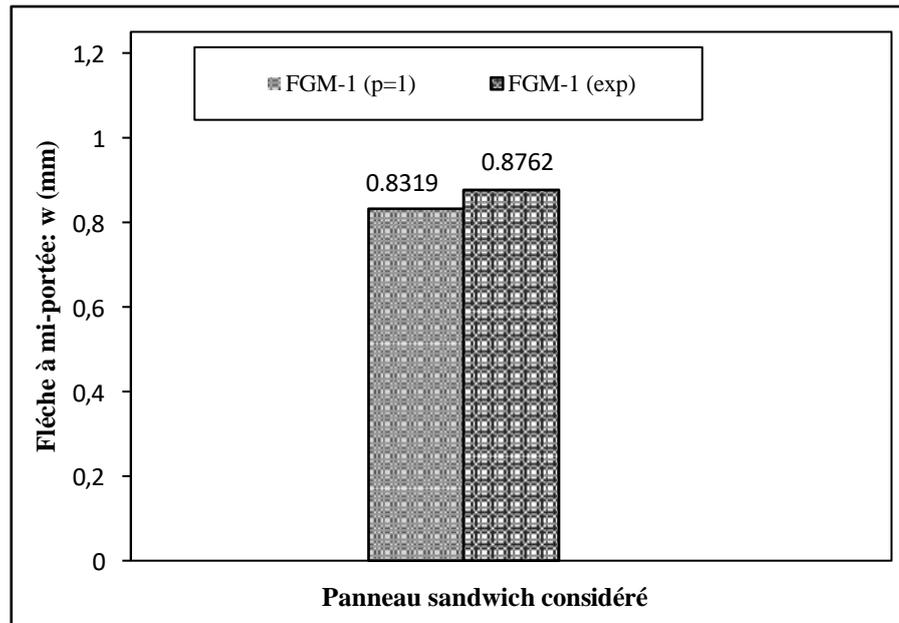
Approche utilisée	La flèche à mi- portée du noyau FGM (mm)				
	FGM-3		FGM-1	FGM-2	
	P=5	P=10	P =1	P=0.1	P=0.5
ESDBT	0.38442	0.38155	0.39741	0.41383	0.40434
SSDBT	0.38693	0.38404	0.39989	0.41668	0.40646
TSDBT	0.38109	0.37026	0.39409	0.41012	0.40165
Données expérimentales	0.3840	0.3813	0.4101	0.3840	0.3813

**Tableau V.4.** Comparaison entre la flèche expérimentale et analytique des panneaux

Approche utilisée	La flèche à mi-portée de panneau sandwich (mm)				
	FGM-3		FGM-1	FGM-2	
	P =5	P=10	P =1	P=0.1	P=0.5
ESDBT	0.82461	0.82230	0.83194	0.85268	0.86092
SSDBT	0.82926	0.82558	0.83368	0.85871	0.86578
TSDBT	0.82104	0.82071	0.83001	0.85101	0.85943
Données expérimentales	/	/	0.8762	/	/

Les différents résultats de la déformation par analyses statiques montrent que la flèche maximale du noyau dégradé est donnée par le type FGM-2 telles que 0,416 mm pour un paramètre de matériau  $P= 0,1$ , et 0,866 mm pour la flèche maximale du panneau sandwich correspondant à  $P= 0,5$ . La confrontation des résultats montre que les valeurs de flèches moyennes du noyau et du panneau de FGM-1 obtenues expérimentalement sont respectivement 0,410 et 0,876 mm. Alors que, les valeurs prédites correspondantes à  $p = 1$  sont respectivement 0,399 mm et 0,831 mm. En effet, une bonne corrélation entre les flèches expérimentales moyennes et celles analytiques pour tous les cas considérés est observée, comme le montre les histogrammes des Figures V.10 et V.11.

**Figure V.10.** Comparaison des déflexions expérimentales et analytiques des âmes.



**Figure V.11.** Comparaison des flèches expérimentales et analytiques du panneau P-FGM-1

En conclusion préliminaire, le modèle théorique prédit de manière satisfaisante la réponse élastique des âmes et panneaux en FGM conçus en termes de déplacement vertical (flèche) et les résultats expérimentaux obtenus sur la nouvelle technologie de conception valident le modèle statique proposé et met en évidence l'apport de cette conception.

#### V.5.6. Confrontation des valeurs de contrainte de cisaillement

Après la comparaison expérimentale des valeurs de flèche et de contrainte normale prédites, cette section se concentre la confrontation des contraintes de cisaillement sous flexion 3-points prédites par le modèle analytique établi avec ( $\tau$ ) et celles préconisées par la norme NF T 54-606 [119] donné par l'équation (V.27).

$$\tau = \frac{F}{b(h+h_a)} \quad (\text{V.27})$$

Dans laquelle :

F : est la charge de flexion appliquée ;

H : est l'épaisseur totale de panneau sandwich ;

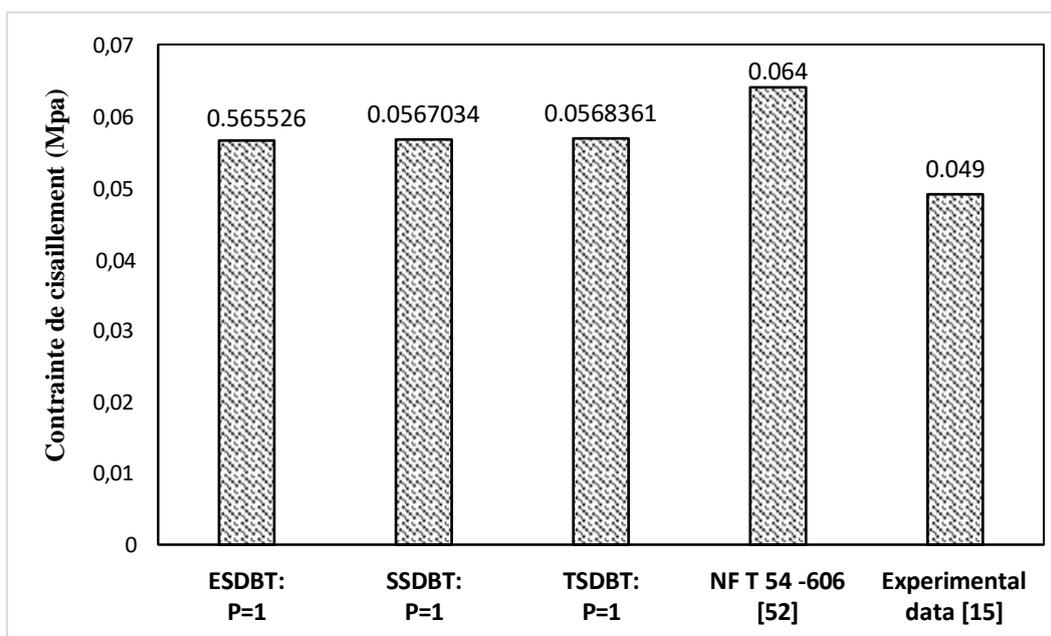
$h_a$  : est l'épaisseur du noyau;

b : est la largeur du panneau.

Le Tableau V.5 et la Figure V.12 résument les contraintes de cisaillement obtenues à partir des différentes théories par rapport aux valeurs expérimentales et préconisées par la norme.

**Tableau V. 5.** Résumé des contraintes de cisaillement obtenues par chaque approche utilisée

Approche utilisée	Contrainte de cisaillement de la poutre sandwich (Mpa)				
	FGM-3		FGM-1	FGM-2	
	P=5	P=10	P=1	P=0.1	P=0.5
ESDBT	0.1501171	0.4196109	0.0565526	0.049364	0.0495301
SSDBT	0.1501172	0.4196116	0.0567034	0.0490491	0.0496622
TSDBT	0.1501172	0.4196116	0.0568361	0.049364	0.0497784
NF T 54-606 [119]	/	/	0.064	/	/
Données expérimentales	/	/	0.049	/	/

**Fig. 12.** Comparaison des valeurs de contrainte de cisaillement de panneau sandwich avec la norme NF 54-606 [119] et les données expérimentales.

On peut voir que les contraintes de cisaillement prédites à l'aide de la formulation théorique sont comparables à celles évaluées à l'aide de l'équation V.27. La contrainte de cisaillement ultime prédite par le modèle analytique est de l'ordre de 0,056 Mpa pour le panneau P-FGM-1 conforme à un paramètre de matériau P=1, cette valeur est favorable avec les contraintes de l'ordre de 0,064 Mpa préconisés par la norme NF et satisfaisante corrélée à la contrainte de 0,049 Mpa obtenus expérimentalement.

## V.6. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de combiner la réponse en flexion des panneaux sandwichs et l'âme P-FGM modélisées avec différentes lois de variation des matériaux aux résultats expérimentaux. À cette fine, une modélisation analytique du comportement à la flexion des panneaux sandwichs en utilisant les théories d'ordre élevé a été réalisée. En effet, les valeurs de flèche et de contrainte prédites selon tous les cas considérés sont corrélées avec une bonne concordance avec les valeurs expérimentales et préconisées.

En outre, le modèle analytique proposé prédit de manière satisfaisante la réponse élastique de flexion et de cisaillement des âmes et panneaux conçus pour les FGM. D'autre part, une bonne corrélation entre les déformations expérimentales moyennes et les contraintes de cisaillement par rapport aux contraintes prédites pour tous les cas considérés a été soulignée. Une telle analyse révèle l'impact élevé de la dégradation fonctionnelle sur l'amplitude des contraintes normales et de cisaillement fournie par la littérature scientifique.

Sachant que l'âme d'une structure sandwich sous flexion agit principalement en cisaillement, les valeurs de contrainte de cisaillement prédites par le modèle proposé ont été favorablement confrontées aux lois préconisées par la norme de conception utilisée pour concevoir les panneaux sandwich à âme en FGM.

Bien que la présente étude révèle un outil analytique validé pour prédire la flexion élastique et la réponse au cisaillement des panneaux étudiées, d'autres recherches restent ouvertes et peuvent constituer ce travail analytique. En conséquence, il faut compléter et étendre la phase de flexion élastique par une analyse non linéaire basée sur la simulation par éléments finis afin de tirer des conclusions complètes sur l'intérêt des panneaux sandwichs à base de l'âme en FGM proposés.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Actuellement, la réduction de la consommation d'énergie, grâce à l'utilisation de matériaux naturels abondants et recyclables pour une meilleure isolation thermique, capacité de portance et rigidité représente un domaine de recherche important. À cet égard, ce projet de thèse a pour contribution, l'étude expérimentale et analytique des nouveaux panneaux sandwichs à base d'une âme fonctionnellement graduée (FGM) conçue d'une matrice plâtre et des granulats de liège et renforcés par des semelles en PVC. L'originalité de ce travail est d'associer deux matériaux compatibles disposés progressivement et continuellement sur la hauteur de l'âme afin d'améliorer la réponse thermomécanique des structures et des constructions. Les agrégats de liège et la dégradation fonctionnelle ont fourni une isolation thermique élevée, tandis que les plaques PVC ont protégé les matériaux de base et augmentent la capacité portante des panneaux.

L'objectif de l'étude expérimentale réalisée est de mettre en évidence le comportement mécanique, physique et thermique de ces nouveaux panneaux sandwichs. En effet, les essais de laboratoire effectués sur les différentes éprouvettes permettent de mieux comprendre le comportement des panneaux proposés. Afin de compléter les objectifs tracés sur ces panneaux conçus, leur réponse en flexion est modélisée avec différentes lois de variation des matériaux est combinée aux résultats expérimentaux. En effet, les valeurs de déplacement et de contrainte prédites selon tous les cas considérés sont positivement corrélées avec un bon accord par rapport aux mesures expérimentales. De plus, l'influence de la transition fonctionnelle graduée du noyau a été mise en évidence par des analyses structurales et microstructurales. Les résultats prometteurs obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le matériau de construction FGM conçu appartient aux nouveaux matériaux innovants qui mettent en évidence les critères des exigences environnementales mondiales. Par conséquent, les éléments de panneaux fabriqués peuvent être destinés à des applications d'isolation comme murs de séparation, améliorant ainsi les propriétés thermiques et mécaniques.
- Les tests au laboratoire réalisés sur les différentes éprouvettes ont permis de mieux comprendre la contribution à la résistance des matières premières utilisées. En effet, les différents résultats obtenus montrent une nette diminution du poids propre par rapport à des structures similaires en mortier ou en béton, ce qui confirme l'efficacité de cette nouvelle conception en termes de légèreté et de facilité de mise en forme. En outre, le comportement mécanique global et local des panneaux sandwichs sous compression et flexion sont en accord avec les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature ;

- Les résultats de la caractérisation physique ont montré une amélioration en termes de densité apparente et de porosité. Il est à souligner que la dégradation fonctionnelle linéaire conduisant à une transition de phase uniforme a permis de diminuer significativement les dispersions matérielles et la porosité ;
- La disposition microstructurale du noyau FGM dépend significativement du mode de dégradation fonctionnelle. En effet, la transition linéaire correspondant à une valeur unitaire du paramètre du matériau ( $p=1$ ) assure une bonne continuité et adhérence entre la matrice plâtre et les granulats du liège ;
- La transition expérimentale de la phase plâtre vers la phase liège a été modélisée analytiquement à travers le paramètre matériel de la fonction de loi de puissance FGM en utilisant les théories d'ordre élevé. Une telle approche révèle l'impact important de la dégradation fonctionnelle sur l'amplitude des contraintes normales et de cisaillement fournies par la littérature scientifique ;
- Le modèle analytique proposé prédit de manière satisfaisante la réponse élastique à la flexion et au cisaillement des panneaux sandwichs conçus. D'autre part, une bonne corrélation entre les flèches expérimentales moyennes et les contraintes de cisaillement par rapport aux contraintes prédites par le modèle et la norme de conception ;
- Connaissant que l'âme d'une structure sandwich sous flexion agit principalement en cisaillement, les valeurs de contrainte de cisaillement ultimes prédites sont favorablement confrontées aux lois préconisées par la norme en vigueur ;

L'analyse critique et objective des différents résultats de ces travaux de recherche ouvrent la voie à diverses perspectives d'étude afin de compléter la présente contribution par amples compléments et approches. Par conséquent, sur le plan expérimental il serait intéressant de :

- Varier l'épaisseur et le diamètre des granulats de liège, afin de déterminer leur influence sur le comportement des éprouvettes façonnées, afin d'améliorer la capacité d'absorption d'eau et la compacité ;
- Étudier le comportement phonique et acoustique des panneaux fabriqués pour bien comprendre les fonction d'isolation et de service de la nouvelle technologie proposée ;
- En ce qui concerne les essais au laboratoire, des mesures de cisaillement et de traction sont nécessaires pour obtenir la réponse mécanique complète, et notamment d'améliorer la qualité de l'interface âme-semelle ;
- Pris en considération l'effet thermique sur la rigidité des panneaux sandwichs fabriqués.

Bien que la partie théorique révèle un outil analytique validé pour prédire la réponse élastique à la flexion et au cisaillement des structures sandwiches étudiées, d'autres approches restent ouvertes et peuvent constituer un suivi de ces travaux. En conséquence, il faudra compléter les modélisations par les recommandations suivantes :

- Tenir compte des déformations dues aux dilatations thermiques dans l'évaluation et la modélisation de la variation de rigidité des structures étudiées ;
- Intégrer dans les modélisations, les coefficients d'adhérence âme-semelle afin prédire les ruptures par décollement qui sont considérées comme le mode de ruine le plus fréquent dans les essais mécaniques ;
- Introduire des études statistiques afin de tenir compte des incertitudes et des erreurs de conceptions liées aux variations des propriétés géométriques et matérielles des éléments qui constituent les panneaux étudiés ;
- Mener une analyse non linéaire basée sur la simulation par éléments finis afin de tirer des conclusions complètes sur l'intérêt des panneaux sandwich à base d'un noyau en FGM.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Si Salem, F. Taouche-Kheloui, K. Ait Tahar. Experimental investigation on the bending and buckling behavior of bio-based core innovative sandwich panels. *International journal of structural integrity* 12 (2020) 226-240.
- [2] S. Medjmadj, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials* 344 (2022) 128257.
- [3] X. Zhang, C. Xu, W. Li and Z. Su. Study on the bending and shear properties of quasi-honeycomb sandwich structures considering the variable-density core design. *Composites Structures* 324 (2023) 117517.
- [4] M. Kazemi. Experimental analysis of sandwich composite beams under three-point bending with an emphasis on the layering effects of foam core / *Structures* 29 (2021) 383-391.
- [5] N. Lakreb et al. Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates. *Materials and Design* 65 (2015) 627–636.
- [6] K. Arslan, R. Gunes. Experimental damage evaluation of honeycomb sandwich structures with Al/B4C FGM face plates under high velocity impact loads. *Composite Structures* 202 (2018) 304–312.
- [7] A. Garg, H.D. Chalak, A. Chakrabarti. Comparative study on the bending of sandwich FGM beams made up of different material variation laws using refined layer wise theory. *Mechanics of Materials* 151 (2020) 103634.
- [8] Sanjay Singh Tomar and M. Talha. Influence of material uncertainties on vibration and bending behaviour of skewed sandwich FGM plates. *Composites Part B: Engineering* 163 (2019) 779-793.
- [9] B.M. Shinde, A.S. Sayyad. A new higher order shear and normal deformation theory for FGM sandwich shells. *Composite Structures* 280 (2022) 114865.
- [10] Pham Van Vinh. Static bending analysis of functionally graded sandwich beams using a novel mixed beam element based on first-order shear deformation theory. *Forces in Mechanics* 4 (2021) 100039.
- [11] Everson Kandare, Piyanuch Luangtriratana, and Baljinder K. Kandola. Fire reaction properties of flax epoxy laminates and their balsa core sandwich composites with or without fire protection. *Composites Part B* 56 (2014) 602–610.
- [12] Xiangmeng Cheng, Kai Wei, Rujie He, Yongmao Pei, and Daining Fang. The equivalent thermal conductivity of lattice core sandwich structure a predictive model. *Applied Thermal Engineering*. 93 (2016) 236–243.
- [13] P. Aumjaud, J.E. Fieldsend, M. Boucher, K.E. Evans, and C.W. Smith. Multi objective optimization of viscoelastic damping inserts in honeycomb sandwich structures. *Composite Structures* 132 (2015) 451–463.

- [14] J.A. Kepler. Simple stiffness tailoring of balsa sandwich core material. *Composites Science and Technology* 71(2011) 46–51.
- [15] Michael Osei-Antwi, Julia De Castro, Anastasios P Vassilopoulos, and Thomas Keller. Shear mechanical characterization of balsa wood as core material of composite sandwich panels. *Construction and Building Materials* 41 (2013) 231–238.
- [16] Joël Galos, Raj Das Michael P. Sutcliffe Adrian P. Mouritz. Review of balsa core sandwich composite structures. *Matériaux & Design* 221 (2022)111013.
- [17] Niloufar Vahedi, Carlos Tiago, Anastasios. Vassilopoulos, Joao R. Correia, Thomas Keller. Thermophysical properties of balsa wood used as core of sandwich composite bridge decks exposed to external fire. *Construction and Building Materials* 329 (2022) 127164.
- [18] Osvaldo Castro, José M Silva, Tessaleno Devezas, Arlindo Silva, and Luís Gil. Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures. *Materials and Design* 31(2010) 425–432.
- [19] I. Alcântara, F. Teixeira-Dias, and M. Paulino. Cork composites for the absorption of impact energy. *Composite Structures* 95 (2013)16–27.
- [20] I. Ivañez, S. Sánchez-Saez, S.K. Garcia-Castillo,E. Barbero, A. Amaro,P.N.B. Reis.High-speed. impact behaviour of damaged sandwich plates with agglomerated cork core. *Structures composites* 248(2020) 112520.
- [21] P. Santos, N. Bouhemame, P.N.B. Reis, A. Bezazi. of bio-based sandwich panels with cork core. *Procedia Structural Integrity* 37 (2022) 833–840.
- [22] Koorosh Delavari and Hadi Dabiryan. Effect of Z-fiber orientation on the bending behavior of sandwich-structured composite: Numerical and experimental study. *Structures composites* 256 (2021)113140.
- [23] Jiayi Liu, Linling Xiang and Tao Kan. The effect of temperature on the bending properties and failure mechanism of composite truss core sandwich structures. *Composites Partie A: 79* (2015) 146-154.
- [24] Shuguang Li, Yanxia Feng, Jiankun Qin et al. Bending Performance of a Jute Fiber and Epoxy Resin Composite Sandwich Structure with a Bi-directional Corrugated Truss Core. *Fibers and polymers* 20(2019) 2166-2174.
- [25] Labans Edgars, Zudrags Kaspars, Kalnins Kaspars. Structural performance of wood based sandwich panels in four point bending. *Procedia Engineering* 172 ( 2017 ) 628 – 633.
- [26] Costanzo Bellini, Rosario Borrelli, Francesco Di Caprio, Vittorio Di Coccoa, Stefania Franchitti, Francesco Iacoviello, Larisa Patricia Mocanu, Luca Sorrentino. Hybrid structures in Titanium-Lattice/FRP: effect of skins material on bending characteristics. *Procedia Structural Integrity* 41 (2022) 3–8.
- [27] Chatdanai Boonruanga, Angkrich Theppawong. Impact property of TiAl3–Ti laminated composite fabricated from metallic sandwich. *Composite Structures* 229(2019) 111379.

- [28] P. Resende Oliveira, T. Hallak Panzera, Rodrigo Teixeira Freire Fabrizio Scarpa. Structures sandwich durables fabriquées à partir de bouchons de bouteilles et de peaux en aluminium : une approche statistique. *Thin-Walled Structures* 130 (2018) 362-37.
- [29] H.N.G. Wadley ,M.R. O'Masta, K.P. Dharmasena, B.G. Compton, E.A. Gamble, F.W. Zok. Effect of core topology on projectile penetration in hybrid aluminum/alumina sandwich structures. *International Journal of Impact Engineering* 62 (2013) 99-113.
- [30] H. Roshani, M. Yousefi, N. Gharaei-Moghaddam, S. Hashem Khatibi. Flexural performance of steel-concrete-steel sandwich beams with lightweight fiber-reinforced concrete and corrugated-strip connectors: Experimental tests and numerical modeling. *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023) e02138.
- [31] Jiachuan Yan, Wensong Zhou, Xin Zhang and Youzhu Lin. Interface monitoring of steel-concrete-steel sandwich structures using piezoelectric transducers. *Nuclear Engineering and Technology* 51 (2019) 1132-1141.
- [32] Mohamed Harhash, Heinz Palkowski. Incremental sheet forming of steel/polymer/steel sandwich composites. *Journal of materials research and technology* 13 (2021) 417 -430.
- [33] Yu-Qin Mao, Guang-He Dong, Wei-Bin Zhu, Yuan-Qing Li, Pei Huang and Shao-Yun Fu .Novel sandwich structured glass fiber Cloth/Poly(ethylene oxide)-MXene composite electrolyte. *Nano Materials Science* (2023) 2589-9651.
- [34] W. Ashraf, M.R. Ishak, M.Y.M. Zuhri, N. Yidris, A.M. Ya'acob. Effect on mechanical properties by partial replacement of the glass with alkali-treated flax fiber in composite facesheet of sandwich structure. *Journal of materials research and technology* 13 (2021) 89 -98.
- [35] Huiyuan Shi, Xuan Wei, Hai Fang, Chen Yang, Baijian Tang. Shear behavior of multi-axial fiber reinforced composite sandwich structures with pultruded profile core. *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022) e01652.
- [36] Y. Guo, L. Chen, C. Zhu, H. Liu, X. Pan, B. Du, W. Zhao, W. Li, Fabrication and axial compression test of thermoplastic composite cylindrical sandwich structures with hierarchical honeycomb core, *Composite Structures* 275 (2021) 114453.
- [37] Ayse Cagla Balabana, Meltem Evren Toygar. Investigation into Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Novel Sandwich Composite Material with Carbon Fibre / Epoxy Facesheets and PVC Foam Core. *Procedia Structural Integrity* 42 (2022) 284–291.
- [38] Mufidatul Ula et al. Vibration characteristics investigation of sandwich composite materials of uni-directional and twill carbon fibers. *Measurement: Sensors* 18 (2021) 100230.
- [39] Yuntong Du, Thomas Keller dYifeng Zhu , Pengyu Wei ,Yan Wang ,Jian Xiong. Mechanical behavior and failure of a carbon fiber reinforced sandwich structure inspired by curved fold origami. *Composite Structures* 316 (2023)117033.

- [40] J.C. Farias-Aguilar, et al. Evaluation of the ballistic protection level of glassfiber reinforced polyamide-aramid fabric sandwich composite panels. *Journal of materials research and technology* 12(2021)1606 -1614.
- [41] Yuelin Zhang , Xuchen Liu ,Yi Zhou , Yanlong Shi. Uniaxial compression performance of an aramid and aluminum honeycomb sandwich structures. *Ocean Engineering* 270(2023) 113676.
- [42] JIN. Z. H, BATRA. R. C. (1996), *Journal of Thermal Stresses* 19, 317–339.
- [43] Forest Products Laboratory. « Wood handbook - Wood as an engineering material». Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, (1999).
- [44] Lakreb N, Umut S, Toussaint E et al. Physical properties and thermal conductivity of cork-based sandwich panels for building insulation. *Construction and Building Materials* 368 (2023) 130420.
- [45] Engin M. R., “Characteristics of Innovative 3-D FRP Sandwich Panels”. Ph.D thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2005.
- [46] Jin Dai, Hahn H., Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding. *Composite structures* 61(2003)247-253.
- [47] ÖCHSNER, A., MURCH, G.E. ET DE LEMOS, M.J.S. (2008), "Cellular and Porous Materials", WILEY-VCH, 398-417.
- [48] S.K. Sahu, N.D. Badgayan, S. Samanta, D. Sahu, P.S.R. Sreekanth. Influence of cell size on out of plane stiffness and in-plane compliance character of the sandwich beam made with tunable PCTPE nylon honeycomb core and hybrid polymer nanocomposite skin. *International journal of mechanical sciences* 148 (2018) 284–292.
- [49] Łukasz Pyrzowski, Bartosz Sobczyk. Local and global response of sandwich beams made of GFRP facings and PET foam core in three point bending test. *Composite Structures* 241 (2020) 112122.
- [50] T.Arciszewski, J.Cornell. Bio-inspiration: Learning Creative Design Principia. *Intelligent computing in Engineering and Architecture* 4200(2006) 32-53.
- [51] C.Ortiz, M.C.Boyce. Bioinspired Structural Materials. *Science*, 319(5866):1053-1054(2008).
- [52] S.Weiner, L.Addadi. Design strategies in mineralized biological materials. *Journal of Materials Chemistry*, 7(1997) 689-702.
- [53] K.S.TAI, H.J.QI, C.ORTIZ. Effect of mineral content on the nanoindentation properties and nanoscale deformation mechanisms of bovine tibial cortical bone. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16 (2005) 947-959.
- [54] F.Nogata, H.Takahashi. Intelligent functionally graded material: Bamboo. *Composite Engineering*, 5 (1995)743-751.

- [55] C. Mattheck. The evolution of notch shape optimization from complex to simple. *Engineering Fracture Mechanics* 73(2006)1732-1742.
- [56] M.Koizumi. FGM activities in Japan. *Composites Part B*, 28 (1997) 1-4.
- [57] A. Karakoti, S. Pandey and V.R. Kar. Nonlinear transient analysis of porous P-FGM and S-FGM sandwich plates and shell panels under blast loading and thermal environment. *Thin-Walled Structures* 173 (2022) 108985.
- [58] W. Zhao et al. Nonlinear axisymmetric buckling analysis of the FGM sandwich shallow spherical shells under thermomechanical loads. *European Journal of Mechanics / A Solids* 97 (2023) 104841.
- [59] Garg A, Belarbi M.O, Chalak H.D et al. A review of the analysis of sandwich FGM structures. *Composite Structures* 258(2021) 113427.
- [60] S. Ait Taleb, A. Si Salem, K. Ait Tahar. Behaviour of a new graded beam reinforced with externally bonded composite sheets: theoretical and experimental studies. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 21(2016) 1171–1185.
- [61] M. Touratier. An efficient standard plate theory, *International Journal of Engineering Science* 29 (8) (1991) 901–916.
- [62] M. Karama, K.S. Afaq, S. Mistou. Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite structures model with transverse shear stress continuity. *International Journal of Solids Structures* 40 (6) (2003) 1525-1546.
- [63] J.N. Reddy, A general non-linear third order theory of plates with moderate thickness. *International Journal of Non-linear Mechanics* 25 (6) (1990) 677–686.
- [64] BACHIR BOUIADJRA RABBAB, « Contribution à l'Etude de la Stabilité des Plaques Epaissees en Composite sur Fondations Elastiques », Thèse de doctorat LMD 3eme cycle, université de d'Oran, Algérie ; 2015.
- [65] S. Medjmadj, S. Ait Taleb and A. Si Salem. Analytical Modeling of the Bending Behavior of Plaster/Cork Functionally Graded Core Sandwich Beams: Analysis and Experimental Validation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* (2023) <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00732-z>
- [66] DELALE. F, ERDOGAN. F. (1983), “The crack problem for a non homogeneous plane”. *ASME « Journal of Applied Mechanics »*; 50 (3): 609-614.
- [67] KADDOURI Djamel Eddine, « Analyse des effets de l'amplitude et température sur le comportement non linéaire d'une plaque annulaire sectorielle à gradient fonctionnel », Thèse de doctorat LMD 3eme cycle, université de Abou Bekr Belkaid, Algérie ; 2013.
- [68] Efstathios E.Theotokoglou and Dimitrios A. Mallios. Computational analysis of a sandwich beam with FGM face sheets under flexural loading. *Procedia Structural Integrity* 41 (2022) 361–371.

- [69] M. Murat Aydin and K. Apalak, Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact. Materials Science and Engineering: 671 (2016) 107-117.
- [70] Nejc Novak et al, Impact and blast resistance of uniform and graded sandwich panels with TPMS cellular structures. Composite Structures 300 (2022) 116174.
- [71] Pham Minh Vuong and Nguyen Dinh Duc. Nonlinear buckling and post-buckling behavior of shear deformable sandwich toroidal shell segments with functionally graded core subjected to axial compression and thermal loads. Aerospace Science and Technology 106 (2020) 106084.
- [72] J.N. Reddy et al. A higher-order shear deformation theory of laminated elastic shells. International Journal of Engineering Science 23 (1985) 319-330.
- [73] Jörg Hohe et al, Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications. Materials & Design 39 (2012) 20-32.
- [74] L. Jing, F. Yang and L.M. Zhao., Perforation resistance of sandwich panels with layered gradient metallic foam cores. Composite Structures 171 (2017) 217–226.
- [75] A. Si Salem et al. Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP. Frontiers of Structural and Civil Engineering 9 No. 2, (2015).
- [76] A. Si Salem, S. Ait Taleb and K. Ait tahar. A finite element approach for predicting the flexural response of light weight FRP-Concrete beams under cyclic loading, Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (2017) 355-363, DOI 10.1007/978-3-319-41468-3\_29.
- [77] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double-confined with FRP-jacket. Procedia Engineering, 114(C) (2015) 165-172.
- [78] Hamouda JAFFEL. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. PhD thesis, École Polytechnique de Paris (2006).
- [79] M. Lamrani, N. Laaroussi, A. Khabbazi, M. Khalfaoui, M. Garoum, and A. Feiz. Experimental study of thermal properties of a new ecological building material based on peanut shells and plaster. Case Studies in Construction Materials 7(2017) 294–304.
- [80] S. Bouzit, F. Merli, M. Sonebi, C. Buratti et al. Gypsum-plasters mixed with polystyrene balls for building insulation: Experimental characterization and energy performance. Construction and Building Materials 283(2021) 122625.
- [81] Céline Martias. Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie. PhD thesis, Université de Toulon et du Var, (2011).
- [82] SATTLER H. The importance of porosity for the properties of hardened gypsum plaster products. ZKG International, (1997) 54–62.

- [83] COQUARD P., Résistance mécanique des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 1992. 100 p.
- [84] BADENS E. Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques de plâtre pris pur et additivé. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 1998. P110.
- [85] Daniel DALIGANG. Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, 'Traité Construction'(C910):24 p., jan 2002.
- [86] Les Industries du plâtre. La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. <http://www.lesindustriesduplatre.org> , consulté le 21/09/2023 à 19h56.
- [87] VIGNES J.-L., ESSADDAM H, and DALIGAND. Une vie de plâtre : Expériences de chimie sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un matériaux AVG. Bulletin de l'Union des Physiciens N° 790, pages 145–164.
- [88] J. Rives *et al.* Integrated environmental analysis of the main cork products in Southern Europe (Catalonia – Spain) *Journal of Cleaner Production* 51 (2013) 289-298.
- [89] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* 83(2016)98–112.
- [90] J. Sierra-Pérez, S. García-Pérez , S. Blanc, J. Boschmonart-Rives , X. Gabarrell . The use of forest-based materials for the efficient energy of cities: Environmental and economic implications of cork as insulation material. *Sustainable Cities and Society* Volume 37, (2018) 628-636.
- [91] S. Lamara. Elaboration et caractérisation d'un composite à base de plâtre renforcé par des fibres végétales. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2016.
- [92] Pereira H. *Cork: biology, production and uses*. Amsterdam: Elsevier; 2007.
- [93] Pereira H, Rosa ME, Fortes MA. The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. *IAWA Bulletin* n.s 8(3) (1987)213–8.
- [94] Gibson LJ, Easterling KE, Ashby MF. The structure and mechanics of cork. *Proceedings of the Royal Society London A* 377 (1981) 99–117.
- [95] H. Pereira, E. Ferreira. Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates. *Materials Science Engineering*, A111 (1989) 217–225.
- [96] B. Marques *et al.* Mechanical, thermal and acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and expanded cork by-products. *Construction and Building Materials* 239 (2020) 117851.
- [97] J. Jeon *et al.* Evaluation of thermal properties and acetaldehyde adsorption performance of sustainable composites using waste wood and biochar. *Environmental Research* 196 (2021) 110910.

- [98] B. Cherki, B. Remy, A. Khabbazi, Y. Jannot, D. Baillis. Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. *Construction and Building Materials* 54(2014) 202-209.
- [99] S. Dias *et al.* Experimental study of expanded cork agglomerate blocks–Compressive creep behavior and dynamic performance. *Construction and Building Materials* 181 (2018) 551-564.
- [100] J. Walsh, H.-I. Kim, J. Suhr, Low velocity impact resistance and energy absorption of environmentally friendly expanded cork core-carbon fiber sandwich Composites. *Composites part A* 101 (2017) 290–296.
- [101] M.E. Rosa, M.A. Fortes. Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science* 23(3) (1988) 879–85.
- [102] Relvas M.C., Cork boiling system consists of controlled water feed not impairing the physical and organoleptic properties of the product», PT102334, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisbon, (2002).
- [103] Rosa M.E., Pereira H, Fortes M.A. «Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork». *Wood and Fiber Science* 22(2) (1990)149–64.
- [104] Gil L., «Cork powder waste: An overview». *Biomass and Bioenergy*, 13: 59-61, (1997).
- [105] Silva S.P., Sabino M.A., Fernandes E.M., Correlo V. M., Boesel L.F., Reis R.L. Cork: Properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(2005) 345-365.
- [106] Pereira H., «Density and moisture relations. Dans: Cork». 1ère Ed., Elsevier Science B.V., Amsterdam. 187-205, (2007e).
- [107] P.N.B. Reis, M.P. Silva, P. Santos, J.M. Parente, S. Valvez, A. Bezazi, Mechanical performance of an optimized cork agglomerate core-glass fibre sandwich panel, *Composite Structures* 245 (2020) 112375.
- [108] S. Sanchez-Saez, S.K. García-Castillo, E. Barbero, J. Cirne, Dynamic crushing behaviour of agglomerated cork. *Materials Design* 65 (2015) 743–748.
- [109] S. Sanchez-Saez, E. Barbero, J. Cirne, Experimental study of agglomerated-cork cored structures subjected to ballistic impacts, *Materials Letters* 65 (14) (2011) 2152–2154.
- [110] A. Tadeu, P. Santos. Assessing the effect of a barrier between two rooms subjected to low frequency sound using the boundary element method. *Applied Acoustics* 64(2003)287–310.
- [111] SHI Feifei. Impact behavior of functionally graded multi-layered sheet metals. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, (2015).
- [112] J. Smardzewski. Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells. *Materials and Design* 183 (2019) 108159.

- [113] F. Hernandez-Olivares, U.M.R Bollatib, M. del Rioc, Parga-Landad B. Development of cork/gypsum composites for building Applications. *Construction and Building Materials* 13 (1999)179-186.
- [114] S. Sair et al. Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation. *Composites Communications* 16 (2019) 20–24.
- [115] EN 13279-1 - Liants-plâtres et enduits à base de plâtre pour le bâtiment - Partie 1 : définitions et exigences. AFNOR 91.100.10 Ciment. Plâtre. Chaux. Mortier (2008) p 22.
- [116] NF EN 196-1. Cement test methods – Part 1: determination of strengths. September (2016).
- [117] NF EN1946-2. Thermal performance of building products and components – Specific criteria for the evaluation of laboratories measuring thermal transmission properties – Part 2: measurements according to the guarded hot plate method. July 1999.
- [118] NF T 54-604. Plastics based sandwich structures. Longitudinal compression test without or with buckling. Afnor 86618. December 1986.
- [119] NF T 54-606. Plastics based sandwich structures. Bending test. Afnor 87461. Octobre 1987.
- [120] NF EN ISO 527-1. Plastics – determination of the tensile properties- September 2019.
- [121] NF P 18-554. Aggregates – Measurements of densities, porosity, absorption coefficient and water content of gravel and pebble. December 1990.
- [122] NF P 18-555. Aggregates. Density measurements, absorption coefficient and water content of sands. April 1980.
- [123] NF P 74-203/DTU 59-3 Building works – Floor painting – Part 1: technical specifications. Afnor 87.020. November 2000.
- [124] NF P18-459. Tests for hardened concrete – Porosity and density test. Afnor 91.100.30. Mars 2010.
- [125] NF EN 1015-18 Methods of test for masonry mortars – Part 18: Determination of water absorption coefficient by capillarity of hardened mortar (2003).
- [126] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. Experimental and theoretical modeling coupled to a reliability approach for flexural failure prediction in hybrid composite beams. *Asian Journal of Civil Engineering* 21(2020) 495–504.
- [127] S. Farahmand et al. Evaluating the elastic properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al FGMs by longitudinal and transverse ultrasonic bulk waves velocity features. *Ceramics International* 47(2021) 24906–24915.
- [128] K. Ananta Bhaskararao, G. Ranga Janardhana. Microstructure, hardness and flexural strength of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FGMs by pressure-less sintering with different cooling rates. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 60(2021) 255–265.

- [129] S. Farahmand, A.H Monazzah, M.H Soorgee. The fabrication of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al FGM by SPS under different sintering temperatures: Microstructural evaluation and bending behavior. *Ceramics International* 45(2019) 22775–22782.
- [130] T. Boch Chartier, M. Huttepain. Tape casting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> laminated Composites. *Journal of the American Ceramic Society* 69 (1986) 191-192.
- [131] NF T 54-602. Plastics based sandwich structures. Perpendicular compression test. Afnor 83647. 1983.
- [132] R. Ferreira, D. Pereira, A. Gago, J. Proença, Experimental characterization of cork agglomerate core sandwich panels for wall assemblies in buildings. *Building Engineering* 5 (2016) 194–210.
- [133] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz, K. Chandra shenkara, Manufacturing and a characterization of polyurethane based sandwich composite structures. *Composite Structures* 123 (2015) 169–179.
- [134] K. Shivakumar, H. Chen, Structural performance of eco-core sandwich panels, in: I. M. Daniel, Y.D.S. Rajapakse, E.E. Gdoutos (Eds.), *Major accomplishments in composite materials and sandwich structures*, Science & Business Media B.V, (2009) 381–405.
- [135] Z. Wang, Z. Li, W. Xiong, Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet, *Composite Part B* 164 (2019) 280–286.
- [136] B. Soares, L. Reis, L. Sousa, Cork composites and their role in sustainable development, *Procedia engineering* 10 (2011) 3214–3219.
- [137] W. Min, L. Tao, Z. Yan, S. Peng, L. Qi, X. Yu, Y. Wan, H. Chen, M. Yu, Z. Sun, Feasibility verification and bending property of web-reinforced foam sandwich composites prepared via thermal expansion molding process. *Composite Structures* 294 (2022) 115720.
- [138] M. MIYAMOTO, W.A. KAYSSER, B.H. RABIN. *Functionally Graded Materials. Design, Processing and Applications* vol 5 (1999).
- [139] B.L. Liu, Y.S. Li. Bending of FGM sandwich plates with tunable auxetic core using DQM. *European Journal of Mechanics - A/Solids* (2022) 104838.
- [140] A. Hassan and N. Kurgan. Bending analysis of thin FGM skew plate resting on Winkler elastic foundation using multi-term extended Kantorovich method. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23(2020) 788–800.
- [141] Q.H. Pham, P. Malekzadeh, V.K. Tran et al. Free vibration analysis of functionally graded porous curved nanobeams on elastic foundation in hygro-thermo-magnetic environment. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 17 (2023) 584–605.
- [142] V.C. Nguyen, T.T. Tran, T. Nguyen-Thoi et al. A novel finite element formulation for static bending analysis of functionally graded porous sandwich plates. *Frontier of Structural and Civil Engineering* 16(12) (2022) 1599–1620.
- [143] M. Şimşek .Buckling of Timoshenko beams composed of two-dimensional functionally graded material (2D-FGM) having different boundary conditions. *Composite Structures* 149(2016) 304–314.

- [144] M.O. Belarbi, M.S.A. Houari, H. Hirane et al. On the finite element analysis of functionally graded sandwich curved beams via a new refined higher order shear deformation theory. *Composite Structures* 179(2022) 114715.
- [145] B.A.P. Dash and B.N. Singh. Buckling analysis of porous FGM sandwich plates under various types non-uniform edge compression based on higher order shear deformation theory. *Composite Structures* 251(2020)112597.
- [146] M. Taczala, R. Buczkowski, M. Kleiber. Analysis of FGM plates based on physical neutral surface using general third-order plate theory. *Composite Structures* 301(2022) 116218.
- [147] A. Tounsi, B.O. Sallai, I. Mechab et al. A theoretical analysis of flexional bending of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> S-FGM thick beams. *Computational Materials Science* 44(2009) 1344–1350.
- [148] V.D. Nguyen and V.B. Phung. Static bending, free vibration, and buckling analyses of two-layer FGM plates with shear connectors resting on elastic foundations. *Alexandria Engineering Journal* 62(2022) 369–390.
- [149] G. Bao, L. Wang. Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal. *International Journal of Solids and Structures* 32 (1995) 2853-2871.
- [150] F. Betene Ebanda. Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012.
- [151] Liège -matière- première (liège, culture, nature, future) Cork Information Bureau 2010.
- [152] T. Karbowski et al, Four hundred years of cork imaging: New advances in the characterization of the cork structure. *SCIENTIFIC REPORTS natureresearch* (2019) 9 :19682

**Résumé :** Dans ce travail de thèse on s'intéresse à l'analyse du comportement de nouveaux panneaux sandwichs en âme graduée à base d'une conception respectueuse de l'environnement, constituée du plâtre avec des ajouts granulaires du liège et des peaux symétriques en polymère collées sur les deux faces de l'âme à l'aide d'une résine STR. La nouveauté de la présente recherche est de souligner l'apport des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) sur les caractéristiques physiques et mécaniques des structures sandwichs et de mettre en évidence l'avantage de cette nouvelle technologie de conception pour répondre aux besoins des structures en termes d'isolation thermique et de capacité mécanique. Un protocole expérimental a été mis au point afin de mettre en évidence les performances mécaniques, physiques et thermiques des panneaux sandwichs développés. En effet, cinq types d'éprouvette en fonction de la dégradation des matériaux ont été conçues pour les essais de caractérisation de l'âme. Ensuite, trois séries de panneaux sandwichs ont été élaborées et testées sous compression axiale, flambement et flexion 03-points. Les courbes de capacité, les modes de rupture, les mesures de conductivité thermique et de porosité de tous les échantillons testés ont été fournis et discutés pour mettre en évidence la configuration de l'âme graduée par rapport à la configuration conventionnelle. Afin de compléter les essais mécaniques et physiques, une analyse microscopique des âmes de panneaux sandwichs est menée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Cette analyse permet de bien comprendre la microstructure des différents types d'éprouvette et notamment d'examiner la qualité de l'adhérence et la cohésion entre les granulats du liège et la matrice plâtre au niveau des phases de transition. Une Modélisation analytique du comportement mécanique des panneaux élaborés est mise au point afin de transcrire la réponse des panneaux sous chargement de flexion. La variation de rigidité dans la direction de l'épaisseur des panneaux est modélisée à travers une nouvelle loi de puissance. Une étude comparative a été réalisée entre les résultats expérimentaux et ceux prédits par le modèle analytique basé sur les théories des poutres d'ordre élevé. Après la validation du modèle, l'effet du changement du paramètre du matériau qui régit la nature de la transition de phase sur l'évolution de la flèche, les contraintes normales et de cisaillement est présenté et discuté. L'analyse des résultats obtenus à travers la confrontation avec les travaux récents disponibles dans la littérature scientifique mis en exergue les avantages conceptuels des panneaux proposés en termes d'optimisation des paramètres de conception de ces matériaux de construction, qui peuvent être utilisés comme cloisons et panneaux de séparation dans les structures.

**Mots clés :** Panneaux sandwichs, Matériaux à gradient fonctionnel (FGM), Isolation thermique, Comportement mécanique, Analyse expérimentale, Modélisation analytique.

**Abstract:** The present PhD thesis investigates the behavior of new functionally graded core based-sandwich panels manufactured according to an environmentally friendly design based on a plaster matrix with cork aggregates inclusion and symmetrical polymer skins bonded to both core faces using STR resin. The novelty of the present research is to highlight the contribution of functional gradient materials (FGM) on the physical and mechanical characteristics of sandwich structures, and to determine the advantage of this new design technology to respond to civil structures requirements in terms of thermal insulation and mechanical capacity. An experimental procedure was carried out to highlight the mechanical, physical and thermal performance of the designed sandwich panels. Indeed, five different layouts of specimen were designed to characterize the panel's core according to the material degradation. Hence, three sets of sandwich panels were manufactured and tested under axial compression, buckling and 03-point bending. Capacity curves, failure modes, thermal conductivity and porosity measurements of all tested samples were provided and discussed to highlight the graded core configuration compared to the conventional one. To complete the mechanical and physical tests, a microscopic analysis of the sandwich panel cores was carried out using a scanning electron microscope (SEM). This analysis provides a good understanding of the microstructure of the different types of specimen, and in particular examines the quality of adhesion and cohesion between the cork aggregates and the plaster matrix namely at the transition phases. Analytical modeling of the mechanical behavior of the designed panels is established to transcribe the bending response of the panels. The stiffness variation through the panel thickness was modeled according to a new power-law approach. A comparative study was carried out between the experimental results and the predicted ones using the analytical model based on high-order beam theories. After the qualitative and quantitative validation of the model, the effect of material power-law parameter that governs the transition phase on the evolution of deflection, normal and shear stresses is presented and discussed. the obtained outcomes analysis as well as the comparison with recent works available in the scientific literature highlights the conceptual advantages of the proposed panels in terms of design parameters optimization of the of these construction materials, which can be used as partitions and separation panels within civil structures.

**Keywords:** Sandwich panels, Functionally graded materials (FGM), Thermal insulation, Mechanical behavior, Experimental analysis, Analytical modeling.

**المخلص:** تحلل هذه الأطروحة سلوك ألواح الساندويتش الجديدة ذات النواة المتدرجة القائمة على تصميم صديق للبيئة، والتي تتكون من الجبس مع إضافات من الفلين الحبيبي وجلود البوليمر المتماثلة الملتصقة على جانبي النواة باستخدام الراتنج. تكمن حادثة هذا البحث في تسليط الضوء على مساهمة المواد المتدرجة الوظيفية في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للهياكل الشطانية وإظهار ميزة هذه التقنية التصميمية الجديدة في تلبية احتياجات الهياكل المدنية من حيث العزل الحراري والقدرة الميكانيكية. وقد تم تطوير بروتوكول تجريبي لإثبات الأداء الميكانيكي والفيزيائي والحراري للألواح العازلة المطورة. تم تصميم خمسة أنواع من عينات الاختبار، اعتماداً على تحلل المواد، لاختبارات التوصيف الأساسية. تم بعد ذلك تطوير ثلاث سلاسل من الألواح العازلة واختبارها تحت الضغط المحوري والالتواء والانحناء من 03 نقطة. تم تقديم ومناقشة منحنيات القدرة وأنماط الفشل والتوصيل الحراري وقياسات المسامية لجميع العينات المختبرة لتسليط الضوء على تكوين اللب المتدرج مقارنة بالتكوين التقليدي. ولإكمال الاختبارات الميكانيكية والفيزيائية، تم إجراء تحليل مجهرى لقلب الألواح العازلة باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح. يوفر هذا التحليل فهماً جيداً للبنية المجهرية لأنواع المختلفة من العينات، وعلى وجه الخصوص، يتيح لنا فحص جودة الالتصاق والتماسك بين ركام الفلين ومصفوفة الجبس في المراحل الانتقالية. تم تطوير نمذجة تحليلية للسلوك الميكانيكي للألواح المنتجة من أجل نسخ استجابة الألواح تحت التحميل بالثني. تم نمذجة التباين في الصلابة في اتجاه سمك الألواح باستخدام قانون قوة جديد. تم إجراء دراسة مقارنة بين النتائج التجريبية وتلك التي تنبأ بها النموذج التحليلي القائم على نظريات الحزم عالية الترتيب. بعد التحقق من صحة النموذج، تم عرض ومناقشة تأثير تغيير معلمة المادة التي تحكم طبيعة الانتقال الطوري على تطور الانحراف والضغط العادية والقصية. يسلط تحليل النتائج التي تم الحصول عليها من خلال المقارنة مع الأعمال الحديثة المتوفرة في الأدبيات العلمية الضوء على المزايا المفاهيمية للألواح المقترحة من حيث تحسين معايير تصميم مواد البناء هذه، والتي يمكن استخدامها كقواطع والأواح فصل في الهياكل

**الكلمات الرئيسية:** ألواح الساندويتش، مواد التدرج الوظيفي، العزل الحراري، السلوك الميكانيكي، التحليل التجريبي، النمذجة التحليلية