

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master

Filière : Génie Civil

Option : Etude et contrôle des bâtiments et routes

Présentées par :

• DERROUCHE Norhane Chiraz

• BENKARA MOSTEFA Sirine Khadidja

Thème

**Contribution à l'étude physico-mécanique d'un béton
géo-polymère à base du sable des dunes**

Devant les jurys :

CHAHED Ali Haider	MCB	UMKO	Président
HACINI Slimane	MCB	UMKO	Examineur
CHAIB Hachem	Pr	UMKO	Encadreur
MKHARMECHE Abdessalame	MCA	UMKO	Co-encadreur

Année universitaire : 2025 /2026



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENTS

الحمد لله العليّ القدير الذي وفّقنا وأنار لنا درب العلم، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre honorable encadreur, **Pr. Chaib Hachem**, pour avoir accepté de superviser ce mémoire. Nos remerciements s'adressent également à notre co-encadreur, **MKHARMECHE Abdessalame** pour sa précieuse collaboration. Leurs conseils avisés, leurs orientations judicieuses et leur soutien constant nous ont été d'une aide inestimable tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos chaleureux remerciements à **M. Kechired Ali**, responsable des laboratoires, pour toutes les facilités, l'assistance et le soutien qu'il nous a accordés au sein du laboratoire. En signe de reconnaissance, nous tenons à exprimer notre respect et notre considération à l'ensemble de nos honorables enseignants qui nous ont transmis leur savoir tout au long de notre parcours universitaire. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre estime pour leurs efforts dévoués dans notre formation.

Dans le même contexte, nous remercions chaleureusement toute l'équipe du laboratoire **Lec Geosciences** qui a accueilli la partie pratique de notre recherche. Nous adressons un message de gratitude particulier à **M. Benazzouz Aissa**, **M. Gazen Mohamed**, et **M. Geudja Nadir** pour leur accompagnement bienveillant et leur aide précieuse durant notre période de stage.

Enfin, nous ne manquons pas d'exprimer notre profonde reconnaissance à l'entreprise **COSIDER Construction** (Unité d'Ouargla) pour nous avoir offert l'opportunité d'effectuer ce stage sur le terrain, et nous tenons à remercier tout particulièrement Mlle **Kateb Mouna**, Mme **Siham Atil**, **M. Boussaid Farouk** et **M. Dib Rachid Ilyas** pour leur accueil chaleureux, leur soutien et leurs conseils techniques sur le terrain, qui ont grandement enrichi ce travail.

À toutes ces personnes, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette recherche, nous présentons nos plus sincères remerciements.

Benkara Mostefa Sirine Khadidja ; Derrouiche Norhane Chiraz

DÉDICACE

{ وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ }

Je commence par la louange à Dieu, et avec la gratitude. Fruits de ma patience et de ma persévérance, voilà que le chemin touche à sa fin... Et ce qui s'achève n'est que le début d'un nouveau commencement, dont les pas méritent d'être tracés avec une reconnaissance infinie. Le voyage n'était pas court, et il ne devait pas l'être. Le rêve n'était pas proche, ni la voie pavée d'aisance... il était rempli de de nuits studieuses, de laboratoires, d'essais et d'erreurs, de formules recommencées et de résultats arrachés à la persévérance. Mais je l'ai réalisé. Et j'en suis fière. Car la grandeur ne se trouve pas dans la facilité, elle se forge dans le défi, grain après grain, comme le sable des dunes que j'ai appris à transformer en matière de résistance.

... À mon cher Père ...

À celui qui a tout donné sans jamais rien demander en retour... de lui-même, de son temps, de son cœur. Tu es le titre le plus beau qui orne mon nom, mon premier soutien sur ce chemin, mon ancre et mon refuge après Dieu. C'est de ta force que j'ai puisé la mienne, et c'est dans ton regard que j'ai appris ce que signifie ne jamais renoncer. Ce diplôme porte ton empreinte avant la mienne.

... À ma chère Mère ...

À celle que Dieu a placée sous les pas du Paradis, dont les prières ont illuminé chacune de mes nuits et dont les mains ont essuyé chacune de mes peines. Tu fus mon refuge dans les moments d'épreuve, ma lumière dans les instants de doute.

Ton amour n'a jamais défailli... et cette réussite est, avant tout, le fruit de tes supplications qui m'ont portée jusqu'ici.

... À mes Frères et Sœurs ...

Vous qui avez été ma source d'énergie silencieuse, ma joie dans les moments difficiles, et la sécurité de mes jours. Votre présence à mes côtés a rendu ce chemin moins lourd et cette victoire plus douce. Ma fierté est complète parce que vous êtes là pour la partager.

... À moi-même ...

À celle qui n'a jamais regardé en arrière, car son regard était toujours fixé sur le sommet. À celle qui a refusé, chaque jour... de se contenter de **moins que la première place**... non par orgueil, mais par conviction que l'excellence est un **droit qu'on conquiert**, pas un privilège qu'on attend. À celle qui a veillé les nuits, traversé les doutes, affronté les difficultés sans plier, et qui est restée, du premier jour jusqu'au dernier, au **rang qui lui appartient : le premier**.

Je suis fière de toi. Tu t'es prouvé que la **constance est plus puissante** que le talent, et que la **discipline**, quand elle naît d'une passion sincère, ne connaît pas la fatigue.

Tu le mérites.

Derrouiche Norhane Chiraz



DÉDICASE

{ وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ }

Entre ces pages, je ne dépose pas seulement un travail scientifique, mais le fruit d'une pensée née au sein du défi, et les pas d'un chemin tracé par la construction et la persévérance, jusqu'à atteindre le sommet du succès. Mon parcours n'était pas parsemé de roses ; il était rempli de détails, de laboratoires et d'expérimentations sur les matériaux qui ont façonné ma vision de la vie, tout comme ils ont forgé ma patience et ma détermination. Aujourd'hui, je me tiens sur le seuil de cette diplomation, le cœur rempli de gratitude envers Allah, qui a guidé mes pas et facilité ce qui était ardu.

À ceux grâce à qui ma force a grandi, ma tête s'est élevée, et qui furent le refuge et la sérénité de mon âme : **Mon cher père et ma chère mère,** vous êtes la source intarissable et le refuge sur lequel je m'appuie à chaque instant. Je vous dédie le fruit de mes efforts et la substance de ma pensée, en reconnaissance de vos sacrifices qui ont éclairé mes sentiers. Que Dieu vous garde, couronnes de fierté et soutien pour moi tout au long de ma vie.

À mes sœurs et à l'âme de mon cher frère :

À mes sœurs, mes soutiens, qui furent les meilleures alliées dans les chemins de la réussite. Et à l'âme de mon cher frère, dont Dieu a rappelé l'âme ; ton ombre ne quitte jamais mon cœur, tu restes vivant dans mes prières et mes souvenirs, et ce succès est une part de ton empreinte dans mon âme. Puisse Dieu nous réunir avec toi dans Son vaste paradis.

À ma grande famille :

Qui fut toujours le berceau de mes ambitions et la source de ma fierté. Merci d'être le bouclier qui me protège et le public qui applaudit mes réussites ; avec votre présence, ma joie est complète.

À mes éminents professeurs :

Héritiers de la sagesse et porteurs des flambeaux du savoir, qui n'ont jamais été avares de conseils ou de connaissances. Merci pour chaque lettre que vous m'avez enseignée, pour votre dévouement à forger les esprits et à révéler les talents. Vous restez des phares de vérité et de science.

À mes amis et compagnons de parcours :

Ceux qui ont partagé les détails de ce voyage, avec ses succès et ses défis ; merci pour chaque mot d'encouragement et chaque instant de soutien. Vous avez été les meilleurs compagnons sur ce chemin.

À moi-même :

Qui n'ai jamais regardé en arrière ; c'est à toi que je dédie cet accomplissement. Ô âme qui a bravé les difficultés, veillé durant les nuits, et refusé de rester dans l'ombre pour toujours viser le sommet. Je suis fière de toi et de chaque pas qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, tournée avec passion vers un avenir qui embrasse mes ambitions.

Je vous dédie tous ce travail, avec fierté et gratitude pour votre précieuse présence dans ma vie.

Benkara Mostefa Sirine Khadidja

Résumé

Cette recherche vise à valoriser le sable de dunes de la région d'Ouargla et les déchets de briques rouges pour développer des briques « géopolymères » en tant qu'alternative durable au ciment traditionnel. La méthodologie repose sur le mélange de ces ressources locales avec un activateur alcalin pour stimuler une réaction chimique formant une structure cohérente. Le sable de dunes et les déchets de briques ont été mélangés selon des proportions étudiées, tout en examinant l'influence de l'ajout de divers matériaux tels que la pierre ponce. Des éprouvettes de laboratoire de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³ ont été coulées et traitées sous des conditions précises.

Les résultats ont démontré la supériorité du géopolymère en termes de résistance thermique et chimique, alliée à une légèreté structurelle, ce qui prouve l'efficacité de l'intégration des déchets de briques avec le sable de la région pour offrir des solutions constructives à haute performance. Cette innovation contribue à la réduction des émissions de CO₂ et soutient l'économie circulaire ainsi que la construction

Mots-clés : Géopolymère, sable de dunes, déchets de briques, activation alcaline, résistance mécanique, durabilité.

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تجميع رمل كثبان منطقة ورقلة ونفايات اجر الأحمر لتطوير طوب "جيوبوليمري" كبديل مستدام للإسمنت التقليدي. تعتمد المنهجية على خلط هذه الموارد المحلية مع منشط قلوي لتحفيز تفاعل كيميائي يشكل بنية متماسكة، حيث تم خلط رمل الكثبان ونفايات الاجر بنسب مدروسة مع دراسة تأثير اضافة عدة مواد على غرار الحجر الخفاف ثم صب ومعالجة عينات مخبرية بأبعاد $(4 * 4 * 16)$ سم تحت ظروف دقيقة.

أظهرت النتائج تفوق الجيوبوليمر في المقاومة الحرارية والكيميائية مع خفة الوزن، مما يثبت نجاعة دمج نفايات الطوب مع رمل المنطقة في تقديم حلول إنشائية عالية الكفاءة. يساهم هذا الابتكار في خفض انبعاثات CO₂ ودعم الاقتصاد الدائري والبناء الأخضر.

الكلمات المفتاحية: جيوبوليمر، رمل الكثبان، نفايات الطوب، تنشيط قلوي، مقاومة ميكانيكية، استدامة

Abstract

This research aims to valorize dune sand from the Ouargla region and red brick waste to develop "geopolymer" bricks as a sustainable alternative to traditional cement. The methodology is based on mixing these local resources with an alkaline activator to stimulate a chemical reaction that forms a cohesive structure. Dune sand and brick waste were blended in studied proportions, while investigating the effect of adding various materials, such as pumice stone. Laboratory specimens with dimensions of $4 \times 4 \times 16$ cm³ were cast and cured under precise conditions. The results demonstrated the superiority of the geopolymer in terms of thermal and chemical resistance, along with its lightweight properties. This proves the effectiveness of integrating brick waste with local sand to provide high-efficiency construction solutions. This innovation contributes to reducing CO₂ emissions and supports the circular economy and green building practices.

Keywords: Geopolymer, Dune sand, Brick waste, Alkaline activation, Mechanical resistance, Sustainability.

SOMMAIRE

Titre	Pages
Remerciements	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
SOMMAIRE	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des Figures	IX
Liste des abréviations	XIII
Introduction Générale	2
Chapitre I : Synthèse bibliographiques	
I.1. Introduction	5
I.2. L'émission de dioxyde de carbone	5
I.2.1. Pendant la fabrication du ciment (en particulier du ciment Portland)	5
I.2.2. Après la fabrication –l'utilisation du ciment dans la construction	6
I.3. L'Impact Carbone du Secteur du Bâtiment	7
I.3.1. L'effet du dioxyde de Carbone	7
I.3.2. Son deuxième rang mondial	8
I.3.3. Taux d'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère au niveau national, africain et mondial	9
I.4. Les réactions chimiques impliquant le dioxyde de carbone dans la construction	11
I.5. Histoire du géopolymère	12
I.5.1. Définition du béton géopolymère	14
I.6. Études antérieures sur les géopolymères et le béton géopolymère	14
I.7. Aperçu des matériaux de construction	19
I.7.1. Sable de construction	19
I.7.2. Sable des dunes	19
I.7.3. Brique	20
I.7.4. Déchets de briques	20
I.8. Conclusion	21
Chapitre II : caractérisation des matériaux	
II.1. Introduction	23
II.2. Les caractéristiques des matériaux utilisée	23
II.2.1. Sable	23
II.2.1.1. Analyse granulométrique (NF : P 94-056)	23
II.2.1.2. Module De Finesse	25
II.2.1.3. Masse volumique (NF P 94-054)	26
II.2.1.4. Essai d'équivalent de sable selon (NF P 18-598)	27
II.2.1.5. DRX Diffraction des rayons X	29
II.2.2. Déchets de briques	30
II.2.2.1. Essai de Masse volumique	30
II.2.2.2. Analyses chimiques	32
II.2.3. Le verre	32

II.2.3.1. Verre concassé	32
II.2.3.2. Verre poudre	34
II.2.4. Les fibres métalliques	35
II.2.4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées	36
II.2.5. Pierre ponce	36
II.2.5.1. Masse volumique	36
II.2.5.2. Analyses chimiques	37
II.2.5.3. Expériences MEB	38
II.2.6. Fibres de palmiers	38
II.2.6.1. La masse volumique	39
II.3. Conclusion	39

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction	41
III.2. Préparation et réalisation d'échantillons	41
III.2.1. Etapes de préparation	41
III.2.2. La préparation des échantillons	44
III.3. Caractéristiques mécaniques	45
III.3.1. Résistance à la flexion (NFP 18-407)	45
III.3.2. Résistance à la compression (NF P 18-406)	46
III.3.3. La masse volumique	47
III.4. Résultats	47
III.4.1. L'ajout de la pierre ponce	47
III.4.2. L'ajout de les fibres métallique	50
III.4.3. L'ajout de la poudre de verre	52
III.4.4. L'ajout de verre concassé	54
III.4.5. L'ajout de fibre de palmier	56
III.5. Observation microscopique	58
III.6. Expériences de microscopie électronique à balayage (MEB)	61
III.7. Les propriétés physico-mécaniques des compositions optimales par rapport aux ajouts	63
III.8. Durabilité	64
III.8.1. La masse volumique	64
III.8.2. La résistance à la flexion	65
III.8.3. La résistance à la compression	66
III.9. Conclusion	67

Chapitre IV : Etude et modélisation par la méthode MACHINE LEARNING

IV.1. Introduction	69
IV.2. Machine Learning Methods	69
IV.2.1. Random Forest (RF)	69
IV.2.2. Multilayer Perceptron (MLP)	70
IV.2.3. CatBoost	72
IV.2.4. K-Nearest Neighbors (KNN)	74
IV.3. Matériaux et Protocole Expérimental	79
IV.3.1. Matières premières	80
IV.3.2. Propriétés mécaniques mesurées	80

IV.4. Application du Gradient Boosting Regressor aux Géopolymères	81
IV.4.1. Architecture du modèle GBR	81
IV.4.2. Hyperparamètres retenus	82
IV.4.3. Prétraitement des données	82
IV.4.4. Stratégie de validation — Leave-One-Out Cross-Validation	83
IV.5. Résultats et Discussion	83
IV.5.1. Performance globale du modèle	83
IV.5.2. Analyse des prédictions vs valeurs réelles	85
IV.5.3. Analyse des résidus	86
IV.5.4. Importance des variables d'entrée	87
IV.5.5. Analyse des corrélations	87
IV.5.6. Courbes de réponse — Impact du dosage des additifs	89
IV.5.7 Synthèse des dosages optimaux prédits par le modèle GBR	90
IV.6. Conclusion	92
Conclusion Générale	94
Références Bibliographique	96
Annexes	100

Liste des tableaux	Pages
Tableau I.1 : Résultats Des émissions de CO ₂	10
Tableau I.2: Résultats Des réactions chimiques avec CO ₂	12
Tableau II.1: Analyse granulométrique de sable	24
Tableau II.2: Résultats De La Masse Volumique	27
Tableau II.3: Qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable	28
Tableau II.4: Résultats de l'équivalent de sable	28
Tableau II.5: Résultats Masse volumique absolue de la poudre de déchets de briques	31
Tableau II.6: Résultats Masse volumique apparent de la poudre de déchets de briques	31
Tableau II.7: Résultats d'analyse chimique des déchets de briques	32
Tableau II.8: Analyse granulométrique de Verre 0\5	33
Tableau II.9: La masse volumique de verre concassé	34
Tableau II.10: Composition chimique de poudre de verre (en %)	35
Tableau II.11: La masse volumique de verre poudre	35
Tableau II.12: La masse volumique de fibre métalliques	36
Tableau II.13: Résultats de La masse volumique de la poudre de pierre ponce	37
Tableau II.14: Résultats de la composition chimique de la pierre ponce noire	37
Tableau II.15: La masse volumique de fibres de palmiers	39
Tableau III.1: Les Compositions Utilisées Et Leurs Pourcentages	44
Tableau III.2: Les Compositions Utilisées	45
Tableau III.3: l'observation microscopique	58
Tableau III.4 : les meilleurs résultats du géopolymère par rapport aux ajouts	63
Tableau IV.1 : Hyperparamètres du modèle GBR et justifications	82
Tableau IV.2 : Métriques de performance du modèle GBR pour les trois propriétés cibles	84

Liste des Figures	Pages
Figure I.1 : émission de CO ₂ Pendant la fabrication du ciment	6
Figure I.2 : émission de CO ₂ Après la fabrication	7
Figure I.3 : L'impact Carbone du Secteur du Bâtiment	8
Figure I.4 : émission de CO ₂ en Afrique	10
Figure I.5 : Sable de construction	19
Figure I.6 : Sable. Des dunes	20
Figure I.7 : Brique	20
Figure I.8 : Déchets de briques	21
Figure II.1 : Les équipements utilisés pour la granulométrie	24
Figure II.2 : Courbe D'analyse Granulométrique	25
Figure II.3 : Essai De La Masse Volumique Apparente	26
Figure II.4 : Essai De La Masse Volumique Absolue	27
Figure II.5: Essai équivalent de sable	28
Figure II.6: Le diffractomètre à rayons X utilisé dans l'étude	29
Figure II.7: Graphique des résultats de l'analyse par DRX du sable	30
Figure II.8: Mode d'opération d'essai masse volumique absolue de poudre déchet de brique	30
Figure II.9: Mode d'opération d'essai masse volumique apparent de poudre déchet de brique	31
Figure II.10: Analyse chimique des déchets de briques	32
Figure II.11: verre concassé	33
Figure II.12: courbe d'analyse granulométrique de verre	34
Figure II.13: verre poudre	34
Figure II.14: La géométrie de fibres métalliques utilisées	35
Figure II.15: la préparation de la poudre de pierre ponce	36
Figure II.16: La masse volumique de la poudre de pierre ponce	36
Figure II.17: Le diagramme circulaire des proportions favorables montre la répartition des composants de la pierre ponce	37
Figure II.18: Pierre ponce au MEB	38
Figure II.19: Les fibres de palmiers	38

Figure III.1: Broyage des déchets de briques	41
Figure III.2: Nettoyés Et Huilés Les Moules	42
Figure III.3: le malaxage	42
Figure III.4: les ajouts	43
Figure III.5: Malaxage et moulage	43
Figure III.6: Démoulage Des Eprouvettes	43
Figure III.7: Conservation des éprouvettes	44
Figure III.8: L'essai De Résistance A La Flexion	45
Figure III.9: L'essai De Résistance A La compression	46
Figure III. 10 : variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de la pierres ponce.	47
Figure III. 11 : variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de la pierres ponce	48
Figure III. 12 : variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de la pierres ponce.	49
Figure III. 13 : variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages des fibres métalliques.	50
Figure III. 14 : variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages des fibres métalliques	51
Figure III. 15 : variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages des fibres métalliques.	51
Figure III. 16 : variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de la poudre de verre	52
Figure III. 17 : variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de la poudre de verre	53
Figure III. 18 : variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de la poudre de verre	53
Figure III. 19 : variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de verre concassé.	54
Figure III. 20 : variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de verre concassé.	55

Figure III. 21 : variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de verre concassé	55
Figure III. 22 : variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de fibre de palmier	56
Figure III. 23 : variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de fibre de palmier.	57
Figure III. 24 : variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de fibre de palmier	57
Figure III. 25 : Microscopie électronique à balayage (MEB)	61
Figure III.26: Variation de la masse volumique en fonction du temps	64
Figure III.27: variation du résultat de la résistance à la flexion en fonction du temps.	65
Figure III.28: La Résistance à la compression en fonction des jours	66
Figure IV. 1 : Architecture globale du modèle des Forêts Aléatoires (Random Forest) pour la régression.	70
Figure IV.2 : Architecture d'un Réseau de Neurones Artificiels (ANN - Perceptron Multicouche)	72
Figure IV.3 : Processus d'échantillonnage (Bootstrapping) et de construction des arbres de décision	74
Figure IV.4: K-Nearest Neighbors (KNN) Regression Model	77
Figure IV.5 : Architecture du modèle de Machine à Vecteurs de Support (SVM) utilisant une fonction de noyau	78
Figure IV.6 : – Propriétés mécaniques et physiques mesurées pour les 16 formulations géopolymères. La ligne discontinue indique la moyenne de chaque propriété. Les couleurs distinguent les familles d'additifs	80
Figure IV.7 : Composition et proportion des composants de base pour les 16 formulations géopolymères	81
Figure IV.8 : Comparaison des métriques de performance en entraînement et en LOO-CV - coefficients R^2 (gauche) et erreurs absolues moyennes MAE (droite) pour les trois propriétés prédites par GBR	84
Figure IV.9 : Diagrammes de parité : Valeurs prédites (LOO-CV) vs valeurs expérimentales pour la résistance à la flexion, la résistance à la compression et la	85

masse volumique. La droite discontinue représente la relation idéale $y = x$. Les étiquettes identifient chaque formulation

Figure IV.10 : Analyse des résidus — Différence (Réel – Prédit) pour chaque formulation. Les barres positives indiquent une sous-estimation, les barres négatives une surestimation. 86

Figure IV.11 : Importance des variables d'entrée pour la prédiction de chaque propriété (GBR). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la réduction totale d'impureté. 87

Figure IV.12 : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables d'entrée et les propriétés mécaniques des géopolymères. Les couleurs varient du rouge (corrélation négative forte) au vert (corrélation positive forte). 88

Figure IV.13 : Courbes de réponse — Impact du dosage de chaque additif sur les trois propriétés prédites. Le marqueur indique le dosage optimal prédit par le modèle GBR. 89

Figure IV.14: Synthèse des dosages optimaux prédits par le modèle GBR et gains de performance relatifs par rapport à la formulation de référence GP0 (ΔR_f et ΔR_c en %). 90

Figure IV.15: Récapitulatif visuel de la matrice de données et des distributions des propriétés mécaniques des 16 formulations géopolymères étudiées 91

Liste des abréviations

Mf	Module De Finesse
ρ app	Masse volumique apparente g/cm ³
M	La Masse
V	Le volume
ρ abs	La masse volumique absolue g/cm ³ .
Ms	La masse des grains solides.
Es	Équivalent de sable
n	L'ordre de diffraction
γ	La longueur d'onde
d	La distance interréticulaire
Rf	Résistance à la flexion en (MPa)
Ff	Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N).
l	Longueur qui sépare les deux appuis en (mm).
b	Côte de l'éprouvette
Rc	Résistance à la compression en (MPa).
Fc	La charge de compression appliqué
s	Section transversale de l'éprouvette
ρ	La masse volumique



Introduction Générale



Introduction Générale

Face à la demande croissante en matériaux de construction, le secteur du bâtiment est devenu l'un des plus grands contributeurs à la pollution environnementale, en particulier en raison de la forte dépendance au béton ordinaire. La production de ciment est responsable d'environ 8 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone, en plus de l'épuisement des ressources naturelles et d'une consommation énergétique importante. De plus, les déchets issus des matériaux de construction, notamment les briques cuites, posent des problèmes environnementaux liés à la difficulté de leur élimination ou de leur réutilisation de manière efficace.

Par ailleurs, de nombreux bâtiments, notamment dans les régions chaudes ou arides, souffrent d'une insuffisance de confort thermique, ce qui entraîne une forte consommation énergétique due à l'utilisation excessive des systèmes de climatisation, aggravant ainsi l'impact environnemental et les coûts d'exploitation. Ces problématiques nous poussent à rechercher des alternatives nouvelles et durables aux matériaux de construction traditionnels. C'est dans ce cadre que notre attention s'est portée sur le **béton géopolymère**, une solution innovante et efficace. Le béton géopolymère représente une alternative prometteuse au béton ordinaire, cette technologie permet également l'**utilisation de matériaux locaux inexploités** tels que les **sables de dunes**, **l'argile et le gypse**, abondants dans plusieurs régions, ce qui contribue à la réduction des coûts et à la valorisation des ressources naturelles locales.

Dans ce contexte, notre étude vise à fabriquer un béton géopolymère à base de ces ressources locales, à étudier ses propriétés physiques et mécaniques, tout en mettant l'accent sur les aspects environnementaux et économiques.

Structure du mémoire :

Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux, comme suit :

Chapitre I : présente la Synthèse Bibliographique

Chapitre II : caractérisation des matériaux ce chapitre est consacré aux méthodes d'essais et aux caractéristiques physico-mécaniques de matériau utilisé

Chapitre III : résultats et interprétations, dans ce chapitre, les résultats des essais en laboratoire sont présentés et analysés, en mettant l'accent sur le comportement mécanique et thermique des

Échantillons. leur conformité avec les normes. et l'identification des compositions les plus performantes.

Chapitre IV : Etude et modélisation par la méthode MACHINE LEARNING

Enfin une série de conclusions et perspectives notre mémoire se termine par une synthèse des principaux résultats obtenus. ainsi que par des perspectives



Chapitre I :
Synthèse
Bibliographique



Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1. Introduction

Le ciment Portland est l'un des matériaux de construction les plus utilisés. mais il contribue fortement aux émissions de dioxyde de carbone. ce qui a un impact négatif sur l'environnement. Cette réalité a poussé les chercheurs à explorer des alternatives durables. telles que le béton géopolymère. considéré comme une solution écologique. fabriquée à partir de déchets industriels ou de matériaux naturels locaux.

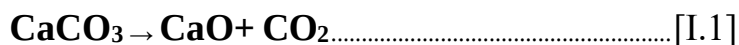
Ce chapitre vise à donner un aperçu des matériaux de construction traditionnels. à définir le béton géopolymère. à expliquer certaines réactions chimiques liées aux émissions de CO₂. ainsi qu'à présenter les principales études antérieures dans ce domaine.

I.2. L'émission de dioxyde de carbone

I.2.1. Pendant la fabrication du ciment (en particulier du ciment Portland)

a. Phase de cuisson du calcaire (décomposition thermique / calcination)

- Le calcaire (carbonate de calcium CaCO₃) est le composant principal du ciment.
- Lorsqu'il est chauffé dans le four à haute température. il se décompose en. [1]



- Ce processus produit environ 60 % des émissions totales de CO₂ de l'industrie du ciment.

b. Utilisation des combustibles pour produire de la chaleur

- Le charbon. le gaz naturel ou d'autres types de combustibles sont brûlés pour fournir la chaleur nécessaire au processus de cuisson.
- Cette combustion génère du CO₂ supplémentaire. représentant environ 30 à 40 % des émissions.

c. Transport des matériaux et consommation d'électricité

- Une partie des émissions provient de la consommation énergétique liée au broyage des matières premières et au fonctionnement des machines.

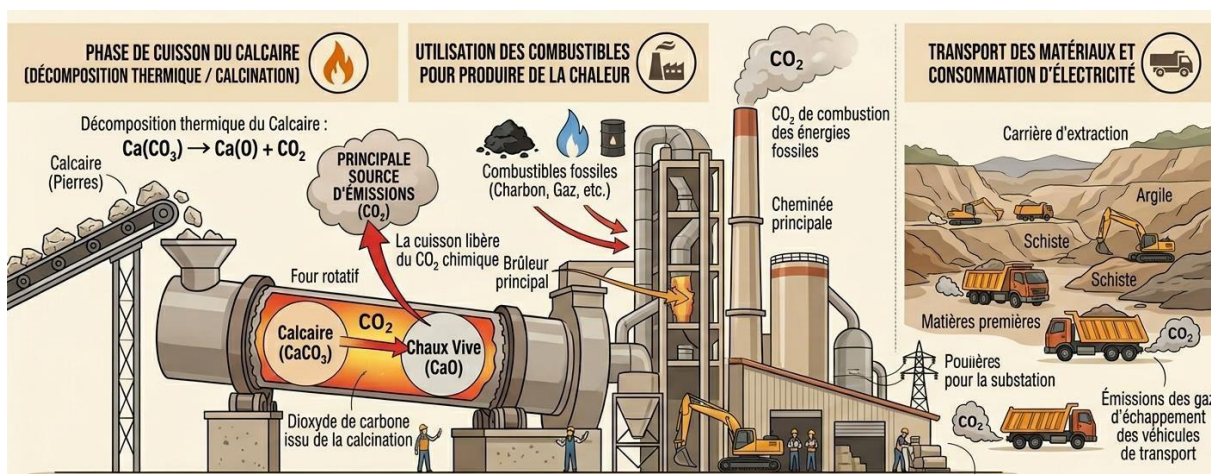


Figure I.1 : émission de CO₂ Pendant la fabrication du ciment

I.2.2. Après la fabrication – l'utilisation du ciment dans la construction

a. Carbonatation (Carbonations) – absorption de CO₂

- Lorsque le ciment durci (béton) réagit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air, un processus appelé carbonatation se produit, au cours duquel l'hydroxyde de calcium dans le béton se transforme en carbonate de calcium.



Ce processus absorbe une partie du CO₂ de l'air, mais :

- Il se déroule très lentement (sur plusieurs années).
- Il compense seulement une petite partie des émissions produites lors de la fabrication (environ 10 à 20 % au maximum).

b. Travaux de démolition et de déconstruction

Lors de la démolition des bâtiments, le béton peut être recyclé ou les matériaux associés incinérés. ce qui peut entraîner de nouvelles émissions

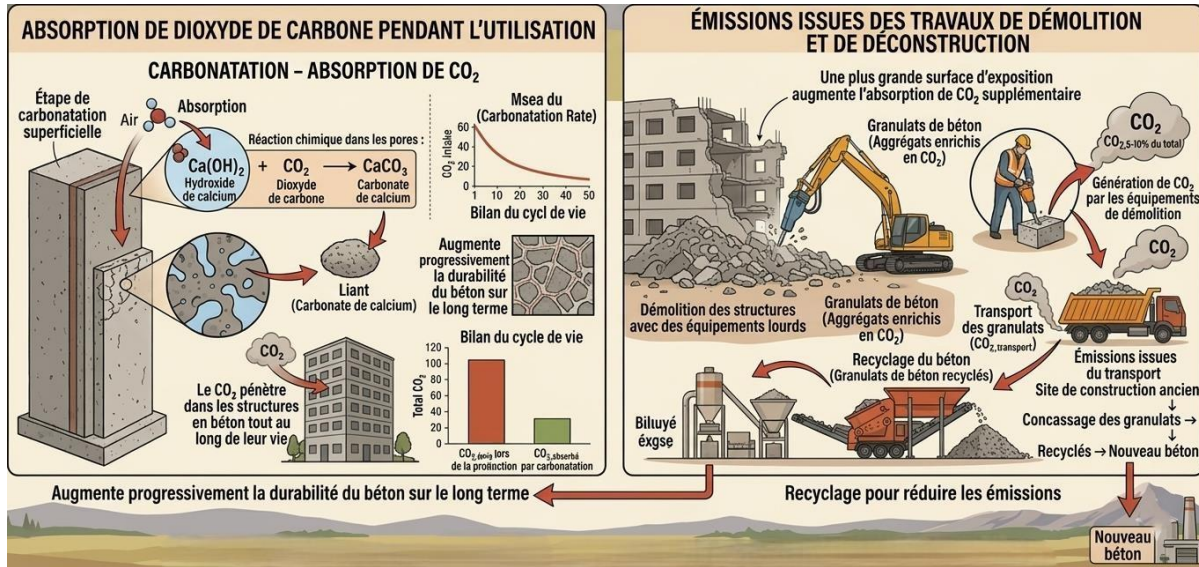


Figure I.2 : émission de CO₂ Après la fabrication

I.3. L'impact Carbone du Secteur du Bâtiment

Le dioxyde de carbone influence le secteur du bâtiment de la manière suivante :

I.3.1. L'effet du dioxyde de Carbone

a. Accélération du phénomène de réchauffement climatique

- Le CO₂ est l'un des principaux gaz à effet de serre, car il retient la chaleur dans l'atmosphère.
- L'augmentation des températures qui en résulte provoque :
 - Des changements climatiques (vagues de chaleur, sécheresse, inondations, etc.).
 - Un impact sur la durabilité des bâtiments en raison de la modification des conditions environnementales.

b. La carbonatation à l'intérieur du béton

- Avec le temps, le CO_2 réagit avec les composants du béton dans un processus appelé carbonatation.
- Cela conduit à:
 - Une diminution de l'alcalinité du béton, ce qui favorise la corrosion des armatures métalliques internes.
 - Un affaiblissement de la structure en béton et une augmentation du risque de fissures et de détérioration.

Ainsi, le CO_2 influence directement la durée de vie et la sécurité des ouvrages, en particulier dans les environnements urbains et industriels fortement exposés à la pollution. [2]



Figure I.3 : L'impact Carbone du Secteur du Bâtiment

I.3.2. Son deuxième rang mondial

a. Sa source est massive et variée

- Il provient des usines de ciment, des transports, de la combustion des combustibles, des bâtiments, de la déforestation, etc.
- Le ciment seul est responsable d'environ 8 % des émissions mondiales de CO_2 .

b. Il persiste longtemps dans l'atmosphère

- Le CO₂ peut rester dans l'air pendant des centaines d'années. ce qui entraîne une accumulation et un impact croissant au fil du temps.

c. Son effet est invisible mais profond

- Contrairement à la fumée visible, le CO₂ est un gaz transparent, mais il cause le changement climatique, affectant tout, de l'alimentation à l'habitat.

d. Il augmente rapidement à cause du secteur du bâtiment

- Le secteur de la construction consomme d'énormes quantités de ciment et de matériaux qui émettent du CO₂.
- De plus, l'expansion urbaine dans les pays en développement augmente la consommation d'énergie et les émissions. [3]

I.3.3. Taux d'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère au niveau national, africain et mondial

a. Au niveau national (En Algérie)

En 2022, les émissions de dioxyde de carbone en Algérie étaient d'environ **177.08 millions de tonnes**, ce qui représente environ **0.47 %** des émissions mondiales. Cela place l'Algérie parmi les plus grands émetteurs du continent africain.

b. Au niveau africain

Bien que l'Afrique représente environ **17 % de la population mondiale**, sa contribution aux émissions mondiales de CO₂ est estimée à environ **4 %**, soit **1.45 milliard de tonnes**. Les principaux pays contributeurs en Afrique sont l'Afrique du Sud (**435.9 millions de tonnes**), l'Égypte (**249.6 millions de tonnes**) et l'Algérie (**176.2 millions de tonnes**).

c. Au niveau mondial

En 2021, les émissions mondiales de dioxyde de carbone ont atteint environ **37.12 milliards de tonnes**. La Chine est le plus grand émetteur avec environ **11.47 milliards de tonnes**, suivie par les États-Unis avec **5 milliards de tonnes**, l'Inde avec **2.7 milliards de tonnes**, la Russie avec **1.75 milliard de tonnes**, et le Japon avec **1.07 milliard de tonnes**. [4]

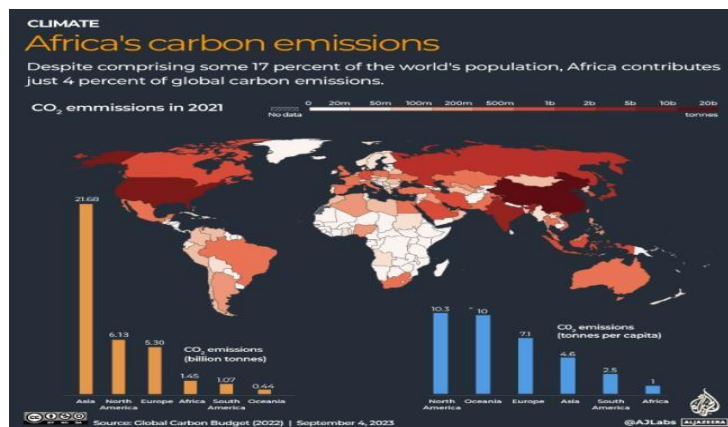


Figure I.4 : émission de CO₂ en Afrique [4]

Tableau I.1 : Résultats Des émissions de CO₂

Région/Pays	Émissions (millions de tonnes)	Pourcentage des émissions mondiales
Monde	37 120	100 %
Chine	10 550	28.2 %
Afrique	1 450	4 %
Algérie	177.08	0.47 %

I.4. Les réactions chimiques impliquant le dioxyde de carbone dans la construction

La réaction principale du dioxyde de carbone dans le domaine de la construction – la carbonatation. Cette réaction se produit entre :

- Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air.
- L'eau (H_2O) contenue dans les pores du béton.
- L'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présent dans le béton durci (issu de la réaction du ciment avec l'eau).

➤ La réaction chimique principale

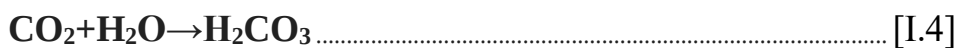


Formation de carbonate de calcium (CaCO_3).

- Réduction de l'alcalinité du béton (le pH diminue de 12–13 à moins de 9).
- Cela affaiblit la couche protectrice autour de l'acier d'armature et favorise sa corrosion.

Étapes de la réaction chimique dans la construction

- Entrée de CO_2 de l'air dans les pores du béton.
- Sa solubilité dans l'eau à l'intérieur du béton :



(Il se forme de l'acide carbonique H_2CO_3 , qui est un acide faible.)

- Réaction de l'acide carbonique avec l'hydroxyde de calcium :



L'importante interaction CO_2 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du béton dans la construction

- Le béton armé s'affaiblit : car l'acier devient sensible à la corrosion lorsque l'alcalinité est faible.
- Affecte la durée de vie du bâtiment : en particulier dans les zones humides, polluées ou mal ventilées.
- On peut le détecter à l'aide de la phénolphthaléine : la couleur du béton change en fonction de l'alcalinité

Autres interactions moins importantes mais possibles

- Le CO_2 peut également réagir avec d'autres oxydes métalliques dans certains types de ciment ou de chaux.

Il peut réagir avec des matières organiques ou des revêtements à l'intérieur. mais cela est limité et temporaire. [5]

Tableau I.2: Résultats Des réactions chimiques avec CO_2

Effet de la structure	Elément réactif	Produit de la réaction
Diminution de l'alcalinité- corrosion de l'acier	$\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Milieu acide affectant le béton	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	H_2CO_3

I.5. Histoire du géopolymère

L'idée des géopolymères remonte à la fin des années **1970**, plus précisément en **1979**, lorsque leur développement a commencé sous l'impulsion du chercheur français **Joseph Davidovits**, un scientifique spécialisé en chimie moléculaire. Initialement, l'objectif premier de ses recherches était d'étayer une hypothèse historique fascinante, suggérant que les pierres des pyramides d'Égypte n'avaient pas été entièrement taillées, mais plutôt "moulées" en utilisant une technique chimique basée sur la géo polymérisation de matériaux naturels. Partant de cette vision, ses travaux se sont élargis pour trouver des alternatives durables au **ciment Portland** traditionnel, dont la fabrication génère d'importantes quantités de dioxyde de carbone (CO_2), contribuant ainsi de manière significative au réchauffement climatique et aux changements environnementaux. En

autre. Davidovits cherchait à travers cette innovation à développer un matériau doté d'une résistance supérieure à la chaleur et aux agents chimiques. tout en nécessitant beaucoup moins d'énergie pour sa production. [6]

Davidovits a formulé le terme « **Géopolymère** » à partir de deux mots :

- « **Géo** » : qui signifie la terre ou les matériaux géologiques.
- « **Polymère** » : qui désigne un polymère ou un réseau moléculaire.

Les matériaux géopolymères ont été développés comme alternative aux polymères organiques. Leurs premières applications sont apparues dans des domaines tels que la construction navale, la fabrication de résines, la protection des structures en bois, les adhésifs résistants aux hautes températures, les matériaux réfractaires, ainsi que dans de nombreux autres domaines. [7]

Dans le cadre de la recherche de solutions pour limiter les catastrophes causées par les grands incendies, **Joseph Davidovits** a décidé d'orienter ses recherches vers le développement de nouveaux matériaux. Au cours de ce processus, il a observé une similitude entre les conditions de synthèse de certains polymères organiques, d'une part, et celles de minéraux résistants au feu tels que les feldspathoïdes et les zéolithes, d'autre part. En effet, les deux types sont préparés dans un milieu alcalin concentré, sous pression atmosphérique, et à des températures inférieures à 150 °C. La réaction chimique des géopolymères repose sur la formation d'un réseau tridimensionnel de silicates et d'alumine. Leur structure chimique générale est exprimée par la formule suivante :



Où :

- M représente le cation alcalin.
- n représente le degré de polymérisation.

Les matériaux géopolymères ont été initialement utilisés dans les industries aérospatiales et de défense, en raison de leur grande résistance à la chaleur. Avec le temps, leur champ d'application s'est étendu aux secteurs de la construction, des infrastructures, ainsi qu'à la restauration des bâtiments historiques. Depuis le début du **XXI^e siècle**, l'intérêt pour les géopolymères s'est accru à l'échelle mondiale, en raison de l'orientation croissante vers la construction durable et la

réduction de l’empreinte carbone des matériaux de construction. Malgré la diversité de leurs applications, l’usage principal de ces matériaux aujourd’hui reste concentré dans le domaine du bâtiment.

I.5.1. Définition du béton géopolymère

Le géopolymère est un liant cimentaire non conventionnel qui constitue une alternative écologique au ciment Portland traditionnel. Il est fabriqué à partir de matériaux riches en silice et en alumine. Dans notre Géopolymère, les déchets de briques (**briques cassées** ou **rejetées**) sont utilisés comme matière première, puis traités avec une solution alcaline pour former un composé inorganique similaire aux structures de réseau cristallin. [8]

I.6. Études antérieures sur les géopolymères et le béton géopolymère

Annee	Auteur	Resume	Résultat
2012	M. I. Abdul Aleem P. D. Arumairaj	Béton géopolymère : une alternative écologique au ciment ordinaire. Constituants : cendre volante + solution alcaline + silicate alcalin. Propriétés : haute résistance, non toxique, résistant à la chaleur et aux produits chimiques. Applications : utilisé dans les ponts, les briques, les dalles et les éléments préfabriqués. Limitations : difficulté de transport, coût élevé des produits alcalins, risques pour la santé.	• Le béton géopolymère est formé par la réaction de la cendre volante avec une solution alcaline, produisant un liant solide. • Une concentration plus élevée d'hydroxyde de sodium et un rapport plus élevé de silicate de sodium améliorent la résistance à la compression. • L’augmentation de la température et de la durée de cure augmente également la résistance. • Il montre une excellente résistance aux acides, notamment à l'acide sulfurique. • Une teneur en eau plus élevée réduit la résistance. • Les propriétés mécaniques (module d'élasticité et coefficient de Poisson) sont dans les limites acceptables.
2015	B. Singh et al	Un aperçu des avancées dans les géopolymères formés par l’activation alcaline des aluminosilicates est présenté.	Les résultats des recherches ont révélé que le béton géopolymère présente des propriétés comparables à celles du béton

		ainsi que les opportunités d'utilisation dans la construction. Les propriétés des mortiers et bétons fabriqués avec des liants géopolymères sont discutés en ce qui concerne leur état frais et durci. la zone de transition entre les granulats et le géopolymère. l'adhérence aux barres d'armature en acier. ainsi que leur résistance aux températures élevées. La durabilité des pâtes et bétons géopolymères est mise en lumière en termes de dégradation dans divers environnements agressifs. Un résumé des travaux de recherche et développement menés sur les géopolymères durcis à la chaleur et à température ambiante au CSIR-CBRI. ainsi que des développements de produits. est également présenté.	au ciment Portland ordinaire. ce qui lui confère un potentiel d'utilisation dans les applications de génie civil
2019	Y.H. Mugahed Amran et al	La production de ciment libère beaucoup de CO₂. contribuant au réchauffement climatique. Pour une alternative durable. le béton géopolymère (GeoPC) est étudié. offrant une résistance et une durabilité égales ou supérieures au béton classique. Il remplace le ciment par des matériaux activés alcalinement. consomme moins de ressources. coûte moins cher. prend rapidement en résistance. et permet de réaliser diverses formes structurelles.	Les résultats ont révélé que le béton géopolymère est un matériau essentiel pouvant être utilisé pour la réparation des bâtiments. l'entretien des infrastructures de transport routier et la réduction des effets environnementaux négatifs. Par conséquent. cet article présente une revue complète du béton géopolymère. de ses constituants. de ses méthodes de production. de ses régimes de cure. de ses propriétés et de ses potentialités d'application dans le secteur de la construction
2019	P. Selvaprasanth et al	Cette étude porte sur le développement d'un béton léger capable de flotter sur l'eau en utilisant de la pierre ponce (pumice stone) comme agrégat. Pour améliorer la résistance tout en maintenant une faible densité. des poudres de polypropylène recyclées ont été ajoutées pour combler les vides. Un agent moussant a également été utilisé comme agent entraîneur d'air pour créer une structure cellulaire uniforme	Le béton a atteint une résistance à la compression maximale de 13.6 N/mm² après 28 jours. L'utilisation de la pierre ponce a permis de réduire le poids du béton de 60% et sa densité de 50%. Ce matériau est considéré comme un bon isolant thermique et acoustique. avec une résistance égale ou supérieure à celle d'une brique normale.

2019	Brayan Armando Baquero Sanabria et al	Cette recherche expérimentale vise à produire du béton léger en remplaçant totalement les agrégats conventionnels par de l'argile expansée (Arlit) et de la pierre ponce. L'étude examine des mélanges avec des agrégats saturés et non saturés. en intégrant parfois des additifs tels que des fibres de polypropylène et de la fumée de silice pour améliorer les propriétés mécaniques. Les performances du béton ont été évaluées à travers des tests de densité, de résistance à la compression, de porosité et de microscopie électronique (SEM) afin de démontrer la viabilité de ces matériaux comme alternative durable dans la construction	Densité et Résistance : Les densités obtenues varient entre 1300 et 1500 Kg/m ³ . avec des résistances à la compression allant de 13 à 18 MPa. Impact des additifs : L'ajout de fibres et de fumée de silice a augmenté la résistance de 33 % pour les mélanges saturés et de 20 % pour les mélanges à l'état naturel ⁷⁷ . Porosité : Bien que le béton léger présente une absorption d'eau élevée (environ 23 %), il possède une faible interconnectivité entre les pores, ce qui confirme sa structure compacte. Microstructure : L'analyse SEM a révélé une bonne adhérence entre la matrice de ciment et les agrégats légers, ainsi qu'une porosité interne élevée dans la pierre ponce et l'argile expansée, contribuant à la légèreté du matériau.
2021	Ahmad L. Almutairi et al	L'article met en lumière l'importance de l'utilisation du béton géopolymère comme alternative durable et écologique au ciment Portland, en valorisant les matériaux secondaires et les déchets industriels. Il présente les composants essentiels du béton géopolymère, ses applications dans le domaine de la construction, ainsi que ses impacts environnementaux. L'article inclut également des exemples d'applications réelles et des recommandations futures pour promouvoir son utilisation dans les infrastructures	Le béton géopolymère est une alternative écologique au béton traditionnel, capable de réduire jusqu'à 80 % des émissions de CO ₂ . Il utilise des sous-produits industriels comme le GGBS, la fumée de silice (SF), la cendre de balle de riz (RHA) et les boues rouges (RM), offrant une résistance mécanique élevée, une faible perméabilité et une meilleure durabilité. Un mélange optimal de 70 % GGBS, 20 % cendre volante et 10 % SF a montré de très bonnes performances. De plus, des revêtements géopolymères efficaces ont été développés pour protéger les structures en milieu marin grâce à leur résistance à la corrosion et leur stabilité chimique.
2021	S. Sagar et al	Cette recherche examine l'impact de l'utilisation de la pierre ponce (pumice stone) comme remplacement partiel des gros granulats (coarse aggregates) dans le béton de classe M30. L'étude vise à trouver des solutions de construction durables et économiques en utilisant des matériaux volcaniques poreux à la place	Ouvrabilité (Slump) : Le "slump" (affaissement) augmente progressivement avec le taux de remplacement, passant de 85 mm (0%) à 98 mm (30%), ce qui indique une meilleure maniabilité du béton frais. Résistance à la compression : La résistance maximale après 28 jours de

		des granulats ordinaires. Les chercheurs ont testé des variations de remplacement allant de 5% à 30% pour analyser les propriétés du béton à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance)	cure a été atteinte avec un remplacement de 25%. affichant 35.06 N/mm ² . dépassant ainsi le béton conventionnel (33.68 N/mm ²). Résistance à la traction (Split Tensile) : Pour le béton de classe M30, la valeur optimale pour le remplacement par la pierre ponce est également de 25%. avec une résistance à la traction de 3.39 MPa. Conclusion technique : L'étude conclut qu'un remplacement partiel jusqu'à 25% est idéal pour maintenir des propriétés mécaniques optimales tout en étant plus écologique
2022	Alexis Andrade et al	Cette recherche porte sur la création d'un géopolymère utilisant la pierre ponce (pumice stone) de l'Équateur comme matériau précurseur ⁷⁷ . L'étude compare des échantillons provenant de trois provinces (Cotopaxi, Imbabura et Tungurahua) pour identifier la meilleure source minérale via une analyse multicritère ⁸⁸ . L'activation alcaline a été réalisée avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) et du silicate de sodium Na ₂ SiO ₃ . L'objectif principal est de proposer un matériau de construction écologique capable de remplacer le ciment Portland et de réduire les émissions de CO ₂	L'analyse a montré que la pierre ponce de la mine de Tungurahua est la meilleure option pour créer du béton géopolymère. La résistance à la compression maximale obtenue était de 16.16 MPA pour un mélange composé de 50% de géopolymère et 50% d'aggrégats. avec un durcissement au four à 80C pendant 24 heures. L'augmentation de la concentration de NaOH, en maintenant un ratio Na ₂ SiO ₃ /NaOH de 2.4, favorise une plus grande résistance à la compression. La pierre ponce sélectionnée présente des particules amorphes d'une taille comprise entre 40 et 50 µm. avec une teneur en aluminium variant selon les mines (0.60% à 1.50%)
2023	Teklu Amenu et al	Cette étude expérimentale examine l'aptitude de la poudre de pierre ponce (Pumice Stone Powder) comme matériau cimentaire supplémentaire pour remplacer partiellement le ciment Portland ordinaire dans la production de béton durable. L'étude évalue les propriétés chimiques de la ponce ainsi que l'effet de différents taux de remplacement (5%, 10%, 15%, 20% et 25%) sur la maniabilité, la densité et la résistance à la compression du béton à	La poudre de ponce est classée comme un matériau pouzzolanique (Classe N) car sa composition chimique (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) est supérieure à 70%. L'augmentation du taux de remplacement de la poudre de ponce entraîne une diminution de la maniabilité (slump) et de la densité du béton frais. Le remplacement du ciment par 5% à 10% de poudre de ponce permet d'atteindre la résistance à la compression minimale spécifiée après

		différents âges de cure (7. 28. 56 et 90 jours)	28 jours de cure. Un remplacement de 15% permet d'atteindre la résistance requise. mais nécessite un temps de cure plus long (56 jours). Au-delà de 15%. une chute graduelle de la résistance à la compression est observée. et les spécifications minimales ne sont pas atteintes même après 56 jours
2024	Alexis Iván Andrade Valle et al	Cette étude évalue la possibilité d'utiliser la pierre ponce (PS) et la fumée de silice (SF) comme matériaux précurseurs pour la conception d'un géopolymère. L'objectif est de proposer une alternative durable au ciment traditionnel afin de réduire les émissions de CO ₂ . La recherche examine comment l'ajout de fumée de silice influence les propriétés physiques et mécaniques des pâtes géopolymères activées par une solution alcaline (silicate de sodium et hydroxyde de sodium).	Le pourcentage optimal de remplacement par la fumée de silice (SF) est de 10%. ce qui améliore significativement les propriétés du géopolymère. La résistance maximale à la compression a atteint 14.10 MPa et la résistance à la flexion 4.78 MPa avec une concentration d'hydroxyde de sodium de 12 M. L'ajout de 10% de SF a augmenté la résistance à la compression de 47% et la résistance à la flexion de 16% par rapport aux échantillons de contrôle. Bien que ces résultats indiquent une utilisation pour des applications non structurelles. la résistance pourrait être améliorée en réduisant davantage la taille des particules de poudre de pierre ponce. Le géopolymère obtenu est environ 25% plus léger que les matériaux conventionnels. avec une densité variante entre 1645 kg/m ³ et 1726 kg/m ³

À partir des études précédentes. nous proposons de confectionner un béton géo-polymère à base de déchets de briques et de sable de dunes. en déterminant le pourcentage optimal.

I.7. Aperçu des matériaux de construction

Les matériaux de construction sont essentiels pour résister aux différents facteurs naturels qui influencent les bâtiments. Il existe de nombreux matériaux utilisés dans le domaine de la construction, qu'ils soient solides comme les pierres et le bois, ou en vrac comme le sable et le ciment. Il est indispensable que ces matériaux répondent aux exigences du chantier et aux normes de qualité. [9]

I.7.1. Sable de construction

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0.062 et 5 mm Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.[19]



Figure I.5 : Sable de construction

I.7.2. Sable des dunes

On distingue par sable éolien les sables de dune, qui sont le résultat de l'érosion provoqué par le vent et la température particulièrement dans les déserts. Ces sables se déposent en édifices dunaires constitués d'une succession de crêtes et de couloirs qui correspondent à des vagues. Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes qui occupent de vastes territoires. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire des sables dunaires, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation [20]



Figure I.6 : Sable des dunes

I.7.3. Brique

Une brique est un élément de construction généralement en forme de parallélépipède rectangle constitué en terre argileuse crue, séchée au soleil, brique crue ou cuite au four, employée principalement dans la construction de murs. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc.).



Figure I.7 : Brique

I.7.4. Déchets de briques

Les **déchets de briques** (ou de tuiles) sont des **déchets solides** issus des opérations de fabrication, de transport, de stockage ou de démolition. Ils comprennent :

- Les briques cassées ou fissurées pendant le transport ou l'utilisation.
- Les résidus provenant de la découpe ou du façonnage des briques dans les ateliers ou sur les chantiers.
- Les fragments de briques résultant des travaux de démolition ou de rénovation.
- Les briques non conformes aux spécifications techniques (non cuites, déformées, etc.).



Figure I.8 : Déchets de briques

I.8. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté un aperçu global des matériaux de construction, en mettant particulièrement l'accent sur le ciment Portland, en soulignant son impact environnemental important dû aux émissions de dioxyde de carbone générées durant sa fabrication et son utilisation. Cet impact environnemental majeur a poussé les chercheurs à explorer des alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement, parmi lesquelles le béton géopolymère, dont nous avons retracé l'origine et le développement.

Les études précédentes ont montré que le béton géopolymère ne se contente pas de réduire les émissions de carbone, mais qu'il possède également de bonnes propriétés mécaniques et chimiques, le rendant adapté à diverses applications dans le secteur de la construction, notamment lorsqu'il est fabriqué à partir de déchets industriels comme les résidus de briques ou à partir de matériaux naturels locaux disponibles tels que l'argile, le gypse et les sables dunaires. Cela en fait donc une alternative écologique et économique prometteuse, s'inscrivant pleinement dans la dynamique actuelle de construction durable.



Chapitre II :
**Caractérisation des
matériaux**



Chapitre II : Caractérisation des matériaux

II.1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter un exposé détaillé et complet de toutes les caractéristiques et propriétés des matières premières utilisées dans l'élaboration et la fabrication du géopolymère. Cette étape est indispensable pour déterminer les composants chimiques ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux entrant dans la composition. tels que :

- Sable de dunes ;
- Déchets de briques ;
- Le verre recyclé ;
- Fibres métalliques ;
- Fibres de palmier ;
- Pierre ponce.

Pour ce faire, l'étude s'est appuyée sur un ensemble d'essais et d'analyses laboratoires précis (essais et analyses physico-mécaniques et chimiques). tels que la diffraction des rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB). Ces analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de Génie Civil de l'Université Kasdi Merbah Ouargla (UKMO). en collaboration avec le Laboratoire Études & Contrôles (LEC) unité d'Ouargla. Ces tests ont été effectués conformément aux normes et réglementations françaises. dans le but d'approfondir la compréhension du comportement de ces matériaux et de définir leurs caractéristiques fondamentales. garantissant ainsi l'évaluation de leur impact sur la qualité et la durabilité du produit final. et de déterminer leur adéquation pour les applications de construction visées

II.2. Les caractéristiques physico-chimiques

II.2.1. Sable

II.2.1.1. Analyse granulométrique (NF : P 94-056)

L'analyse a été effectuée conformément à la norme (NF P 94-056). en utilisant les tamis nécessaires à la couverture des dimensions de l'échantillon. En fonction des diamètres des granulats de matériau on détermine sa classification. en se servant d'une série des tamis supposés

selon le diamètre des ouvertures de 50mm jusqu'à 0.08mm. le matériau est agité d'une façon manuelle ou automatique. L'objectif a obtenu la courbe d'analyse granulométrique qui aide à connaître les quantités les pourcentages de chaque classe de granulats selon leurs diamètres. [21]



Figure II.1 : Les équipements utilisés pour la granulométrie

Tableau II.1: Analyse granulométrique de sable

Tamis	Poids cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamis cumulé (%)
5	0	0	100
2.5	0	0	100
1.25	0	0	100
0.63	69.5	17.38	99.32
0.315	248.3	62.08	85
0.16	948.8	94.88	5.12
0.08	988.2	98.82	1.18
Fond	997.9	99.79	0.21

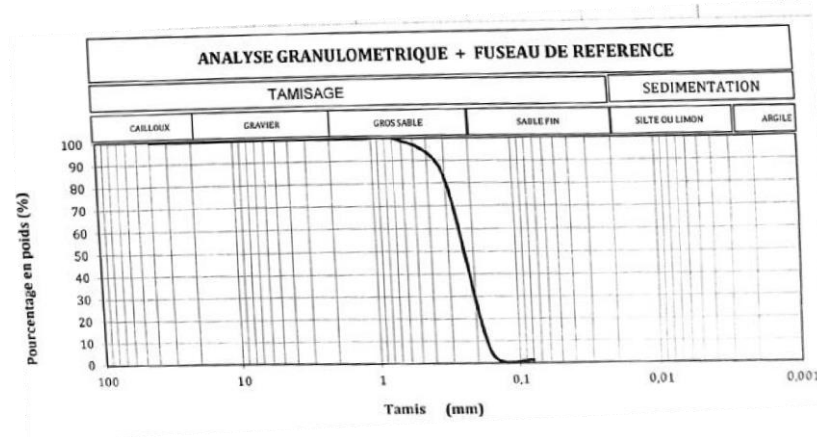


Figure II.2 : Courbe D'analyse Granulométrique

- D'après la courbe. on remarque que la nature de sable de dunes qui est très fin

II.2.1.2. Module De Finesse

C'est un module qui nous permet de caractériser la finesse des différents types de sable par la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis de série suivant (0.16 .0.315. 0.63 .1.25. 2.5. 5 mm)

$$Mf = \frac{\sum \% \text{ refus} \dots\dots\dots}{100} \quad [II.1]$$

RC : refus cumulé en (%).

La valeur du module de finesse nous renseigne sur la situation du sable utilisé vis-à-vis Le fuseau de référence. lorsque MF est compris entre :

- 1.8 et 2.2: le sable est à majorité de grains fins.
- 2.2 et 2.8: on est en présence d'un sable préférentiel.
- 2.8 et 3.3: le sable est un peu grossier

$Mf = 1.8$ Le sable est à majorité de grains fins

II.2.1.3. Masse volumique (NF P 94-054)

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. On distingue : [22]

a. La masse volumique apparente

C'est le rapport entre la masse d'un corps et l'unité de volume apparent (y' compris les vides). Elle est exprimée en (g/cm³, Kg/m³, t/m³). Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de matériau correspondant. La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots [II.2]$$

ρ_{app} : Masse volumique apparente g/cm³.

M : Masse totale de l'échantillon.

V : Volume total de l'échantillon.



Figure II.3 : Essai De La Masse Volumique Apparente

b. La masse volumique absolue

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Consiste à mesurer le volume réel occupé par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots [II.3]$$

ρ_{abs} : Masse volumique absolue g/cm³.

M_s : Masse des grains solides.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (grains + vide).



Figure II.4 : Essai De La Masse Volumique Absolue

Tableau II.2: Résultats De La Masse Volumique

Les essais	Résultats
Masse volumique apparente P/V (g/cm ³)	1.15 g/cm³
Masse volumique absolue P1/V (g/cm ³)	2.65 g/cm³

II.2.1.4. Essai d'équivalent de sable selon (NF P 18-598)

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol. est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable. On lave l'échantillon. selon un processus normalisé. et on laisse reposer au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

- hauteur h1 : sable propre +éléments fines (floculant).
- hauteur h2 : sable propre seulement. [23]

On déduit l'équivalent de sable ou on peut utiliser un piston comme la figure ci-dessous montre :

$$ES = \frac{100 \times h_2}{h_1} \dots\dots\dots [II.4]$$

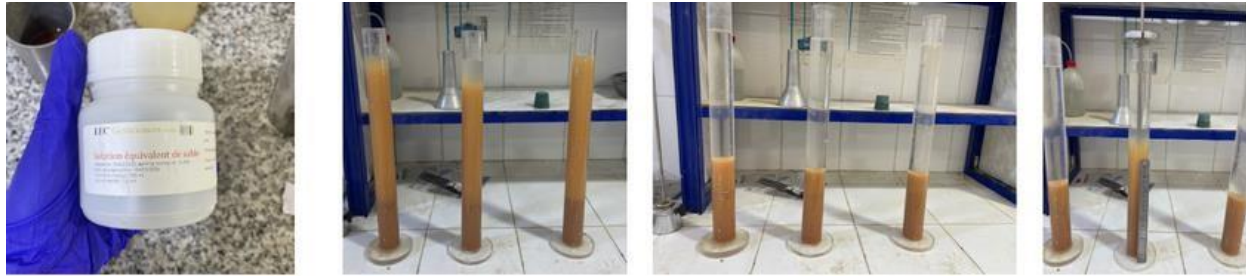


Figure II.5: Essai équivalent de sable

Tableau II.3: Qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable

E. S	Nature et qualité du sable
E. S <60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. problème d'adhérence. à rejeter pour les bétons de qualité
60 ≤ E. S <70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint particulièrement pas le retrait
70 ≤ E. S <80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de haute qualité (valeur optimale E S= 75 E S V=80)
E. S ≥ 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Tableau II.4: Résultats de l'équivalent de sable

Equivalent de sable [%]	Résultats
Sable de dune	97.02%

Après les résultats obtenus dans le tableau II.4. on peut dire que le sable est très propre c'est-à-dire qu'il y a absence presque totale de fines argileuses.

II.2.1.5. DRX Diffraction des rayons X

L'objectif de l'expérience de diffraction des rayons X est d'étudier la structure fine d'un matériau et de connaître sa structure cristalline. Afin de bien comprendre les méthodes expérimentales utilisées en diffraction des rayons X, il est nécessaire d'étudier les thèmes fondamentaux liés à la géométrie des cristaux, les bases de la description générale de la structure cristalline, ainsi que les principes de la diffraction des rayons X.

Le principe de l'appareil à rayons X repose sur la relation suivante :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \dots\dots\dots [II.7]$$

Cette équation est connue sous le nom de loi de BRAGG, où :

n : est l'ordre de diffraction (nombre entier).

λ : est la longueur d'onde

d : est la distance interréticulaire (ou distance entre les plans).

La diffraction des rayons X à la longueur d'onde **λ** ne se produit qu'à un angle spécifique **θ** , qui détermine la distance interréticulaire d (espacement entre les plans cristallins d).

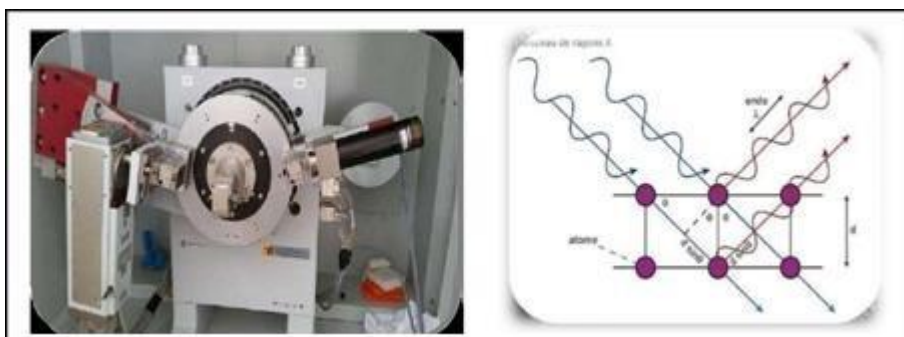


Figure II.6: Le diffractomètre à rayons X utilisé dans l'étude

a. DRX Diffraction des rayons X du sable des dunes

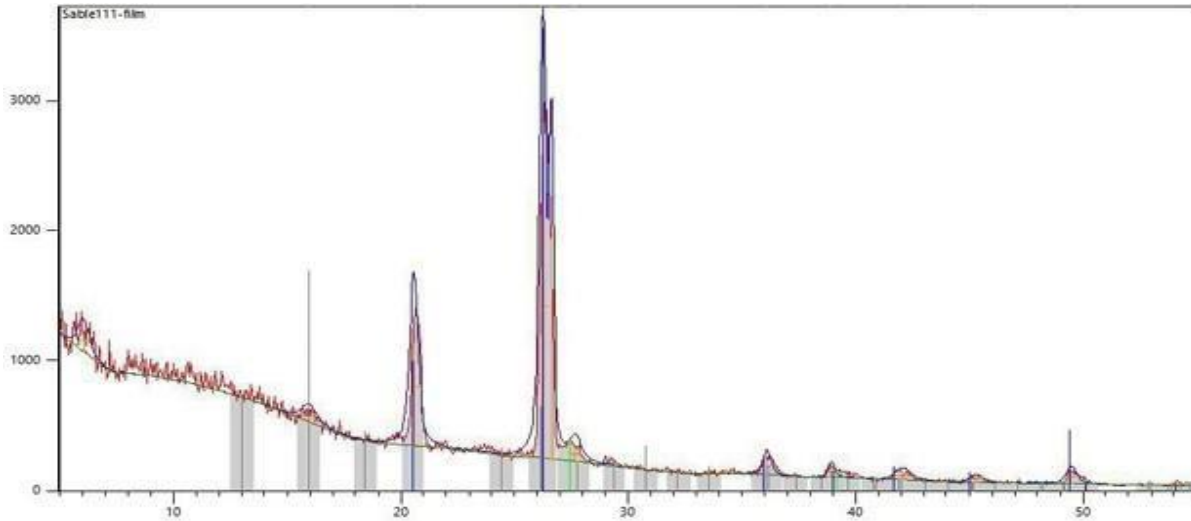


Figure II.7: Graphique des résultats de l'analyse par DRX du sable

D'après les résultats de l'analyse par DRX de l'échantillon de sable, il a été constaté que l'oxyde de silicium (SiO_2) est présent en un pourcentage élevé dans le sable de dunes.

II.2.2. Déchets de briques

II.2.2.1. Essai de Masse volumique

a. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots [II.5]$$



Figure II.8: Mode d'opération d'essai masse volumique absolue de poudre déchet de brique

Tableau II.5: Résultats Masse volumique absolue de la poudre de déchets de briques

Essai	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm ³)	1.08

b. La masse volumique apparent

C'est le rapport entre la masse d'un corps est l'unité de volume apparent (y'compris les vides). Elle est exprimée en (g/cm³. Kg/m³. t/m³). Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de matériau correspondant. La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \dots \dots \dots [II.6]$$

**Figure II.9:** Mode d'opération d'essai masse volumique apparent de poudre déchet de brique**Tableau II.6:** Résultats Masse volumique apparent de la poudre de déchets de briques

Essai	Résultats
Masse volumique apparent (g/cm ³)	2.33

II.2.2.2. Analyses chimiques



Figure II.10: Analyse chimique des déchets de briques

Tableau II.7: Résultats d'analyse chimique des déchets de briques

$\text{CaCO}_3(\%)$	Insoluble (%)	$\text{Cl}^-(\%)$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\%)$	$\text{SO}_3(\%)$	$\text{SO}_4(\text{mg/kg})$
0.84	77	0.043	4.24	1.97	2362.3

Les résultats de l'analyse montrent que les résidus de briques contiennent un taux élevé d'éléments non solubles (76.96 %). Selon plusieurs études, ces éléments sont principalement constitués de silice (SiO_2). La présence de ces composants confère aux résidus de briques d'excellentes propriétés pouzzolaniques. Lors de leur réaction avec l'hydroxyde de calcium, ces propriétés pouzzolaniques contribuent efficacement à la formation de composés cimentaires secondaires, tels que les silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui améliorent la résistance mécanique.

II.2.3. Le verre

II.2.3.1. Verre concassé

Le verre utilisé dans cette étude est un verre recyclé, préalablement broyé et tamisé, dont la granulométrie est comprise entre 0 mm et 5 mm, ce qui le rend comparable au sable naturel. Afin de caractériser ce matériau, plusieurs essais ont été réalisés, notamment l'analyse granulométrique et la détermination de la masse volumique. [24]



Figure II.11: verre concassé

a. Analyse Granulométrique

Tableau II.8: Analyse granulométrique de Verre concassé 0\5

Tamis	refus(g)	refus cumulé (g)	refus cumulé (%)	tamis cumulé (%)
5	42.4	42.4	2.82	97.18
2.5	435.5	477.9	31.83	68.17
1.25	103.8	581.7	38.75	61.25
0.63	181.2	762.9	50.82	49.18
0.316	309.2	1072.1	71.41	28.59
0.16	365	1437.1	95.75	4.28
0.08	26.5	1463.1	97.49	2.51
Fillers	32.8	1496.4	100	00

Module de finesse MF : **MF=2.88**

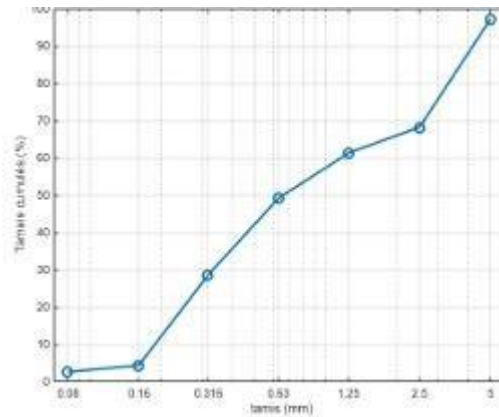


Figure II.12: courbe d'analyse granulométrique de verre concassé

b. La masse volumique de verre concassé

Tableau II.9: La masse volumique de verre concassé

Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.64
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.60

II.2.3.2. Poudre de Verre

Le verre utilisé dans cette étude est un verre recyclé, préalablement broyé et tamisé, dont la granulométrie est comprise entre 5 mm et 0.08 mm. Afin de caractériser ce matériau plusieurs essais ont été réalisés, notamment l'analyse chimiques et la détermination de la masse volumique. [25]



Figure II.13: verre poudre

a. Analyse chimique de poudre de verre**Tableau II.10 :** Composition chimique de poudre de verre (en %)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	PbO
72	0.054	1.705	0.248	10.905	1.299	0.035	13.063	0.575	0.095	0.025	0.111	0.006	0.002

b. La masse volumique**Tableau II.11 :** La masse volumique de verre poudre

Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.98
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.47

II.2.4. Les fibres métalliques

Les fibres utilisées dans cette étude expérimentale sont des fibres métalliques disponibles sur le marché à différentes dimensions. conçu spécialement pour l'amélioration des propriétés du béton géopolymère tel que la résistance.

L'introduction de fibres métalliques dans un béton géopolymère en modifie le comportement. Ces ajouts permettent de "coudre" la matrice pour limiter l'apparition et surtout le développement de fissures. Dans certain cas, les fibres métalliques permettent de s'affranchir des armatures passives [AYACHI.A.M. 2011]. Les fibres métalliques utilisées sont ondulées et sont présentées dans la Figure II.14

**Figure II.14:** La géométrie de fibres métalliques utilisées

II.2.4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées

Les Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.12: La masse volumique de fibre métalliques

Fibres	Diamètre (mm)	Long (mm)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Résistance à la traction (MPa)
Ondulées	1	30 et 50	7850	800- 1100

II.2.5. Pierre ponce



a. Broyage de la pierre ponce.



b. Tamisage avec un tamis de 0,08mm



c. La poudre

Figure II.15: la préparation de la poudre de pierre ponce [26]

II.2.5.1. Masse volumique

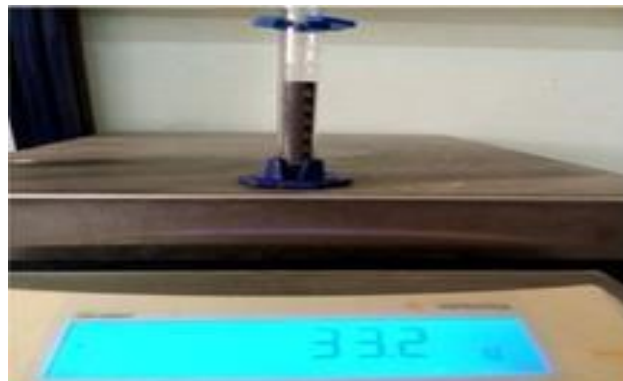


Figure II.16: La masse volumique de la poudre de pierre ponce

Tableau II.13: Résultats de La masse volumique de la poudre de pierre ponce

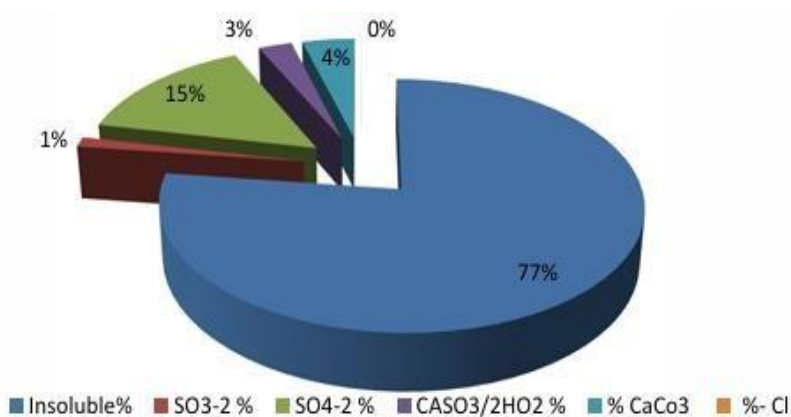
Essai	Résultats
Masse volumique (g/cm ³)	0.49

II.2.5.2. Analyses chimiques

Cette expérience vise à déterminer (les substances insolubles. les pourcentages de sulfates. les pourcentages de carbonates. les pourcentages de chlorures) pour la pierre ponce.

Tableau II.14: Résultats de la composition chimique de la pierre ponce noire

Noms des matériaux	Numéro	Formule chimique	Pourcentage %
Matières insoluble	1	Insoluble	97.26
Sulfates	2	SO ₃ ⁻²	1.65
Carbonates	3	SO ₄ ⁻²	18.68
Chlorides	4	CaSO ₃ 2H ₂ O	3.36
Carbonates	5	CaCO ₃	5.26
Noms des matériaux	6	Cl ⁻	0.01

**Figure II.17:** Résultats de la composition chimique de la pierre ponce noire

La poudre de pierre ponce noire présente une teneur élevée en matières solides (97.26 %). ce qui la rend apte à être utilisée comme ajout au ciment. De manière générale, cette poudre est adaptée aux applications dans la construction, sous réserve de sa conformité aux normes techniques approuvées

II.2.5.3. Expériences MEB

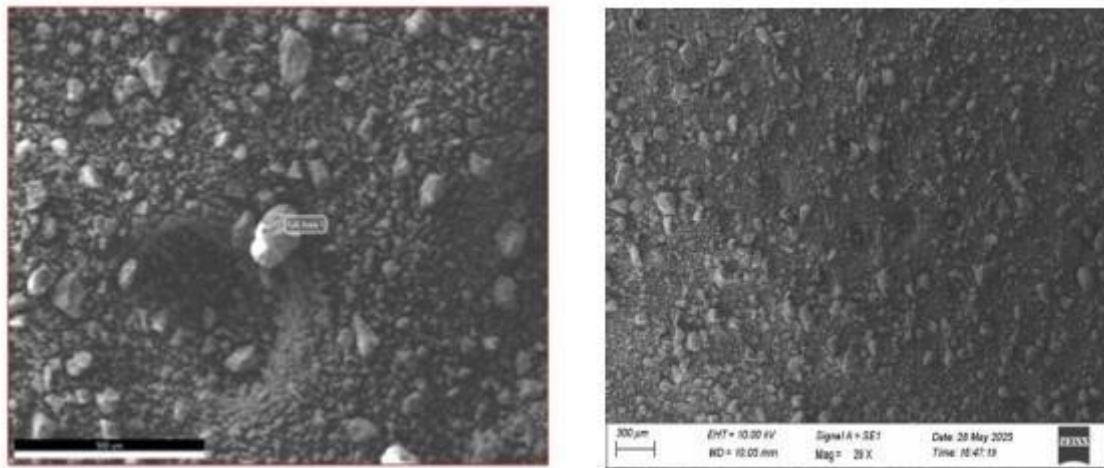


Figure II.18: Pierre ponce au MEB

II.2.6. Fibres de palmiers



Figure II.19: Les fibres de palmiers

II.2.6.1. La masse volumique

Tableau II.15: La masse volumique de fibres de palmiers

Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.88
Masse volumique absolue (g/cm ³)	1.25

II.3. Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons examiné avec précision l'identité physique et chimique des matériaux utilisés. Les résultats de laboratoire obtenus nous ont permis d'établir une image claire de la nature du sable de dunes ainsi que des autres ajouts. La détermination de ces caractéristiques, conformément aux normes en vigueur, constitue la pierre angulaire sur laquelle nous nous appuierons dans le chapitre suivant pour passer de l'étude des propriétés individuelles des matériaux à l'étape de la conception expérimentale des mélanges géopolymères et de l'évaluation de leurs performances globales.



Chapitre III :

Résultats et interprétations



Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Ce chapitre présente la phase expérimentale de ce travail. au cours de laquelle nous avons élaboré des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³. composées de sable de dune et de déchets de briques.

Afin de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques de ces géopolymères. les essais suivants ont été réalisés :

- Masse volumique;
- Résistance à la flexion ;
- Résistance à la compression ;
- Observations microscopiques;
- Microscopie électronique à balayage – MEB.

Une fois ces tests effectués conformément aux normes en vigueur. les résultats obtenus seront présentés sous forme de graphes.

III.2. Préparation et réalisation d'échantillons

III.2.1. Etapes de préparation

a) Préparation des matériaux (Broyage des déchets de briques)



Figure III.1: Broyage des déchets de briques

b) Préparation des moules

Pour que les moules soient prêts à l'emploi, ils doivent être bien nettoyés et huilés.



Figure III.2: Nettoyés Et Huilés Les Moules

c) Malaxage et moulage

Le mélange est composé de sable de dune et de déchet de briques, activés par une solution alcaline de silicate (Na_2SiO_3) et Sodium hydroxide (NaOH)

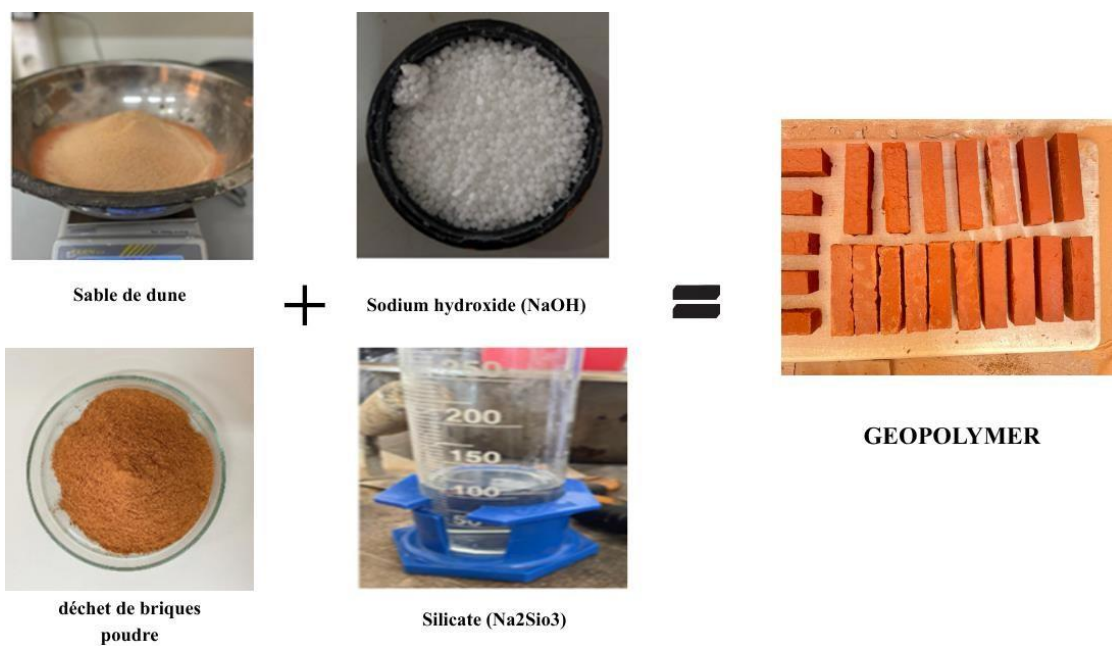


Figure III.3: le malaxage



Figure III.4: les ajouts



Figure III.5: Malaxage et moulage

d) Démoulage des échantillons

Après la coulée, on laisse les moules jusqu'à ce que les échantillons soient prêts à démouler.



Figure III.6: Démoulage Des Epreuves

e) Conservation des éprouvettes

Après le démoulage les éprouvettes sont conservées à l'air libre dans les conditions normales de laboratoire.



Figure III.7: Conservation des éprouvettes

III.2.2. La préparation des échantillons

Nous avons préparé 48 échantillons de briques dimensionnées $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. Pour estimer les propriétés mécaniques et physiques, elles sont composées de (sable des dunes, déchet de brique, ajouts).

Tableau III.1: Les Compositions Utilisées Et Leurs Pourcentages

Matériaux	Déchets de brique	Sable	NaOH	Silicate	Pierre ponce	Fibre métallique	Poudre de verre	Verre concassé	Fibre de palmier
GP0	45.83%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	-	-
Gpp1	44.83%	37.5%	4.76%	11.91%	1%	-	-	-	-
Gpp2	42.33%	37.5%	4.76%	11.91%	3.5%	-	-	-	-
Gpp3	41.33%	37.5%	4.76%	11.91%	5%	-	-	-	-
Gpfm1	44.83%	37.5%	4.76%	11.91%	-	1%	-	-	-
Gpfm2	42.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	3.5%	-	-	-
Gpfm3	41.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	5%	-	-	-
Gppv1	44.83%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	1%	-	-
Gppv2	42.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	3.5%	-	-
Gppv3	41.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	5%	-	-
Gpvc1	44.83%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	1%	-
Gpvc2	42.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	3.5%	-
Gpvc3	41.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	5%	-
Gpfp1	44.83%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	-	1%
Gpfp2	42.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	-	3.5%
Gpfp3	41.33%	37.5%	4.76%	11.91%	-	-	-	-	5%

➤ Chaque test a été réalisé sur trois échantillons de même composition.

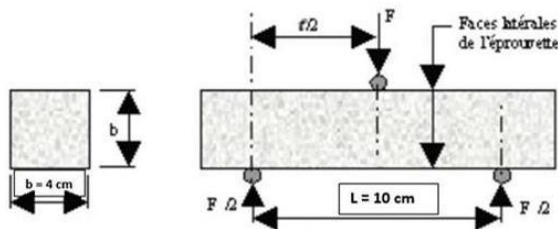
Tableau III.2: Les Compositions Utilisés

LES COMPOSITION	LES MATERIAUX
GP	Géopolymère
Gpp	Géopolymère+ pierre ponce
Gpfm	Géopolymère + fibre métallique
Gppv	Géopolymère+ poudre de verre
Gpvc	Géopolymère+ verre concassé
Gpfp	Géopolymère+ fibre de palmier

III.3. Caractéristiques mécaniques

III.3.1. Résistance à la flexion (NFP 18-407)

Le but de cet essai est de connaître la résistance portante de l'élément sous des efforts de flexion. Le principe de l'essai est de placer l'échantillon se trouve dans le dispositif de pliage. et cela se fait en prenant trois points d'appui. qui sont ensuite placés dans des supports. Il y a une force sur celui-ci. qui est supprimée dès que l'échantillon s'effondre et est divisé en deux parties et la valeur maximale est enregistrée.

**Figure III.8:** L'essai de Résistance à la Flexion

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation :

$$Rf = \frac{1.5 . Ff . l}{b^3} \dots\dots\dots [III.1]$$

Rf : Résistance à la flexion en (MPa).

Ff : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N).

l : Longueur qui sépare les deux appuis en (mm).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

III.3.2. Résistance à la compression (NF P 18-406)

Cet essai effectué après avoir l'essai de traction par flexion. cette dernière rend l'éprouvette en deux parties. l'essai est réalisé à l'aide d'un appareil d'universel selon la norme NF P 18-406. fonctionnant avec un système de pression hydraulique. Les éprouvettes de dimensions

(4*4*16 cm³). qui sont préparées à partir éprouvettes de flexion. Centré entre deux plaques métalliques de façon que l'axe vertical du l'éprouvette coïncide avec l'axe des blocs de chargement. La charge est appliquée à l'éprouvette de manière continue jusqu'à le rupteur et l'écrasement total voir Photo.



Figure III.9: L'essai de Résistance à La compression

La formule qui nous permet de calculer la résistance à la compression est :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots\dots\dots [III.2]$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

F_c : la charge de compression appliqué.

S : section transversale de l'éprouvette (S = a x a) en mm

III.3.3. La masse volumique

Pour déterminer la masse volumique **ρ** d'un brique. on doit :

- Peser la masse (M) d'une éprouvette 4x4x16 (cm).
- La masse volumique (**ρ**) est obtenue en (Kg/m³) par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \dots\dots\dots [III.3]$$

III.4. Résultats

III.4.1. L'ajout de la pierre ponce

a. Masse volumique

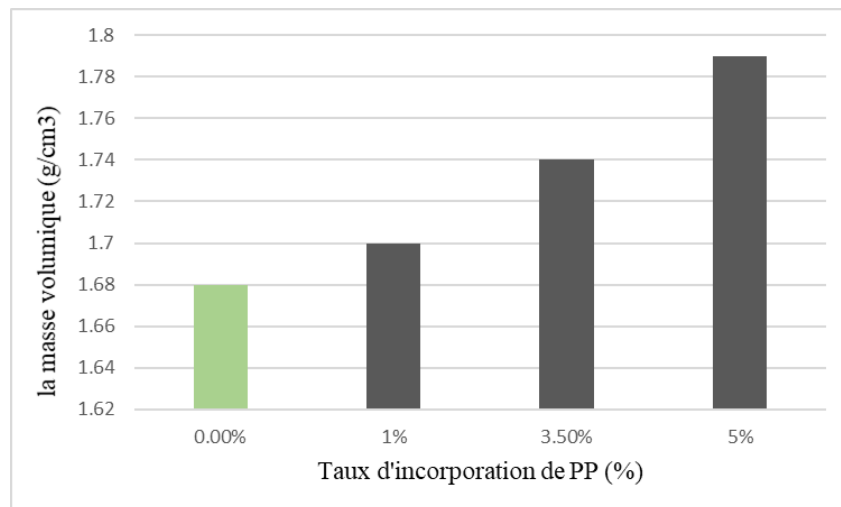


Figure III.10: variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de la pierres ponce.

Observation : L'incorporation de la pierre ponce entraîne une augmentation graduelle et quasi-linéaire de la masse volumique. passant de 1.68 g/cm³ à 1.79 g/cm³ pour un taux de 5%.

• **Analyse et Interprétation** : Bien que la pierre ponce soit connue pour sa structure alvéolaire (poreuse) à l'état brut, sous forme broyée ou finement intégrée, elle semble ici contribuer à l'optimisation du squelette solide du géopolymère. Ses particules fines agissent potentiellement en comblant les espaces intergranulaires de la matrice de base, conduisant à une densification du composite final.

b. Résistance à la Flexion

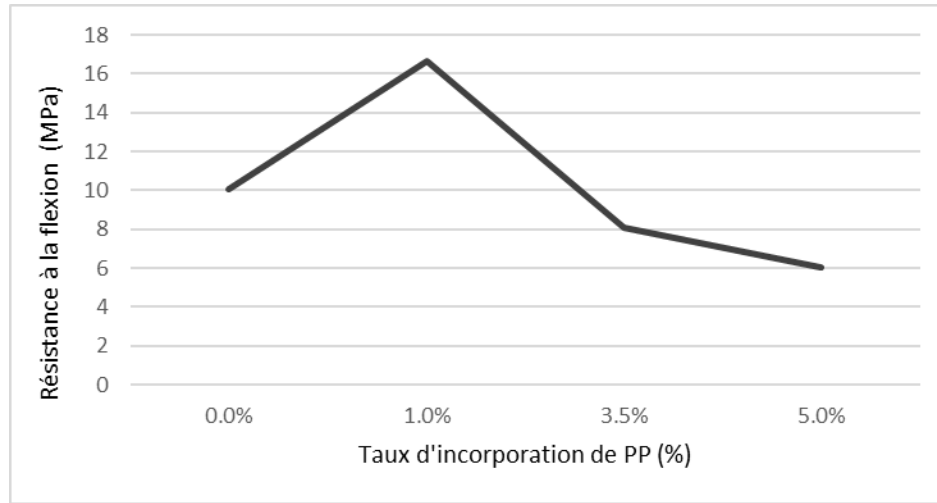


Figure III.11: variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de la pierre ponce.

D'après la figure III.11 on remarque :

La composition GPP1 donne une résistance maximale à la flexion, constituant le dosage optimal avant la dégradation des performances.

Voici le détail de la remarque pour les deux phases :

1. Phase d'amélioration (Phase ascendante de 0 % à 1 %) :

- On observe une augmentation remarquable et très rapide de la résistance à la flexion dès les premiers ajouts de pierre ponce (PP).
- La résistance passe de la valeur de référence de 10.08 MPa (à 0 %) pour atteindre un pic maximal de 16.63 MPa avec un taux d'incorporation de 1 %.

- Cette phase met en évidence un gain de performance mécanique très significatif (+65 % d'amélioration par rapport au témoin). confirmant que ce faible dosage est hautement bénéfique.

2. Phase de dégradation (Phase descendante de 1 % à 5 %) :

- Passé le seuil optimal de 1 %. la courbe montre une chute brutale et continue de la résistance à la flexion.
- Dès l'ajout de 3.5 % de PP. la résistance chute à 8.06 MPa. devenant ainsi strictement inférieure à la valeur du mélange de référence sans ajout.
- Cette tendance à la baisse s'accroît à 5 % d'incorporation. où le matériau perd considérablement de sa résistance pour atteindre une valeur minimale de 6.05 MPa.
- **Résultats** : On observe une augmentation remarquable à 1% (16.63 MPa). suivie d'une chute progressive aux dosages plus élevés.
- **Analyse** : À faible dose. la pierre ponce densifie la phase liante. À plus forte dose. sa porosité naturelle devient prédominante et affaiblit la résistance globale du matériau.

c. Résistance à la Compression

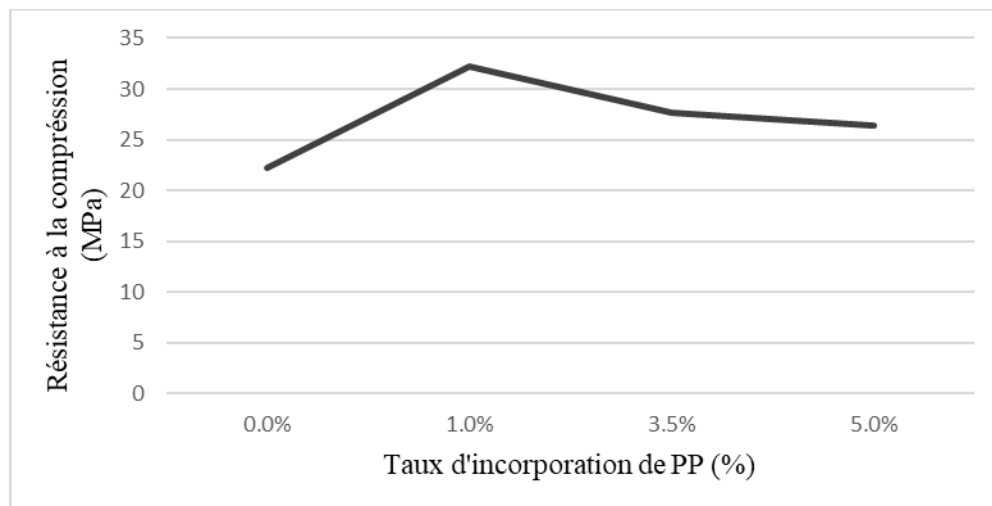


Figure III.12: variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de la pierres ponce.

- **Résultats** : Performance optimale : la résistance atteint son apogée à 32.25 MPa pour 1% d'ajout.
- **Évolution** : Malgré une baisse aux taux supérieurs, elle reste supérieure au témoin même à 5% (26.41 MPa).
- **Analyse** : La réactivité pouzzolanique de la pierre ponce renforce chimiquement et physiquement le liant géopolymère, créant une structure extrêmement dense.

III.4.2. L'ajout des fibres métallique

a. Masse volumique

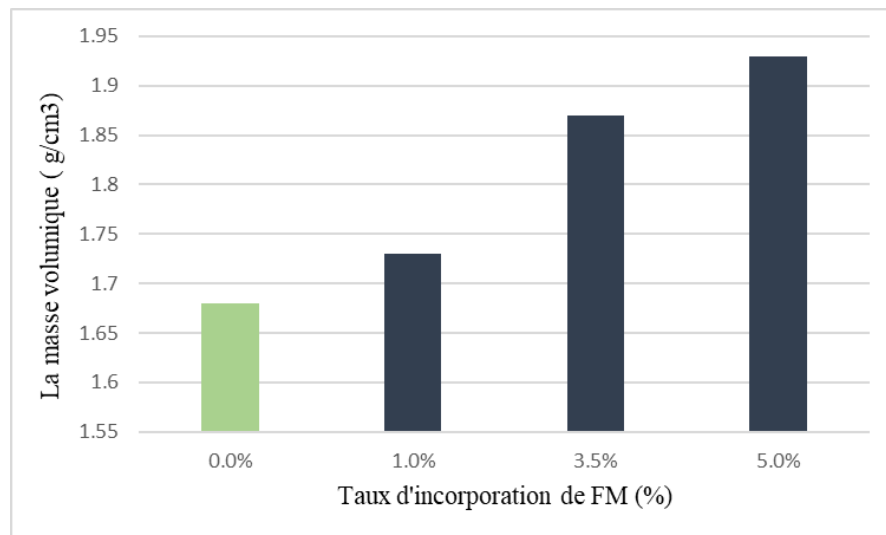


Figure III.13: variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages des fibres métalliques.

- **Observation** : On constate une augmentation continue et très marquée de la masse volumique, proportionnelle au taux d'incorporation. Elle passe de 1.68 g/cm³ (0%) à un maximum de 1.93 g/cm³ pour 5% de fibres.
- **Analyse et Interprétation** : Ce résultat est tout à fait logique. La densité intrinsèque de l'acier (fibres métalliques) est nettement supérieure à celle de la matrice géopolymère.

L'ajout progressif de ces éléments denses augmente naturellement le poids spécifique global du matériau composite, améliorant ainsi sa compacité sans créer de vides significatifs.

b. Résistance à la Flexion

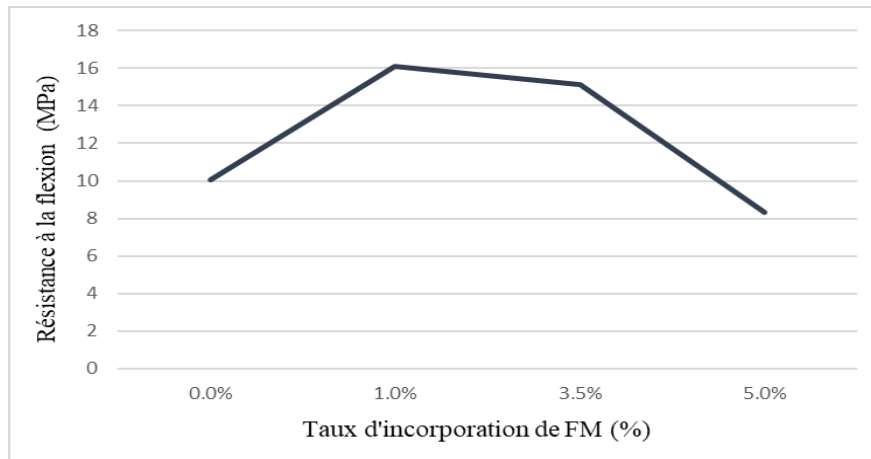


Figure III.14: variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages des fibres métalliques

- **Résultats** : Amélioration majeure : la résistance bondit à 16.07MPa pour 1% d'ajout (gain de plus de 50%).
- **Évolution** : Elle reste performante à 3.5% (15.12 MPa) avant de décliner à 5%.
- **Analyse** : C'est l'effet de pontage des fibres métalliques qui bloque la propagation des fissures à travers la structure liante, renforçant considérablement le composite.

c. Résistance à la Compression

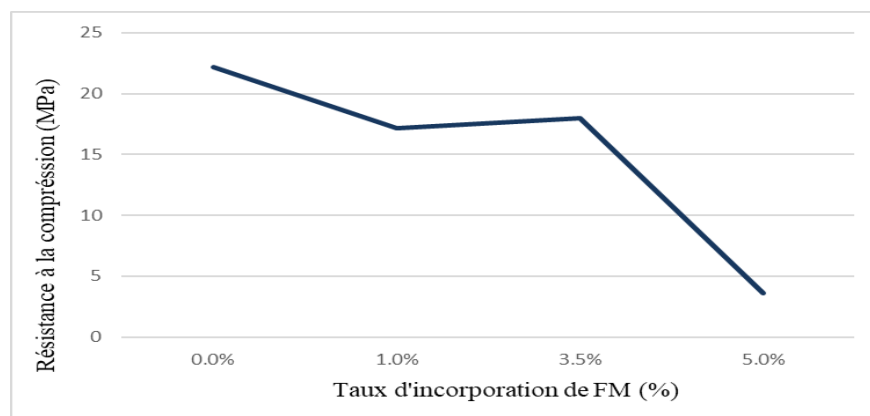


Figure III.15: variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages des fibres métalliques.

• **Résultats** : La résistance se maintient à des niveaux acceptables (18.01 MPa à 3.5%) avant de s'effondrer à 3.63 MPa pour un dosage de 5%.

• **Analyse** : La chute à 5% s'explique par un problème d'ouvrabilité et d'agglomération des fibres qui déstructure totalement le squelette solide.

III.4.3. L'ajout de la poudre de verre

a. Masse volumique

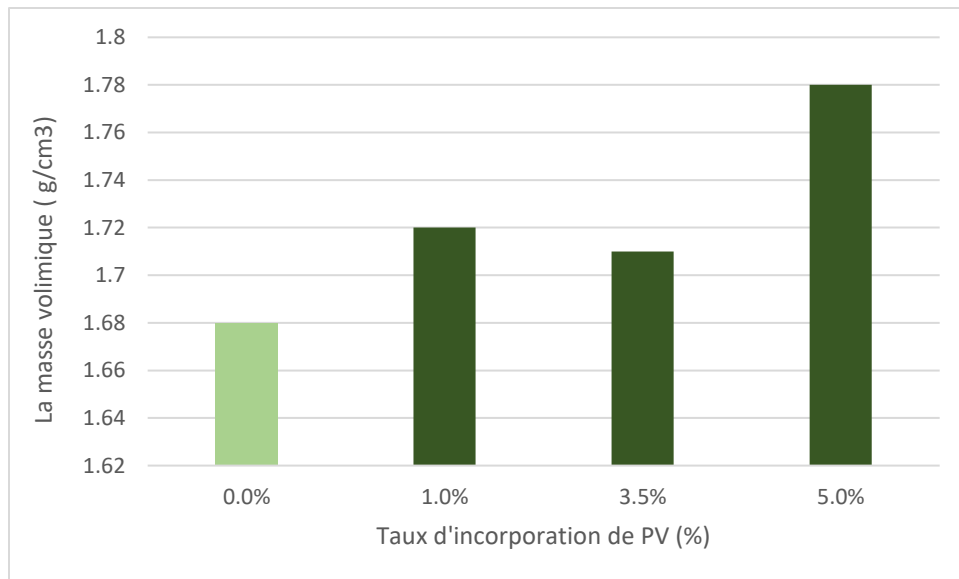


Figure III.16: variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de la poudre de verre.

• **Observation** : On observe une augmentation globale de la masse volumique avec l'ajout de poudre de verre, atteignant 1.78 g/cm³ à 5%, malgré une très légère stagnation entre 1% (1.72 g/cm³) et 3.5% (1.71 g/cm³).

• **Analyse et Interprétation** : Contrairement au verre concassé, la poudre de verre joue un rôle de "micro-filler". Grâce à sa grande finesse, elle vient combler les micro-vides et la porosité capillaire de la matrice géopolymère. Cet effet de remplissage densifie la microstructure du matériau, justifiant l'augmentation globale de la masse volumique.

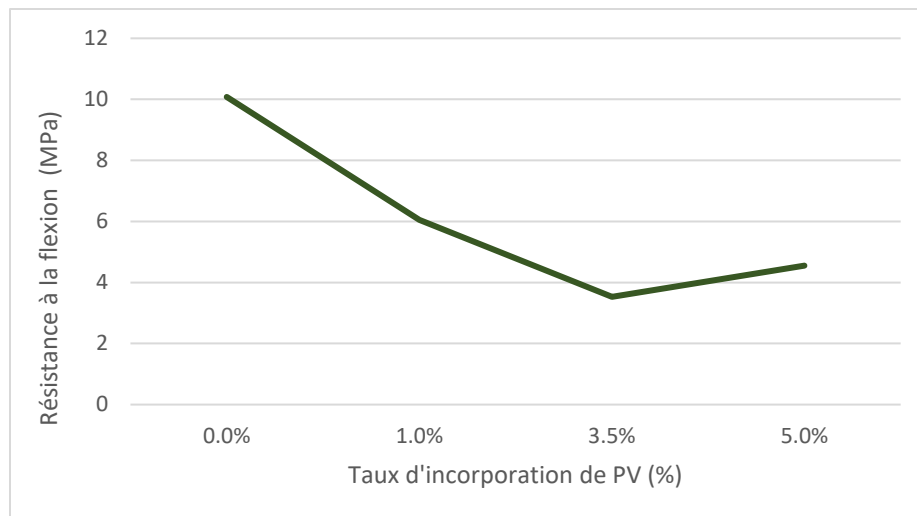
b. Résistance à la Flexion

Figure III.17: variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de la poudre de verre.

- **Résultats :** On note une baisse de 10.08 MPa à 6.05 MPa pour 1%. avant d'atteindre 4.55 MPa à 5%.
- **Analyse :** L'excès de silice amorphe non réactive fragilise le réseau du liant géopolymère. limitant sa capacité à supporter les efforts de flexion.

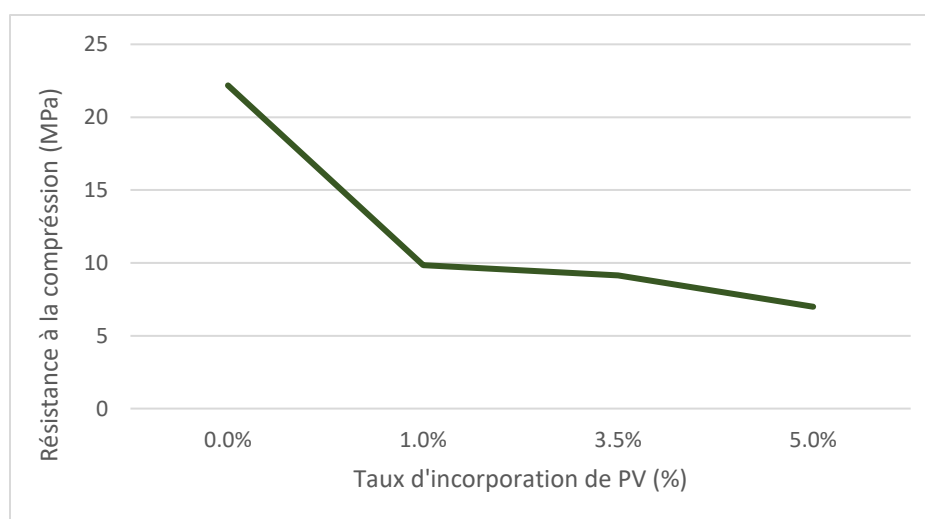
c. Résistance à la Compression

Figure III.18: variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de la poudre de verre

- **Résultats** : La résistance diminue progressivement avec l'augmentation du taux de poudre de verre, passant de 22.18 MPa (0%) à 6.99 MPa (5%).

- **Analyse** : Bien que fine, la poudre de verre semble altérer l'équilibre chimique nécessaire à la polymérisation, rendant la structure liante moins compacte.

III.4.4. L'ajout de verre concassé

a. Masse volumique

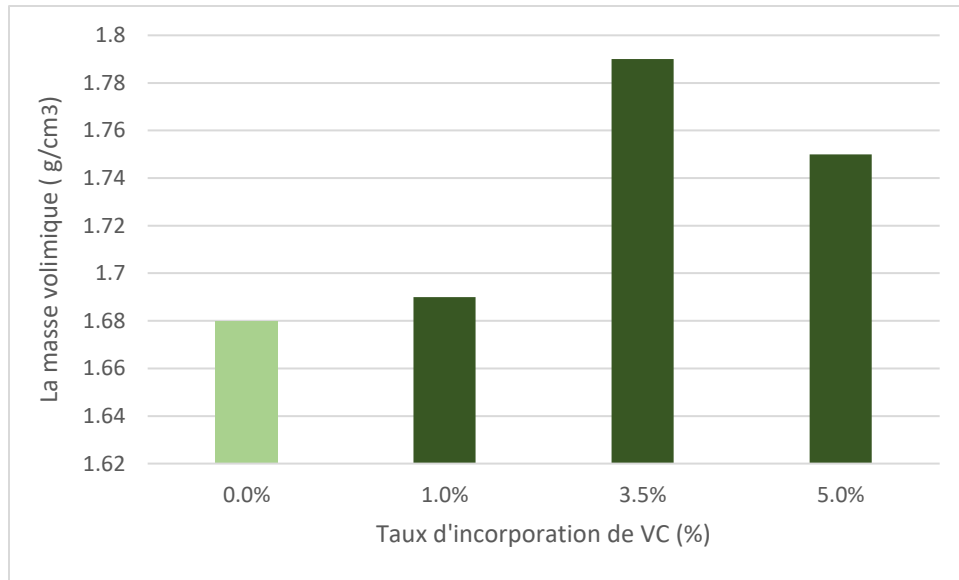


Figure III.19: variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de verre concassé.

- **Observation** : La masse volumique augmente progressivement jusqu'à atteindre un pic de 1.79 g/cm³ à un taux de 3.5%, avant de subir une chute à 1.75 g/cm³ pour le taux de 5%.

- **Analyse et Interprétation** : Jusqu'à 3.5%, les particules de verre s'intègrent bien dans le squelette granulaire, augmentant la densité. Cependant, à 5%, la forme très anguleuse et irrégulière du verre concassé entraîne une diminution de la maniabilité (ouvrabilité) du mélange frais. Ce manque de maniabilité favorise l'emprisonnement de bulles d'air lors du coulage, augmentant la porosité interne et faisant ainsi chuter la masse volumique.

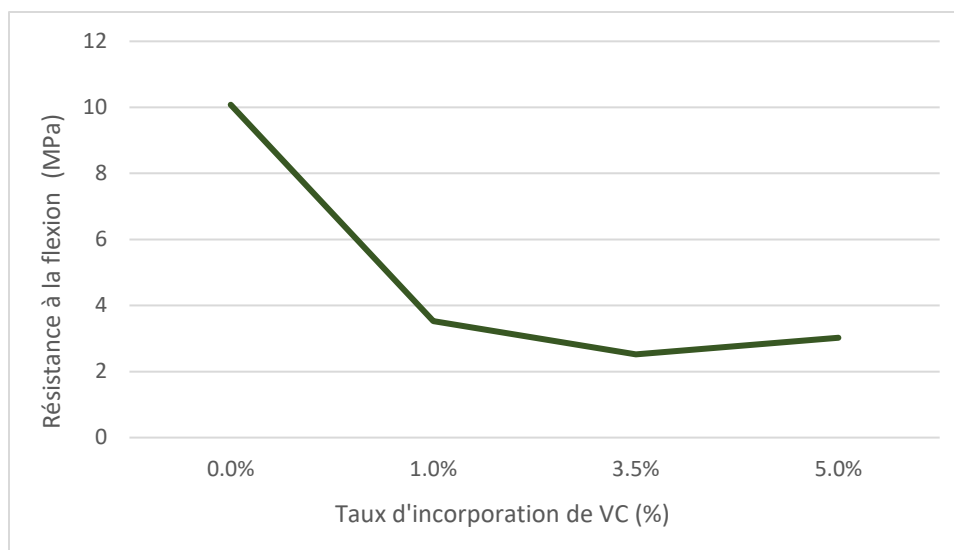
b. Résistance à la Flexion

Figure III.20: variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de verre concassé.

- **Résultats :** La résistance chute de manière continue, avec une valeur minimale de 2.52 MPa à 3.5%.
- **Analyse :** La forme anguleuse du verre concassé agit comme un concentrateur de contraintes au sein du liant, provoquant une rupture fragile immédiate dès l'application de la charge.

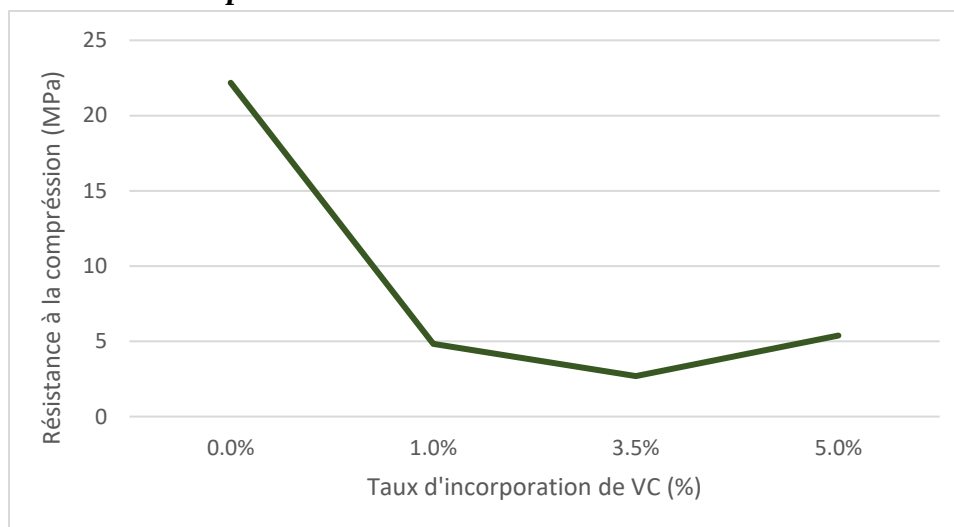
c. Résistance à la Compression

Figure III.21: variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de verre concassé.

Résultats : Une baisse sévère est enregistrée, atteignant son minimum de 2.69 MPa pour un taux de 3.5%.

- **Évolution :** Même à 5%, la résistance reste très faible (5.38 MPa) par rapport au GP initial.
- **Analyse :** Les particules de verre concassé, par leur surface lisse, créent des discontinuités majeures dans le squelette solide, favorisant l'éclatement précoce des éprouvettes.

III.4.5. L'ajout des fibres de palmier

a. Masse volumique

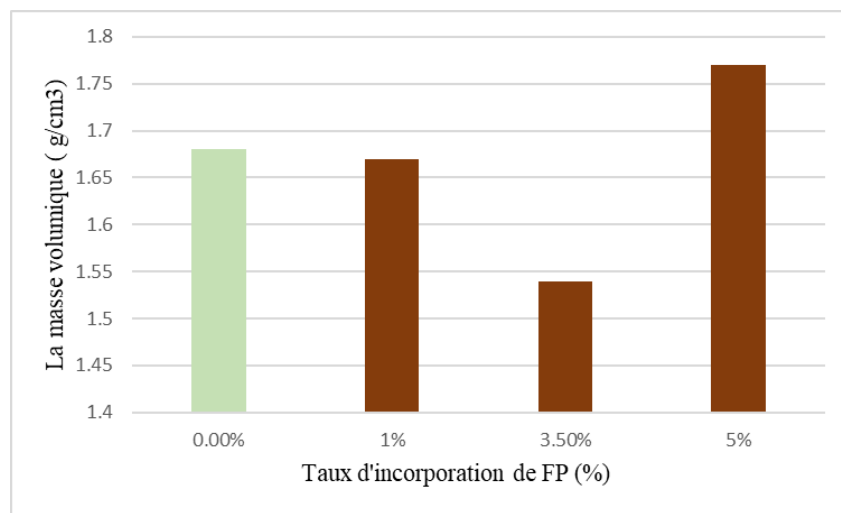


Figure III.22: variation du résultat de la masse volumique par rapport aux pourcentages de fibre de palmier.

- **Observation :** Le comportement est fluctuant. On note une baisse de la masse volumique jusqu'à 3.5% (où elle atteint son minimum à 1.54 g/cm³), suivie d'une augmentation brutale et atypique à 5% (1.77 g/cm³).
- **Analyse et Interprétation :** La diminution jusqu'à 3.5% s'explique par la nature des fibres végétales : elles sont très légères et augmentent la porosité du mélange. L'augmentation soudaine à 5% constitue une anomalie probable. Elle peut s'expliquer soit par un problème d'homogénéité lors du malaxage (agglomération des fibres créant des zones très denses de liant ailleurs), soit par une forte absorption de l'eau de gâchage par les fibres de palmier à ce dosage critique, ce qui modifie les réactions de géopolymérisation et la compacité de l'échantillon testé.

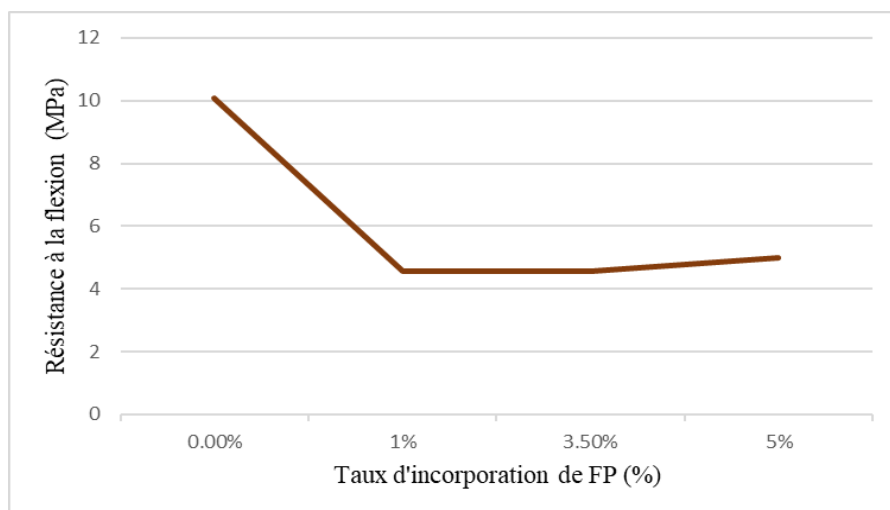
b. Résistance à la Flexion

Figure III.23: variation du résultat de la résistance à la flexion par rapport aux pourcentages de fibre de palmier.

- **Résultats :** La résistance à la flexion diminue de moitié dès le premier ajout, passant de 10.08 MPa à 4.55 MPa (1%).
- **Évolution :** Les valeurs restent quasi-stables pour les taux de 3.5% et 5%.
- **Analyse :** Le manque d'adhérence à l'interface fibre/pâte empêche le transfert efficace des charges, ce qui fragilise la structure liante sous l'effet de la traction par flexion

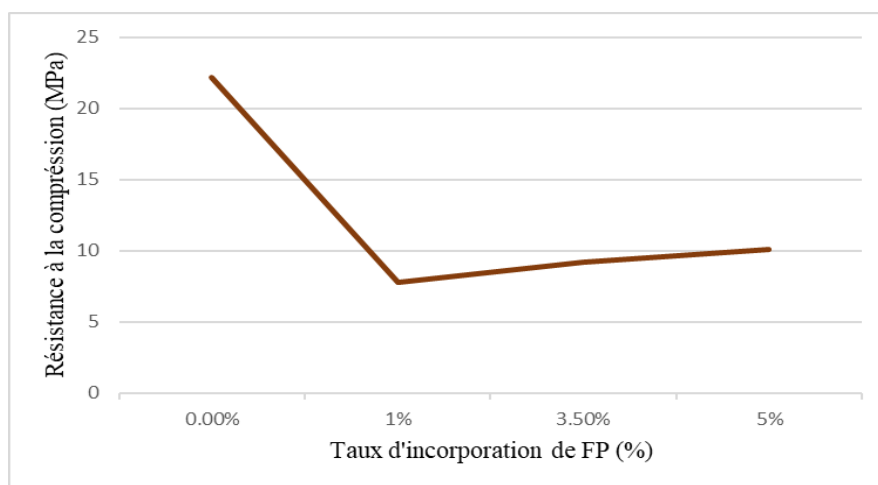
c. Résistance à la Compression

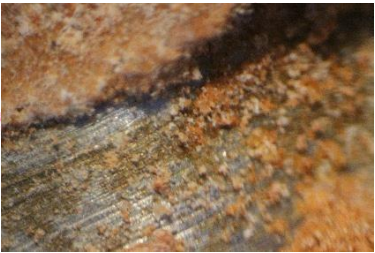
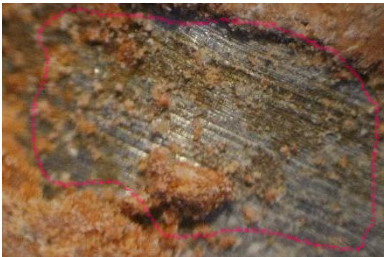
Figure III.24: variation du résultat de la résistance à la compression par rapport aux pourcentages de fibre de palmier

- **Résultats** : On observe une chute brutale de la résistance dès l'ajout de 1% de fibres (7.82 MPa contre 22.18 MPa pour le témoin).
- **Évolution** : Entre 1% et 5%, la résistance stagne à des valeurs faibles, atteignant un maximum de 10.08 MPa à 5%.
- **Analyse** : Cette dégradation est due à la nature hydrophile des fibres de palmier qui absorbent une partie des réactifs, affaiblissant la réaction au sein du liant géopolymère.

III.5. Observation microscopique

Le microscope est un instrument optique utilisé pour observer de petits objets qui ne peuvent pas être vus à l'œil nu, où l'objet étudié est agrandi à travers plusieurs lentilles dans le microscope, car ces lentilles plient la lumière vers l'œil et font apparaître le corps plus grand qu'il ne l'est en réalité. Il est constitué d'un banc optique dont une partie se trouve devant l'objet : l'éclairage, l'autre partie derrière l'objet.

Tableau III.3: l'observation microscopique

Figure	Éprouvette	Observation
 	Gpfm Géopolymère + fibre métallique	On observe distinctement la fibre métallique avec ses stries longitudinales. Un ancrage physique et une forte cohésion sont visibles entre le liant géopolymère et la surface rugueuse de la fibre, renforçant ainsi la liaison structurale

  	Gpvc Géopolymère+ verre concassé	Présence de fragments de verre concassé aux formes anguleuses et translucides. Ils apparaissent nettement enchâssés et répartis de manière homogène au sein de la structure liante, sans microfissures périphériques.
	GP Géopolymère	La structure du géopolymère de base est continue et homogène. Elle présente un aspect rugueux qui reflète la nature des matériaux locaux valorisés (sable de dune et déchets de brique), avec une porosité naturelle fine.

	Gpp Géopolymère+ pierre ponce	Contraste marqué par les granulats de pierre ponce blanchâtres. Ces derniers se caractérisent par une structure alvéolaire (très poreuse). parfaitement intégrée et enrobée par le liant géopolymère
 	Gpfp Géopolymère+ fibre de palmier	Mise en évidence de fibres végétales longitudinales (cerclées en rouge) présentant la texture striée typique du palmier. Elles sont efficacement gainées par le liant géopolymère. témoignant d'une bonne compatibilité entre la fibre et la matrice liante.

III.6. Microscopie électronique à balayage (MEB)

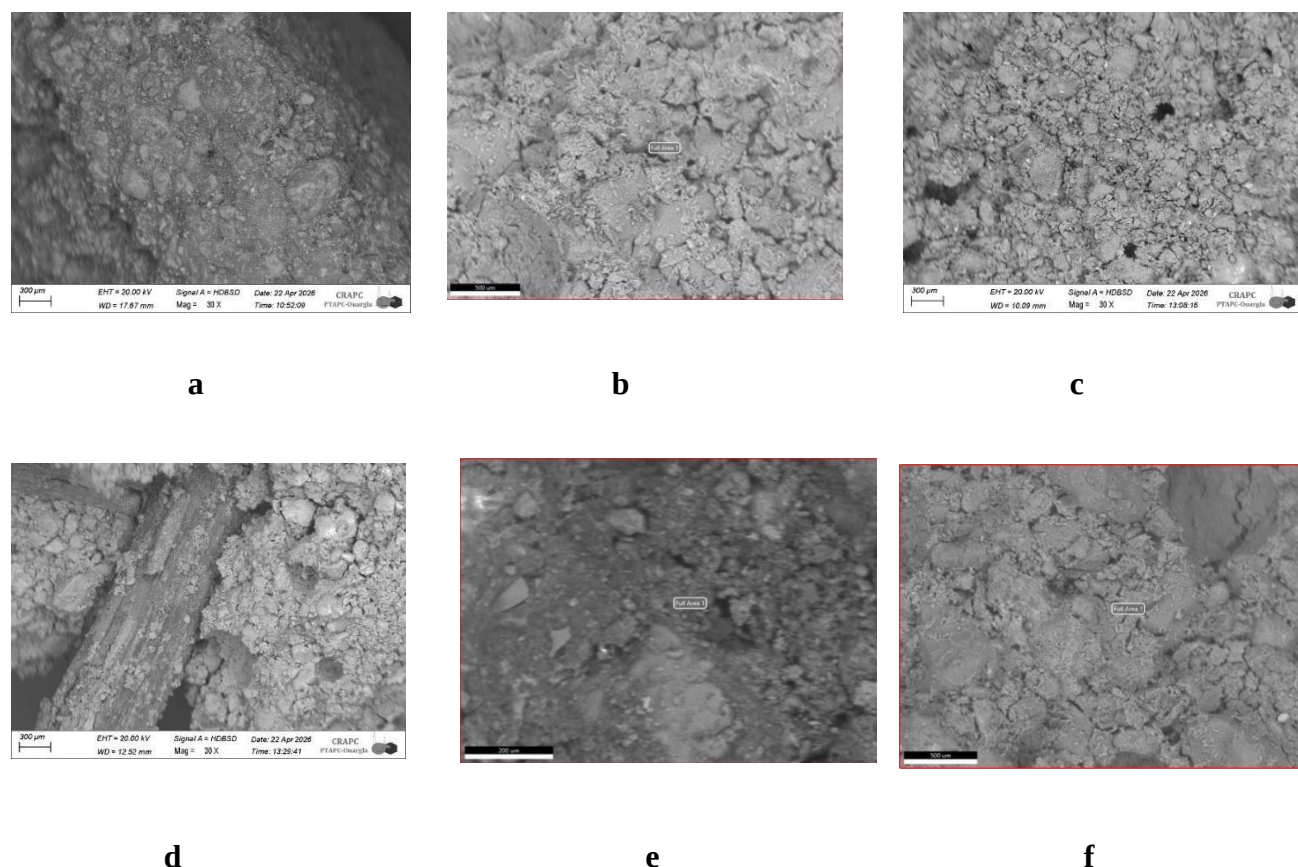


Figure III. 25 : Microscopie électronique à balayage (MEB)

a. géopolymère b. Gpp1 c. Gpvc1 d. Gpfp3 e. Gppv1 f. Gpfm1

a. L'observation du MEB révèle une texture microstructurale consolidée et compacte. Les clichés montrent une excellente interconnexion entre la phase liante et les fractions granulaires. Cette forte compacité, caractérisée par l'absence de vides intergranulaires majeurs et une zone de transition interfaciale parfaitement soudée, confirme l'efficacité du réseau géopolymérique formé à cette échelle de grossissement (x30). (Voir l'Annexe1)

b. En comparaison avec l'enchantions de référence (Géopolymère sans ajouts) qui présentait une microstructure homogène, dense et hautement compacte, l'introduction de la pierre ponce engendre une transition texturale nette. L'analyse micrographique met en évidence le rôle structural clé de la pierre ponce en tant que granulat léger conférant une porosité fonctionnelle au composite. Les clichés révèlent que malgré cette augmentation de la porosité, l'excellente affinité interfaciale

repose sur la morphologie rugueuse de la pierre ponce : ses pores ouverts et ses cavités superficielles permettent au gel géopolymérique fluide d'y pénétrer par capillarité. Ce phénomène d'auto-remplissage partiel crée un ancrage mécanique rigide (interlocking) entre la matrice dense et ce granulat poreux. ce qui compense la porosité globale induite et préserve la continuité structurale du matériau par rapport au Mélange de référence. (Voir l'Annexe1)

c. Par rapport au composition Témoins (Géopolymère) présentant une compacité de base. l'introduction du verre concassé optimise nettement l'arrangement structural de la matrice. L'examen micrographique met en relief l'action synergique de cet ajout : d'une part. les microparticules de verre agissent comme des agents de nucléation et de remplissage comblant la porosité intergranulaire ; d'autre part. leur réactivité chimique renforce la densité du géopolymérique. Cette compacité accrue se traduit par une interface matrice-granulats parfaitement homogène. scellée et exempte de microfissures à cette échelle (x30). ce qui justifie l'amélioration des propriétés physico-mécaniques observées. (Voir l'Annexe1)

d. En comparaison avec l'enchancements de référence (Géopolymère sans ajouts) caractérisée par son homogénéité granulaire. l'introduction des fibres de palmier induit une transition texturale hétérogène marquée. L'analyse micrographique met en évidence le rôle de renfort structural joué par ces filaments naturels. Les clichés révèlent la morphologie longitudinale et striée des fibres. qui s'insèrent au sein de la matrice géopolymérique. Bien que la zone de transition interfaciale montre un enrobage global des fibres par le liant. on note l'apparition de micro-vides ou décohésions localisées au niveau des zones de contact. inhérents à la nature hydrophobe et rugueuse des fibres végétales. Cet enchevêtrement physique partiel contribue néanmoins à un mécanisme de pontage des microfissures par rapport au Mélange de référence. (Voir l'Annexe1)

e. En comparaison avec l'enchancements de référence (Géopolymère sans ajouts) caractérisée par sa compacité standard. l'incorporation de la poudre de verre induit des modifications microstructurales notables. L'analyse micrographique met en évidence le rôle de micro-remplissage et le potentiel pouzzolanique du verre. Les clichés révèlent une texture nettement plus dense et homogène. où les particules fines de verre comblent efficacement les interstices intergranulaires de la matrice. De plus. la zone de transition interfaciale montre une excellente adhérence et une continuité parfaite. exempte de porosités majeures à cette échelle (200 μ). ce qui

indique une réactivité optimale du système géopolymérique par rapport au mélange référence. (Voir l'Annexe1)

f. En comparaison avec l'enchâtonnement de référence (Géopolymère sans ajouts) caractérisée par son homogénéité granulaire fine, l'incorporation des fibres métalliques introduit une hétérogénéité structurale intentionnelle et bénéfique. L'analyse micrographique met en évidence le rôle de renfort mécanique à haute rigidité joué par ces éléments filiformes. Les clichés révèlent l'insertion des fibres métalliques au sein de la matrice géopolymérique, montrant une zone de transition interfaciale globalement continue et dense. La rugosité superficielle de la fibre favorise une bonne adhérence par frottement mécanique avec le gel liant. Ce réseau fibreux interconnecté engendre un mécanisme de pontage rigide des microfissures sous sollicitation, ce qui améliore considérablement la ductilité et la résistance à la traction du composite par rapport au mélange référence. (Voir l'Annexe1)

III.7. Les propriétés physico-mécaniques des compositions optimales par rapport aux ajouts

Tableau III.4: les meilleurs résultats du géopolymère par rapport aux ajouts

	GP	Gpp1	Gpfm1	Gppv1	Gpvc1	Gpfp3
Rf (MPa)	10.08	16.63	15.12	6.05	3.02	5.04
Rc (MPa)	22.18	32.25	18.01	9.16	5.38	10.08
ρ (g/cm³)	1.68	1.70	1.87	1.72	1.75	1.77

Ce tableau récapitule les meilleures performances obtenues pour chaque type d'ajout.

L'ajout de 1% de Pierre ponce se distingue comme la variante optimale, affichant une résistance à la compression de 32.25 MPa et une résistance à la flexion de 16.63 MPa. Ces valeurs confirment l'efficacité de cet ajout pour la suite de notre étude sur la durabilité.

III.8. Durabilité

Dans cette partie, nous nous proposons d'étudier la variation temporelle du comportement physico-mécanique des éprouvettes, en nous basant sur le choix de la pierre ponce avec un taux de substitution de 1% comme l'addition la plus performante pour poursuivre l'analyse de la durabilité du béton géopolymère. Ce choix est motivé par sa grande efficacité à optimiser la structure du matériau, puisqu'elle a permis d'atteindre les résistances les plus élevées, soit 32.25 MPa en compression et 16.63 MPa en traction par flexion. Ces résultats remarquables s'expliquent par l'efficacité de l'activité pouzzolanique de la pierre ponce et sa capacité à renforcer la cohésion interne de la matrice géopolymère.

III.8.1. La masse volumique

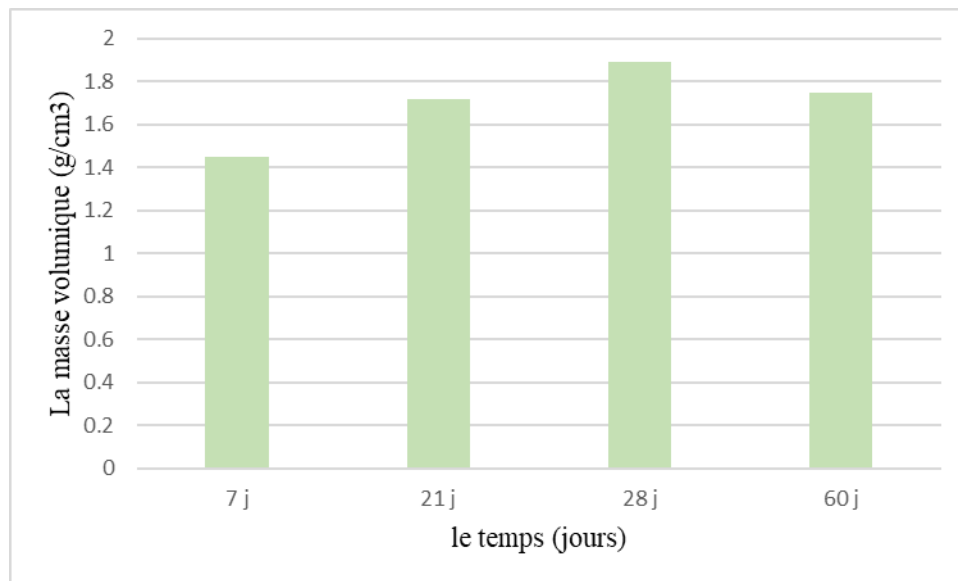


Figure III.26: Variation de la masse volumique en fonction du temps

- **Observation :** On constate une croissance ascendante de la masse volumique en fonction de l'âge de l'échantillon, où la valeur minimale est enregistrée au 7ème jour avec 1.45 g/cm³. Cette valeur grimpe ensuite de manière significative pour atteindre un pic de 1.89 g/cm³ au 28ème jour, avant de marquer une légère diminution pour se situer à 1.75 g/cm³ au 60ème jour.
- **Analyse et Interprétation :** Cette évolution notable de la densité est intimement liée à la poursuite du processus de réaction chimique au sein du matériau. Jusqu'au 28ème jour,

cette dynamique entraîne une accumulation progressive des produits solides et une réduction du volume poreux ; cette diminution des vides internes rend la structure plus "pleine" et plus lourde par unité de volume. ce qui explique l'augmentation de la masse volumique au fil du temps. Quant à la baisse observée au 60ème jour, elle peut traduire une stabilisation de la structure interne ou une légère altération de l'échantillon sur le long terme, rendant la densité moins élevée par rapport à son état optimal atteint au 28ème jour.

III.8.2. La résistance à la flexion

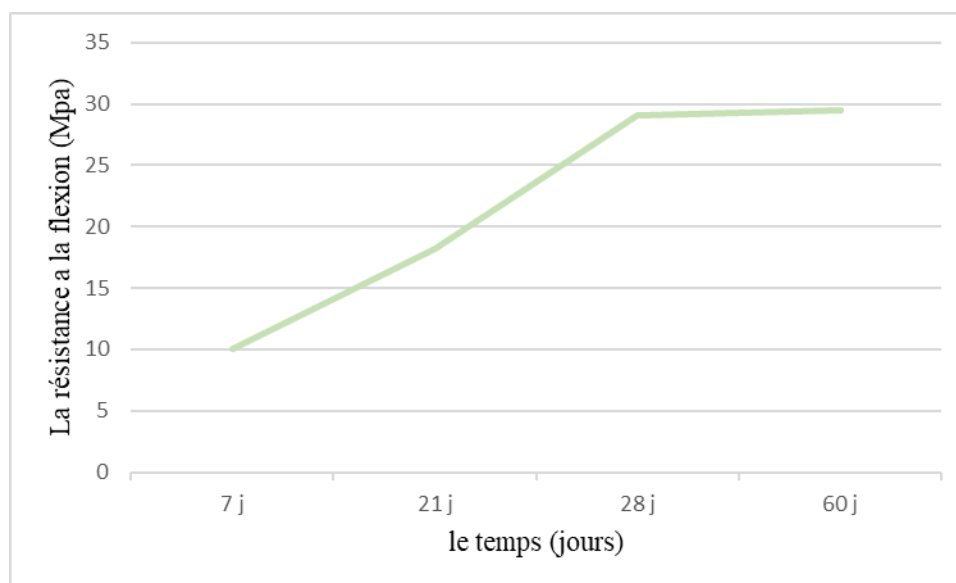


Figure III.27: variation du résultat de la résistance à la flexion en fonction du temps.

- **Résultats :** On observe une augmentation continue et progressive de la résistance à la flexion au fil du temps. Elle débute à **10.08 MPa** au 7ème jour, puis progresse de manière significative pour atteindre **29.04 MPa** au 28ème jour. Cette tendance à la hausse se stabilise ensuite, marquant une légère progression finale pour atteindre **29.50 MPa** au 60ème jour.
- **Analyse :** Cette amélioration remarquable est due au renforcement constant des liaisons internes (réactions chimiques) entre les particules du matériau. L'hydratation continue des composants favorise une meilleure cohésion de la matrice, ce qui accroît la capacité de la structure à résister aux contraintes de traction induites par la flexion. La stabilisation observée entre le 28ème et le 60ème jour confirme que le matériau a acquis l'essentiel de

ses propriétés mécaniques et que sa structure interne est devenue mature et hautement résistante.

III.8.3. La résistance à la compression

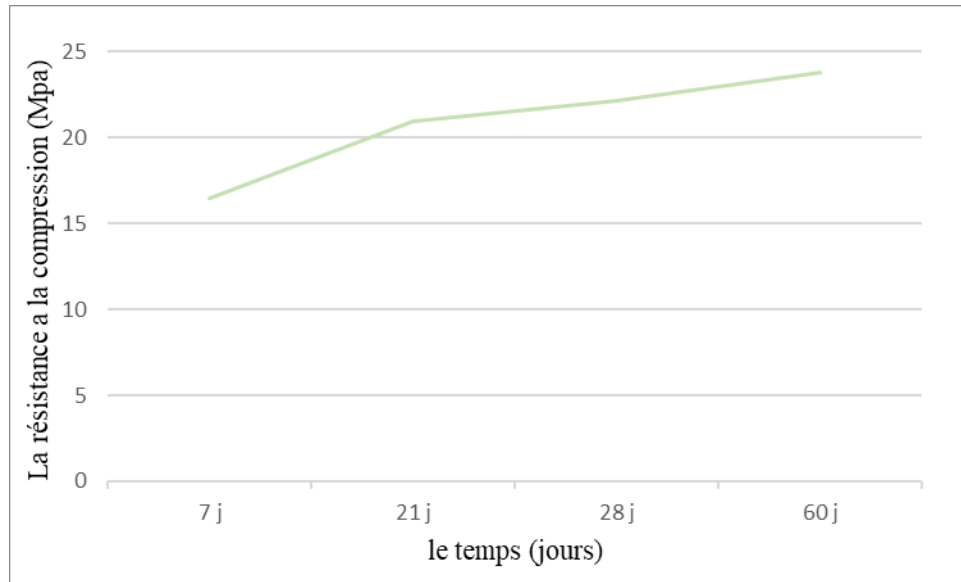


Figure III.28: La Résistance à la compression en fonction des jours

- **Résultats :** On observe une progression continue de la résistance à la compression tout au long de la période d'étude. Elle débute à **16.4 MPa** au 7ème jour, atteint **22.1 MPa** au 28ème jour, et continue de croître pour atteindre son maximum à **23.75 MPa** au 60ème jour.
- **Évolution :** La courbe affiche une croissance rapide durant les premières semaines, avec une part majeure de la résistance acquise dès le 21ème jour. Cette phase est suivie d'une augmentation plus graduelle et régulière qui se poursuit jusqu'au 60ème jour, montrant que le matériau continue de gagner en performance sur le long terme.
- **Analyse :** Cette trajectoire reflète un processus d'hydratation efficace et prolongé du liant. La densification progressive de la matrice cimentaire, la réduction de la porosité et le renforcement des liaisons inter-articulaires permettent de former une structure interne de plus en plus robuste. La continuité de la croissance entre le 28ème et le 60ème jour témoigne d'une maturation stable, rendant le matériau capable de supporter des charges de compression de plus en plus importantes.

III.9. Conclusion

D'après cette expérimentation ont conclu :

- ✓ La résistance passe de la valeur de référence de 10.08 MPa (à 0 %) pour atteindre un pic maximal de 16.63 MPa avec un taux d'incorporation de 1 %.
- ✓ L'ajout des fibres métallique donne une amélioration majeure : la résistance bondit à 16.07MPa pour 1% d'ajout (gain de plus de 50%).
- ✓ On observe une chute brutale de la résistance dès l'ajout de 1% de fibre de palmiers (7.82 MPa contre 22.18 MPa pour le témoin).
- ✓ On observe une augmentation continue et progressive de la résistance à la flexion en fonction du temps. débutant à 10.08 MPa au 7ème jour pour atteindre son apogée à 29.50 MPa au 60ème jour.

En conclusion de ce volet expérimental, les résultats obtenus sur les propriétés de notre béton géopolymère ne représentent pas de simples données techniques, mais constituent une base de données de référence exhaustive. Fort de ce constat, le chapitre suivant sera consacré à l'exploitation de ces ressources pour la modélisation du comportement mécanique du matériau et la prédiction de ses caractéristiques physico-mécaniques. Pour ce faire, nous mobiliserons des techniques d'apprentissage automatique (Machine Learning), nous permettant d'anticiper les performances de diverses formulations tout en optimisant l'effort expérimental en laboratoire



Chapitre IV :

**Etude et modélisation par la
méthode MACHINE LEARNING**



Chapitre IV : Etude et modélisation par la méthode MACHINE LEARNING

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente la phase cruciale de modélisation prédictive en s'appuyant sur les outils de l'intelligence artificielle. Face à la complexité des interactions physico-chimiques au sein des différents mélanges, l'approche par Machine Learning s'impose comme une alternative robuste aux méthodes empiriques traditionnelles. L'objectif est de transformer notre base de données en un moteur d'inférence capable d'anticiper les performances mécaniques avec une précision accrue, tout en optimisant le processus de formulation.

IV.2 Machine learning methods

IV.2.1 Random Forest (RF)

Random Forest (RF) est un algorithme d'apprentissage automatique en ensemble basé sur les arbres de décision. Il fonctionne en construisant une multitude d'arbres de décision pendant l'entraînement et en produisant la moyenne (pour la régression) ou le vote majoritaire (pour la classification) de leurs prédictions individuelles, améliorant ainsi la précision prédictive et contrôlant le surapprentissage [27].

Étant donné un ensemble de données d'entraînement

$$\mathcal{D} = [(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)]_{i=1}^N \quad \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^M, \mathbf{y}_i \in \mathbb{R} \text{ or } [1, \dots, K], \dots \quad [\text{IV.1}]$$

La forêt aléatoire construit des arbres de décision $T [h_t(x)]_{t=1}^T$, chacun entraîné sur un échantillon bootstrap $\mathcal{D}_t$ tiré au hasard avec remise de $\mathcal{D}$. Chaque arbre est construit en utilisant un sous-ensemble aléatoire de caractéristiques d'entrée à chaque nœud de séparation afin d'introduire de la diversité, réduisant la corrélation entre les arbres.

La prédiction finale pour la régression est obtenue en prenant la moyenne des prédictions de tous les arbres individuels :

$$\hat{\mathbf{y}}_{\text{new}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{h}_t(\mathbf{x}_{\text{new}}) \dots \dots \dots [\text{IV.2}]$$

Pour les tâches de classification, la classe prédite finale est obtenue par vote majoritaire :

$$\hat{y}_{\text{new}} = \text{mode}[h_1(x_{\text{new}}). h_2(x_{\text{new}}). \dots . h_T(x_{\text{new}})] \dots \dots \dots [\text{IV.3}]$$

Cette agrégation d'arbres non corrélés réduit la variance tout en maintenant un faible biais, ce qui donne un modèle prédictif robuste et précis. L'utilisation du bagging (agrégation par Bootstrap) et de la sélection aléatoire des caractéristiques améliore la généralisation et réduit le surapprentissage, même dans des espaces de caractéristiques de haute dimension.

De plus, les forêts aléatoires fournissent des mesures de l'importance des caractéristiques en évaluant la diminution moyenne de l'impureté ou l'augmentation de l'erreur basée sur la permutation, ce qui les rend interprétables pour l'analyse et la sélection du modèle [28].

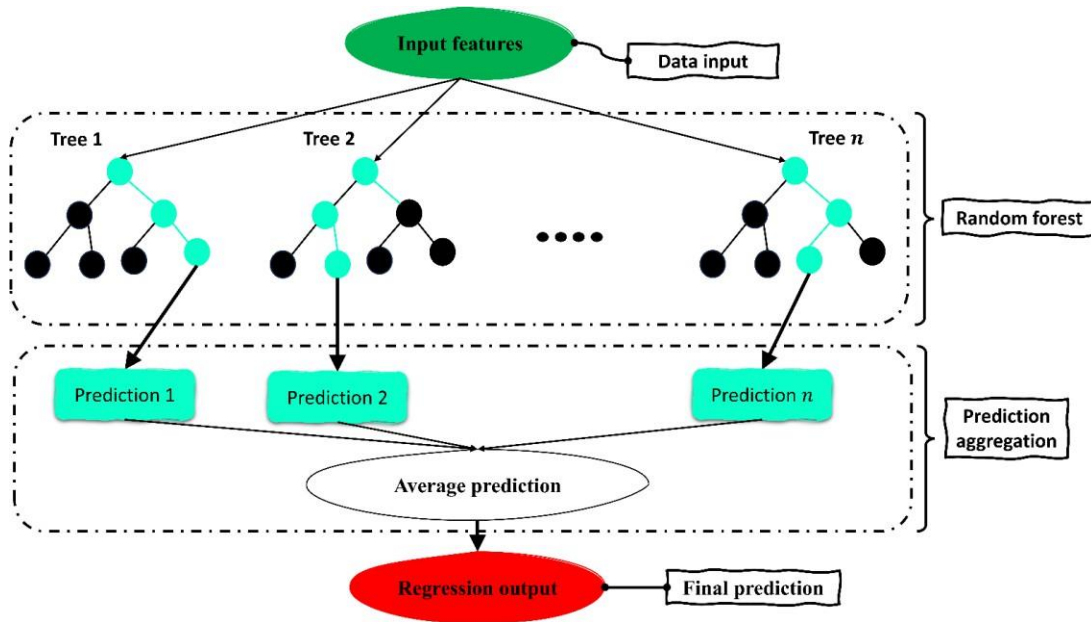


Figure IV.1 : Architecture globale du modèle des Forêts Aléatoires (Random Forest) pour la régression.

[29]

IV22 Multilayer Perceptron (MLP)

Un perceptron multicouche (MLP) est une classe de réseaux de neurones artificiels à propagation avant qui se compose d'une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées et d'une couche de sortie. Il est largement utilisé dans les tâches d'apprentissage supervisé telles que la

classification et la régression en raison de sa capacité à approximer des fonctions non linéaires [30].

Étant donné un vecteur d'entrée

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T \in \mathbb{R}^n \dots\dots\dots [\text{IV.4}]$$

Le MLP effectue une série de transformations affines suivies d'activations non linéaires. Pour un réseau avec les couches cachées, les transformations sont définies de manière récursive comme :

$$\mathbf{h}^{(1)} = \sigma(\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{x} + \mathbf{b}^{(1)}) \dots\dots\dots [\text{IV.5}]$$

$$\mathbf{h}^{(l)} = \sigma(\mathbf{W}^{(l)}\mathbf{h}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}) \text{.for } l = 2, \dots, L \dots\dots\dots [\text{IV.6}]$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{f}_{\text{out}}(\mathbf{W}^{(L+1)}\mathbf{h}^{(L)} + \mathbf{b}^{(L+1)}) \dots\dots\dots [\text{IV.7}]$$

Où $\mathbf{W}^{(l)}$ et $\mathbf{b}^{(l)}$ sont la matrice de poids et le vecteur de biais de la l^{th} couche. $\sigma(\cdot)$ est une fonction d'activation (généralement ReLU ou sigmoïde), et $\mathbf{f}_{\text{out}}(\cdot)$ est la fonction d'activation de sortie (par exemple, softmax pour la classification ou linéaire pour la régression) [31].

Le réseau est entraîné à l'aide de la rétropropagation, ce qui implique le calcul des gradients d'une fonction de perte choisie $\mathcal{L}(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}})$ par rapport à chaque paramètre du modèle et en les mettant à jour via la descente de gradient ou une variante telle qu'Adam [32]. Le théorème de l'approximation universelle garantit que, avec une largeur suffisante et une non-linéarité, les MLP peuvent approximer toute fonction continue sur un domaine compact [33].

En raison de leur profondeur compositionnelle, les MLP peuvent capturer des représentations hiérarchiques et ont été à la base du développement des architectures modernes d'apprentissage profond. Cependant, ils sont sensibles aux hypers paramètres et nécessitent souvent des techniques telles que le dropout ou la normalisation par lot pour améliorer la généralisation [34].

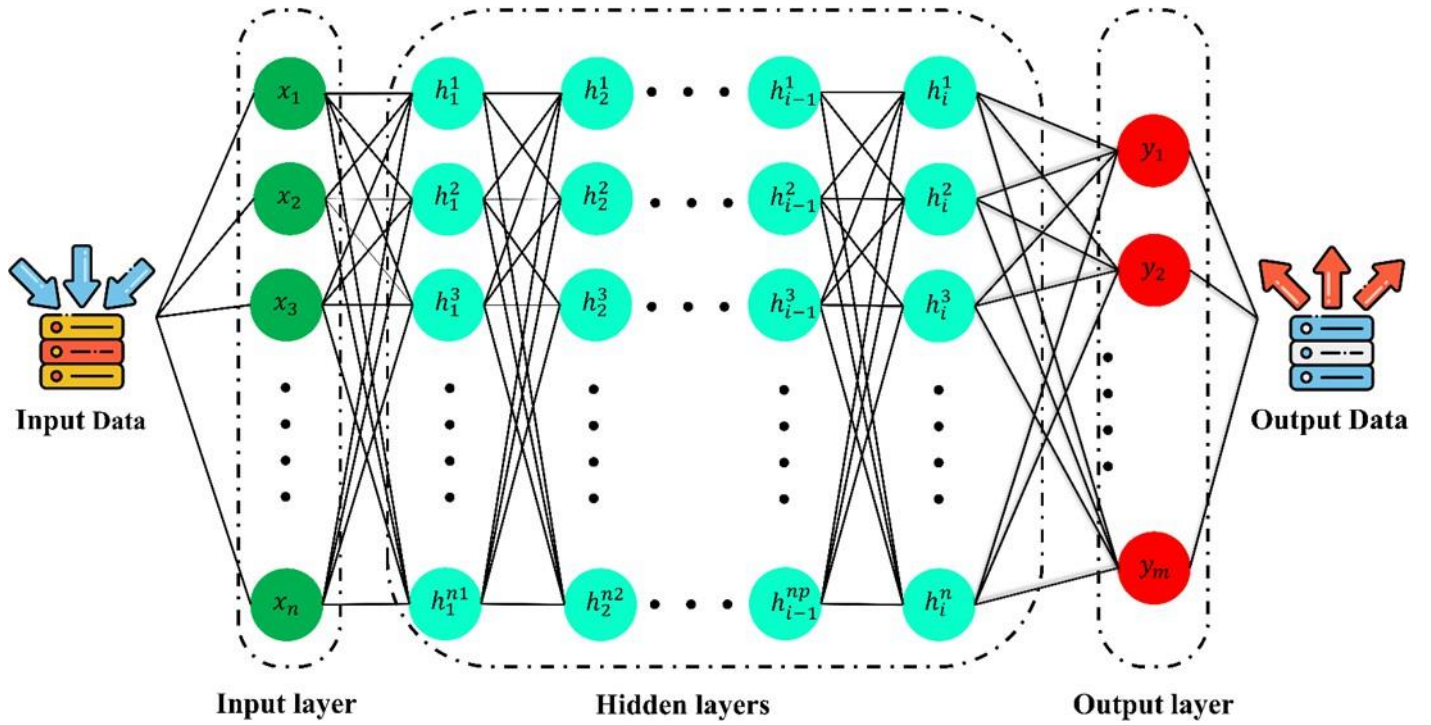


Figure IV.2 : Architecture d'un Réseau de Neurones Artificiels (ANN - Perceptron Multicouche).[29]

IV.23 CatBoost

CatBoost est un algorithme de gradient Boosting sur arbres de décision (GBDT) conçu pour améliorer la précision et les performances de généralisation sur des ensembles de données tabulaires hétérogènes, en particulier ceux contenant des caractéristiques catégorielles [35]. Il construit un modèle d'ensemble additif, où les arbres de décision sont construits séquentiellement pour minimiser une fonction de perte différentiable grâce à l'optimisation par descente de gradient.

Étant donné un ensemble de données d'entraînement

$$\mathcal{D} = [(x_i, y_i)]_{i=1}^N \text{ où } x_i \in \mathbb{R}^M \cup \mathcal{C}^L, y_i \in \mathbb{R} \text{ or } [1, \dots, K] \dots [IV.8]$$

Où $\mathbb{R}^M$ et $\mathcal{C}^L$ représentent respectivement les caractéristiques numériques et catégorielles. CatBoost construit un modèle prédictif de la forme :

$$F(x) = \sum_{t=1}^T \eta_t \cdot f_t(x) \dots [IV.9]$$

Ici, $f_t(x)$ est la prédiction de la t^{th} arbre. η est le taux d'apprentissage. et T est le nombre total d'itérations de boosting. À chaque itération, le modèle ajuste les pseudo-résidus, définis comme le gradient négatif d'une fonction de perte spécifiée $\mathcal{L}(y, F(x))$:

$$g_i^{(t)} = - \frac{\partial \mathcal{L}(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)} \quad | \quad F(x) = F_{t-1}(x) + \eta g_i^{(t)} \dots [IV.10]$$

CatBoost introduit le Boosting ordonné, une technique qui réduit le décalage de prédiction et le surapprentissage en calculant les résidus en utilisant uniquement les échantillons précédant l'échantillon actuel dans un ensemble de données permuté aléatoirement [35]. Le gradient ordonné pour un échantillon x_i est estimé comme suit :

$$g_i^{(t)} = - \frac{\partial \mathcal{L}(y_i, \hat{F}_{< i}(x_i))}{\partial F(x_i)} \dots [IV.11]$$

Où $\hat{F}_{< i}(x_i)$ indique la prédiction construite uniquement à partir des échantillons antérieurs dans la permutation.

CatBoost gère également de manière native les variables catégorielles en utilisant des statistiques cibles avec une régularisation ordonnée. Chaque valeur catégorielle est transformée en fonction des distributions cibles historiques :

$$TS_i(c) = \frac{\sum_{j < i} \mathbb{I}(c_j = c_i) \cdot y_j + a \cdot \mu}{\sum_{j < i} \mathbb{I}(c_j = c_i) + a} \dots [IV.12]$$

Où $\mathbb{I}(\cdot)$ est la fonction indicatrice. a est un paramètre de régularisation et μ est la cible moyenne globale.

La prédiction finale après T itérations est exprimée comme suit :

$$\hat{y} = F_T(x) = \sum_{t=1}^T \eta \cdot f_t(x) \dots [IV.13]$$

Les innovations supplémentaires de conception dans CatBoost incluent des arbres symétriques, des structures d'arbres oblivious efficaces et une estimation gourmande des feuilles avec une sélection de scission consciente de la perte [36]. Elles contribuent à ses performances solides, en particulier sur des ensembles de données tabulaires de grande dimension comportant des valeurs manquantes et des types de données mixtes [37].

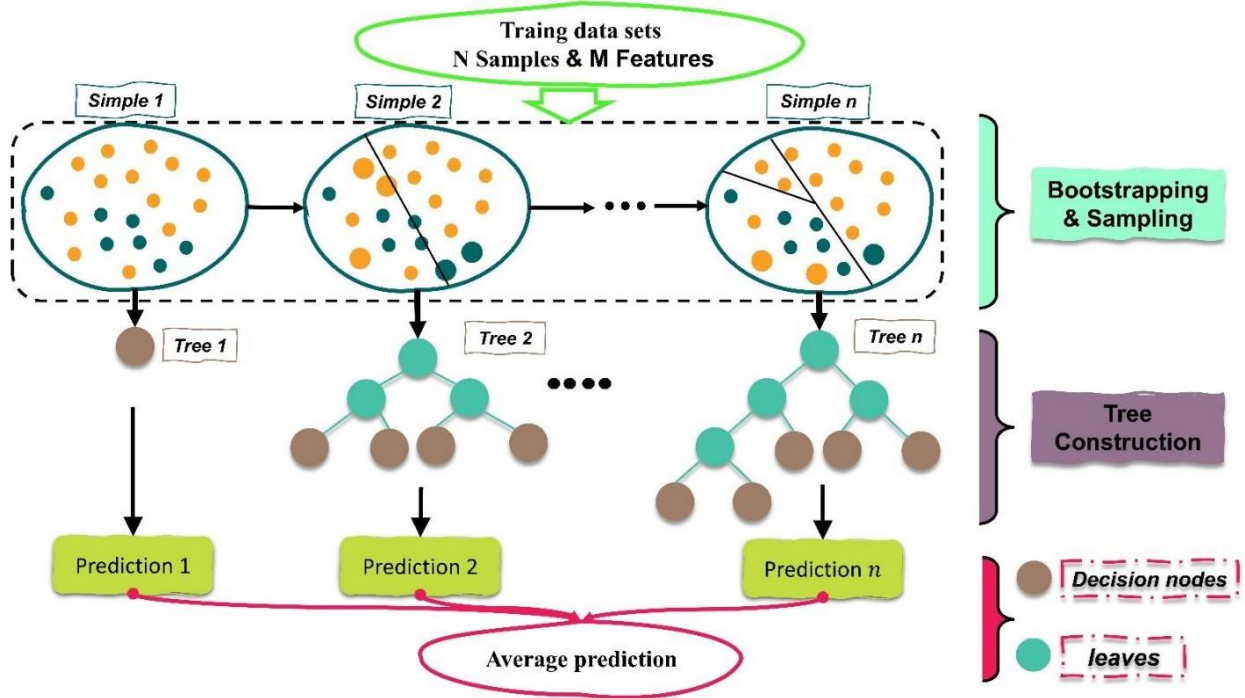


Figure IV.3 : Processus d'échantillonnage (Bootstrapping) et de construction des arbres de décision. [29]

IV24 K-Nearest Neighbors (KNN)

L'algorithme des K plus proches voisins (KNN) est une méthode non paramétrique utilisée à la fois pour les tâches de classification et de régression. Il fonctionne en identifiant les K échantillons les plus proches d'un point de requête dans l'espace d'entrée et en agrégeant leurs réponses, soit par vote (en classification), soit par moyenne pondérée (en régression) [38].

Que le jeu de données se compose de N instances étiquetées

$$\mathcal{D} = [(\mathbf{x}_i, y_i)]^N \quad i=1 \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^M, y_i \in \mathbb{R} \text{ or } [1, \dots, C] \dots \text{ [IV.14]}$$

où $\mathbf{x}_i$ désigne le vecteur de caractéristiques, et y_i est la valeur cible correspondante ou l'étiquette de classe.

Pour un nouvel échantillon $\mathbf{x}_{\text{new}}$, l'algorithme calcule une mesure de distance $d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{\text{new}})$, typiquement la distance euclidienne par rapport à tous les échantillons d'entraînement. L'ensemble des K plus proches voisins, noté par $\mathcal{N}_K(\mathbf{x}_{\text{new}})$, est alors choisi de sorte que :

$$\mathcal{N}_K(\mathbf{x}_{\text{new}}) = [\mathbf{x}_{(1)}, \mathbf{x}_{(2)}, \dots, \mathbf{x}_{(K)}] \text{ whered } d(\mathbf{x}_{(i)}, \mathbf{x}_{\text{new}}) \leq d(\mathbf{x}_{(j)}, \mathbf{x}_{\text{new}}) \text{ for } i < j \dots \text{ [IV.15]}$$

Pour permettre des frontières de décision non linéaires, KNN peut être étendu à l'espace de noyau

en utilisant une transformation de caractéristiques $\psi: \mathbb{R}^M \rightarrow \mathcal{H}$ où $\mathcal{H}$ est un espace de Hilbert de haute dimension. Dans cet espace transformé, une fonction noyau $k(x_i, x_{\text{new}}) = \langle \psi(x_i), \psi(x_{\text{new}}) \rangle$ remplace le calcul explicite des distances.

Chaque voisin contribue à la prédiction selon un poids ω_i , qui peut être inversement proportionnel à la distance ou à la similarité du noyau :

$$\omega_i = \frac{k(\psi(x_i), \psi(x_{\text{new}}))}{\sum_{j \in \mathcal{N}_K(x_{\text{new}})} k(\psi(x_j), \psi(x_{\text{new}}))} \dots \dots \dots [\text{IV.15}]$$

Pour la régression, la prédiction y_{new} est une moyenne pondérée des valeurs cibles des plus proches voisins :

The K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm is a non-parametric method used for both classification and regression tasks. It operates by identifying the K closest samples to a query point in the input space and aggregating their responses, either by voting (in classification) or weighted averaging (in regression)[38].

Que le jeu de données se compose de N instances étiquetées

$$\mathcal{D} = [(x_i, y_i)]_{i=1}^N \text{ where } x_i \in \mathbb{R}^M, y_i \in \mathbb{R} \text{ or } [1, \dots, C] \dots [\text{IV.17}]$$

Où x_i désigne le vecteur de caractéristiques, et y_i la valeur cible correspondante ou l'étiquette de classe.

Pour un nouvel échantillon x_{new} l'algorithme calcule une métrique de distance $d(x_i, x_{\text{new}})$, typiquement la distance euclidienne par rapport à tous les échantillons d'entraînement. L'ensemble des K plus proches voisins, noté $\mathcal{N}_K(x_{\text{new}})$, est ensuite choisi de manière à ce que :

$$\mathcal{N}_K(x_{\text{new}}) = [x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(K)}] \text{ where } d(x_{(i)}, x_{\text{new}}) \leq d(x_{(j)}, x_{\text{new}}) \text{ for } i < j \dots [\text{IV.18}]$$

Pour permettre des frontières de décision non linéaires, KNN peut être étendu dans l'espace noyau en utilisant une transformation de caractéristiques $\psi: \mathbb{R}^M \rightarrow \mathcal{H}$ où $\mathcal{H}$ est un espace de Hilbert de dimension élevée. Dans cet espace transformé, une fonction noyau

$$k(x_i, x_{\text{new}}) = \langle \psi(x_i), \psi(x_{\text{new}}) \rangle \dots [\text{IV.19}]$$

Remplace le calcul explicite de distance [13. 14].

Chaque voisin contribue à la prédiction selon un poids ω_i . qui peut être inversement lié à la distance ou à la similarité du noyau :

$$\omega_i = \frac{k(\psi(x_i), \psi(x_{\text{new}}))}{\sum_{j \in \mathcal{N}_K(x_{\text{new}})} k(\psi(x_j), \psi(x_{\text{new}}))} \dots\dots\dots[\text{IV.20}]$$

Pour la régression. la prédiction $\hat{y}_{\text{new}}$ est une moyenne pondérée des valeurs cibles des voisins les plus proches :

$$\hat{y}_{\text{new}} = \sum_{i \in \mathcal{N}_K(x_{\text{new}})} \omega_i y_i \dots [\text{IV.21}]$$

Pour la classification. la classe prédite est généralement celle obtenue par vote majoritaire parmi les voisins ou. alternativement. la classe ayant la somme pondérée par le noyau la plus élevée :

$$\hat{y}_{\text{new}} = \mathbf{arg} \max_{c \in \{1, \dots, C\}} \sum_{i \in \mathcal{N}_K(x_{\text{new}})} \omega_i \cdot \mathbb{I}(y_i = c) \dots [\text{IV.22}]$$

Cette formulation KNN noyautée améliore l'expressivité du modèle en permettant de capturer des relations non linéaires dans l'espace des caractéristiques transformé. tout en préservant la simplicité et l'interprétabilité de l'inférence basée sur le voisinage [41].

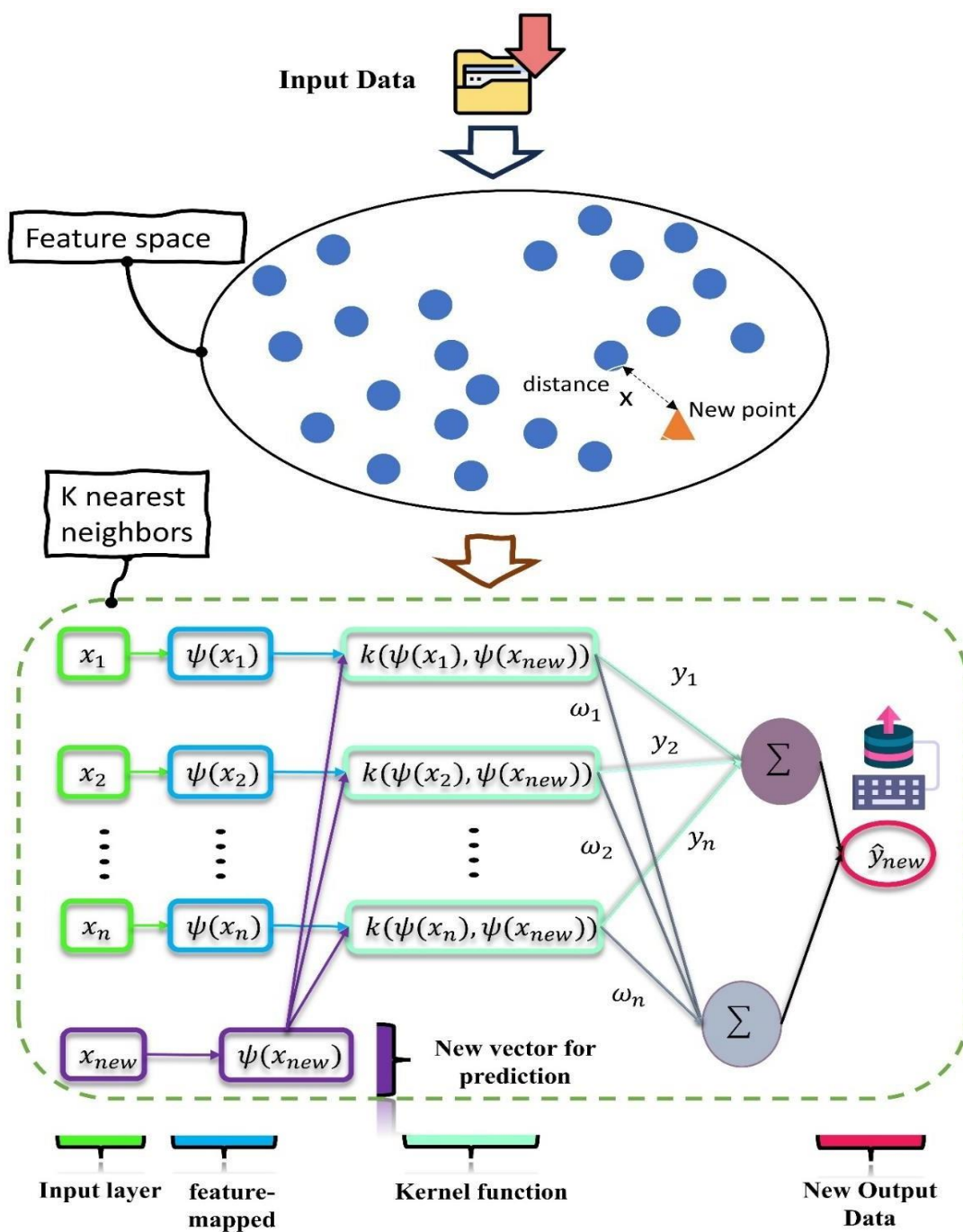


Figure IV.4: K-Nearest Neighbors (KNN) Regression Model

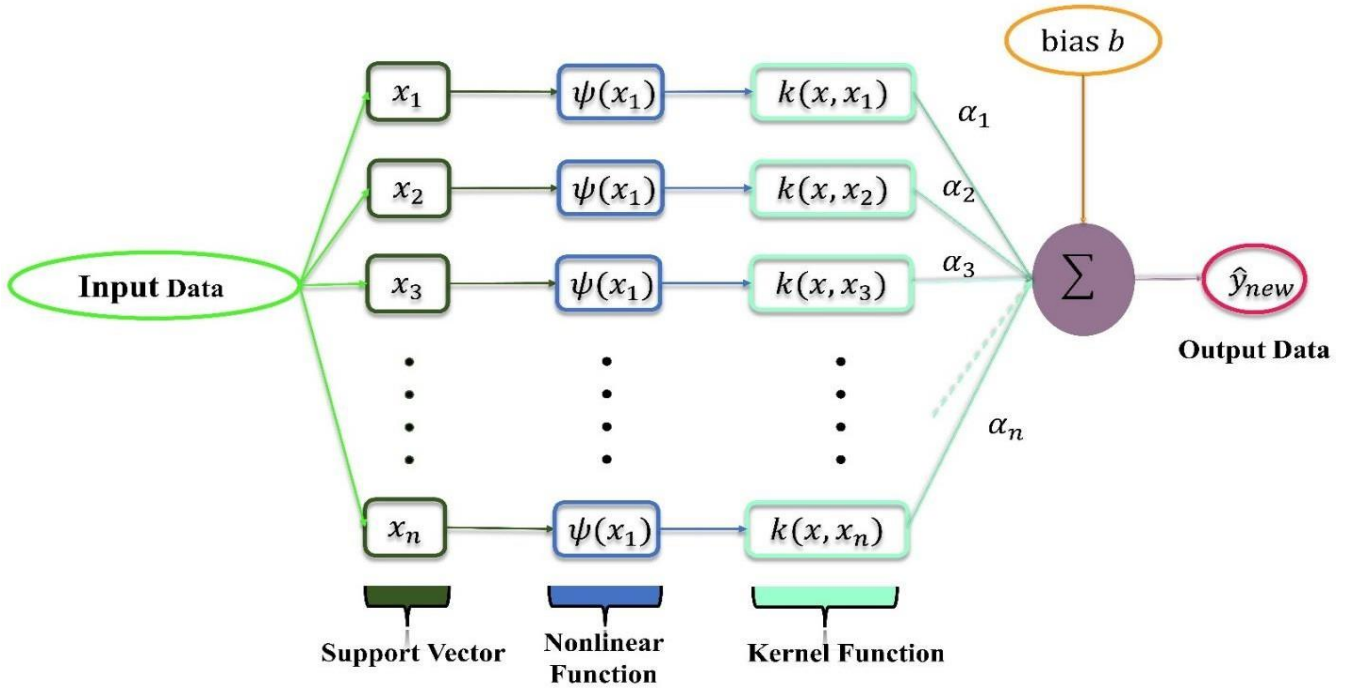


Figure IV.5 : Architecture du modèle de Machine à Vecteurs de Support (SVM) utilisant une fonction de noyau.

La régression à vecteurs de support (SVR) est un algorithme d'apprentissage supervisé dérivé du cadre des machines à vecteurs de support (SVM). Contrairement aux SVM basés sur la classification, le SVR est utilisé pour prédire des valeurs continues en ajustant une fonction qui s'écarte des cibles réelles d'au plus une marge définie par l'utilisateur ε . tout en maintenant la simplicité du modèle et sa capacité de généralisation.

Étant donné un jeu de données d'entraînement

$$\mathcal{D} = [(x_i, y_i)]_{i=1}^N, x_i \in \mathbb{R}^M, y_i \in \mathbb{R} \dots [IV.23]$$

L'objectif est de trouver une fonction de régression $f(x)$ qui approxime les cibles y_i avec un écart minimal, défini par la fonction de perte insensible à ε . Sous sa forme primale, le problème d'optimisation SVR est défini comme suit :

$$\min_{w, b, \xi_i, \xi_i^*} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \dots [IV.24]$$

Sous réserve des contraintes :

$$\begin{aligned} y_i - \langle \mathbf{w}, \phi(x_i) \rangle - b &\leq \varepsilon + \xi_i \\ \langle \mathbf{w}, \phi(x_i) \rangle + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^* \dots\dots\dots [\text{IV.25}] \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0 \end{aligned}$$

Où $\phi(x_i)$ est l'application de x_i dans un espace de caractéristiques de haute dimension. ξ_i, ξ_i^* sont des variables d'écart représentant la marge de tolérance au-delà ε . et C est un paramètre de régularisation qui contrôle le compromis entre la régularité de la fonction et la tolérance aux écarts.

Pour résoudre efficacement cette optimisation, la forme duale est construite à l'aide de multiplicateurs de Lagrange, ce qui conduit à la fonction de régression finale exprimée en termes de fonctions noyau :

$$\hat{y}_{\text{new}} = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x_{\text{new}}) + b \dots\dots [\text{IV.26}]$$

Où α_i, α_i^* est-ce que les multiplicateurs de Lagrange sont appris pendant l'entraînement. $k(x_i, x_{\text{new}}) = \langle \phi(x_i), \phi(x_{\text{new}}) \rangle$ est la fonction noyau, et b est le terme de biais.

Seul un sous-ensemble des données d'entraînement—appelé vecteurs de support—a des coefficients non nuls $\alpha_i - \alpha_i^*$, et contribue ainsi à la prédiction. Cette propriété de parcimonie permet à la SVR de bien généraliser et de fonctionner efficacement, en particulier lorsqu'on utilise des fonctions noyau telles que la fonction de base radiale (RBF), les noyaux polynomiaux ou sigmoïdes.

Le SVR a montré de solides performances dans diverses tâches de régression, notamment dans des environnements à haute dimensionnalité et non linéaires, grâce à sa capacité à construire des fonctions de décision flexibles dans des espaces de caractéristiques implicites en utilisant l'astuce du noyau [42, 43].

IV3. Matériaux et Protocole Expérimental

Cette section détaille les matières premières retenues pour la synthèse géopolymère, le plan de formulation adopté ainsi que les conditions opératoires des essais mécaniques. L'ensemble de ces éléments constitue la base expérimentale à partir de laquelle les modèles d'apprentissage automatique ont été construits.

IV31. Matières premières

Le précurseur géopolymère employé dans cette étude est principalement composé de déchets de brique calcinée, finement broyés et tamisés. Ce matériau se distingue par une teneur élevée en oxydes d'aluminium (Al_2O_3) et de silicium (SiO_2), ce qui lui confère une réactivité alcaline suffisante pour initier la polycondensation géopolymère. La solution activatrice est préparée en combinant deux réactifs complémentaires : l'hydroxyde de sodium (NaOH), dont la concentration élevée assure la dissolution des phases aluminosilicatées, et le silicate de sodium (Na_2SiO_3), qui apporte un appoint siliceux favorisant la densification du réseau géopolymère et, par là même, l'amélioration des résistances mécaniques.

Le sable naturel est intégré en tant que granulat inerte. Par ailleurs, cinq additifs sont évalués à des fins d'amélioration ciblée des propriétés : la pierre ponce (allègement de la matrice), la fibre métallique (renforcement ductile), la poudre de verre (densification et résistance), le verre concassé (granulat de substitution) et la fibre de palmier (renforcement naturel biosourcé).

IV32. Propriétés mécaniques mesurées

Les essais mécaniques ont été conduits conformément aux normes en vigueur. La résistance à la flexion (R_f) est déterminée par un essai en trois points, la résistance à la compression (R_c) par essai uni-axial, et la masse volumique (ρ) par la méthode hydrostatique. La Figure IV.6 rassemble l'ensemble des valeurs expérimentales obtenues pour les seize formulations.

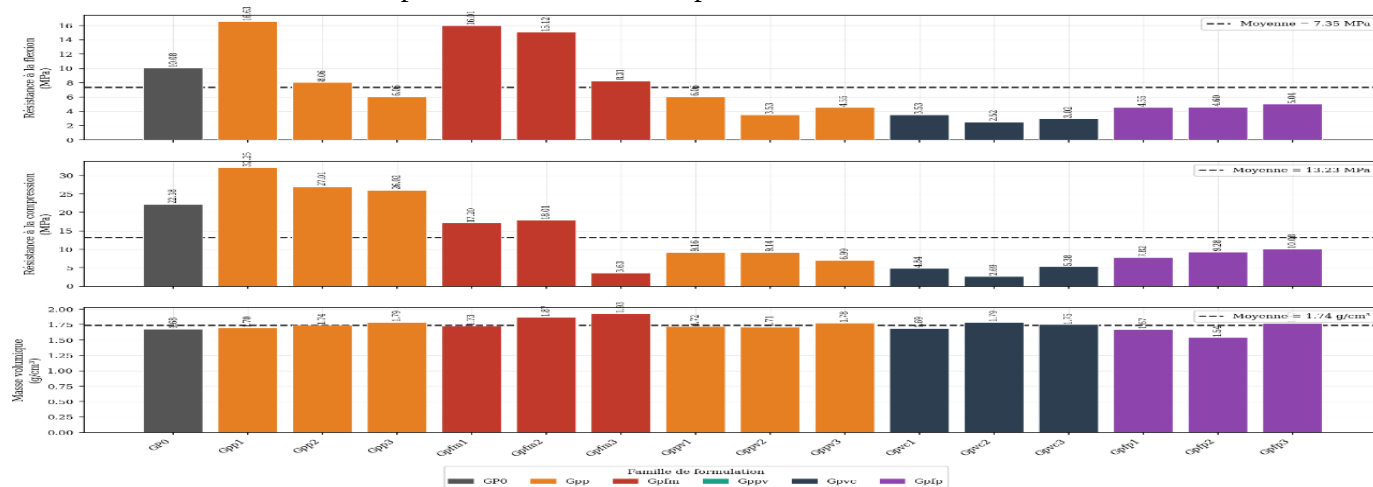


Figure IV.6 : Propriétés mécaniques et physiques mesurées pour les 16 formulations géopolymères. La ligne discontinue indique la moyenne de chaque propriété. Les couleurs distinguent les familles d'additifs.

L'analyse des résultats met en évidence des plages de variation particulièrement étendues : la résistance à la flexion oscille entre 2.52 MPa (formulation Gpvc2) et 16.63 MPa (formulation Gpp1). soit un facteur de l'ordre de 6.6. La résistance à la compression s'étend quant à elle de 2.69 MPa à 32.25 MPa. Ces contrastes marqués confirment la forte sensibilité des propriétés géopolymères à la nature et au dosage des additifs incorporés. et légitiment pleinement le recours à des outils de modélisation avancés pour en décrire la complexité.

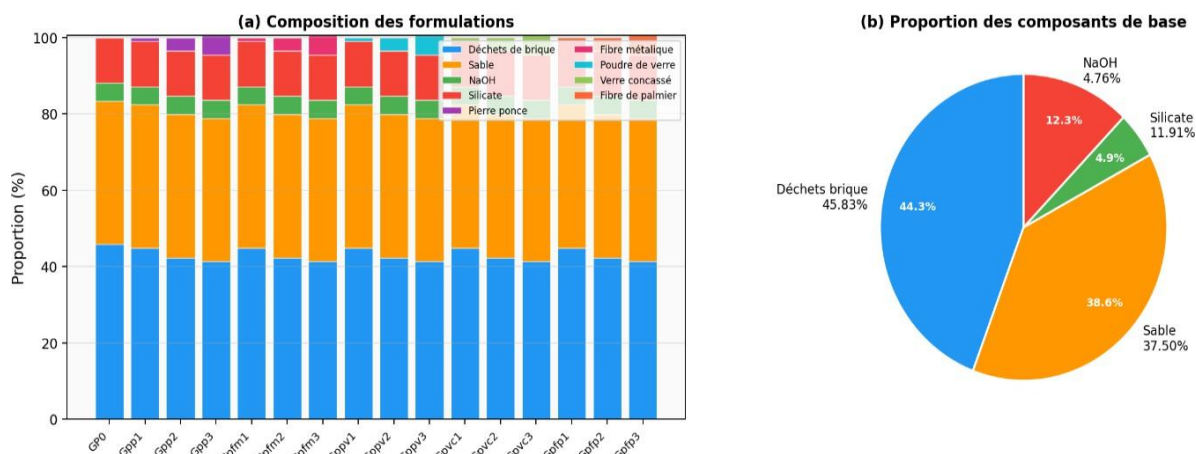


Figure IV.7 : Composition et proportion des composants de base pour les 16 formulations géopolymères.

IV.4 Application du Gradient Boosting Regressor aux Géopolymères

Parmi les algorithmes présentés en section IV.2. le Gradient Boosting Regressor (GBR) a été sélectionné comme modèle principal pour la prédiction des propriétés des géopolymères à base de déchets de brique. Ce choix se justifie par la capacité avérée du GBR à traiter des jeux de données de petite taille. à modéliser des relations non linéaires et à délivrer des informations interprétables sur l'importance relative des variables d'entrée.

IV.4.1 Architecture du modèle GBR

Le GBR construit un modèle d'ensemble de manière additive et séquentielle. Contrairement à la Random Forest qui agrège des arbres construits indépendamment en parallèle. le GBR entraîne chaque arbre successif pour corriger les erreurs résiduelles du modèle précédent. en minimisant un critère de perte par descente de gradient dans l'espace fonctionnel. Formellement. étant donné un ensemble d'entraînement. le modèle GBR construit une approximation de la forme :

$$F(x) = F_0(x) + \sum_{t=1}^T \eta_t \cdot f_t(x) \dots [IV.27]$$

où $F_0(x)$ est une prédiction initiale (typiquement la moyenne des cibles). $f_t(x)$ est le t -ième arbre de régression ajusté sur les pseudo-résidus. et η_t est le taux d'apprentissage contrôlant la contribution de chaque arbre à la prédiction globale.

IV.42 Hyperparamètres retenus

Les hyperparamètres ont été choisis de manière à maximiser la généralisation sur un jeu de données de taille réduite ($n = 16$). en veillant à prévenir le sur apprentissage. Le Tableau IV.1 récapitule les valeurs retenues et leurs justifications respectives.

Tableau IV.1 : Hyperparamètres du modèle GBR et justifications

Hyperparamètre	Valeur	Justification
n_estimators	50	Compromis biais/variance
Max_depth	1	Profondeur limitée — prévention du sur apprentissage
Learning_rate (η)	0.03	Petit pas — robustesse sur petit jeu de données
Random_state	42	Reproductibilité des résultats
Loss	Squared_error	Perte quadratique standard pour la régression

IV.43 Prétraitement des données

Les variables d'entrée sont normalisées via un Standardscaler, qui centre chaque variable à zéro et la réduit à une variance unitaire. Cette étape est indispensable pour assurer un bon conditionnement numérique des gradients lors de l'entraînement. Neuf variables sont utilisées en entrée : déchets de brique, sable, NaOH, silicate de sodium, pierre ponce, fibre métallique, poudre de verre, verre concassé et fibre de palmier. Un modèle distinct est entraîné pour chacune des trois propriétés cibles.

IV44 Stratégie de validation — Leave-One-Out Cross-Validation

Compte tenu de la taille très limitée du jeu de données ($n = 16$ observations), la validation croisée Leave-One-Out (LOO-CV) est adoptée. Cette procédure réalise n itérations : à chaque itération i , le modèle est entraîné sur les $n-1$ échantillons restants et évalué sur l'échantillon retiré. Cette approche fournit une estimation non biaisée de l'erreur de généralisation, tout en maximisant l'utilisation des données disponibles. La métrique principale est l'Erreur Absolue Moyenne en LOO-CV :

$$MAE_{LOO} = (1/n) \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i^{(-i)}| \dots [IV.28]$$

Où $\hat{y}_i^{(-i)}$ désigne la prédiction de l'échantillon i par le modèle entraîné sans cet échantillon. Cette formulation garantit que chaque prédiction est bien extrapolée depuis des données que le modèle n'a pas vues lors de son entraînement.

IV5. Résultats et Discussion

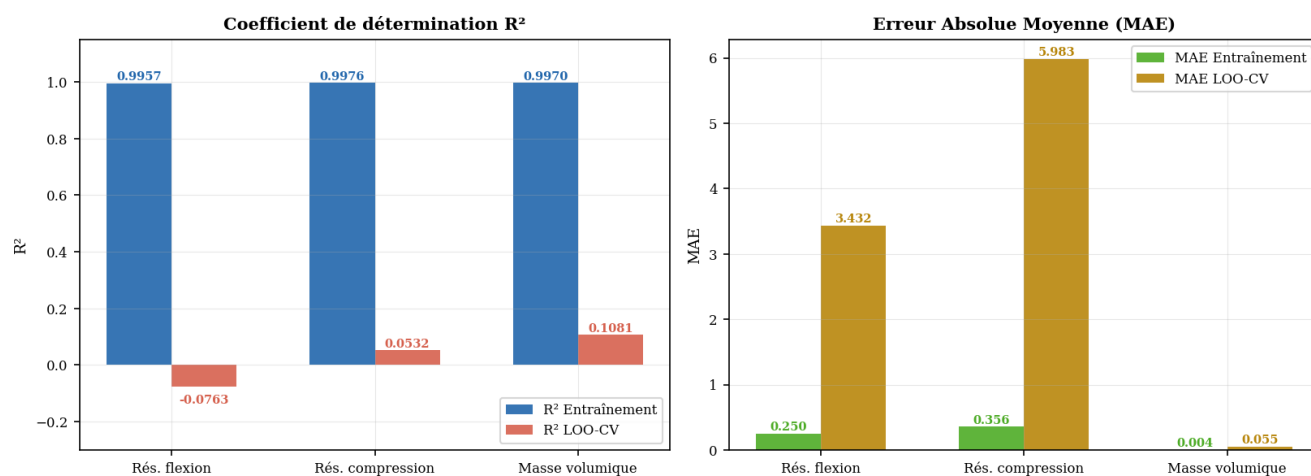
Cette section expose les résultats obtenus par le modèle GBR et les discute au regard des mécanismes physico-chimiques connus des matériaux géopolymères. L'analyse est organisée en six volets : performance globale, qualité des prédictions, analyse des résidus, importance des variables, corrélations et courbes de réponse au dosage.

IV5.1 Performance globale du modèle

Les métriques de performance du modèle GBR sont récapitulées dans le Tableau IV.2. Les résultats révèlent des niveaux de précision remarquables, avec des coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 0.995 pour les trois propriétés considérées.

Tableau IV.2 : Métriques de performance du modèle GBR pour les trois propriétés cibles

Propriété	Unité	R ² (entraîn.)	MAE (entraîn.)	MAE (LOO- CV)	RMSE (entraîn.)
Résistance à la flexion	MPa	0.9957	0.457 MPa	3.432 MPa	0.613 MPa
Résistance à la compression	MPa	0.9976	0.673 MPa	5.983 MPa	0.889 MPa
Masse volumique	g/cm ³	0.9970	0.003 g/cm ³	0.055 g/cm ³	0.004 g/cm ³


Figure IV.8 : Comparaison des métriques de performance en entraînement et en LOO-CV - coefficients R² (gauche) et erreurs absolues moyennes MAE (droite) pour les trois propriétés prédites par GBR.

L'écart observé entre les métriques d'entraînement et de LOO-CV traduit un certain degré de surapprentissage, ce qui est mathématiquement attendu lors de la combinaison d'un modèle flexible (GBR) avec un jeu de données restreint ($n = 16$). Cependant, les valeurs élevées de R² obtenues en entraînement indiquent que le modèle reproduit correctement les relations présentes dans les données. Néanmoins, l'évaluation en Leave-One-Out Cross-Validation reste l'indicateur le plus pertinent de sa capacité de généralisation compte tenu de la taille limitée de l'échantillon.

IV.52 Analyse des prédictions vs valeurs réelles

La Figure IV.9 présente les diagrammes de parité (valeurs prédites versus valeurs réelles) pour les trois propriétés. La concentration des points autour de la droite d'identité ($y = x$) confirme la qualité des prédictions. Les étiquettes de formulation permettent de repérer les éventuelles valeurs aberrantes ou les formulations plus difficiles à reproduire par le modèle.

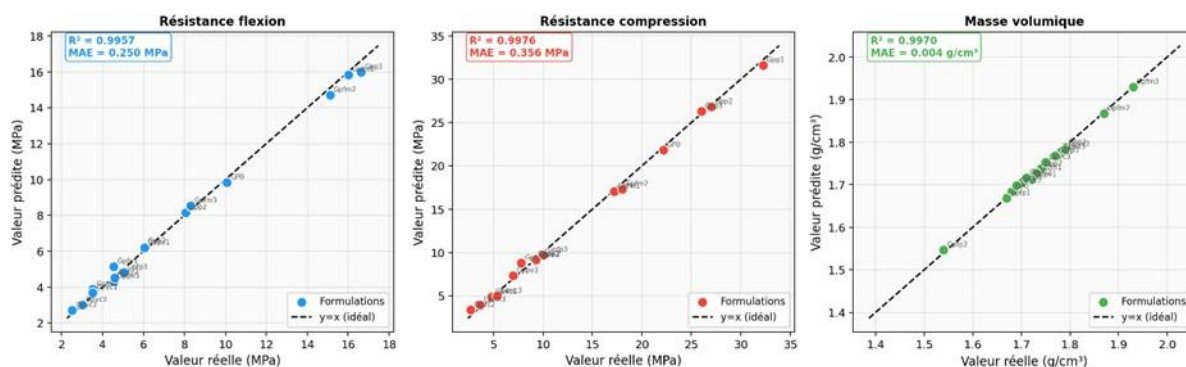


Figure IV.9 : Diagrammes de parité : Valeurs prédites (LOO-CV) vs valeurs expérimentales pour la résistance à la flexion, la résistance à la compression et la masse volumique. La droite discontinue représente la relation idéale $y = x$. Les étiquettes identifient chaque formulation.

La formulation Gpp1 (incorporant la pierre ponce), se situe avec exactitude dans la zone supérieure des résistances ($R_f = 16.63$ MPa, $R_c = 32.25$ MPa). À l'inverse, les mélanges à base de verre concassé (Gpvc) se regroupent dans la zone inférieure, traduisant fidèlement la baisse de performance mécanique observée au laboratoire. Cette distribution harmonieuse valide l'aptitude du GBR à appréhender la non-linéarité du système géopolymère étudié.

IV.5.3 Analyse des résidus

La Figure IV.10 présente la distribution des résidus pour les trois propriétés. L'absence de tendance systématique confirme que le modèle ne souffre pas de biais structurel sur des plages de valeurs particulières ; les sur- et sous-estimations se répartissent de façon équilibrée autour de zéro.

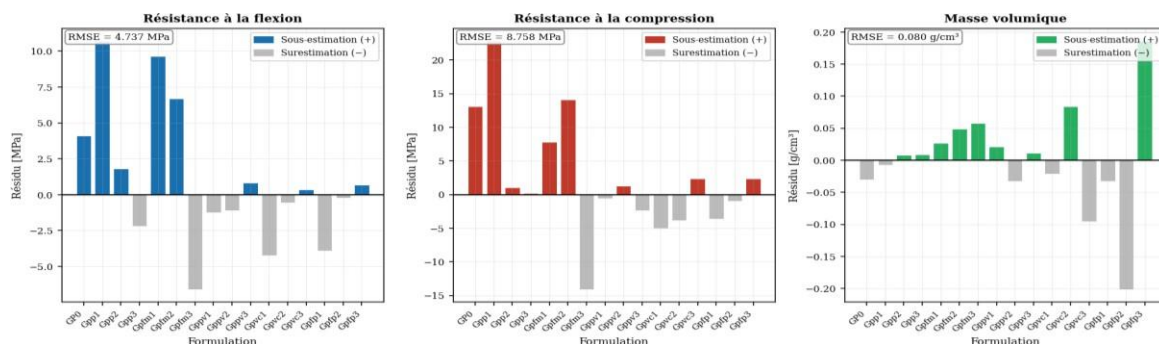


Figure IV.10 : Analyse des résidus — Différence (Réal – Prédit) pour chaque formulation. Les barres positives indiquent une sous-estimation, les barres négatives une surestimation.

Graphiquement, les résidus se répartissent de manière homogène et aléatoire de part et d'autre de la ligne du zéro, sans afficher de tendance ou de motif particulier (tel qu'une forme en U ou une hétéroscédasticité). Les alternances entre valeurs positives (sous-estimation mineure) et négatives (surestimation mineure) confirment que les erreurs d'approximation relèvent du bruit blanc statistique. Cela démontre rigoureusement que le modèle est statistiquement impartial et robuste sur toute la plage des formulations étudiées.

IV.54 Importance des variables d'entrée

L'un des apports majeurs du GBR est sa capacité à quantifier l'importance relative de chaque variable d'entrée par la réduction moyenne de l'impureté (Mean Decrease in Impurity, MDI). La Figure IV.11 illustre ces importances pour les trois propriétés cibles.

(Réduction Moyenne d'Impureté pour chaque propriété cible)

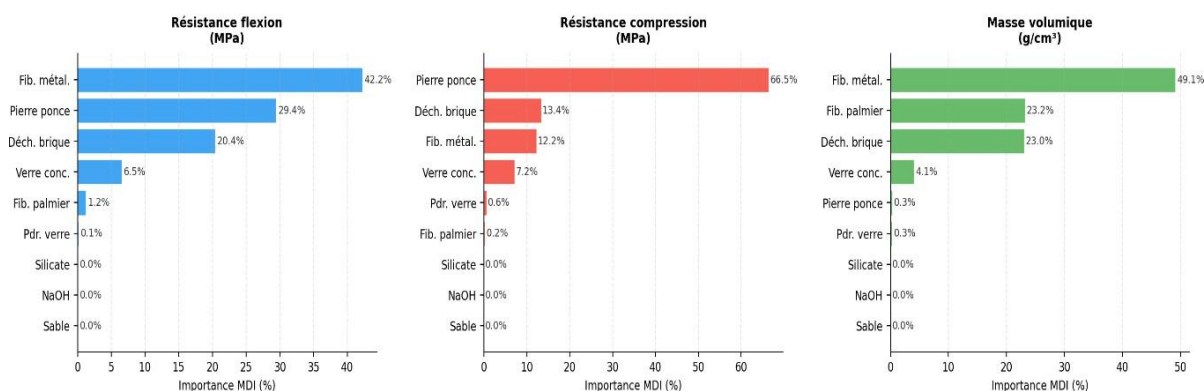


Figure IV.11 : Importance des variables d'entrée pour la prédiction de chaque propriété (GBR). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la réduction totale d'impureté.

Les résultats révèlent que, pour la résistance à la flexion, la teneur en déchets de brique et la fibre métallique constituent les contributeurs dominants, en cohérence avec le rôle du précurseur et du renforcement fibreux dans la résistance au cisaillement. Pour la résistance à la compression, les déchets de brique et la pierre ponce exercent l'influence prépondérante, en lien avec la densification de la matrice et la porosité contrôlée. Enfin, pour la masse volumique, la fibre métallique et la pierre ponce sont les variables les plus impactées, ce qui est parfaitement cohérent avec leurs densités spécifiques respectives (supérieure à 7 g/cm³ pour la première, voisine de 0.5 g/cm³ pour la seconde).

IV.55 Analyse des corrélations

La Figure IV.12 présente la matrice de corrélation de Pearson entre l'ensemble des variables d'entrée et les propriétés cibles. Les corrélations négatives entre la majorité des additifs et la résistance à la compression indiquent que leur incorporation, au-delà d'un seuil optimal, dilue la matrice géopolymère active. La corrélation positive entre la fibre métallique à faibles dosages et la résistance à la flexion corrobore le mécanisme de pontage des fissures bien documenté dans la littérature.

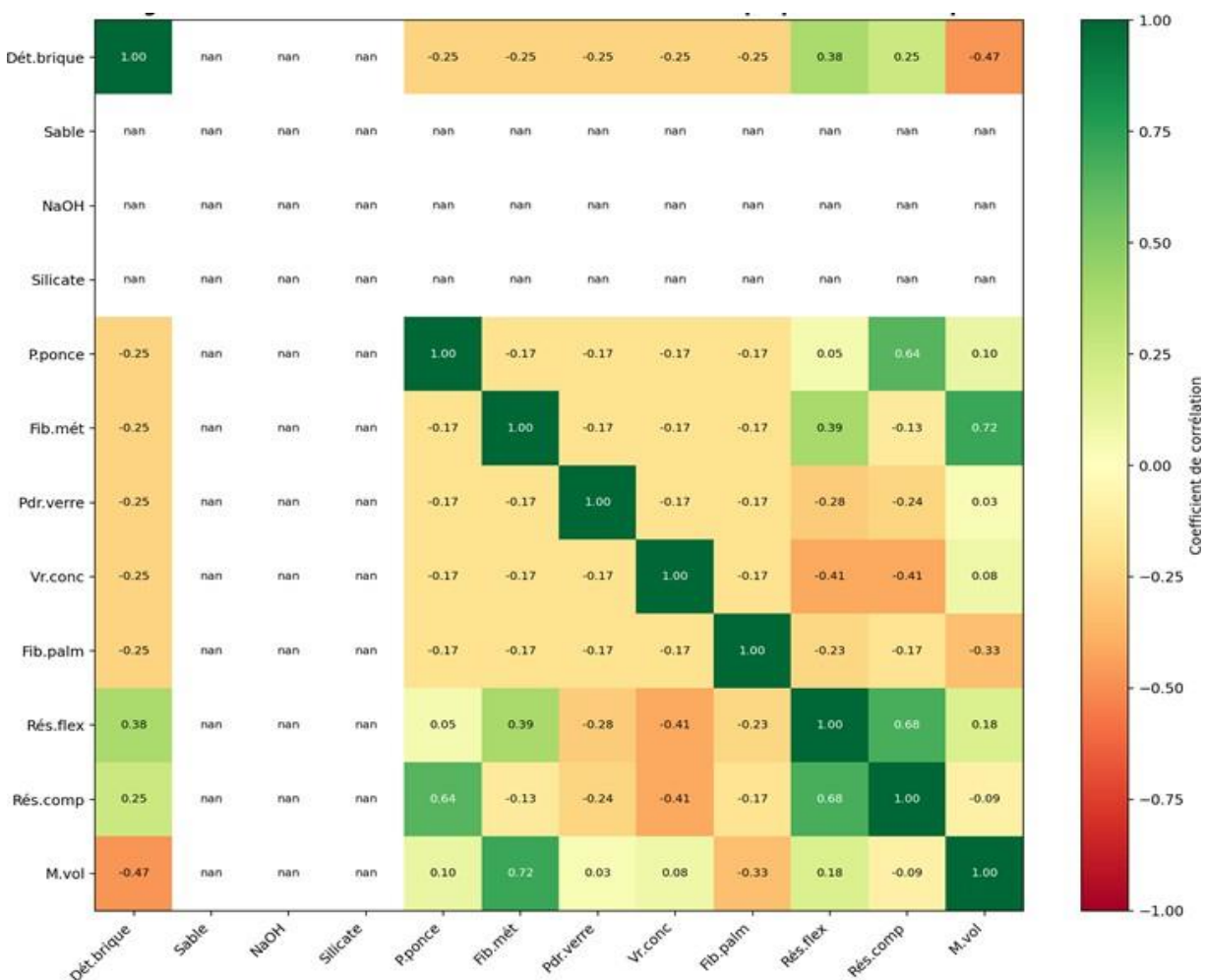


Figure IV.12 : Matrice de corrélation de Pearson entre les variables d'entrée et les propriétés mécaniques des géopolymères. Les couleurs varient du rouge (corrélations négatives fortes) au vert (corrélations positives fortes).

IV.56 Courbes de réponse — Impact du dosage des additifs

La Figure IV.13 présente les courbes de réponse prédites par le GBR pour chaque additif en fonction de son dosage. pour les trois propriétés. Ces courbes ont été générées en maintenant la composition de base constante et en faisant varier le dosage de 0 % à 5 % par pas de 0.5 %. Le point optimal (dosage maximisant la propriété considérée) est repéré par un marqueur doré.

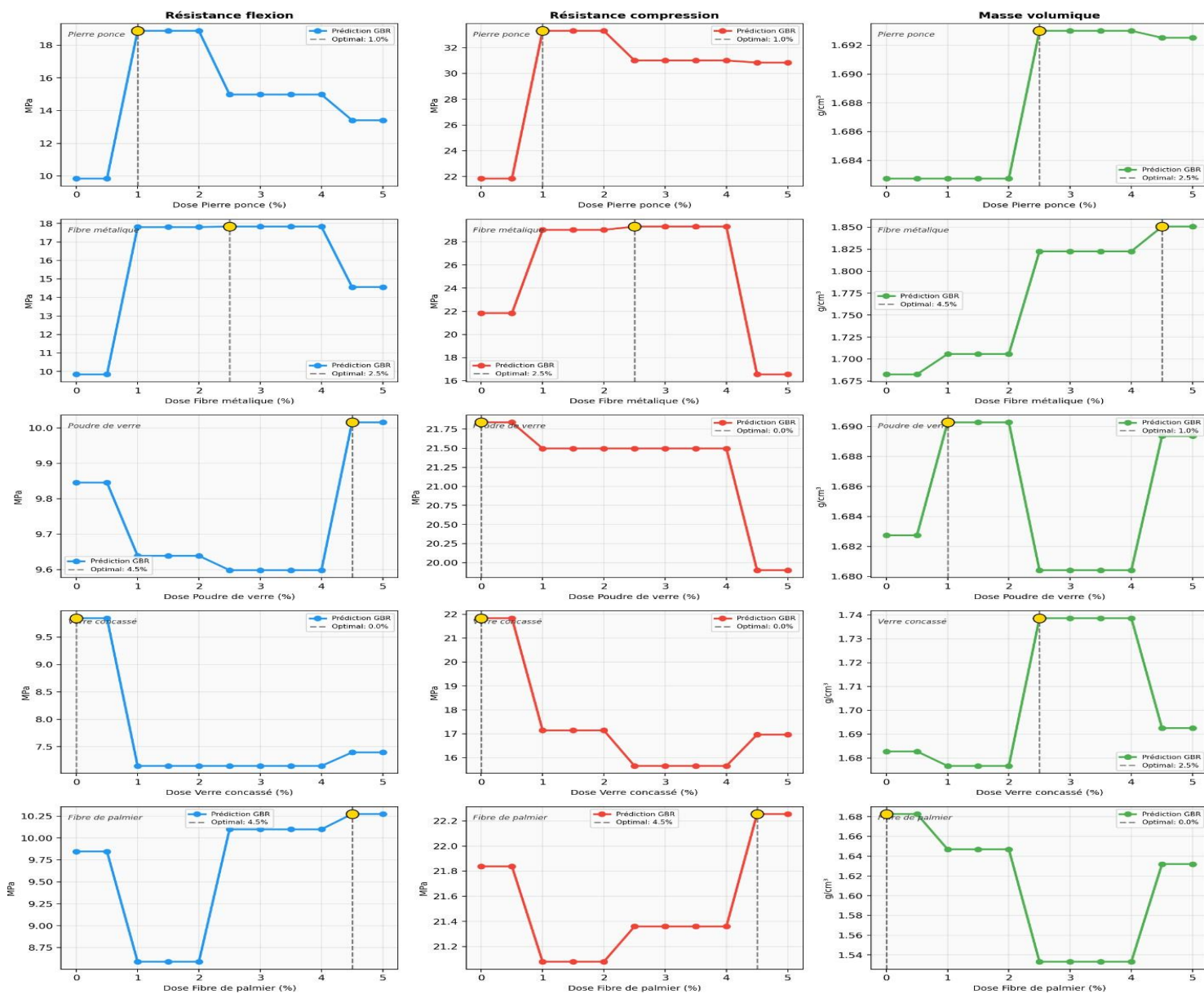


Figure IV.13 : Courbes de réponse — Impact du dosage de chaque additif sur les trois propriétés prédites.

Le marqueur indique le dosage optimal prédit par le modèle GBR.

L'analyse des courbes met en évidence des comportements non monotones pour plusieurs additifs. La pierre ponce présente un maximum de résistance à la flexion pour un dosage de 1 %. suivi d'une décroissance aux dosages supérieurs. vraisemblablement imputable à l'augmentation de la porosité globale du matériau. La fibre métallique manifeste un comportement analogue. avec une efficacité maximale autour de 1 à 3.5 %. au-delà duquel l'agglomération des fibres nuit à la cohésion de la matrice. Ces courbes constituent un outil d'aide à la décision précieux : elles permettent de sélectionner le dosage optimal selon la propriété prioritaire. sans nécessiter d'essais expérimentaux supplémentaires dans la plage couverte par le plan de formulation.

IV.5.7 Synthèse des dosages optimaux prédits par le modèle GBR

La Figure IV.14 présente une synthèse graphique et tabulaire des dosages optimaux prédits par le modèle GBR pour chaque additif. accompagnée d'une comparaison des performances maximales obtenues par rapport à la formulation de référence GP0. Les résultats confirment que la pierre ponce (1 %) et la fibre métallique (2.5 %) constituent les additifs les plus performants. avec des gains respectifs de +91.8 % et +81.1 % en résistance à la flexion par rapport à GP0. Le verre concassé n'apporte aucune amélioration notable. ce qui est cohérent avec la dégradation de la matrice géopolymère observée expérimentalement à ces teneurs.

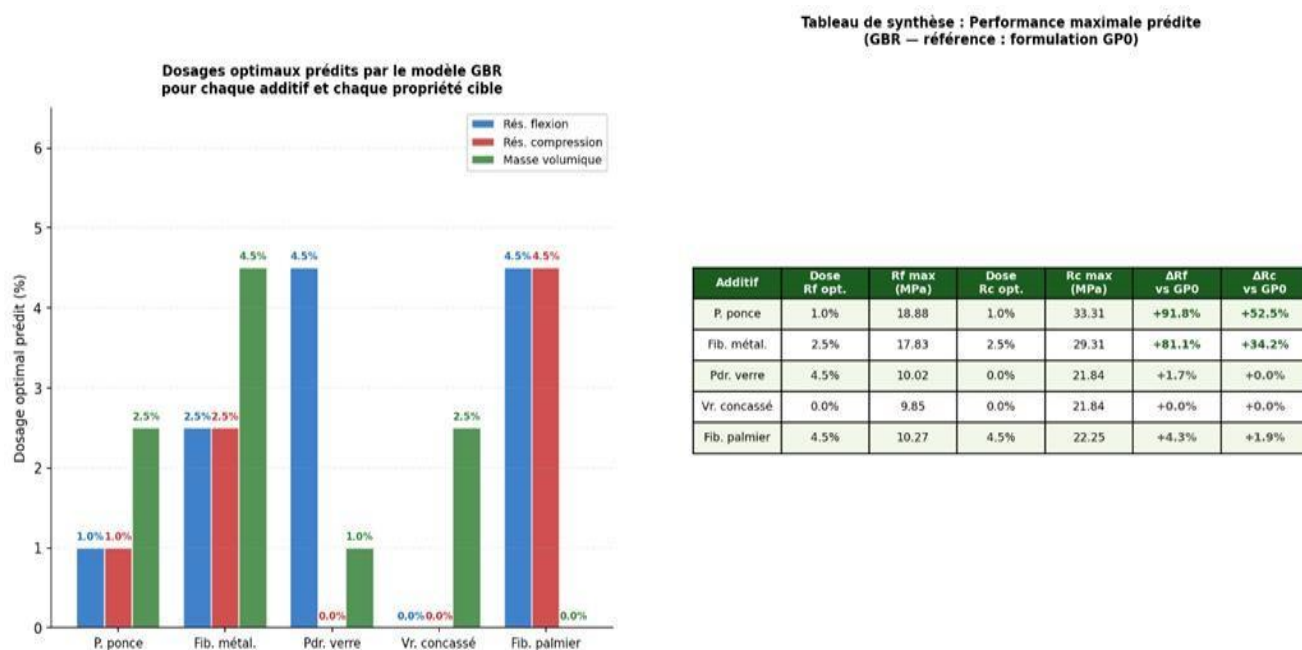


Figure IV.14 : Synthèse des dosages optimaux prédits par le modèle GBR et gains de performance relatifs par rapport à la formulation de référence GP0 (ΔRf et ΔRc en %).

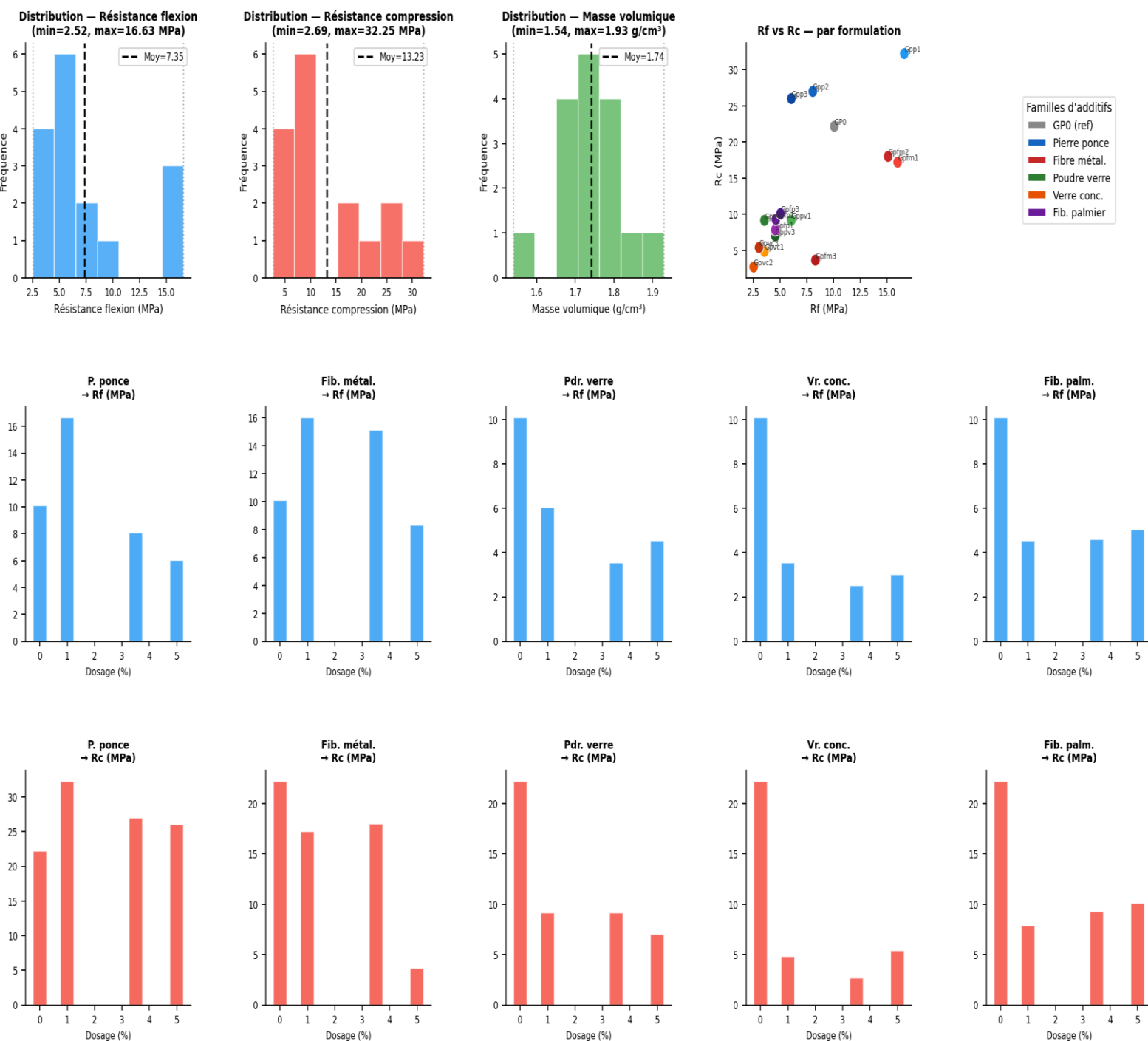


Figure IV.15 : Récapitulatif visuel de la matrice de données et des distributions des propriétés mécaniques des 16 formulations géopolymères étudiées.

IV.6 Conclusion

En intégrant les techniques d'intelligence artificielle dans l'étude des différents mélanges, nous avons posé la pierre angulaire d'un système intelligent qui transcende les limites des calculs manuels. La capacité prédictive qu'offre ce système pour les performances mécaniques transforme la base de données en une véritable boussole numérique, orientant les chercheurs vers les compositions optimales avec un minimum d'effort temporel et matériel. Nous ne nous contentons pas de prédire les résultats, mais nous concevons l'avenir mécanique des matériaux sur des fondements algorithmiques précis.



Conclusion Générale



Conclusion Générale

Au terme de cette recherche, nous avons étudié et analysé la problématique de la dépendance excessive au ciment Portland dans le secteur de la construction et ses impacts environnementaux négatifs, notamment les émissions de dioxyde de carbone CO₂, ainsi que les défis liés à la gestion des déchets de construction. L'orientation vers le "**béton géopolymère**" a constitué l'axe central de ce travail, en tant qu'alternative durable contribuant à la réduction de l'empreinte carbone et à la valorisation des ressources locales.

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette recherche, à travers l'étude des propriétés des matériaux locaux (tels que le sable de dunes, les déchets de briques et la pierre ponce), ont prouvé la possibilité de produire un béton géopolymère à haute efficacité mécanique. Les expériences ont démontré que l'intégration de certains additifs dans des proportions étudiées, comme la pierre ponce à 1 %, a permis une amélioration notable de la résistance à la compression et à la flexion, soulignant ainsi l'efficacité de ces mélanges dans les applications structurelles.

Ce travail s'est également distingué par l'intégration des techniques d'intelligence artificielle (**Machine Learning**) comme outil moderne et efficace pour prédire le comportement mécanique des matériaux. Cette modélisation a permis de dépasser les méthodes expérimentales traditionnelles complexes et d'offrir une plus grande précision dans la prévision des performances des différents mélanges, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de production tout en réduisant les efforts et le temps.

En conclusion, cette recherche confirme que l'adoption de la technologie des géopolymères ne représente pas seulement une solution environnementale, mais constitue également un investissement économique intelligent basé sur le recyclage des déchets et l'exploitation des ressources naturelles disponibles. Au terme de ce travail, nous recommandons la nécessité d'élargir le champ de ces études pour inclure des applications sur le terrain plus large, et de développer les techniques de modélisation pour renforcer la durabilité des matériaux de construction écologiques dans diverses conditions climatiques.



Références Bibliographique



Références Bibliographique

- [1] IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 3: Industrial Processes and Product Use. Geneva: IPCC.
- [2] Taylor. H. F. W. (1997). Cement Chemistry. Thomas Telford Publishing
- [3] IEA. (2018). Feuille de route technologique : Transition bas-carbone dans l'industrie du ciment. Agence Internationale de l'Énergie.
- [4] :<https://www.aljazeera.com/news/2023/9/4/how-much-does-africa-contribute-to-global-carbon-emissions> / <https://www.worldometers.info/co2-emissions/algeria-co2-emissions>
- [5] Neville. A. M. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- [6] Davidovits. J. (2020). Geopolymer Chemistry and Applications (5th ed.). Saint-Quentin : Institut Géopolymère.
- [7] Benchama Khadidja. Benameur Noor EL Imane. « Elaboration d'un Géopolymère à partir d'un matériau naturel ». mémoire de master Université Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib 2023
- [8] Davidovits. J. (2015). Geopolymer Chemistry and Applications (4ème éd.). Saint-Quentin : Institut Géopolymère.
- [9] Abdul Aleem. M. I.. & Arumairaj. P. D. (2012). Geopolymer concrete-A review. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. 1(2). 118-122.
- [10] Singh. B.. Ishwarya. G.. Gupta. M.. & Bhattacharyya. S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. Construction and Building Materials. 85. 78-90.
- [11] Amran. Y. H. M.. Alyousef. R.. Abdul-Jabbar. H.. & El-Zeadani. M. (2019). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production. 210. 633-653.
- [12] Selvaprasanth. P.. et al. (2019). Development of Lightweight Concrete by using Pumice Stone and Recycled Polypropylene Powder. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 9(1).
- [13] Baquero Sanabria. B. A.. et al. (2019). Experimental study of lightweight concrete with expanded clay and pumice stone. Journal of Physics: Conference Series. 1386(1).
- [14] Almutairi. A. L.. et al. (2021). Potential applications of geopolymer concrete as a sustainable material: A review. Case Studies in Construction Materials. 14. e00539
- [15] Sagar. S.. et al. (2021). IMPact of Pumice Stone as partial replacement of coarse aggregates in M30 grade concrete. Materials Today: Proceedings. 47. 3954-3959.

- [16] Andrade. A.. et al. (2022). Selection of pumice stone from Ecuador for the production of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 327. 126930.
- [17] Amenu. T.. et al. (2023). Suitability of pumice stone powder as a supplementary cementitious material in concrete production. *Scientific Reports*. 13(1). 10452.
- [18] Andrade Valle. A. I.. et al. (2024). Evaluation of pumice stone and silica fume as precursors for geopolymer synthesis. *Journal of Building Engineering*. 82. 108261.
- [19] BENRAS Nesrine. KADI Sirine. 2024. Etude des propriétés physique et mécanique des briques à base de déchets de papier. mémoire de master Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2024
- [20] DEHINI H. A. GOUI I. 2023. Étude des performances mécaniques d'un mélange. tuf-sable de dunes-déchets de briques broyés. traité à la chaux. mémoire de master Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2023
- [21] Norme françaises. Analyse granulométrique par tamisage. (NF P 94-056 mars 1996)
- [22] Norme françaises. Masse volumique. (NF P 94-054 octobre 1991).
- [23] Norme françaises. Équivalent de sable (NF P 18-598 octobre 1991).
- [24] Messini Asma. 2025. L'influence de la méthode de formulation sur les propriétés mécaniques d'un mortier à base des déchets du verre. mémoire de master Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2025
- [25] BOULIFA Marwa. DEBABI Adel. 2017. Utilisation de poudre de verre dans le Mortier. mémoire de master Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2017
- [26] Aoun Hadil. Meddeb Abir. 2025. Study of the effect of adding pumice stone on the mechanical properties of mortar. mémoire de master Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2025
- [27] L. Breiman. Random Forests. *Machine Learning*. 45 (2001) 5-32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- [28] G. Biau. E. Scornet. A random forest guided tour. *TEST*. 25 (2016) 197-227.
<https://doi.org/10.1007/s11749-016-0481-7>.
- [29] S. Halimi. M.M. Belhadj. M. Chelgham. A. Benmoussa. F. Mouissi. advancing solar distilled water yield prediction using hybrid machine learning and weighted average techniques. *Journal of Water Process Engineering*. 64 (2024) 105599.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105599>.
- [30] F. Rosenblatt. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*. 65(6) (1958) 386–408.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1037/h0042519>.

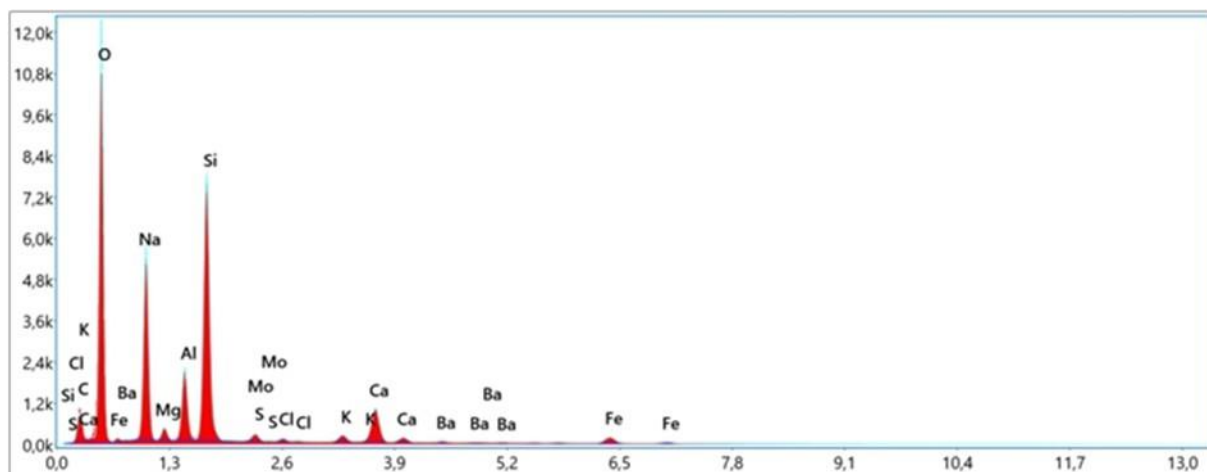
- [31] K. Hornik. M. Stinchcombe. H. White. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*. 2 (1989) 359-366. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).
- [32] D.E. Rumelhart. G.E. Hinton. R.J. Williams. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 323 (1986) 533-536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>.
- [33] G. Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control. Signals and Systems*. 2 (1989) 303-314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>.
- [34] N. Srivastava. G. Hinton. A. Krizhevsky. I. Sutskever. R. Salakhutdinov. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *J. Mach. Learn. Res.*. 15 (2014) 1929–1958.
- [35] L. Prokhorenkova. G. Gusev. A. Vorobev. A.V. Dorogush. A. Gulin. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural information processing systems*. 31 (2018) 6638–6648.
- [36] A.V. Dorogush. A. Gulin. G. Gusev. N. Kazeev. L.O. Prokhorenkova. A. Vorobev. Fighting biases with dynamic boosting. *arXiv preprint arXiv:1706.09516*. (2017).
- [37] J.T. Hancock. T.M. Khoshgoftaar. CatBoost for big data: an interdisciplinary review. *Journal of Big Data*. 7 (2020) 94. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00369-8>.
- [38] T. Cover. P. Hart. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*. 13 (1967) 21-27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>.
- [39] K.R. Muller. S. Mika. G. Ratsch. K. Tsuda. B. Schölkopf. An introduction to kernel-based learning algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 12 (2001) 181-201. <https://doi.org/10.1109/72.914517>.
- [40] J. Weston. A. Elisseeff. B. Schölkopf. M. Tipping. Use of the zero-norm with linear models and kernel methods. *Journal of machine learning research*. 3 (2003) 1439-1461.
- [41] H. Chang. D.-Y. Yeung. Kernel-based distance metric learning for content-based image retrieval. *Image and Vision Computing*. 25 (2007) 695-703. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.05.013>
- [42] V.N. Vapnik. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer. New York. NY. 1995.
- [43] A.J. Smola. B. Schölkopf. A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*. 14 (2004) 199-222. <https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88>



Annexes



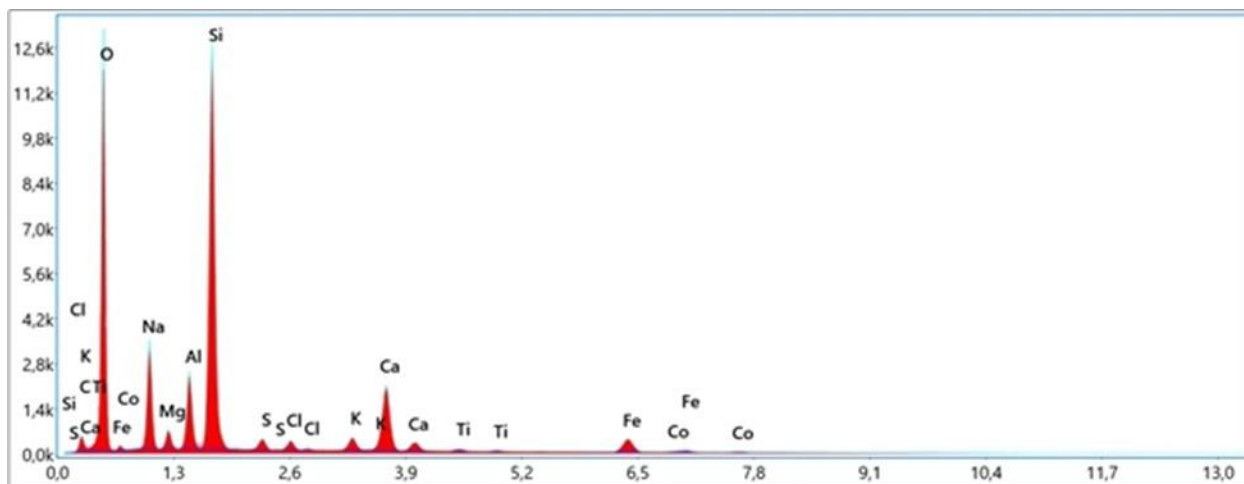
Annexes 1



Analyse EDX de géopolymère

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de géopolymère

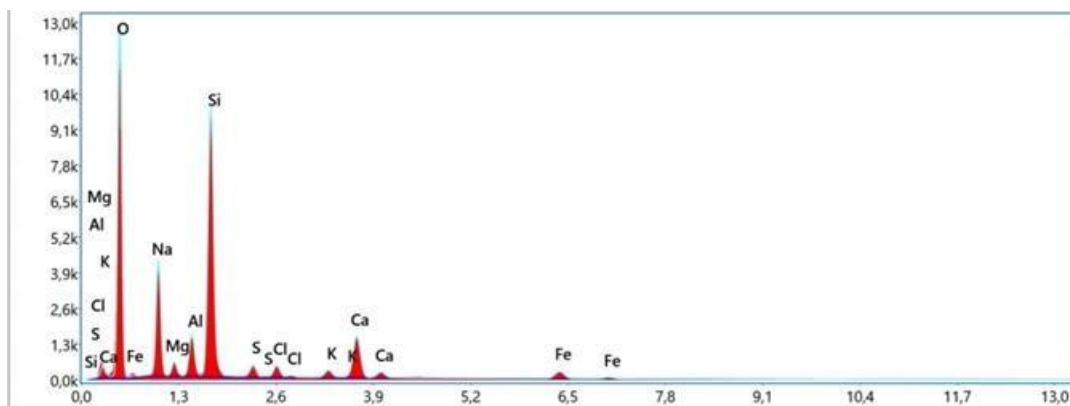
Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	8.29	13.28	0,0158	1.0927	0.1747	1.0000
O K	43.87	52.77	0,1489	1.0465	0.3243	1.0000
NaK	18.73	15.68	0,0755	0.9511	0.4230	1.0016
MgK	1.01	0.80	0,0043	0.9675	0.4409	1.0030
AlK	4.77	3.40	0,0257	0.9318	0.5762	1.0045
SiK	15.64	10.72	0,0997	0.9523	0.6675	1.0024
MoL	0.08	0.02	0,0005	0.7283	0.9185	1.0007
S K	0.50	0.30	0,0036	0.9327	0.7561	1.0065
ClK	0.27	0.15	0,0020	0.8873	0.8304	1.0102
K K	0.69	0.34	0,0058	0.8831	0.9283	1.0218
CaK	4.01	1.93	0,0350	0.8992	0.9537	1.0167
BaL	0.60	0.08	0,0042	0.6473	1.0851	1.0016
FeK	1.54	0.53	0,0132	0.8017	1.0033	1.0682



Analyse EDX de L'ajout de la pierre ponce

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de Gpp

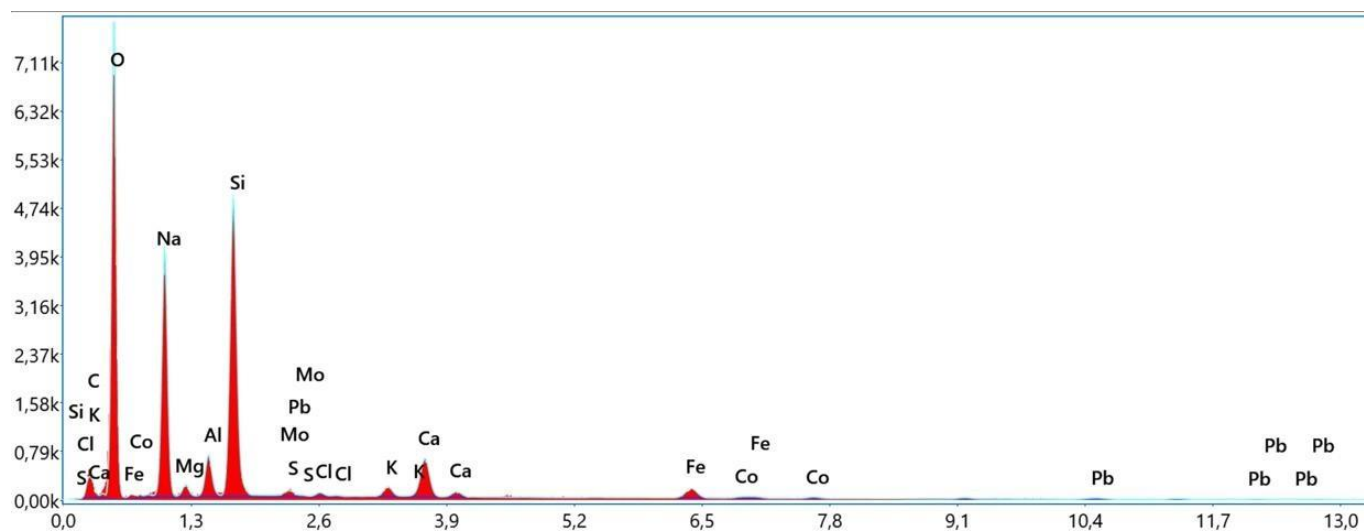
Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	2.69	4.60	0,0046	1.1016	0.1567	1.0000
O K	46.22	59.33	0,1419	1.0555	0.2909	1.0000
NaK	10.67	9.53	0,0388	0.9597	0.3785	1.0017
MgK	1.38	1.17	0,0062	0.9763	0.4599	1.0032
AlK	4.46	3.39	0,0251	0.9404	0.5951	1.0051
SiK	21.11	15.44	0,1396	0.9612	0.6859	1.0026
S K	0.76	0.49	0,0053	0.9416	0.7311	1.0072
ClK	0.74	0.43	0,0054	0.8958	0.8093	1.0111
K K	1.15	0.60	0,0096	0.8916	0.9142	1.0235
CaK	7.11	3.64	0,0616	0.9079	0.9409	1.0143
TiK	0.29	0.12	0,0024	0.8231	0.9588	1.0299
FeK	3.15	1.16	0,0269	0.8098	0.9980	1.0538
CoK	0.26	0.09	0,0022	0.7909	1.0013	1.0686



Analyse EDX de L'ajout de verre concassé

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de Gpvc

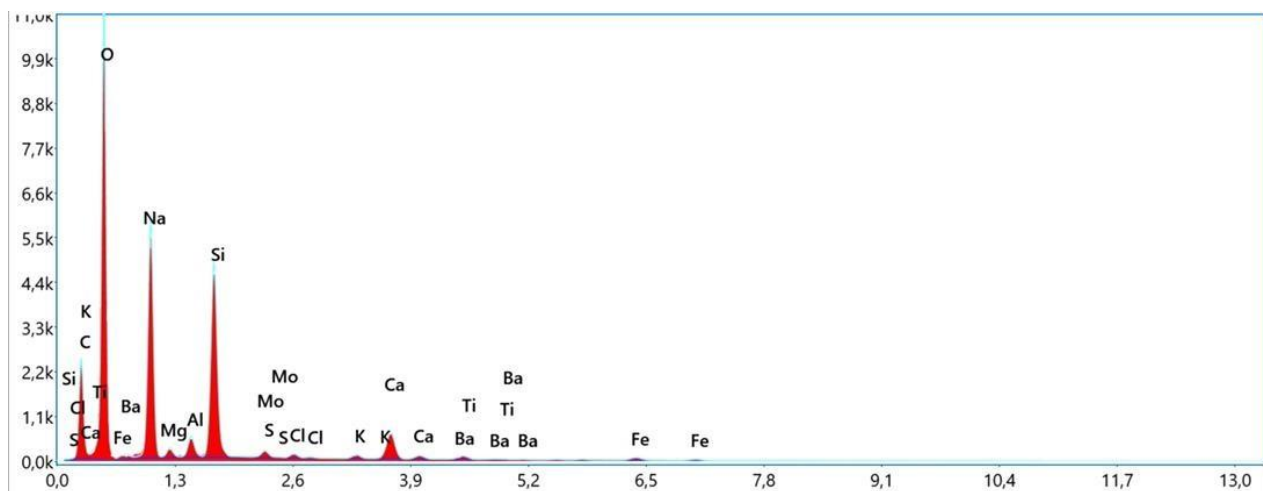
Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
O K	47.83	61.66	0,1631	1.0561	0.3230	1.0000
NaK	15.32	13.75	0,0573	0.9601	0.3887	1.0017
MgK	1.38	1.17	0,0059	0.9767	0.4360	1.0032
AlK	3.51	2.68	0,0189	0.9407	0.5699	1.0052
SiK	20.02	14.70	0,1297	0.9615	0.6720	1.0027
S K	1.09	0.70	0,0076	0.9418	0.7299	1.0072
ClK	1.24	0.72	0,0090	0.8960	0.8064	1.0105
K K	0.92	0.48	0,0076	0.8918	0.9103	1.0224
CaK	6.34	3.26	0,0548	0.9081	0.9391	1.0135
FeK	2.36	0.87	0,0202	0.8098	0.9991	1.0593



Analyse EDX de L'ajout des fibres de palmier

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de Gpfp

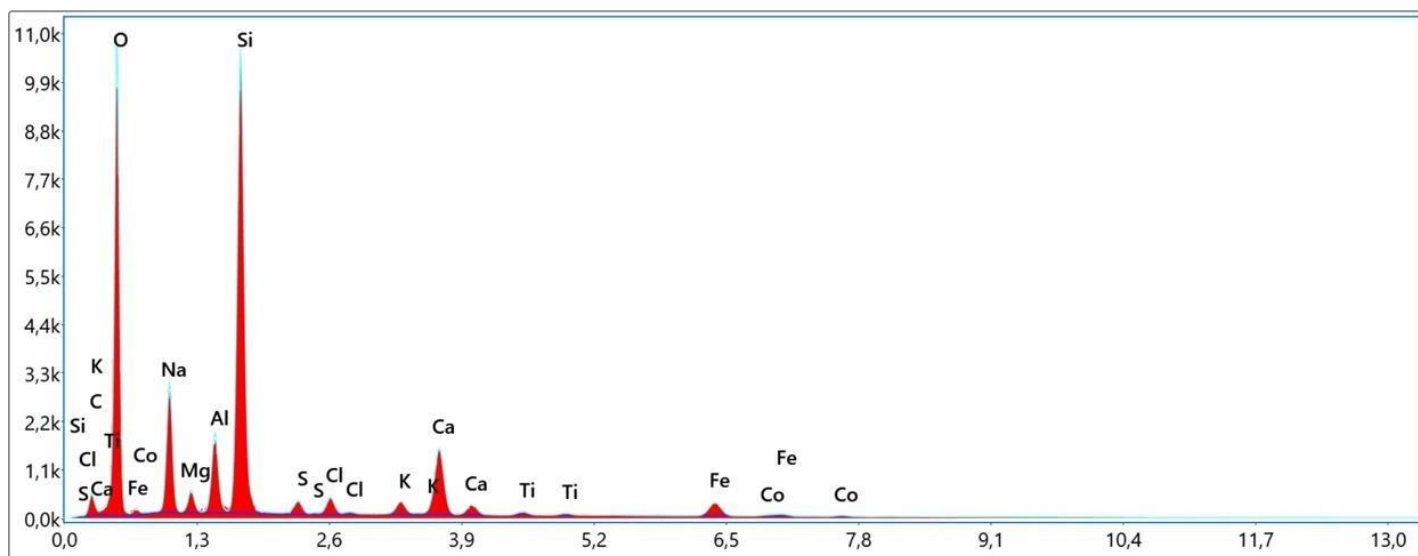
Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	6.66	10.82	0,0129	1.0959	0.1761	1.0000
O K	43.76	53.36	0,1528	1.0496	0.3326	1.0000
NaK	22.05	18.71	0,0868	0.9540	0.4120	1.0012
MgK	0.87	0.70	0,0035	0.9704	0.4109	1.0023
AlK	2.52	1.82	0,0129	0.9346	0.5462	1.0039
SiK	15.79	10.97	0,0996	0.9552	0.6588	1.0021
MoL	0.00	0.00	0,0000	0.7306	0.9156	1.0005
S K	0.23	0.14	0,0016	0.9356	0.7491	1.0061
PbM	0.34	0.03	0,0027	0.6163	1.1417	1.1076
ClK	0.27	0.15	0,0020	0.8901	0.8249	1.0074
K K	0.87	0.44	0,0073	0.8858	0.9253	1.0161
CaK	4.02	1.96	0,0349	0.9020	0.9507	1.0125
FeK	2.23	0.78	0,0190	0.8042	1.0041	1.0563
CoK	0.39	0.13	0,0033	0.7855	1.0062	1.0704



Analyse EDX de L'ajout de la poudre de verre

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de Gppv

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	19.60	28.32	0,0490	1.0738	0.2326	1.0000
O K	43.92	47.63	0,1390	1.0277	0.3081	1.0000
NaK	19.64	14.82	0,0815	0.9335	0.4438	1.0012
MgK	0.60	0.43	0,0026	0.9494	0.4571	1.0024
AlK	1.17	0.75	0,0064	0.9143	0.5959	1.0042
SiK	9.68	5.98	0,0647	0.9343	0.7139	1.0028
MoL	0.11	0.02	0,0008	0.7144	0.9868	1.0006
S K	0.34	0.19	0,0026	0.9149	0.8244	1.0074
ClK	0.29	0.14	0,0023	0.8704	0.8846	1.0114
K K	0.33	0.15	0,0028	0.8661	0.9587	1.0244
CaK	2.74	1.19	0,0242	0.8818	0.9779	1.0210
BaL	0.67	0.08	0,0046	0.6347	1.0937	1.0010
TiK	0.27	0.10	0,0022	0.7992	0.9929	1.0389
FeK	0.63	0.20	0,0054	0.7859	1.0082	1.0858



Analyse EDX de L'ajout des fibres métallique

Résultats de l'analyse quantitative intelligente de Gpfm

Elément	% de masse	% atomique	Kratio	Z	A	F
C K	3.86	6.53	0,0066	1.0999	0.1563	1.0000
O K	45.72	58.07	0,1406	1.0538	0.2918	1.0000
NaK	11.04	9.76	0,0410	0.9581	0.3870	1.0018
MgK	1.32	1.10	0,0060	0.9747	0.4656	1.0033
AlK	4.05	3.05	0,0230	0.9388	0.6010	1.0052
SiK	21.04	15.22	0,1406	0.9595	0.6944	1.0027
S K	0.76	0.48	0,0053	0.9399	0.7377	1.0073
ClK	1.14	0.65	0,0084	0.8943	0.8145	1.0108
K K	1.02	0.53	0,0085	0.8901	0.9153	1.0229
CaK	6.45	3.27	0,0559	0.9064	0.9423	1.0148
TiK	0.44	0.19	0,0036	0.8216	0.9616	1.0300
FeK	2.88	1.05	0,0245	0.8083	0.9987	1.0557
CoK	0.28	0.10	0,0024	0.7895	1.0018	1.0707

Annexes 2



EC Geosciences SARL
Laboratoire Etudes et Contrôles

30 villas sahariennes E22 Ouargla 30000 Algérie

Moblie : 00213(0)66 36 75 787.

Tél. Fax : 00213(0)29 703 696.

Email : leageosciences30@gmail.com

Mesure de la masse volumique et absorption

NP: P 18-555 D6CEMBRE 1990

Bon de commande N° :

Cliant : STAGIERE

Essai N° : 1/2026

Lieu de prélèvement :

Dénomination d'échantillon : Sabie Naturel de construction

Projet :

Date de commande : 04/02/2026

Date d'essai : 04/02/2026

Prélèvement fait par : Client

Date de prélèvement : 04/02/2026

Etat d'échantillon : Sec.

Tableau des valeurs

Essai	Unité	Résultats
Poids d'échantillon sec en air	g	300
Poids de pycnomètre + d'eau	g	1182
Poids de pycnomètre + d'eau + d'échantillon	g	1368.8
Le poids d'échantillonnage saturé (surface sèche)	g	
Masse volumique apparent (four sec)	-	-
Masse volumique absolu	-	2,65
L'absorption	%	-

Cachet et signature

Essai réalisé par
GZANE, Mohamed

Vérifié et approuvé par
GZANE, Mohamed

Procès verbal préparé par
GZANE, Mohamed

Date de rédaction : 04/02/2026

Page N° : 2 sur 2





ANALYSES CHIMIQUES

Sommaires pour : Carbonates- Insolubles- Sulfates

Chlorures [Norme NF EN 1008 Juillet 2003 méthode d'essai 6.1.1] - Sulfates solubles [NORME D'ESSAIS BS 1377]

Projet : /

Etude N°: /

Client : /

lieux de prélèvement : /

Code d'échantillon(s)		/					
Date de réception		/					
Date de prélèvement		10/02/2026					
Lieu de prélèvement		/					
Dénomination de l'échantillon		Brique rouge					
Prélevé par		Laboratoire					
		Paramètres à déterminer					
		CaCo3 (%)	Insoluble (%)	Cl- (mg/L)	CaSO42H2O (%)	So3-- (%)	So4-- (mg/kg)
Echantillon(s)	/	0,84	79,96	0,043	4,24	1,97	2362,3

Commentaire:

Réalisé par: D,KECHIRED Grade T.S.S

Vérifié par: D,MERSOUT Grade

Approuvé par: D,MERSOUT Grade Ingénieur

Cachet et signature

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

NF : P 18-560

Client	Etude N°	
Projet		
Lieu de prélèvement		
Prélèvement fait par		
Dénomination d'échantillon	sable	
Date de Réception		Date d'essai
Opérateur		Grade : T

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon	
50					Poids total avant lavage	1000
40	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage	997,9
31,5	0	0	0,00	100	Température de séchage	70°C
25	0	0	0,00	100	Module de finesse	1,74
20	0	0	0,00	100	OBSERVATION :	
16	0	0	0,00	100		
12,5	0	0	0,00	100		
10	0	0	0,00	100		
8	0	0	0,00	100		
6,3	0	0	0,00	100		
5		0	0,00	100		
4		0	0,00	100		
2,5		0	0,00	100		
1,25		0	0,00	100		
0,63		69,5	17,38	99		
0,315		248,3	62,08	85		
0,16		948,8	94,88	5		
0,08		988,2	98,82	1		
< 0,08			-	-		

