

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة 8 ماي 1945 قالمة

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Génie Civil et Hydraulique

Spécialité Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

THÈSE

En vue d'obtention d'un diplôme du **DOCTORAT**

Présentée par **Tahar ZERIG**

Contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des mortiers de sable de dune avec ajouts

Soutenue le : 24 Juin 2024, En présence du jury

| | | |
|----------------------|---------------------------------|---------------|
| Pr. CHERAIT Yacine | Université 8 mai 1945 Guelma | Président |
| Pr. BELACHIA Mouloud | Université 8 mai 1945 Guelma | Rapporteur |
| Dr. AIDOU Assia | Université 8 mai 1945 Guelma | Co-Rapporteur |
| Pr. NAFAA Zahreddine | Université 8 mai 1945 Guelma | Examineur |
| Pr. HEBHOUB Houria | Université 20 Août 1955 Skikda | Examineur |
| Dr. DJEDID Tarek | Université Hamma Lakhdar ElOued | Invité |

Juin 2024



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ وَأَنْبَثْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ بَهِيجٍ ﴾

[ق: 6]

﴿ أَفَلَمْ يَنْظُرُوا إِلَى السَّمَاءِ فَوْقَهُمْ كَيْفَ بَنَيْنَاهَا وَزَيَّنَّاهَا وَمَا لَهَا مِنْ فُرُوجٍ ﴾

[ق: 7]

﴿ أَفَمَنْ أَسَّسَ بُنْيَانَهُ عَلَى تَقْوَىٰ مِنَ اللَّهِ وَرِضْوَانٍ خَيْرٍ أَمْ مَنْ أَسَّسَ بُنْيَانَهُ عَلَىٰ شَقَا
جُرْفٍ هَارٍ فَانْهَارَ بِهِ فِي نَارِ جَهَنَّمَ وَاللَّهُ لَا يَهْدِي الْقَوْمَ الظَّالِمِينَ ﴾

[التوبة: 109]



Remerciements

..Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers le Tout-Puissant, **الله**.

J'ai eu la chance d'exprimer ma profonde gratitude envers notre directeur de thèse, le Professeur **Mouloud BELACHIA**, ainsi que la co-encadrante, Docteur **Assia AIDOU**, à qui nous restons redevables de m'avoir inlassablement accepté, soutenu et accompagné physiquement et moralement sans relâche pendant les bons et les mauvais moments de ces quatre ans. Nous aimerions également les remercier pour leur disponibilité malgré leurs nombreuses occupations, leurs sages conseils, la grande confiance témoignée et la latitude laissée pour prendre des initiatives dans ce travail. **À Monsieur Mouloud BELACHIA et Madame Assia AIDOU**, permettez-nous de vous dire un sincère "MERCI POUR TOUT".

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury de ma soutenance : à Monsieur **CHÉRAIT Yacine**, Professeur à L'Université 8 mai 1945 Guelma, qui a eu l'honneur de présider le jury, à Monsieur **NAFAA Zahreddine**, Professeur à L'Université 8 mai 1945 Guelma, et à Madame **HEBHOUB Houria**, Professeur à l'Université 20 Août 1955 Skikda, pour la lourde tâche d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des membres du Laboratoire LCGH, en particulier à Monsieur le directeur de laboratoire de recherche (LGC) Monsieur **Nouanouria Med Salah**, Professeur au département de Génie Civil à L'Université 8 mai 1945 Guelma, et aux membres du laboratoire de génie civil de l'Université Badji Mokhtar - Annaba (LGC), en particulier à Monsieur **DJAGHABA Kamal**, Professeur au département de Génie Civil ...

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs les Docteurs **Tarek DJEDID**, **Ali Farik**, **Abdelmounaam Miloudi**, et **Mohammed Mani**, ainsi qu'au Professeur **Ali GHOMRI**, pour avoir sacrifié de leur temps pour nous fournir tous les renseignements nécessaires au cours de nos années de recherche scientifique. Nous avons beaucoup appris de vous, merci infiniment.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance à nos amis Mr Le Directeur **Ben Ammar El hachemi**, **Lalmi Soualhi Ahmima**, **Bekkouche Ammar** et **Abdelfatah**, **Bousbia A. Wahab** et **Kouider Yahia**.

Enfin, j'adresse mes sentiments les plus respectueux à mes amis doctorants de ma promotion pour tous les bons moments partagés à l'université. Merci à tous ceux qui ont soutenu et valorisé ce travail de recherche.

Dédicaces



En-mémoire de :

*El Hadj LAID Zerig, mon regretté père,
rappelé à الله le 25/12/2015, qui a su laisser une
flamme inextinguible après son éternel adieu.*

Et-je-dédie-ce-travail à :

Ma tendre mère, Souici Hania

Mon épouse bien aimée, Farida

Mon 2^{ème} père, ZERIG Ali

Mes-enfants : Imane, Oussama, Nada, Radhia, Alla, Laid

Et-la prunelle de-mes-yeux, Meriem.

*À-mes frères : Kamel, Ali, Hamza, Abdelwahab, El-Hadi, Nabil
et Tedjani*

À-ma sœur, Fatima, et ses enfants

*À-tous mes amis de la direction des équipements publics de la
wilaya d'El-Oued.*

*À-tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation
de cette recherche.*

Tahar Zerig

A la mémoire de mon père

Publications liées aux Recherches Doctorales

Publications internationales :

1. **T. ZERIG, A. AIDOUD, M. BELACHIA, T. DJEDID, M. ABBAS.** Combined sand and eco-mortar reinforced with polyethyleneTerephthalate :Behavior and optimization using RSM method Construction Building Materiles 2023;404:133160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133160>.
2. **T. ZERIG, M. BELACHIA, A. AIDOUD, N. MEFT T. DJEDID, M. ABBAS.** Statistical analysis using the RSM approach of the physical behavior of green polymerized eco-mortar Journal of Cleaner Production 2024;450:14185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141858>.

Communications Internationals:

1. **T. ZERIG.** Influence of Dune Sand on the Physico-mechanical Behavior of Eco-mortar after Curing. The Second International Conference on Materials, Energy and Environment (MEE'2023) on October 23-24, 2023 in El Oued- Algeria.
2. **T. ZERIG.** Effect of the Incorporation of Plastic Waste on the Physico-Mechanical Properties of a Mortar at a Young Age. 5th InternationalConference on Applied Engineering and NaturalSciences on 10-12 July in 2023 "ICAENS2023" at Konya/Turkey.
3. **T. ZERIG.** Impact of curing regime on the kinetics of the physico-mechanical behavior in combined sand (dune and recycled) concrete. 1st International Conference on Scientific-and-Academic-Research-on10-13-December-in2022-"ICSAR-2022"at Konya/Turkey.
4. **T. ZERIG, A. AIDOUD, T. DJEDID, A. KHELIFI et M. BELACHIA.** A REVIEW: ABOUT THE EXPLOITEDBENEFITS OFDUNE SAND IN THE MORTAR INDUSTRY: PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES. 1st International.Conference on Innovative AcademicStudies on 10-13 September in 2022 "ICIAS 2022" at Konya/Turkey,.
5. **T. ZERIG.** Mechanical examination of demolished dune sand mortar. 3rd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences on 14-17 January in 2023, "ICEANS 2023" at Konya/Turkey.
6. **T. ZERIG, T. DJEDID, A. AIDOUD, A. KHELIFI, M. BELACHIA et A.GUETTALA.** The influence of marble fines on the physical mechanical characteristics of concrete based on demolition aggregates. FirstInternationalConference on Geotechnical,Structural and Advanced Materials Engineering (ICGSAME' 2021), December 05-07, 2021/ Biskra-Algeria.

7. **ZERIG-Tahar**, AIDOUUD-Assia, BELACHIA-Mouloud, DJEDID-Tarek. Caractérisations de matériaux cimentaires a base de sable de dune, ajouts et fibres : Etat de l'art. the 2nd International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE- 2021), 10-11 Novembre 2021. University of Skikda, Algeria .
8. **T. ZERIG**, Tarek DJEDID, Assia AIDOUUD, Abdelhamid KHELIFI, Mouloud BELACHIA. Investigation expérimentale de mortier a base des sables duno-démolis de la région de oued souf. 3rd International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE- 2022) November 27-28, 2022 - Skikda, Algeria.
9. **T. ZERIG**, Mouloud BELACHIA, Assia AIDOUUD, Abdelhamid KHELIFI, Tarek DJEDID et Mouhammed MANI . Exploitation des matériaux purement environnementaux dans la formulation des matériaux cimentaire. 2nd International Seminar on Industrial Engineering And Applied Mathematics (ISIEAM 22) in Skikda (ALGERIA) 23 et 24 October 2022.

Communication Nationale:

1. **T. ZERIG**, A. AIDOUUD, T. DJEDID, A. KHELIFI et M. BELACHIA. Influence de la Nature de Cure sur les Propriétés Physico-Mécaniques du Mortier à Base de Sable Duno-Démolis. 2^{ème} Séminaire National de Génie Civil "SNGC₂₀₂₂" Université de Souk-Ahras, 18-19 Decembre 2022.
2. **T. ZERIG**, Khelifi A, AIDOUUD A., DJEDID T., BELACHIA M. Comportement Physique et Rhéologique du Béton à Base de Granulats Recyclés. The first national Seminar on Green Chemistry and Natural Products (GCNP'22), organized from March 14-15, 2022 at the University of Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued.
3. **T. ZERIG**, M. BELACHIA, A. AIDOUUD, DJEDID T., Bedadi L. Recycling and recovery of abandoned materials for the manufacture of eco-sustainable mortar (CNGCH 2023), organisé par du Congres Nationale de Génie Civil et d'Hydraulique Guelma, le 12-13 Novembre 2023.
4. **T. ZERIG**, A. AIDOUUD, M. BELACHIA, DJEDID T., A. KHELIFI. Application of the response surface methode to optimize duno-demolished sand-based mortars (CNGCH 2023), organisé par du Congres Nationale de Génie Civil et d'Hydraulique Guelma, le 12-13 Novembre 2023.
5. **T. ZERIG**, A. AIDOUUD, T. DJEDID, M. BELACHIA, A. KHELIFI. Effect of Curing on the Flexural Strength of Dune Sand Mortar with Addition: Optimization RSM. Premier Séminaire National de Géotechnique, Construction, Matériaux & Environnement (GEOMAT23), tenu à l'université de Souk Ahras, du 11 au 12 décembre 2023.
6. **T. ZERIG**, A. AIDOUUD, T. DJEDID, M. BELACHIA, A. KHELIFI. Valorisation de Polymère PET dans la fabrication de matériaux composites à base de sable de dune. 2^{ème} Séminaire National en Génie des Procédés (SNGP 2023), organized in the faculty of applied sciences at the University of Kasdi Merbah Ouargla Algeria.

Résumé

Cette thèse se concentre sur la valorisation et le recyclage de trois matériaux entièrement abandonnés en Algérie pour la fabrication de nouveaux mortiers écologiques (sable de dune, sable recyclé et la fibre plastique PET). Aujourd'hui, l'intérêt économique et environnemental est devenu impératif dans les travaux de construction. À cet égard, l'utilisation de matériaux de substitution pour les granulats naturels ou le ciment contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des émissions de gaz carbonique.

L'interaction entre le sable de dune (DS) et le sable recyclé (RS), ainsi que l'introduction d'une fibre de type polyéthylène téréphtalate (PET-F), facilite la création d'un matériau écologique conforme aux normes, respectueux de l'environnement et présentant un coût très bas.

La stratégie repose sur la substitution progressive du sable de dune par un autre provenant de déchets de démolition à différentes proportions : 0, 25, 50, 75 et 100%, associée à un taux graduel de fibre PET (de 20 et 30 mm) de longueur variant de 0 à 2%, avec un intervalle de 0,5%. L'impact de ces nouveaux composites sur les performances physico-mécaniques des mortiers conçus a été examiné à travers divers tests, notamment l'étalement, la densité fraîche, l'air occlus à l'état frais (Ac), la porosité, l'absorption capillaire et par immersion, le retrait (Sh), la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV), la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le déplacement flexionnel (Yf). Par ailleurs, une approche prédictive par la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été appliquée dans le but d'optimiser les paramètres influençant les propriétés des nouveaux composites cimentaires.

Les résultats obtenus démontrent un intérêt significatif pour le mélange composé de 50% de sable de dune (SD), 50% de sable de recyclé (SR) et 0,5% de fibres PET d'une longueur de 30 mm. Ce mélange a abouti à des performances mesurées de 2,231% d'air occlus (Ac), 21,426% de porosité, -22,76 $\mu\text{m}/\text{m}$ de retrait linéaire (Sh), 3,372 mm de déplacement flexionnel (Yf), 3606,74 m/s de vitesse des ultrasons (UPV), et 12,046% d'absorption d'eau (WA), ainsi que 43,398 MPa de résistance à la compression (Rc) et 7,723 MPa de résistance à la flexion (Rf).

De plus, le modèle de Réponse de Surface (RSM) présente une corrélation satisfaisante avec les données expérimentales, indiquant une amélioration notable des propriétés physico-mécaniques de l'éco-mortier étudié. Il est également à noter que le modèle proposé semble pertinent, avec un coefficient de désirabilité élevé égal à 0,90.

Mots-clés: Eco-mortier, Sable de dune, Sable recyclé, Fibre polyéthylène-téréphtalate, Caractéristiques physico-mécaniques, Méthodologie de surface de réponse.

Abstract

This thesis focuses on the valorization and recycling of three materials entirely abandoned in Algeria for the production of new ecological mortars (dune sand, recycled sand and PET plastic fiber). Today, economic and environmental considerations have become imperative in construction projects. In this regard, the use of substitute materials for natural aggregates or cement contributes to the preservation of natural resources and the reduction of carbon dioxide emissions.

The strategy involves the gradual substitution of dune sand with another sourced from demolition waste at different proportions: 0, 25, 50, 75, and 100%, combined with a gradual rate of PET fiber (20 and 30 mm) of length varying from 0 to 2%, with an interval of 0.5%. The impact of these new composites on the physico-mechanical performance of the designed mortars was examined through various tests, including spread, fresh density, occluded air at the fresh state (A_c), porosity, capillary and immersion absorption, shrinkage (Sh), ultrasonic pulse velocity (UPV), compression strength, flexural strength, and flexural displacement (Y_f). Additionally, a predictive approach using the Response Surface Methodology (RSM) was applied to optimize the parameters influencing the properties of the new cementitious composites.

The obtained results demonstrate significant interest in the composite mixture consisting of 50% dune sand (DS), 50% recycled sand (RS), and 0.5% PET fibers with a length of 30 mm. This mixture resulted in measured performances of 2.231% occluded air (A_c), 21.426% porosity, -22.76 $\mu\text{m}/\text{m}$ linear shrinkage (Sh), 3.372 mm flexural displacement (Y_f), 3606.74 m/s ultrasonic pulse velocity (UPV), and 12.046% water absorption (WA), as well as 43.398 MPa compression strength (R_c) and 7.723 MPa flexural strength (R_f).

Furthermore, the Response Surface Model (RSM) shows a satisfactory correlation with experimental data, indicating a notable improvement in the physico-mechanical properties of the studied eco-mortar. It is noteworthy that the proposed model appears relevant, with a high desirability coefficient of 0.90.

Key-words: Eco-mortar, Dune sand, Recycled sand, Polyethylene-terephthalate fiber, physico-mechanical characteristics, Response surface methodology.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تثمين وإعادة تدوير ثلاث مواد مهجورة بالكامل في الجزائر لإنتاج ملاط بيئي جديد (رمال الكثبان الرملية والرمال المعاد تدويره والألياف البلاستيكية PET). اليوم، أصبحت الاعتبارات الاقتصادية والبيئية حتمية في مشاريع البناء. وفي هذا الصدد فإن استخدام مواد بديلة للركام الطبيعي أو الإسمنت يساهم في الحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

تتضمن الاستراتيجية الاستبدال التدريجي للرمال الرملي بآخر مصدره مخلفات الهدم بنسب مختلفة: 0، 25، 50، 75، 100%، مصحوبة بمعدل تدريجي من ألياف PET (20 و 30 ملم) بأطوال تتراوح من 0 إلى 2%، بزيادة قدرها 0.5%. تم فحص تأثير هذه المركبات الجديدة على الأداء الفيزيائي والميكانيكي للملاط المصمم من خلال اختبارات مختلفة، بما في ذلك الانتشار، والكثافة الطازجة، والهواء المغطى في الحالة الطازجة (Ac)، والمسامية، والامتصاص الشعري والغمر، والانكماش (Sh)، سرعة النبض بالموجات فوق الصوتية (UPV)، وقوة الضغط، وقوة الانثناء، وإزاحة الانثناء (Yf). بالإضافة إلى ذلك، تم تطبيق نهج تنبؤي باستخدام منهجية سطح الاستجابة (RSM) لتحسين المعلمات التي تؤثر على خصائص المركبات الإسمنتية الجديدة.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها اهتمامًا كبيرًا بالخليط المركب الذي يتكون من 50% رمل كثبان (DS)، و50% رمل معاد تدويره (RS)، و0.5% ألياف PET بطول 30 مم. أدى هذا الخليط إلى قياس أداء 2.231% من الهواء المحبوس (Ac)، 21.426% مسامية، -22.76 ميكرومتر/م انكماش خطي (Sh)، 3.372 ملم إزاحة انثناء (Yf)، 3606.74 م/ث سرعة نبض بالموجات فوق الصوتية (UPV)، و امتصاص الماء بنسبة 12.046% (WA)، بالإضافة إلى قوة ضغط تبلغ 43.398 ميغا باسكال (Rc) وقوة انثناء تبلغ 7.723 ميغا باسكال (Rf).

علاوة على ذلك، أظهر نموذج سطح الاستجابة (RSM) ارتباطاً مرضياً مع البيانات التجريبية، مما يشير إلى تحسن ملحوظ في الخواص الفيزيائية والميكانيكية للملاط البيئي المدروس. ومن الجدير بالذكر أن النموذج المقترح يبدو مناسباً، حيث أن معامل رغبة عالٍ قدره 0,90

الكلمات المفتاحية: الملاط البيئي، رمال الكثبان الرملية، الرمال المعاد تدويره، ألياف البولي إيثيلين

تريفثاليت، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، منهجية سطح الاستجابة.

Liste des Abréviations

| | | |
|--------------------------|---|--|
| SD | : | Sable de d une. |
| SR | : | Sable de r ecyclé. |
| PET-F | : | P olyéthylène T éréphtalate F iber. |
| M_x/y/z | : | M ortier, x :% S D, y :% S R, z : L F. |
| UPV | : | U ltrasonic P ulse V elocity (la vitesse d'impulsion ultrasonique). |
| Sh | : | S hrinkage (Retrait). |
| As | : | A ir content (air occlus) . |
| Yf | : | F lexural displacement (déplacement flexionnel). |
| Ab | : | A bsorption d'eau. |
| RSM | : | R éponse S urface M éthodologie. |
| BBD | : | B ox- B ehnken D esign. |
| ANOVA | : | A nalyse of V ariance. |
| Rc | : | R ésistance de compression. |
| Rf | : | R ésistance de flexion. |
| EN | : | N orme E uropéenne. |
| NF P | : | N orme F rançaises applicable au bâtiment et génie civil . |
| AFNOR | : | A ssociation F rançaise de N ormalisation . |
| PNAE-DD | : | P lan N ationald' A ctions pour l' E nvironnement et le D éveloppement D urable. |
| FEDEP | : | F onds N ationalde l' E nvironnement et de dépollution. |
| DI | : | D échets I nertes |
| DIB | : | D échets I ndustriels B anals |
| DIS | : | D échets I ndustriels S péciaux |
| DD | : | D échets D angereux |
| ONEDD | : | O bservatoire N ationalde l' E nvironnement et du D éveloppement D urable |
| MEB | : | M icroscopie E lectronique à B alayage |
| DRX | : | D iffractionpar R ayons X |
| FTIR | : | F ourier T ransform I nfrared S pectroscopy |
| ASTM | : | A merican S ociety for T esting and M aterials. |

Table des matières

| | |
|--|------|
| .Remerciements..... | i |
| .Dédicaces..... | ii |
| .Publications liées aux recherches doctorales..... | iii |
| .Résumé..... | v |
| .Abstract..... | vi |
| ملخص..... | vii |
| .Liste des abréviations..... | viii |
| .Table des matières..... | ix |
| .Liste des figures..... | xiii |
| .Liste des tableaux..... | xv |

-INTRODUCTION GENERALE-

| | |
|--|---|
| .Problématique..... | 2 |
| .Introduction générale | 3 |
| .Objectifs à atteindre et les résultats attendus | 4 |
| .Structure de la thèse | 5 |

C HAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction | 7 |
| I.2 Définition des matériaux cimentaires | 7 |
| I.3 Ciment Portland | 8 |
| I.4 Sable de dune | 9 |
| I.4.1 Définition | 9 |
| I.4.2 Analyse chimique par rayons X dispersifs en longueur d'onde fluorescence | 11 |
| I.4.2.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) | 12 |
| I.4.2.2 Répartition granulométrique du sable d'El-Oued | 12 |
| I.4.2.3 Morphologie et analyse EDX | 13 |
| I.4.2.4 Minéralogie du sable d'El-Oued | 13 |
| I.5 Sable recyclés | 14 |
| I.5.1 Définition | 14 |
| I.5.2 Béton de granulats recyclés | 15 |
| I.5.3 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats | 16 |
| I.5.4 Caractérisation expérimentale des granulats de béton recyclés | 17 |
| I.5.4.1 Résistance à la compression et à la traction | 17 |
| I.5.4.2 Module d'élasticité | 18 |
| I.6 Plastiques Polyéthylène Téréphtalate (PET) | 19 |
| I.7 Influence des composants sur les caractéristiques d'un mortier élaboré à partir de SD. | 19 |

| | |
|---|----|
| I.7.1 Propriétés mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques | 21 |
| I.7.2 Propriétés de durabilité des composites cimentaires avec granulats thermoplastiques | 22 |
| I.7.2.1 Effet du PET sur l'absorption d'eau | 22 |
| I.7.2.2 Effet du PET sur résistance aux attaques acides et sulfates | 24 |
| I.8 Conclusion | 26 |
| Références bibliographiques | 27 |

-CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DECHETS-

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 34 |
| II.2 Émergence d'une politique environnementale en Algérie | 34 |
| II.3 Définition des déchets | 36 |
| II.4 Influence des déchets sur l'écosystème | 36 |
| II.4.1 Pollution de l'eau | 36 |
| II.4.2 Pollution de l'air | 36 |
| II.4.3 Altération des sols | 36 |
| II.4.4 Émissions de gaz à effet de serre | 37 |
| II.4.5 Impacts sur la faune et la flore | 37 |
| II.4.6 Problèmes de gestion des déchets | 37 |
| II.4.7 Ressources épuisées | 37 |
| II.5 Différents types de déchets | 37 |
| II.5.1 Déchets ultimes | 37 |
| II.5.2 Déchets inertes | 37 |
| II.5.3 Déchets assimilés | 37 |
| II.5.4 Déchets verts | 37 |
| II.5.5 Déchets organiques (DO) | 38 |
| II.5.6 Déchets industriels banals (DIB) | 38 |
| II.5.7 Déchets dangereux (DD) | 38 |
| II.5.7.1 Déchets industriels spéciaux (DIS) | 38 |
| II.5.7.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) | 38 |
| II.5.8 Déchets de la construction (démolition) | 38 |
| II.5.9 Les déchets utilisés dans cette étude | 40 |
| II.5.9.1 Sable de dune une ressource sous exploitée: | 40 |
| II.5.9.2 Déchet de béton | 41 |
| II.5.9.2.1 Composition des granulats recyclés | 43 |
| II.5.9.3 Déchet plastiques | 43 |
| II.5.9.3.1 Consommation des plastiques en Algérie | 43 |
| II.5.9.3.2 Polyéthylène téréphtalate (PET) | 44 |

| | |
|--|----|
| II.6 Collecte des déchets | 45 |
| II.7 Impacts du recyclage sur l'environnement et l'industrie | 45 |
| II.8 Conclusion | 46 |
| Références bibliographiques | 47 |

-CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES-

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction- | 51 |
| III.2 Matériaux utilisés- | 51 |
| III.2.1Ciment | 52 |
| III.2.2 Présentation des granulats utilisés | 52 |
| III.2.2.1 Sable de-dune | 52 |
| III.2.2.2 Sable recyclé | 53 |
| III.2.3 Fibre plastique(PET) | 53 |
| III.2.4 Eau de gâchage | 54 |
| III.3 Caractérisation physique des Matériaux utilisés | 54 |
| III.3.1 Analyse granulométrique | 54 |
| III.3.2 Masses volumiques et absorption d'eau | 55 |
| III.3.3 Equivalant de sable | 55 |
| III.4 Étude minéralogique | 56 |
| III.4.1 Analyse par diffraction des rayons X(DRX) | 56 |
| III.4.2 Analyse infrarouge par transformée de Fourier (FTIR) | 56 |
| III.4.3 Analyse par MEB | 57 |
| III.5 Méthodes d'essais | 58 |
| III.5.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai | 58 |
| III.5.2 Préparation des échantillons d'essai | 60 |
| III.6. Méthodologie expérimentale | 61 |
| III.6.1. Caractéristiques physico-mécaniques | 61 |
| III.6.1.1. A l'état frais | 61 |
| III.6.1.2. A l'état durci | 63 |
| III.6.1.2.1. Mesure des masses volumiques humide et sèche | 63 |
| III.6.1.2.2. Essais des résistances mécaniques | 65 |
| III.6.1.2.2.1 Essais d'auscultation dynamique (essai ultrasonique) | 65 |
| III.6.1.2.2.2 Module d'élasticité dynamique E_{dyn} | 66 |
| III.6.1.2.2.3 Essai de flexion à trois point et déplacement flexionnel | 66 |
| III.6.1.2.2.4 Essai de compression | 67 |
| III.6.1.2.3. Essai de variation dimensionnel (<i>Retrait/gonflement</i>) | 68 |
| III.6.1.2.4 Caractéristiques des indicateurs de durabilité | 69 |
| III.6.1.2.4.1 Porosité accessible à l'eau | 69 |
| III.6.1.2.4.2 Essai d'absorption d'eau par capillarité | 70 |

| | |
|--|----|
| III.6.1.2.4.3 Absorption d'eau par immersion totale | 72 |
| III.6.1.2.4.4 Analyse thermo gravimétrique ATG/DSC | 72 |
| III.6.1.2.4.5 Essais d'attaque par acide sulfurique H ₂ SO ₄ | 74 |
| III.7 Conclusion | 75 |
| Références bibliographiques | 96 |

-CHAPITRE IV : ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS-

| | |
|--|-----|
| IV. 1-Introduction | 80 |
| IV.2 Propriétés à l'état frais | 80 |
| IV.2.1 Ouvrabilité | 80 |
| 2.2 Densité à l'état frais | 82 |
| IV.2.3 Air occlus | 83 |
| IV.3 Propriétés à l'état durci | 84 |
| IV.3.1 Résistance à la compression | 84 |
| IV.3.2 Résistance à la flexion trois points | 86 |
| IV.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV) | 89 |
| IV.3.4 Module d'élasticité dynamique (Edyn) | 91 |
| IV.4 Propriétés des facteurs de durabilité. | 92 |
| IV.4.1 Absorption d'eau par immersion et la sorptivité | 93 |
| IV.4.2 Porosité accessible à l'eau | 97 |
| IV.4.2 Retrait | 99 |
| IV.4.3 Exposition des éco-mortiers à l'acide sulfurique H ₂ SO ₄ | 100 |
| IV.4.3.1 Observation visuelle | 100 |
| IV.4.3.2 Perte de masse par l'effet H ₂ SO ₄ | 102 |
| IV.5 Étude statistiques par la méthodologie de surfacé de réponse (RSM) | 105 |
| IV.5.1 Plan expérimental de la méthodologie de surfacé de réponse (RSM) | 106 |
| IV.5.2 ANOVA et analyse des interactions | 106 |
| IV.5.3 Interprétation des réponses de 2D et 3D | 117 |
| IV.6 Conclusion | 119 |
| Références bibliographiques | 121 |
| -CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS- | 126 |
| Annexes | 130 |

Les Figures

CHAPITRE I

| | |
|---|-----------|
| Figure I-1: Étapes de la fabrication du ciment..... | 09 |
| Figure I-2: Les sables des dunes mouvants..... | 10 |
| Figure I-3: Carte de l'Algérie montrant la localisation des dunes de sable dans le quartier d'El-Oued..... | 10 |
| Figure I-5 a) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5..... | 12 |
| Figure I-6 Analyses EDX des grains de sable S4 et S5 | 13 |
| Figure I-7 Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued..... | 14 |
| Figure I-8 Coupe transversale de la structure interne de granulats a) Naturel, b) Recyclé | 15 |
| Figure I-9 Analyse scanner 3D des granulats : a (Naturel), b (Recyclé) | 16 |
| Figure I-10 Absorption d'eau à 24 heures, et densité apparente des agrégats..... | 16 |
| Figure I-11 Résultats de la résistance-à la compression..... | 17 |
| Figure I-12 Résultats de la résistance-à la traction..... | 18 |
| Figure I-13 Résultats du module d'élasticité..... | 19 |
| Figure I-14 Chaîne de la composition de PET | 19 |
| Figure I-15 Résistance à la compression à (3, 7 et 28 jours) d'un mortier composé | 20 |
| Figure I-16 Absorption d'eau des bétons contenant des granulats fins de PET..... | 24 |
| Figure I-17 Effet de l'attaque acide sur les propriétés du béton contenant PET..... | 25 |

CHAPITRE II

| | |
|---|-----------|
| Figure II-1 Compositions des déchets du bâtiment..... | 39 |
| Figure II-2 Composition de base des déchets de démolition (environ) | 39 |
| Figure II-3 (a) Déchets de construction et de démolition, (b) Déchets de béton stockés à l'usine de recyclage..... | 42 |
| Figure II-5 Forme de granulats recyclés..... | 43 |
| Figure II-6 L'augmentation de la consommation du plastique en Algérie à partir de 2007 à 2020 | 44 |
| Figure II-7 Ceinture plastique de cerclage PET. | 44 |

CHAPITRE III

| | |
|--|-----------|
| Figure III-1 : Sable de dune..... | 52 |
| Figure III-2 : Sable recyclé..... | 52 |
| Figure III-3 : Fibre PET..... | 52 |
| Figure III-4 : Courbes granulométriques du sable de dune, du sable recyclé et des différents mélanges de SD et SR. | 54 |
| Figure III-5 : Mesure de la masse volumique des granulats, l'équivalent de sable et tamisage mécanique des granulats..... | 55 |
| Figure III-6 : Diagrammes de diffraction des rayons X du SD et SR..... | 56 |
| Figure III-7 : Analyse infrarouge par transformée de Fourier du SD et SR..... | 57 |
| Figure III-8 : Images MEB de, (a) sable de dune et (b, c) sable recyclé..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| Figure III-9 : Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) air occlus, (c) la masse volumique | 60 |
| Figure III-10 : Lubrification de moule à l'huile..... | 61 |
| Figure III-11 : Nivellement de la surface du mortier avec une truelle..... | 61 |
| Figure III-12 : Conservation des échantillons d'essai dans l'eau..... | 61 |
| Figure III-13 : Equipements tables à secousses et méthode de la mesure de l'étalement.. | 62 |
| Figure III-14 : Pesage hydrostatique des éprouvettes (4x4x16) cm ³ | 64 |
| Figure III-15 : Visualisation optique des échantillons témoin et fibrés des mortiers | 64 |
| Figure III-16 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique..... | 65 |
| Figure III-17 : Principe de l'essai de la flexion..... | 67 |
| Figure III-18 : Matériels utilisés et essai de traction par flexion trois points..... | 67 |
| Figure III-19 : Principe de l'essai de la compression..... | 68 |
| Figure III-20 : Presse d'essai de compression..... | 68 |
| Figure III-21 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique..... | 69 |
| Figure III-23 : Schéma du dispositif d'absorption d'eau par capillarité..... | 71 |
| Figure III-24 : Dispositif expérimental d'absorption d'eau par capillarité..... | 71 |
| Figure III-26 : Appareil d'analyses thermogravimétriques et les courbes DSC du mortier | 74 |
| Figure III-27 : Essai de l'attaque d'acide H ₂ SO ₄ sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³ | 75 |

CHAPITRE IV

| | |
|---|-----------|
| Figure IV-1 Répartition des mortiers en fonction du pourcentage de substitution du sable de dune par le sable recyclé et du taux de fibre pour chaque longueur..... | 81 |
| Figure IV-2 Relation entre la densité du mortier à l'état frais et l'état durci..... | 83 |
| Figure IV-3 Teneur en air des mortiers en fonction du % de sable recyclé et de taux de fibre de chaque longueur..... | 84 |
| Figure IV-4 Résistance à la compression des mortiers témoins après 28 jours de cure à l'eau | 85 |
| Figure IV-5 Résistances à la compression des mortiers en fonction du taux de PET-F20mm | 85 |
| Figure IV-6 Résistances à la compression des mortiers en fonction du taux de PET-F30mm | 86 |
| Figure IV-7 Résistance à la flexion des mortiers témoins après 28 jours de cure à l'eau ... | 87 |
| Figure IV-8 Résistances à la flexion des mortiers en fonction du taux de PET-F 20 mm... | 88 |
| Figure IV-9 Résistances à la flexion des mortiers en fonction du taux de PET-F 30 mm... | 88 |
| Figure IV-10 Mécanisme de défaillance des mortiers de références (sans fibres)..... | 89 |
| Figure IV-11 Mécanisme de défaillance (a), mortier fibré PET-F 30 mm et (b), mortier fibré PET-F 20 mm..... | 89 |
| Figure IV-12 Effet de la substitution de SD par SR et du taux de fibre sur UPV..... | 90 |
| Figure IV-13 Corrélations entre la résistance en compression et la vitesse UPV | 90 |
| Figure IV-14 Effet de la substitution de SD par SR sur le module d'élasticité dynamique. | 91 |
| Figure IV-15 Effet du pourcentage de PET-F de 20 mm sur le module d'élasticité dynamique de chaque type de mortier..... | 92 |
| Figure IV-16 Effet du pourcentage de PET-F de 30 mm sur le module d'élasticité dynamique de chaque type de mortier..... | 92 |
| Figure IV-17 Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction de a) taux de substitution de SD par SR de mortier témoin, b) avec 0.5% de PET-F 20 mm, c) avec 1% de PET-F 20 mm, d) avec 1.5% de PET-F 20 mm et e) de 2% de PET-F 20 | 94 |

| | |
|--|------------|
| Figure IV-18 Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction de b) avec 0.5% de PET-F 30 mm, c) avec 1% de PET-F 30 mm, d) avec 1.5% de PET-F 30 mm et e) de 2% de PET-F 30 mm..... | 95 |
| Figure IV-19 Absorption d'eau des mélanges témoins et des mélanges avec PET-F de 20 et 30 mm..... | 96 |
| Figure IV-20 Relation entre la porosité du mortier témoin et avec PET-F(30et 20 mm).. | 97 |
| Figure IV-21 Porosité en fonction de la teneur SR..... | 98 |
| Figure IV-22 Effet du taux de PET-F 20 mm sur la porosité | 98 |
| Figure IV-23 Effet du taux de PET-F 30 mm sur la porosité | 99 |
| Figure IV-24 Effet de l'incorporation des fibres PET-F(20et30)mm sur le retrait de mortier | 100 |
| Figure IV-25 Apparence extérieure des mortiers élaboré, a) mortier témoin, b) mortier fibré | 101 |
| Figure IV-26 Variations de la perte de masse des mortiers humidifiés en fonction de la durée d'immersion (Tout juste après chaque 7 jours d'immersion.) en fonction de la durée d'immersion à 5 % de IH_2SO_4 : a) mortier témoin, b) mortier avec du PET-F de 20 mm, c) mortier avec du PET-F de 30 mm..... | 104 |
| Figure IV-27 Variations de la perte de masse des mortiers secs en fonction de la durée d'immersion (Après chaque 7 jours à l'air libre) en fonction de la durée d'immersion à 5% de H_2SO_4 : a) mortier témoin, b) mortier avec du PET-F de 20 mm, c) mortier avec du PET-F de 30 mm..... | 105 |
| Figure IV-28 Corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs réelles de l'éco-mortier..... | 108 |
| Figure IV-29 Différents tracés de probabilité normale des résidus de l'éco-mortier..... | |
| Figure IV-30 Différents tracés des résidus par rapport à la réponse prédite de l'éco-mortier... | 111 |
| Figure IV-32 Graphiques de réponse 3D de l'éco-mortier..... | 116 |
| Figure IV-33 Meilleures données de rampes de désirabilité pour les valeurs optimales de R_c , R_f , Y_f , UPV , Ab , P , Ac et retrait de l'éco-mortier..... | 117 |
| ANNEXE | |
| Figure I-4: Analyse DRX et forme granulaire des sables de dune | 130 |
| Figure II-4 Total des déchets générés dans l'Union européenne: (a) l'activité économique; (b) catégorie de déchets..... | 130 |
| Figure II-8 Composition des déchets plastiques (par sous-catégories) | 130 |
| Figure III-22 : Dispositif hydrostatique | 131 |
| Figure III-25 : Principe expérimental d'absorption d'eau | 131 |
| Figure IV-31 Courbes de contour 2D de l'éco-mortier..... | 133 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE II

| | |
|---|-----------|
| Tableau I.1 : Analyse chimique des échantillons de sable d'El-Oued | 11 |
| Tableau I.3 : Détails sur le remplacement du plastique dans les mortiers d'après des études antérieures | 22 |
| Tableau I.4 : Détails sur le remplacement du plastique dans le béton d'après des études antérieures | 23 |

CHAPITRE III

| | |
|---|-----------|
| Tableau III.1 : Récapitulation des caractéristiques du ciment utilisé | 52 |
| Tableau III.2 : Propriétés physiques des granulats et du fibre plastic utilisé | 59 |
| Tableau III.4 : Les différents formulation des mortiers étudiées | 59 |
| Tableau III.5 : Valeurs d'étalement | 62 |
| Tableau III.6 : Critères de vitesse pour le classement de la quantité du béton | 65 |

CHAPITRE IV

| | |
|--|------------|
| Tableau IV.1 : Densité des mortiers à l'état frais, durcis et les valeurs d'étalement | 81 |
| Tableau IV.4 : Facteurs et niveaux de code de la RSM | 106 |
| Tableau IV.7 : Contraintes des facteurs du mortiers avec leurs réponses | 118 |

ANNEXE

| | |
|---|------------|
| Tableau I.2 : Analyse chimique des sables de dune | 134 |
| Tableau II.1 : Niveau de recyclage en Europe | 134 |
| Tableau III.3 : Répartition granulométrique du sable de dune, sable de recyclage et des différents mélanges de SD et SR | 134 |
| Tableau IV.2 : Résistance à la compression, à la flexion et la vitesse d'impulsion des ultrasons des éco-mortiers renforcés avec PET-F (20 et 30) mm et sans PET-F | 135 |
| Tableau IV.3 : Absorption d'eau par immersion total, Sorptivité capillaire et la porosité de l'éco-mortiers renforcés avec PET-F (20 et 30) mm et sans PET-F | 136 |
| Tableau IV.5 : Conception expérimentale et résultats de : R_c , R_f , Y , UPV , Ab , P , Ac et retrait des éco-mortiers renforcés avec du PET-F (20 et 30 mm) et sans PET-F | 137 |
| Tableau IV.6 : Analyse de variance du modèle quadratique et les statistiques d'ajustement du Plan Box-Behnken | 139 |
| Tableau IV.8 : Les vingt et un premières meilleures solutions pour les paramètres de production du mortier renforcé de PET-F et leurs réponses correspondantes | 139 |

INTRODUCTION GENERALE

Problématique

Après l'eau, le sable est le deuxième matériau le plus utilisé au monde. Chaque année, 15 milliards de tonnes de sable sont extraites, principalement pour la construction (routes, fabrication de béton, etc.). Il faut ainsi 200 tonnes de sable pour construire une seule maison et 30 000 tonnes de sable pour un kilomètre de route. Face à une demande croissante, les industriels exploitent d'énormes carrières, draguent les rivières et les fonds marins, avec parfois des conséquences écologiques désastreuses. Cependant, pourquoi exploiter nos rivages et nos montagnes alors que la Terre est recouverte d'étendues désertiques ? Le Sahara, par exemple, couvre à lui seul 9,4 millions de km².

Les granulats jouent un rôle fondamental dans l'industrie de la construction et des travaux publics. Leur utilisation répandue au sein de l'industrie du ciment et des matériaux cimentaires engendre un impact environnemental significatif. Ainsi, le problème combine deux aspects majeurs :

Le premier est lié au secteur de la construction, qui est confronté à une pénurie de sable, difficile à croire lorsque l'on contemple les immenses dunes du Sahara. Hélas, les industriels ont besoin de granulats aux caractéristiques bien précises, et le sable du désert est, malheureusement, inexploitable pour eux.

Le problème réside dans le fait que tout le sable n'est pas du tout adapté à la construction : sculptés par le vent, ses grains sont trop fins et trop lisses. Or, pour fabriquer du béton, les industriels ont besoin de granulats avec des angles et des tailles différentes, de manière à ce qu'ils s'imbriquent les uns dans les autres et s'agglomèrent facilement. D'autre part, un sable trop fin oblige les cimentiers à augmenter le dosage en eau, ce qui nuit à la solidité et à la stabilité du béton. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse entre 2,2 et 2,8. Or, celui du désert possède une granulométrie de 1,2, contre 2,8 pour du sable alluvionnaire.

Le deuxième problème crucial concerne la gestion des déchets. Si l'on se contente de les stocker dans des décharges, l'accumulation devient un problème, car en fonction de leur nature, ils peuvent se dégrader très lentement et disparaître progressivement.

Ainsi, une gestion adéquate des déchets implique de classer ces derniers en fonction de leur durée de dégradation dans le sol. Les éléments biodégradables, tels que les déchets verts et les papiers, se décomposent en moins d'un an, tandis que le métal nécessite 10 ans et les plastiques, polystyrènes, et autres matières synthétiques peuvent prendre de 100 à 1000 ans pour se dégrader.

De plus, la gestion des déchets est cruciale, car certains d'entre eux peuvent présenter des dangers pour la santé humaine et l'environnement.

Afin d'éviter une prolifération incontrôlée des déchets et de réduire les risques potentiels de pollution et d'intoxication, divers procédés de traitement des déchets sont mis en œuvre. Les principes appliqués, avant et après la production des déchets, visent à réduire les volumes, diminuer leur toxicité, améliorer leur recyclage (potentiel et réalisé), et assurer une mise en décharge sécurisée des déchets ultimes. Étant donné le coût élevé de ces procédés, une

attention particulière est accordée à ceux qui permettent de valoriser les déchets. En Algérie, la récupération et le recyclage des agrégats ne sont pas actuellement identifiés comme des objectifs prioritaires dans le domaine des richesses naturelles.

De manière indirecte, les déchets reflètent les habitudes de consommation de la société et l'exploitation des ressources naturelles et énergétiques. Leur traitement en vue de la valorisation constitue une stratégie pour atténuer l'épuisement de ces ressources et les dommages associés à leur exploitation.

Introduction générale

Les granulats jouent un rôle fondamental dans l'industrie de la construction et des travaux publics. Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé au XXe siècle, avec une production annuelle plus de 6 milliards de mètres cubes par an, soit près d'un mètre cube par habitant chaque année. Ce qui en fait le matériau manufacturé le plus consommé au monde¹, contribuant ainsi à l'épuisement des ressources naturelles utilisées dans son processus de fabrication. Cette situation a conduit à la mise en place de mesure à l'échelle mondiale visant à améliorer les propriétés techniques, les coûts et l'empreinte environnementale de la technologie des matériaux cimentaires. Pour faire face à la demande croissante de granulats, qui implique l'extraction accrue de granulats alluviaux, il est nécessaire de trouver des solutions dans le domaine du recyclage, afin de prévenir la pollution de l'environnement, les eaux souterraines et de préserver les ressources naturelles.

Le Sahara algérien est connu pour son énorme richesse naturelle de dunes des sables siliceux. C'est un matériau naturel provenant des dunes de sable et possédant des propriétés distinctives, est largement utilisé dans divers domaines tels que la construction, la fabrication de verre, la filtration de l'eau. De plus, l'utilisation de granulats recyclés, même si elle ne représente qu'une petite partie de la production, continue de croître. Leurs réutilisation dans le mortier et le béton permet d'économiser les granulats alluvionnaires. Le recyclage semble plus intéressant car il génère un nouveau secteur d'activité soutenu par l'ensemble des « activités locales et industriels ». L'utilisation de déchet plastique PET pour fabrication du mortier, afin de limitation de fissurations.

L'intégration de déchets plastiques en PET (polyéthylène téréphtalate) dans la composition du mortier offre plusieurs avantages. En réutilisant ces matériaux, non seulement on contribue à la réduction des déchets plastiques, mais on améliore aussi les propriétés du mortier. Plus précisément, le PET confère au mortier une meilleure résistance aux fissurations en absorbant et en répartissant les tensions de manière plus uniforme. Ainsi, le mortier enrichi en PET devient plus durable et performant, tout en participant à une démarche écologique de recyclage des plastiques.

Cette étude vise à analyser les propriétés du sable des dunes et à réutiliser des granulats recyclés issus du béton démolé et à contribuer à la réutilisation des déchets et sous-produits dans l'industrie du mortier. Le programme de cette recherche comprend donc des travaux liés à la valorisation de ces derniers matériaux, avec l'incorporation de fibres plastiques de type polyéthylène téréphtalate en différentes proportions massique. Malgré de nombreuses

recherches dans ce domaine, le sable des dunes et le sable recyclé ne trouvent que peu d'études encourageantes dans leur valeur et surtout dans leur combinaison dans des proportions différentes. Cependant, des pays comme la Chine et l'Algérie ont mené plusieurs recherches scientifiques sur l'exploitation du sable des dunes dans la fabrication des matériaux cimentaires, la Suisse et le Danemark ont adopté des normes pour la fabrication de béton à partir de granulats recyclés.

En raison de la gigantesque richesse en sable doré dans le désert algérien, ainsi que la disponibilité d'importants volumes de déchets issus des activités de construction et de démolition de bâtiments. En plus, l'utilisation excessive récente de matières plastiques, de nombreux chercheurs travaillent dans le monde entier pour améliorer et recycler tous les types de déchets dans l'industrie des matériaux de construction. Le développement du matériaux cimentaire moderne repose sur plusieurs types de déchets (dont le sable dunaire abandonné est inclus), y compris les débris de construction et les matériaux plastiques utilisés, tels que les ceinture d'emballage en (PET) pour les matériaux lourds.

Cependant, il semble qu'il n'y ait pas de données disponibles dans la littérature sur les propriétés physico-mécaniques du mortier de ciment qui utilise trois types de matériaux complètement abandonnés en Algérie: le sable des dunes ajusté avec du sable recyclé renforcés par de fibres plastiques de type polyéthylène téréphtalate.

Notez que la perméabilité du mortier est étroitement liée à sa ténacité. Dans le cas des matériaux cimentaires qui ne contiennent pas certains des additifs dans les études antérieures, l'introduction d'ajustements tels que l'incorporation de sable recyclé et le renforcement avec des fibres plastiques conduit à une modification de la porosité de la matrice cimentaire, ce qui a un impact sur les propriétés physico-mécaniques du mortier. Ainsi, nous examinerons l'air occlus et l'étalement du mortier à l'état frais, ainsi que la porosité, l'absorption capillaire et par immersion du mortier étudié à l'état durci.

Objectifs à atteindre et les résultats attendus

L'objectif principal de cette thèse est de caractériser un mélange et son mortier associé, composés de sables de dunes, de sable recyclé et de fibres plastiques de type polyéthylène téréphtalate (PET), source potentielle de divers problèmes environnementaux et économiques.

Le premier objectif est d'améliorer les propriétés du sable de dune (granulométrie, porosité, compacité, masse volumique, etc.) en le remplaçant par du sable recyclé. Cette substitution se fera à des proportions pondérales allant de 0 à 100%, avec l'ajout de fibres PET à des taux pondéraux ou volumiques variant de 0 à 2%. La quantité de ciment restera constante.

Le deuxième objectif vise à examiner l'impact de l'ajout en substitution sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers à l'état frais (l'ouvrabilité, air occlus, masse volumique) et à l'état durci (porosité, absorption d'eau, masse volumique, retrait, résistances à la compression et à la flexion, déplacement flexionnel, etc....).

Ainsi que sa résistance aux agents agressifs (durabilité).

En conclusion, les résultats obtenus seront corrélés et comparés à ceux optimisés par la méthodologie de surface de réponse RSM.

Structure de la thèse

Afin de comprendre pleinement le sujet et atteindre les objectifs définis, une investigation approfondie a été entreprise, structurée à travers les chapitres suivants :

- Une introduction globale abordant la problématique du sujet, exposant les objectifs visés, et présentant de manière détaillée le plan de travail envisagé.
- Dans le cadre du premier chapitre, une vue d'ensemble sur les matériaux cimentaires est exposée de manière détaillée.
- Le deuxième chapitre propose une synthèse bibliographique complète sur la gestion des déchets, en mettant en avant l'émergence d'une politique environnementale en Algérie, ainsi que l'impact des déchets sur l'environnement. Une attention particulière est accordée à la description détaillée des déchets spécifiquement étudiés dans le cadre de cette recherche.
- Le troisième chapitre aborde un récapitulatif des descriptions des divers matériaux et méthodes employés dans le cadre du programme expérimental, tout en exposant les procédures d'essai. Ce chapitre traite les caractéristiques des granulats utilisés, notamment le sable de dune et le sable recyclé, ainsi que des fibres PET. De plus, il examine en détail les caractéristiques minéralogiques de sable de dune et sable recyclé utilisés et leurs caractéristiques spécifiques sont discutées.
- Le chapitre final est réservé à la présentation des résultats expérimentaux, à la fois dans l'état frais et dans l'état durci, accompagnés de leurs interprétations. En outre, une analyse statistique basée sur la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) a été effectuée en utilisant l'expérience de Box-Behnken Design (BBD). L'objectif de cette approche est d'obtenir une estimation prédictive afin d'optimiser les paramètres influant sur les caractéristiques des nouveaux composites cimentaires.

Finalement, Notre travail se conclut par une synthèse générale, accompagnée de recommandations pour des recherches futures.

¹ <http://www.sable-vert.com/grandeur-et-limite-du-beton>

CHAPITRE I:

GENERALITES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX CIMENTAIRES

I.1 Introduction

Les matériaux cimentaires sont parmi les matériaux les plus largement utilisés à l'échelle mondiale et ils ont un impact majeur sur notre environnement. Ils sont omniprésents, que ce soit dans la construction routière, d'ouvrages d'art, d'infrastructures d'assainissement, de bâtiments de toutes sortes, y compris les édifices historiques.

Le ciment joue un rôle central dans la composition des matériaux cimentaires, tels que le béton et le mortier. Il remplit une fonction mécanique en liant les particules granulaires, mais il est également largement responsable de la durabilité à long terme du béton. La conception d'un mélange de béton est étroitement liée à l'environnement auquel il sera exposé tout au long de sa durée de vie.

Au fil des années récentes, le secteur de la construction a connu une augmentation significative du nombre de projets de construction, ce qui a entraîné une demande croissante en matières premières. Cependant, les ressources naturelles de granulats potentiellement exploitables se font de plus en plus rares, posant ainsi un défi croissant pour les acteurs industriels en matière d'approvisionnement.

Dans ce chapitre, nous offrirons un aperçu général des matériaux cimentaires, en mettant en lumière les divers additifs utilisés dans leur composition, en abordant les recherches antérieures dans ce domaine, tout en mettant l'accent sur la situation en Algérie, en particulier en ce qui concerne la fabrication des bétons et des mortiers.

I.2 Définition des matériaux cimentaires

Les matériaux cimentaires englobent un large éventail de substances utilisées dans la construction, caractérisées par leur capacité à durcir et à adhérer après mélange avec de l'eau. Ces matériaux sont fréquemment employés dans le secteur de la construction pour créer des structures durables et résistantes.

Le ciment, un composant clé des matériaux cimentaires, est une poudre fine produite en broyant du clinker, lui-même obtenu par la cuisson d'un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile à des températures élevées (1450-1550°C). Lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau, il réagit pour former une pâte qui, en durcissant, lie les agrégats (gravier et sable) et d'autres matériaux pour créer le béton ou le mortier.

Outre le ciment Portland classique, il existe d'autres types de ciments, tels que les ciments à faible teneur en alcalins, le ciment Portland composé, les ciments à haut fourneau, les ciments pouzzolaniques, le ciment blanc, et bien d'autres, chacun ayant des propriétés spécifiques adaptées à des applications particulières.

Les matériaux cimentaires comprennent également des additifs, des adjuvants et des matériaux de renforcement, qui sont souvent utilisés pour améliorer certaines propriétés du matériau fini, comme la résistance, la durabilité, la maniabilité ou la résistance aux conditions environnementales.

Les agrégats sont des matériaux inertes, de nature minérale, utilisés dans la construction pour former la partie granulaire du béton ou le mortier. Ils comprennent diverses tailles de particules, allant des grains fins de sable aux agrégats plus gros tels que le gravier et les pierres concassées. Les agrégats jouent un rôle essentiel dans la composition des mélanges

(béton, mortier), contribuant à la résistance, à la durabilité et aux propriétés mécaniques du matériau final c'est-à-dire les matériaux commentaires.

En résumé, les matériaux cimentaires constituent une composante essentielle de l'industrie de la construction, offrant une diversité de solutions pour répondre aux exigences variées des projets de construction.

I.3 Ciment Portland

Le ciment Portland, composé de silicates et d'aluminates de chaux, réagit avec l'eau et durcit progressivement à la suite de réactions chimiques. Sa production comprend plusieurs étapes (voir Figure I-1) :

- Extraction de calcaires (CaCO_3) et d'argiles ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$) des carrières.
- Concassage des matériaux puis homogénéisation, avec 80% de calcaire et 20% d'argile.
- Cuisson dans un four jusqu'à $1450-1550^\circ\text{C}$.
- Refroidissement (trempe) du mélange pour obtenir le clinker.

Pendant la cuisson, les composants du mélange cru subissent une décomposition et une recombinaison pour former les minéraux du clinker. Leur notation chimique simplifiée utilise les lettres C pour CaO (chaux), S pour SiO_2 (silice), A pour Al_2O_3 (alumine), et F pour Fe_2O_3 (oxyde de fer). Les minéraux ainsi formés sont les suivants :

- ✓ Le silicate tricalcique C3S ($3\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5$), également appelé Alite. La teneur normale en C3S du clinker se situe entre 50 et 65 %.
- ✓ Le silicate bicalcique C2S ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_3$), aussi connu sous le nom de bélite. La teneur normale en C2S du clinker varie entre 15 et 25 %.
- ✓ L'aluminate tricalcique C3A ($3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO},\text{Al}_2\text{O}_3$), également appelé célite. La teneur normale en C3A du clinker oscille entre 4 et 12 %.
- ✓ L'alumino ferrite tricalcique C4AF ($4\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaO},\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$), également connu sous le nom de brown millérite. La teneur normale en C4AF du clinker varie entre 0 (ciment blanc) et 10 %.

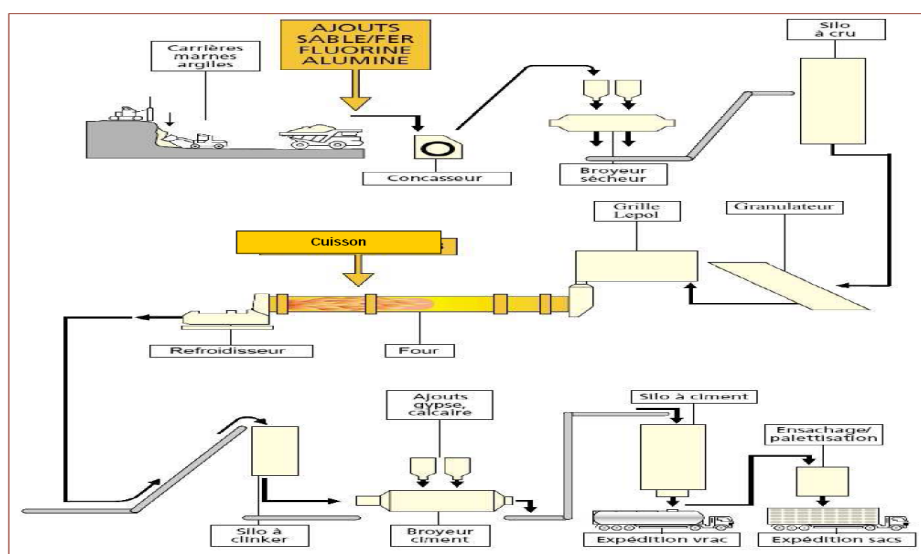


Figure I-1: Étapes de la fabrication du ciment.

Selon l'étude menée par Waleed H. Khushefati et al. [1], l'utilisation de matériaux à masse thermique permet une réduction significative de la consommation d'énergie dans les bâtiments, variant de 7 à 22 %. Il est donc essentiel de privilégier des matériaux cimentaires offrant des propriétés d'isolation thermique améliorées. Les données issues des tests sont compilées et analysées pour identifier les différences de comportement en termes de conductivité thermique, en prenant en compte divers aspects tels que les méthodes de test, les modèles d'évaluation, les types d'agrégats, les mélanges/additifs minéraux, les fibres utilisées, etc. Outre le type et le volume des granulats et des adjuvants cimentaires, la densité/porosité et la teneur en humidité jouent un rôle crucial dans l'impact sur la conductivité thermique des matériaux cimentaires.

L'atténuation du changement climatique mondial nécessite des mesures sans précédent pour contrôler les émissions de gaz à effet de serre, telles que le dioxyde de carbone [2]. Les deux principaux facteurs qui contribuent au coût du cycle de vie d'un bâtiment économe en énergie sont la consommation énergétique et l'impact environnemental, y compris les risques naturels au cours de sa durée de vie [3].

I.4 Sable de dune

Généralement, les dunes présentes dans le Sahara, dont la signification demeure sujette à diverses interprétations, caractérisent la région nord de l'Afrique, laquelle est reconnue comme le plus vaste désert chaud du monde².

Le sable joue un rôle prépondérant en tant que composant du squelette granulaire, exerçant une influence significative sur les propriétés du béton et du mortier [4].

I.4.1 Définition

Les sables présents dans les dunes mobiles (figure I-2) se caractérisent par des particules siliceuses de taille pratiquement uniforme et de dimensions réduites. Ces types de sables sont répandus dans diverses régions désertiques, formant des dunes mobiles de hauteurs variables qui occupent d'importants espaces, notamment dans le sud algérien. Le processus de triage granulaire, de déplacement, et d'accumulation de ces sables est largement influencé par la vitesse et l'intensité des vents [5].

La composition minéralogique du sable englobe divers minéraux tels que la silice, les silicates, les carbonates, et les argiles, avec une prédominance des silicates qui constituent la famille minérale la plus abondante dans la nature, représentant environ 90 % de la masse de l'écorce terrestre. Les sables des dunes se caractérisent principalement par leur pureté en silice, la présence de carbonates et d'argiles étant à l'état de traces.

² [Sahara — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sahara)



Figure I-2: Les sables des dunes mouvants.

Comme l'ont défini Altameemi ZA et al. [6], une dune de sable est une élévation formée par le dépôt éolien de sable meuble, pouvant avoir une taille allant d'un mètre à plusieurs kilomètres. Ces dunes peuvent se regrouper pour former des champs de dunes de sable ou se présenter sous la forme de crêtes isolées. On les trouve dans diverses régions et, en fonction de leur emplacement géographique, on les classe en "dunes intérieures ou continentales", "dunes côtières ou de bord de mer", "dunes de berges de rivière" et "dunes de bord de lac". Les dunes sont dynamiques, variant en longueur, hauteur et position selon la direction et l'intensité du vent.

L'influence du vent sur le sol est significative, avec des particules de taille sableuse se rassemblant pour former des dunes de différentes formes et tailles [7]. Cependant, en raison de l'essor des activités de construction dans les zones arides, il est nécessaire d'approfondir les descriptions de la formation des sols dans ces régions ventilées. Une compréhension approfondie de l'effet de l'érosion éolienne sur ces sols, ainsi que leur classification et leur déplacement, est cruciale pour évaluer leur impact sur ces activités.

La figure I-3 offre une représentation cartographique détaillée, indiquant avec précision l'emplacement géographique des dunes de sable situées dans la région d'Oued Souf. Cette illustration permet une visualisation claire et informative de la répartition spatiale de ces caractéristiques naturelles spécifiques au sein de cette région donnée.

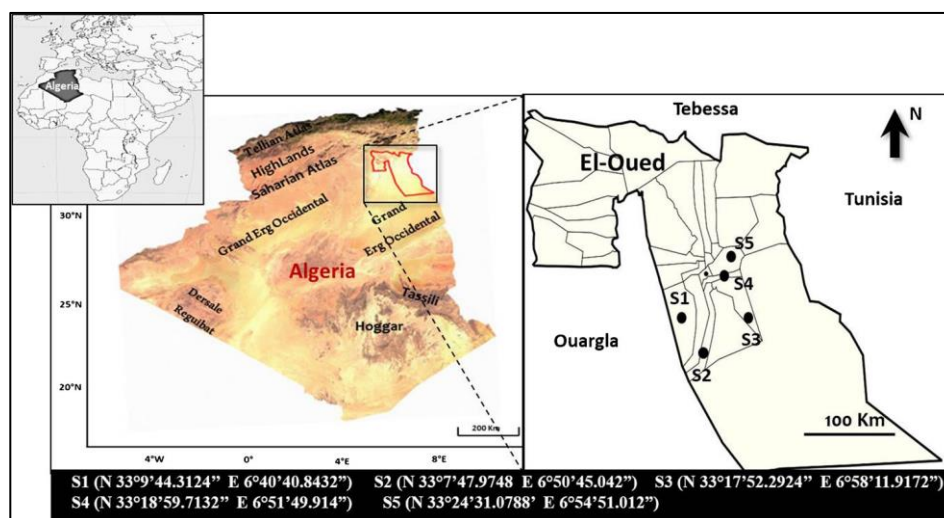


Figure I-3: Carte de l'Algérie montrant la localisation des SD d'El-Oued [8].

Le sable des dunes, présent en abondance dans le Sahara, occupe plus de 60 % de la superficie de l'Algérie. Ces dunes ont récemment attiré une attention croissante en tant que matériau de construction, comme en témoignent plusieurs études [9–11].

Récemment, Wenlong et al [12], ont proposé une méthode de conception pour déterminer la proportion optimale de mélange de béton à base de sable de dune, utilisant une approche de modélisation statistique. Cette méthode permet d'optimiser la composition du béton en prenant en compte des facteurs expérimentaux tels que le rapport eau/ciment, le rapport S/G, le rapport SD/granulats fins, et le dosage du réducteur d'eau. De manière similaire, Sang jun Park et al [13], ont examiné l'impact du sable de dune sur les propriétés du béton à l'état frais, démontrant dans une certaine mesure son influence bénéfique sur l'ouvrabilité.

D'autre part, dans certaines régions, les granulats grossiers s'épuisent progressivement, entraînant une augmentation significative de leur coût. Cette situation est exacerbée par l'extraction excessive de granulats fluviaux, engendrant des problèmes écologiques majeurs [14]. Par contraste, d'importantes quantités de sable dunaire restent inexploitées dans diverses régions, notamment dans le sud de l'Algérie. Des recherches approfondies ont été menées sur l'intégration du sable de dune dans différents types de bétons, cherchant à optimiser sa proportion à l'aide de diverses techniques.

I.4.2 Analyse chimique par rayons X dispersifs en longueur d'onde fluorescence

Les compositions chimiques des échantillons de sable de dune étudiés (S1,S2,S3,S4 et S5) par WDXRF sont présentés dans le tableau I-1. Nous soulignons que tous les échantillons de sable ont des teneurs élevées en silice. (SiO) qui variait de 87,10 à 94,24 % et de faibles quantités d'oxyde de calcium (CaO) [8].

La figure I-4 (voir annexe 1) illustre l'analyse par rayons X et la forme des granulats de sable de dune de la région de la ville de Laghouat, avec une taille de 0/0,63 mm. Il est clair que ce sable est propre et essentiellement de nature siliceuse [15], présentant une granulométrie étroite. À noter que le sable de dune a été utilisé dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux [15].

Tableau I.1 Analyse chimique des échantillons de sable d'El-Oued [8].

| Sample | SiO ₂ (%) | CaO (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | K ₂ O (%) | MgO (%) | Na ₂ O (%) | Zn (%) | Sr (%) | Zr (%) | Ba (%) |
|---------------|--|---|---------------------------------------|--|-------------------------|--|--------------------------|-----------|------------|------------|-----------|
| S1 | 94.24 | 1.96 | 2.77 | 0.27 | 0.46 | 0.26 | - | - | 0.003 | 0.005 | 0.020 |
| S2 | 91.95 | 4.37 | 2.82 | 0.37 | 0.44 | - | - | 0.007 | 0.005 | 0.010 | 0.020 |
| S3 | 88.21 | 8.90 | 1.72 | 0.36 | 0.34 | 0.42 | - | 0.020 | 0.007 | 0.004 | 0.024 |
| S4 | 88.71 | 7.36 | 1.50 | 0.29 | 0.30 | 0.37 | 1.40 | 0.018 | 0.007 | 0.005 | 0.030 |
| S5 | 87.10 | 8.79 | 1.68 | 0.36 | 0.34 | 0.42 | 1.25 | 0.020 | 0.008 | 0.003 | 0.020 |
| Sample | SiO₂/Al₂O₃ | Fe₂O₃ + MgO(%) | | Al₂O₃/SiO₂ | | Al₂O₃ + Na₂O + K₂O(%) | | | CIA | CIW | |
| S1 | 34.03 | 0.53 | | 0.029 | | 3.23 | | | 58.56 | 58.56 | |
| S2 | 32.61 | 0.37 | | 0.031 | | 3.26 | | | 39.22 | 39.22 | |
| S3 | 51.28 | 0.78 | | 0.019 | | 2.06 | | | 16.20 | 16.20 | |
| S4 | 59.14 | 0.66 | | 0.017 | | 3.20 | | | 14.62 | 14.62 | |
| S5 | 51.85 | 0.78 | | 0.019 | | 3.27 | | | 14.33 | 14.33 | |

Le tableau I-2 (voir annexe 2), Centralise les conclusions de l'analyse chimique des différents

sables prélevés de plusieurs régions du Sud Algérien. L'analyse minéralogique par diffractométrie aux RX des différents sables a montrés que l'ensemble de ces sables sont à prédominance quartzitique, contenant une faible quantité des minéraux d'origine sédimentaire (calcite, gypse), magmatique (feldspath) et d'altération feldspathique (argiles) [16].

I.4.2.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) [8]

Les spectres FTIR des échantillons de sable étudiés (S1, S2, S3, S4 et S5) sont présentés sur la figure I-5a. Ils ont révélé des bandes caractéristiques similaires, principalement dans la région des empreintes digitales, où nous avons distingué bandes d'absorption caractéristiques de la silice à 459, 692, 779, 794, 1 080, 1 170 et 1 878 cm, correspondant aux vibrations d'étirement et de flexion symétriques du SiO et de la liaison Si-O-Si [17–19].

I.4.2.2 Répartition granulométrique du sable d'El-Oued [8]

La distribution granulométrique d'un sable donné est un paramètre textural crucial pour déterminer son adéquation à diverses applications il peut fournir des informations sur les conditions de transport, de tri et de dépôt du sable étudié. Les courbes granulométriques des échantillons S1,S2,S3,S4 et S5 sont présentées sur la figure I-5b. Toutes les courbes présentaient des formes sigmoïdes similaires avec une légère variation entre les échantillons. On peut observer qu'environ 90 % en masse des grains sont uniformément répartis entre 160 et 400 μm , alors que les échantillons de sable S2 et S5 sont les plus inestimables parmi tous [20–22].

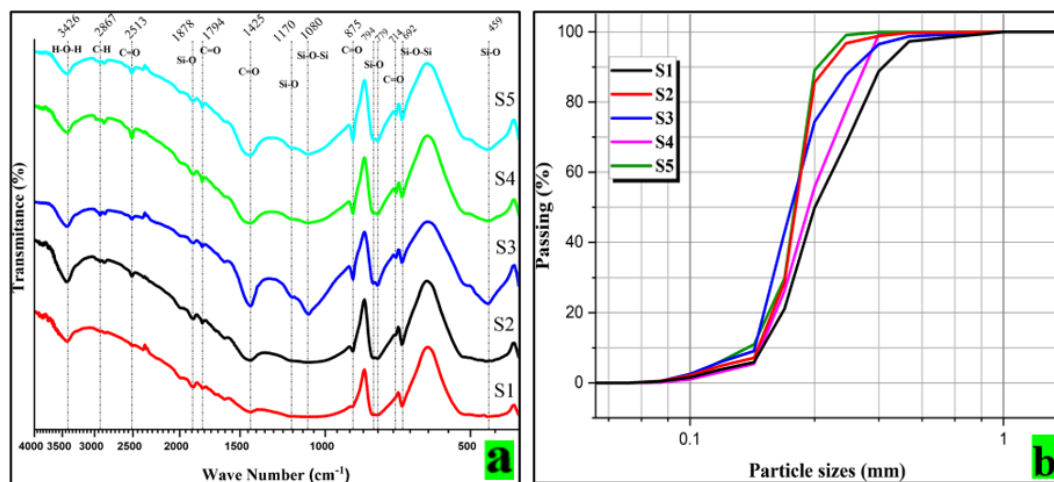


Figure I-5 a) Spectres d'absorption FTIR et b) courbes granulaires des échantillons de sable d'El-Oued S1, S2, S3, S4 et S5, [8].

Des études physicochimiques, minéralogiques et thermiques du sable El-Oued du désert algérien ont été réalisées à l'aide d'analyses granulométriques, FTIR, XRF, XRD, SEM/EDX et TG-DTA. Nos résultats indiquent des sables bien triés et de taille fine à moyenne. Le SEM et le traitement logiciel ont montré que les grains de sable d'El-Oued sont bien arrondis en raison de l'environnement éolien avec un long transport et des altérations chimiques significatives.

L'analyse chimique par XRF, FTIR et EDX a montré des teneurs élevées en silice (94,24%)

avec des impuretés subordonnées (carbonates et autres oxydes mineurs tels que Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO). Ceci a été confirmé par la technique XRD. En outre, la taille des cristallites de quartz dans tous les échantillons de sable est comprise entre 331 et 3637 nm. L'analyse thermique (TG-DTA) a montré que le sable d'El-Oued était relativement stable jusqu'à 800 °C. La taille nanométrique des cristallites est favorable à la nanotechnologie et à d'autres applications industrielles.

Ces caractéristiques physicochimiques suggèrent que ces sables peuvent être extraits pour le béton, la fonderie, l'industrie céramique et le stockage de l'énergie solaire, mais pas pour la fabrication du verre. Par conséquent, ces utilisations potentielles encouragent l'exploitation et l'exploration des dunes de sable en tant que géo ressources locales, contribuant ainsi directement au développement durable de la région géologique, directement au développement durable du secteur des géomatériaux en Algérie [8,23].

I.4.2.3 Morphologie et analyse EDX [8]

La technique EDX permet une analyse semi-quantitative des éléments chimiques présents dans les grains d'échantillons de sable (voir Figure I-6). Chaque point sur la figure représente la composition élémentaire EDX des grains sélectionnés dans les échantillons de sable de la région d'El-Oued. Les résultats indiquent que l'oxygène et le silicium sont les principaux composants dans tous les échantillons, avec une abondance accrue dans les échantillons S1 et S5. Ces observations suggèrent que la silice (SiO) prédomine comme minéral principal dans tous les échantillons de sable d'El-Oued. Toutefois, une faible proportion d'aluminium ($\leq 8,7\%$) a été détectée dans presque tous les grains de sable, confirmant la présence d'une certaine quantité d'aluminium dans le quartz.

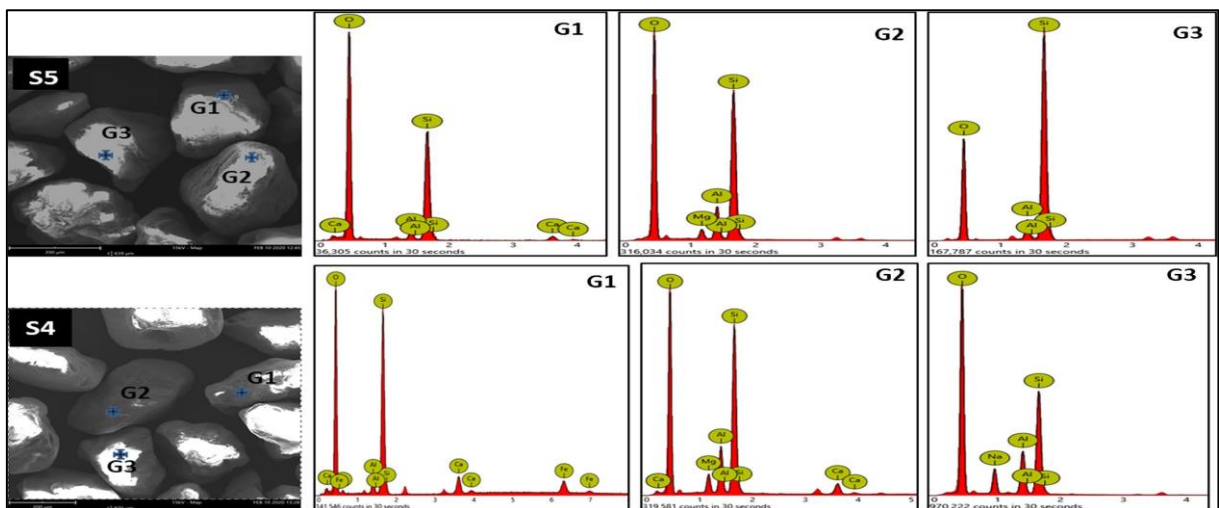


Figure I-6 Analyses EDX des grains de sable S4 et S5 [8].

I.4.2.4 Minéralogie du sable d'El-Oued [8]

La figure I-7 présente les diffractogrammes des échantillons de sable S1, S2, S3, S4 et S5 de la région d'El-Oued, révélant un caractère cristallin élevé pour tous, en accord avec les résultats de [24]. L'identification des minéraux a été effectuée à l'aide du programme X'Pert High Score et des cartes JCPDS.

Les ajustements Rietveld des modèles XRD permettent une évaluation semi-quantitative des principales phases cristallines des échantillons de sable. Les paramètres microstructuraux tels que le groupe d'espace, les paramètres de réseau, la taille des cristallites et la micro déformation ont été déterminés et synthétisés. L'analyse semi-quantitative révèle que le quartz α à structure hexagonale (P3₁21 (154)) est la phase dominante dans tous les échantillons de sable, avec un ratio le plus élevé de 93,5 % pour l'échantillon S1.

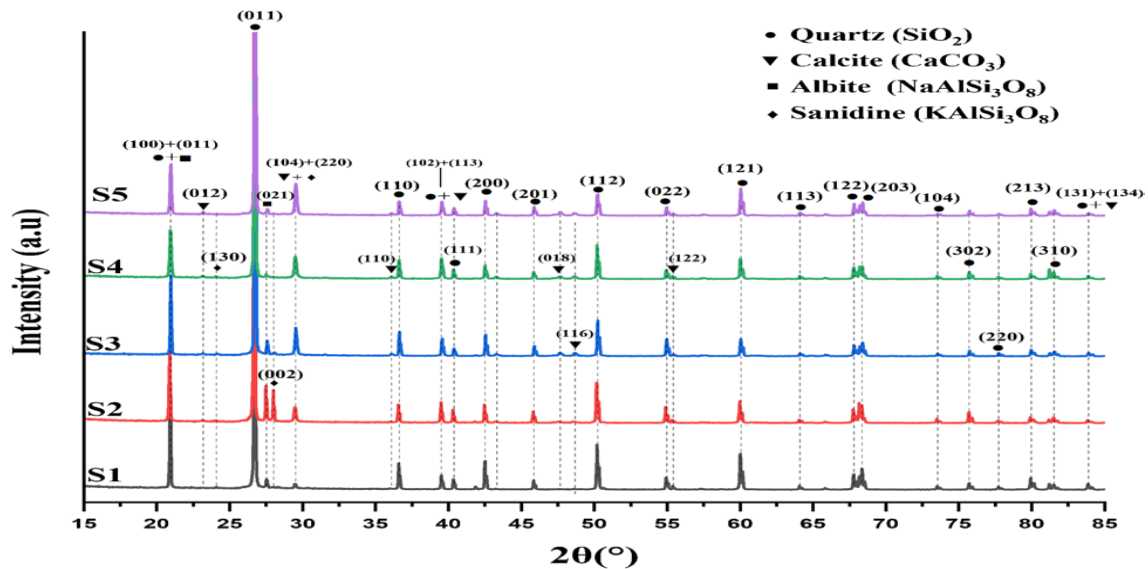


Figure I-7 Modèles XRD des échantillons de sable d'El-Oued [8].

I.5 Sable recyclés

I.5.1 Définition

Le sable recyclé est un matériau granulaire obtenu par traitement et du recyclage de débris de démolition, de briques, d'asphalte ou d'autres matériaux d'inexploitable. Ce processus de recyclage vise à récupérer les agrégats fins, tels que le sable, provenant des déchets de construction et de démolition. Après le tri, le concassage et le criblage des matériaux récupérés, le sable recyclé est obtenu en tant que produit final. Son utilisation contribue à réduire la dépendance vis-à-vis des ressources naturelles, à minimiser les déchets de construction et à promouvoir des pratiques plus durables dans l'industrie de la construction. Le sable recyclé peut être incorporé dans la fabrication de béton, mortier ou d'autres applications similaires.

La Figure I-8 présente la structure interne du sable naturel et du sable recyclé respectivement.

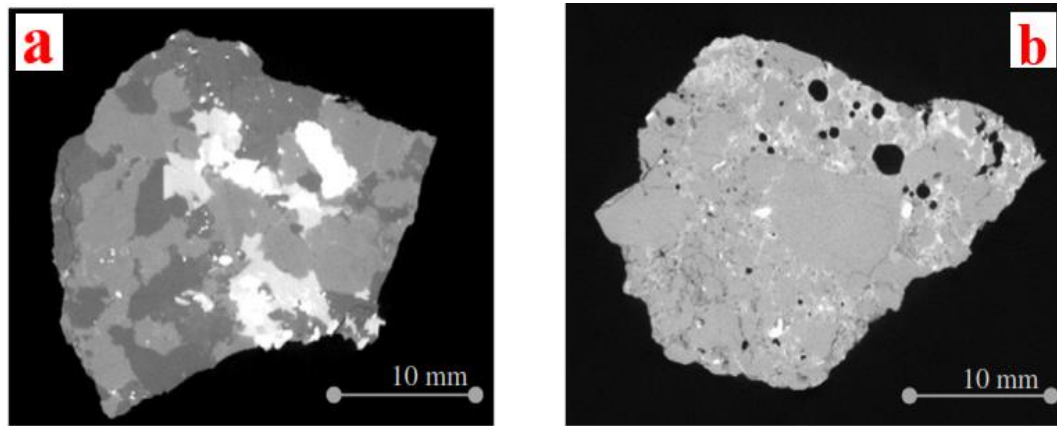


Figure I-8 Configuration interne des granulats **a)** Naturel, **b)** Recyclé [25].

Avec la croissance mondiale de l'industrie de la construction et de la démolition, le recyclage des débris de construction en tant qu'agrégat pourrait représenter une étape cruciale vers la durabilité dans la construction en béton. Toutefois, l'adoption pratique de cette méthode nécessite une méthodologie claire pour l'intégration des déchets issus de la construction et de la démolition (C&D) dans la production de béton [26–28].

I.5.2 Granulats de béton recyclés [25]

Une technique de tomodensitométrie 3D sophistiquée a été employée pour caractériser la morphologie interne des agrégats. Les résultats obtenus sur les granulats naturels (Fig. I-8a et 9a) et recyclés (Fig. I-8b et 9b) sont présentés dans la Figure I-9. Les images du scanner 3D révèlent distinctement les différences de texture de surface ainsi que la morphologie interne des agrégats. Par ailleurs, les variations de densité interne sont illustrées par les différences de couleur dans la coupe transversale 2D, où les points les plus sombres représentent une faible densité, tandis que les points plus clairs indiquent des structures à haute densité.

La comparaison entre les figures I-8a et I-8b met en évidence les disparités de structure interne entre les granulats recyclés et les granulats naturels. En effet, les granulats recyclés présentent un pourcentage significativement plus élevé de points poreux et de microfissures, attribuables à la porosité de l'ancienne pâte de mortier qui demeure attachée aux anciens granulats naturels. De plus, le processus de production et de concassage des granulats recyclés (issus de déchets de démolition) peut également contribuer à une désintégration et une fracturation internes supplémentaires. Par conséquent, les granulats de béton recyclés peuvent présenter des propriétés substantiellement différentes de celles des granulats naturels, en fonction de la quantité de mortier résiduel attaché à l'intérieur des granulats recyclés.

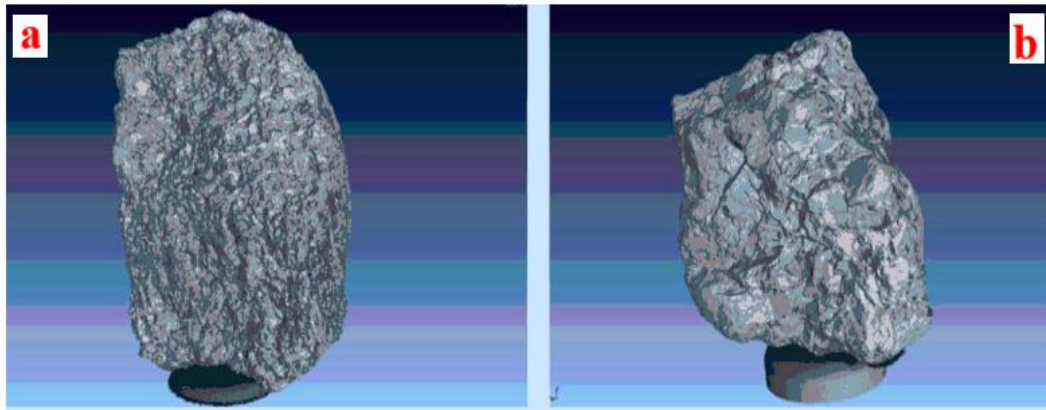


Figure I-9 Analyse scanner 3D des granulats : a (Naturel), b (Recyclé) [25].

Les fluctuations dans les propriétés physico-chimiques des granulats fins de béton recyclés (fRCA), ainsi que l'absence de normes définies pour évaluer leur qualité, constituent les principaux obstacles qui freinent actuellement l'utilisation du fRCA dans la fabrication de nouveaux bétons [29–31].

I.5.3 Absorption d'eau et la densité apparente des agrégats [25]

Les premiers essais visant à évaluer l'efficacité du nettoyage autogène des particules de béton recyclé ont été menés en mesurant la capacité d'absorption d'eau et la densité apparente conformément à la norme NBR NM 53 [32][33], appliquée aux gros granulats (Brita0 et Brita 1). La Figure I-10a présente les résultats des tests d'absorption d'eau, montrant qu'un nettoyage approfondi jusqu'à 15 minutes entraîne une réduction significative de l'absorption d'eau, avec des effets moins prononcés pour des durées de nettoyage plus courtes. Ainsi, le mortier fixé apparaît comme le paramètre déterminant tant pour l'absorption d'eau que pour le pourcentage de vides implicite. Les résultats révèlent qu'après le nettoyage autogène, la quantité d'eau absorbée a diminué de 50 % et 20 % pour Brita 0 et Brita 1, respectivement.

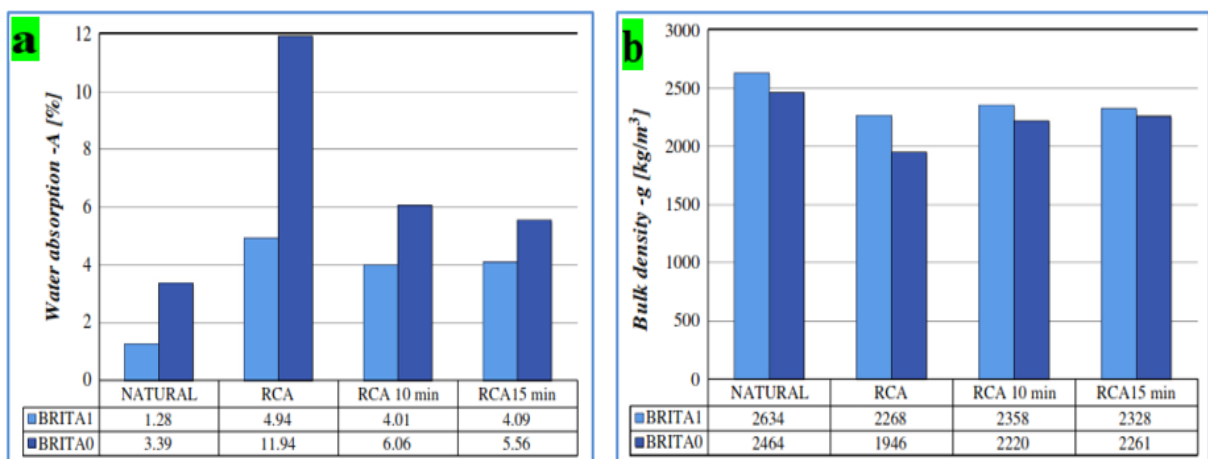


Figure I-10 Absorption d'eau à 24heures, et densité apparente des agrégats [25].

Par ailleurs, les constatations sus mentionnées ont été corroborées par des mesures de la densité apparente des échantillons de particules traités. La Figure I-10b offre une illustration du potentiel

du nettoyage autogène, tel que pris en considération dans cette étude, pour métamorphoser les particules de béton concassées en granulats de béton recyclés soigneusement nettoyés.

Selon Naël-Redolfi J, 2016 [34], la maîtrise de l'absorption d'eau et de la microstructure des granulats constitue des paramètres critiques pour anticiper le comportement rhéologique et mécanique des matériaux incorporant des granulats recyclés. Les recherches existantes se concentrent principalement sur les bétons où une fraction des granulats naturels est remplacée par des granulats recyclés issus de bétons concassés. En revanche, l'utilisation du sable recyclé, souvent composé principalement de mortier concassé, comme substitut du sable naturel est peu fréquente. La difficulté réside dans la mesure de l'absorption du sable recyclé, un paramètre qui n'est pas aisément évaluable selon la norme actuelle de caractérisation des granulats. Cette norme implique la détermination d'un état dénommé "saturé surface sèche", et dans le cas des granulats recyclés, la rugosité de surface rend particulièrement complexe la détermination visuelle de cet état [35].

I.5.4 Caractérisation expérimentale des granulats recyclés

I.5.4.1 Résistance à la compression et à la traction

La résistance à la compression des éprouvettes de béton issues des trois mélanges a été évaluée à des âges de 2, 7, 14, 28 et 60 jours, conformément à la norme NF EN 12390-4 [36], utilisant des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur (cinq essais pour chaque âge de cure).

La figure I-11 présente l'évolution de la résistance à la compression. Les échantillons REF affichent une résistance à la compression moyenne de 33 MPa à 28 jours, atteignant 37 MPa après 60 jours de durcissement grâce à l'hydratation continue.

La résistance à la compression des échantillons RAC montre une réduction d'environ 20 %, principalement due à une absorption d'eau accrue qui augmente la valeur effective du rapport E/C, déjà observée en termes d'ouvrabilité et de propriétés rhéologiques. Cependant, l'effet bénéfique du nettoyage autogène est clairement perceptible dans l'analyse des résultats de résistance à la compression pour les échantillons RAC CL, où une réduction significativement moindre de 8,9 % a été mesurée.

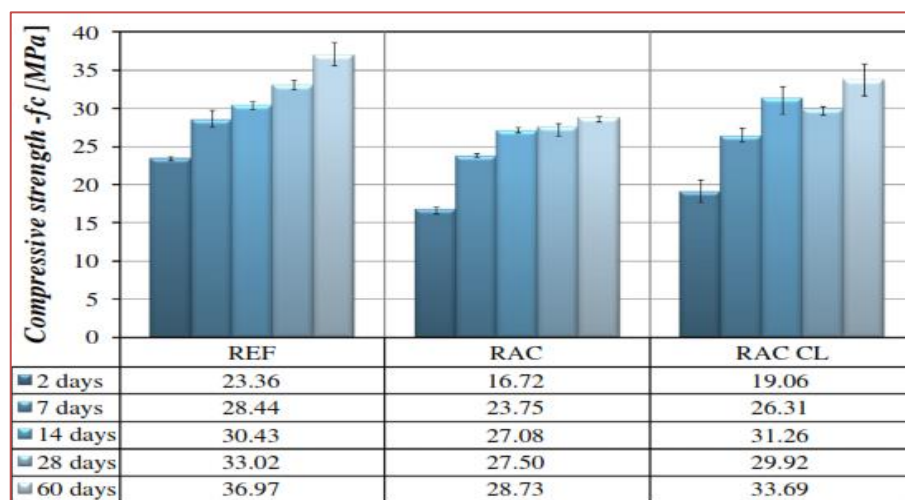


Figure I-11 Résultats de la résistance à la compression [25].

La résistance brésilienne à la traction et à la fissuration a été déterminée à partir d'éprouvettes cylindriques après 28 jours de durcissement à l'eau (trois éprouvettes pour chaque lot). Les conclusions démontrent que l'emploi de granulats issus du recyclage non nettoyés réduit significativement (soit environ 13 %) la résistance à la traction, tandis que le nettoyage autogène conduit à des résistances à la traction plus élevées et se caractérise également par une réduction de la dispersion (moins de 4 %) des résultats obtenus. à partir des trois tests effectués sur des échantillons RAC CL (Figure I-12).

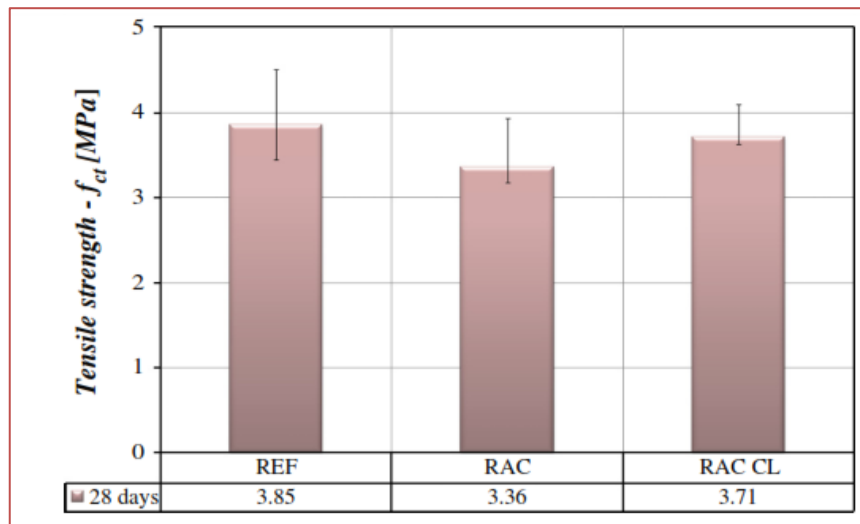


Figure I-12 Résultats de la résistance à la traction [25].

Les résultats obtenus en termes de résistance à la compression uni-axiale et de résistance à la traction ont montré un effet positif du nettoyage autogène pour les échantillons des granulats recyclés testés dans ce programme expérimental (voir Figures I-11 et I-12) [25].

I.5.4.2 Module d'élasticité

Selon (Pepe M, et al 2014) le module d'élasticité du béton a été déterminé conformément à la norme brésilienne NBR 8522 en utilisant des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, testées après 28 jours de cure à l'eau (trois éprouvettes pour chaque lot). Pour obtenir le module d'élasticité, les graphiques de déplacement de la charge ont été utilisés, en reliant deux points de la branche ascendante de la courbe contrainte déformation avec une ligne droite. Ces points représentent une contrainte de 0,50 MPa et une valeur correspondant à 30 % de la résistance maximale atteinte lors de la compression de l'essai, respectivement. En règle générale, une corrélation positive est observée entre le module d'élasticité et la résistance à la compression dans le béton [37].

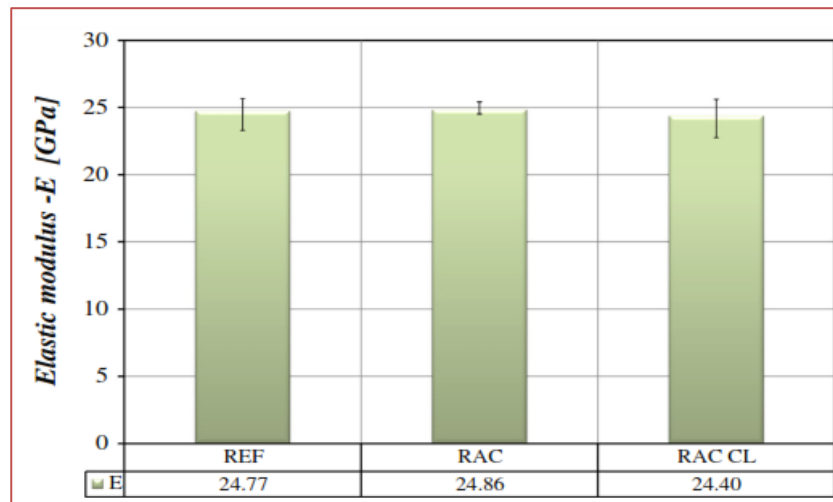


Figure I-13 Résultats du module d'élasticité [25].

Les résultats présentés dans la Figure I-13 indiquent que l'ajout de granulats, qu'ils soient nettoyés ou non, n'affecte pas de manière significative le module d'élasticité. Des valeurs d'environ 24 GPa ont été mesurées pour le module d'élasticité de tous les bétons dans cette étude, pour tous les lots considérés.

I.6 Plastiques Polyéthylène Téréphtalate (PET)

Le polyéthylèneTéréphtalate (PET) est un polymère synthétique produit par la polycondensation de l'éthylène glycol avec l'acide téréphtalique. Principalement employé dans la fabrication de bouteilles, flacons, pots, films, feuilles, fibres, etc., ce plastique fait partie de la famille des thermoplastiques et est recyclable.

Cependant, la tendance actuelle consiste à étendre leur utilisation en tant que matières plastiques spécialisées dans les secteurs mécaniques et électriques est courante en raison de leurs caractéristiques distinctives. La formule développée illustré au figure I-14 :

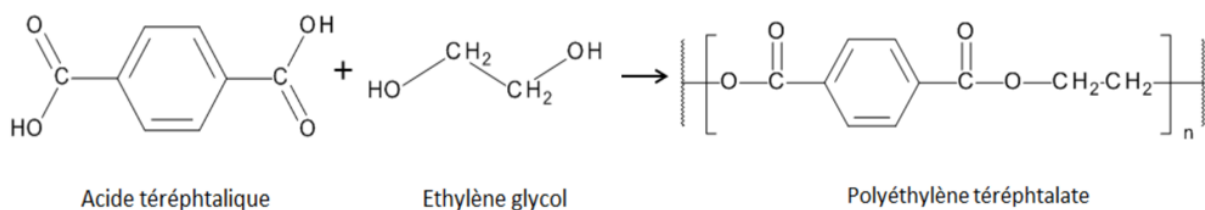


Figure I-14 Chaîne de la composition de PET .

I.7 Influence des composants sur les caractéristiques d'unmortier élaboré à partir de sable de dune.

La combinaison d'un sable grossier avec un sable fin, appelée correction granulaire, améliore de manière satisfaisante les propriétés mécaniques. Les grains fins du sable occupent les vides créés par l'empilement des grains grossiers, entraînant une amélioration de la compacité du mélange. Une étude sur l'exploitation des sables locaux de la région de Laghouat, notamment

le sable de dunes et le sable alluvionnaire, réalisée par Bédérina en 2005 [14], a démontré que l'utilisation d'une classe de 0.4/5 mm de sable alluvionnaire (RS) avec du sable de dunes (DS), selon un rapport RS/DS de 1.7, améliore la compacité du mélange de sable (RDS).

Benchaa B. et al. (2012) [38], ont examiné les propriétés du mortier-autoplaçant à base de divers types de sable, démontrant que les mortiers M_{SAD} issus de cette combinaison affichent des performances mécaniques supérieures par rapport aux mortiers M_{SDP} et M_{SD} (voir Figure I-15), et les mortiers à base de sable mélange montrent une meilleure durabilité face à l'attaque des sulfates par rapport aux mortiers de sable dunaire. Les mortiers de sable de dunes sont plus poreux, facilitant la pénétration des agents agressifs, ce qui entraîne une diminution des propriétés liantes et des caractéristiques mécaniques lorsque le rapport RS/SD est égal à 2.

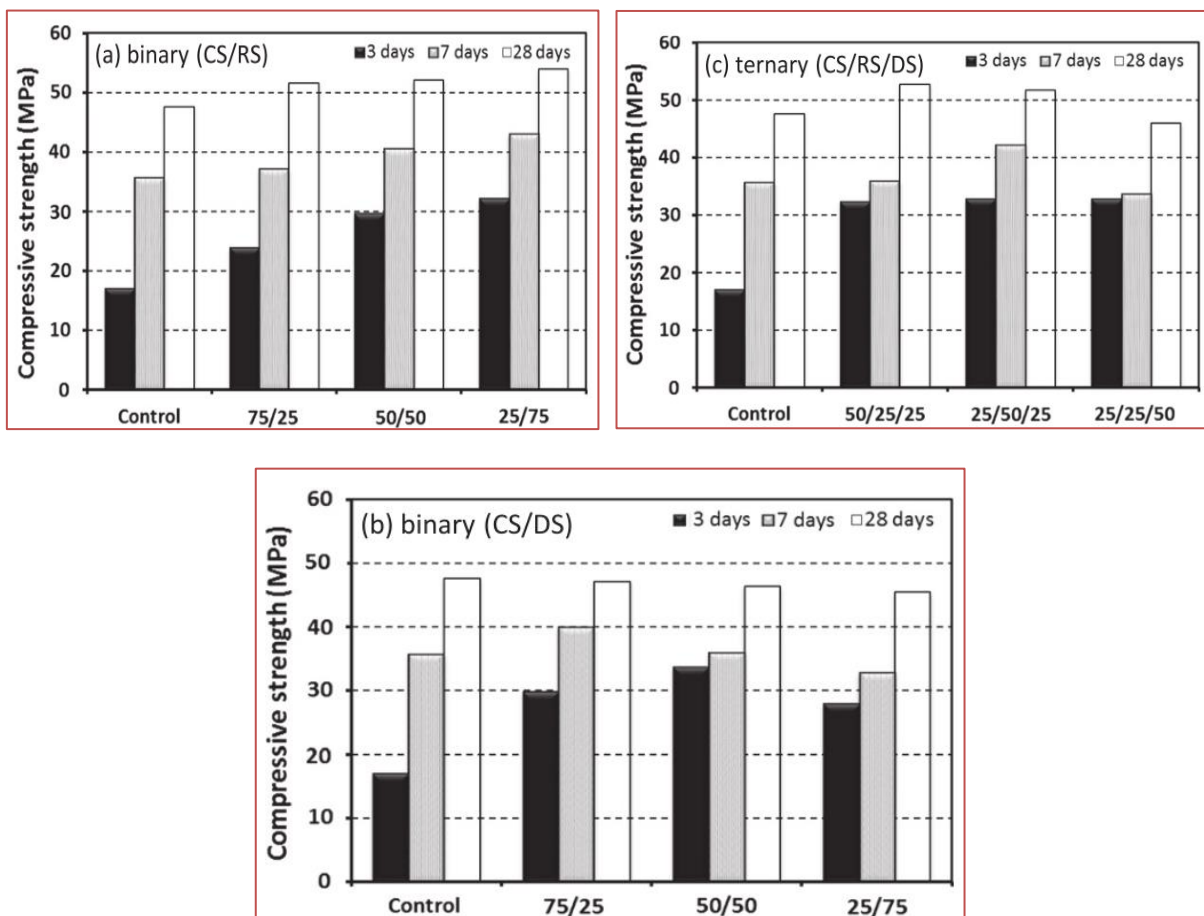


Figure I-15 Rc à (3, 7 et 28 jours) d'un mortier composé de :
(a)sable binaire (CS/RS), (b)sable binaire (CS/DS), et (c)sable ternaire (CS /RS/DS).

Plusieurs études de recherche ont examiné l'incorporation de déchets plastiques en tant que charges d'agrégats dans le béton, telles que celles publiées dans diverses revues jusqu'en 2020. Cependant, ces études se sont principalement focalisées sur les propriétés physiques et mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques, négligeant souvent les aspects liés à la durabilité, tels que la résistance mécanique réduite, la faible densité et l'augmentation de la porosité [39].

La dispersion aléatoire des fibres offre une résistance aux fissures en retardant leur formation et en limitant leur ouverture grâce à des effets de pontage qui agissent sur les surfaces de fracture [40–42]. Cependant, pour la création d'un mortier respectueux de l'environnement,

L'utilisation de fibres recyclées, telles que celles provenant de mousse recyclée, d'acier recyclé issu de pneus usagés ou d'ateliers de tournage de métaux, de déchets de fibres de polypropylène provenant de sacs de stockage, ainsi que de fibres de nylon recyclées, a été explorée pour obtenir des composites de mortier de ciment plus durables [43–45]. L'utilisation de fibres végétales comme renfort représente également une approche viable pour promouvoir la durabilité dans la construction [46,47].

I.7.1 Propriétés mécaniques des composites cimentaires contenant des déchets plastiques

Les déchets plastiques (PW) peuvent être utilisés en remplacement partiel des granulats grossiers (CA) et/ou des granulats fins (FA) dans le béton ou les autres matériaux cimentaires, plusieurs études ont souligné l'impact significatif du comportement intrinsèque non réactif des granulats de déchets plastiques (PWA) sur les performances du béton, y compris leur taille, texture de surface et forme [48]. Bien que le comportement interne du mélange soit souvent similaire, les résultats varient [49].

Les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des composites de déchets plastiques et de ciment (PWCC) sont résumées comme suit :

- ✓ Les études démontrent que la teneur en air élevée des PWCC en raison de la forme irrégulière, de l'immiscibilité et de la nature hydrophobe des PW [48].
- ✓ L'augmentation du PWA entraîne une diminution de la maniabilité du PWCC [49], influencée par la forme, la taille et la texture des particules, déterminant l'étendue de leur impact négatif sur l'ouvrabilité [50].
- ✓ La densité du béton diminue avec l'augmentation du PWA, principalement en raison de la densité inférieure du PWA par rapport aux granulats naturels [49]. Cette réduction est plus marquée pour les particules de PWA plus grandes et plus feuilletées [51].
- ✓ La résistance à la compression, à la flexion et à la traction diminue avec l'augmentation de la fraction de PW dans les composites, cette diminution étant plus prononcée avec des particules de plastique de forme non uniforme. Ce comportement est attribué au manque d'adhérence entre la surface plastique et la matrice cimentaire, ainsi qu'à la réaction d'hydratation limitée du ciment près de la surface du PWA, résultant de la nature hydrophobe de la PWA [49,50].
- ✓ Le module d'élasticité du PWCC diminue linéairement avec l'augmentation de la teneur en PWA, bien que la diminution du module élastique soit relativement inférieure à la baisse correspondante de la résistance à la compression [48,51].
- ✓ La vitesse des impulsions ultrasoniques du PWCC diminue avec l'augmentation du pourcentage de plastique, indiquant clairement une dégradation de la qualité du béton après l'incorporation de PW [49,51].

I.7.2 Propriétés de durabilité des composites cimentaires avec granulats thermoplastiques

Les résultats de la recherche sur la durabilité et le comportement des composites cimentaires contenant des déchets plastiques de type PET dans des environnements agressifs sont présentés dans les tableaux I-3, I-4 récapitule les types, les tailles et les taux de remplacement de l'agrégat par les déchets plastiques .

I.7.2.1 Effet du PET sur l'absorption d'eau

L'absorption d'eau est l'un des indicateurs essentiels de la durabilité du béton durci. C'est un critère qui mesure l'étendue de la porosité du matériau dans des conditions spécifiques [48]. Les caractéristiques de rétention d'eau et de porosité du béton ont un impact significatif sur sa performance à long terme. Une absorption d'eau plus élevée est synonyme d'une porosité accrue, ce qui augmente la vulnérabilité à la pénétration d'agents agressifs. Ainsi, il est essentiel de déterminer les propriétés d'absorption d'eau des composites cimentaires contenant des déchets plastiques pour assurer leur durabilité à long terme.

Tableau I.3 Détails sur le remplacement du plastique dans les mortiers d'après des études antérieures [39].

| Type | Matériau composite | Forme plastique : taille | Granulat remplacé : taux de remplacement | Réf |
|-----------|----------------------|--|--|---------|
| PET | Mortier | Fibre : 20mm / 50 mm long | Sable : 0.5, 1, 1.5% (Volume) | [52,53] |
| PET | Mortier | Particules broyées : 1–5 mm | Sable : 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100 % (Volume) | [57] |
| PET | Mortier | Granulat léger fabriqué : Module de finesse 4.11 | Sable : Mortier- 25, 50, 75, 100% (Volume) | [58] |
| PET/PC | Mortier | Particules broyées: PET<10mm; PC< 5mm | Sable : 3, 10, 20, 50% (Volume) | [61] |
| PET | Mortier | Particules broyées: 1–9 mm (0.1/1 mm d'épaisseur) | Sable : 3, 10, 20, 50 % (Volume) | [62] |
| PET | Mortier ^a | Granulés broyés :0–4 mm | 60 % du poids du liant (poids) | [63] |
| PET | Mortier ^c | Particules broyées: 0,08–4 mm | Sable : 10,20,30,50 % (poids) | [68] |
| PET+PE+PP | Mortier | Agrégat léger fabriqué : <8 mm | Sable : 10 à 50 % (poids) | [70] |
| PET | Mortier | Particules broyées : 1–4 mm | Sable : 10, 20, 30, 50 % (Poids) | [71] |
| PET | Mortier ^b | Granulés broyés : 0–4 mm | Granulats fins : 20, 40, 60, 80 et 100 % (Volume) | [72] |
| PET | Mortier | Flocons Fins : 1–4 mm ; Palettes : 1–4 mm | Sable : 5, 10, 15 % (Volume) | [73] |
| PET | Mortier | Agrégat léger fabriqué : 0-3 mm | Sable : 25, 50, 75, 100% (Poids) | [77] |
| PET | Mortier | Agrégat léger fabriqué :0-2.7 mm | Sable : 25, 50, 75, 100% (Poids) | [79] |
| PET | Mortier | Fibre : (20mm/30 mm) long | Sable : 0.5, 1, 1.5, 2% (Volume) | [82] |
| PET | Mortier | Fibre : (40 mm) long | Sable : 0, 1.5, 3% (Volume) | [83] |

Tableau I.4 Détails sur le remplacement du plastique dans le béton d'après des études antérieures [39].

| Type | Matériau composite | Forme plastique : taille | Granulat remplacé : taux de remplacement | Réf |
|----------|--------------------|--|--|---------|
| PET | Béton | Fibre:rapport d'aspect15-60 | Agrégat fins : 0.1, 0.5% (Poids) | [54] |
| PET | Béton | Fibre : 10 mm de long 2mm largeur | Sable : 0.5, 1, 1.5% (volume) | [55] |
| PET | Béton | Granulés broyés : (2.6 /11.4) mm | Sable : 10, 20% (Volume) | [56] |
| PET | Béton | Granulat léger fabriqué : Module de finesse 4.11 | Béton- 25, 50, 75% (Volume) | [58] |
| PET | Béton | Particules broyée:0.1–5 mm | Sable : 5 % (poids) | [59] |
| PET | Béton ^a | Granulés concassés : 0–4 mm | Sable : 50 et 100 % du liant (Volume) | [60] |
| PET/LDPE | Béton | PET-agglutiné : 6–12.5 mm ; LDPE-Écrasé :0.15–2.4 mm | Sable : 0.5, 1, 2.5, 5, 7.5% (Poids) | [64] |
| PET | Béton | Flocons fins: 1–4 mm ; Flocons grossiers: 2 à 11,2 mm ; Palettes: 1–4 mm | Granulats fins Granulats grossiers: 7.5, 15 % (Volume) | [65,66] |
| PET | Béton | Flocons fins: 1–4 mm ; Flocons grossiers: 2 à 11,2 mm ; Palettes: 1–4 mm | Granulats fins et grossiers: 5, 10, 15 % (Volume) | [67] |
| PET | Béton | Flocons fins: 1–4 mm ; Flocons grossiers: 2 à 11,2 mm ; Palettes: 1–4 mm | Granulats fins: 7.5, 15 % (Volume) | [66,69] |
| PET | Béton | Flocons : 0.15–4.75 mm | Sable : 5, 10, 15 % (Volume) | [74,75] |
| PET | Béton | Granulés broyés : 4.75–9.5 mm | Granulats grossiers : 5, 10, 20 % (Volume) | [76] |
| PET | Béton ^c | Granulés broyés: < 4.75 mm | Sable : 5,10,15% (Poids) | [71] |
| PET | Béton de sable | Granulés moulés : 10 mm | Sable : 10, 20, 30, 40, 50, 100 % (Volume) | [78] |
| PET | Béton | Particules broyées:2–12 mm | Granulats grossiers : 10, 20, 30% (Volume) | [80] |
| PET | Béton | Particules déchiquetées : 0–4.75 mm/4.75–20 mm | Granulats fins et grossiers: 5, 10, 15, 20 % (Volume) | [81] |

L'absorption d'eau des mélanges de béton intégrant des déchets PETaété évaluée par divers chercheurs en utilisant la méthode d'immersion [56,66,67,69,71,76]. Comme le montre la figure I-16, la plupart des études ont montré une augmentation de l'absorption d'eau avec l'augmentation de l'agrégats de déchets plastiques à l'intérieur du béton. Albano et al. [56] ont déclaré que les particules de PET étant planes et allongées par rapport aux granules sphériques de granulats naturels (NA), le mélange hétérogène entraîne une porosité plus

élevée, donc une absorption plus élevée. De plus, il y avait une augmentation de l'absorption avec une augmentation de la taille du PET et du rapport eau/ciment. Cela a été attribué aux vides provoqués par une réduction du volume de la pâte due à une teneur en eau plus élevée [56]. L'effet de la forme et de la taille du PET sur le comportement d'absorption du béton, pour des niveaux de remplacement identiques, a été étudié par différents chercheurs [66,67,69]. Tous les auteurs consultés semblent s'accorder sur l'existence d'une proportionnalité directe entre les volumes de substitution de gros flocons de PET et les valeurs d'absorption du béton. À la majorité, il a été déclaré que le PET sous forme de palette ne modifiait pas les caractéristiques d'absorption du mélange témoin jusqu'à des taux de remplacement de 15 %. Cependant, des flocons de PET plus fins ont entraîné une augmentation de l'absorption au-delà d'un dosage de 10 % [54,56]. Silva et al. [56] ont étudié l'influence des conditions de cure sur l'immersion et l'absorption d'eau capillaire du béton mélangé en PET. L'étude préconise que l'absorption d'eau d'un tel béton puisse être réduite en durcissant les échantillons dans un environnement avec des niveaux d'humidité relativement plus élevés. Ce comportement a été attribué à l'amélioration de la microstructure du béton due à une hydratation accrue du ciment par la disponibilité continue d'eau dans les pores de la matrice [56]. Marzouk et al. [57] ont suggéré que les particules de PET peuvent offrir une meilleure durabilité aux mortiers contre la migration de solutions agressives.

De plus, l'utilisation d'ajouts pouzzolaniques comme la fumée de silice (SF) et les cendres volantes (FLA) comme substitut partiel du ciment normal (NC) pourrait réduire l'absorption du béton en raison de l'amélioration de la microstructure du mélange par action pouzzolanique [71].

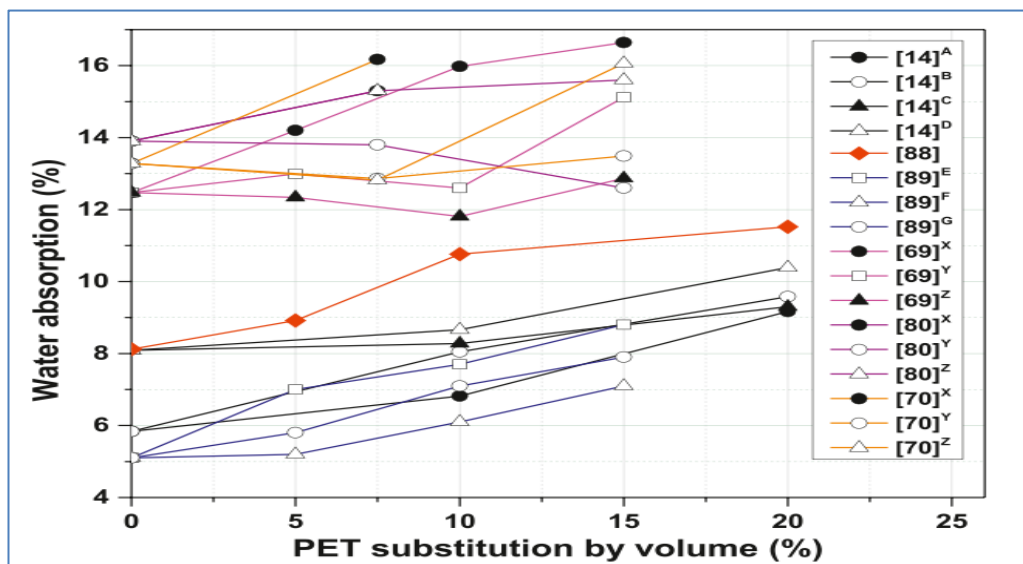


Figure I-16 Absorption d'eau des bétons contenant des granulats fins de PET [56,66,67,69,71].

I.7.2.2 Effet du PET sur résistance aux attaques acides et sulfates

L'attaque acide se manifeste par la dissolution et le lessivage des composants sensibles aux acides, principalement l'hydroxyde de calcium présent dans la pâte de ciment du béton durci.

Cette attaque entraîne une augmentation de la porosité, une perte de cohésion, une diminution de l'adhérence et éventuellement une baisse de la résistance du béton. Dans les cas les plus graves, elle peut également induire la formation de fissures et éventuellement causer la désintégration du matériau. En revanche, l'attaque sulfate résulte de la réaction entre les ions sulfate présents dans la solution interstitielle du béton, générant de nouveaux produits de réaction avec un volume relativement plus important. Dans des conditions sévères, l'augmentation du volume molaire de ces nouvelles phases peut engendrer des contraintes susceptibles de provoquer des fissures dans le béton [84].

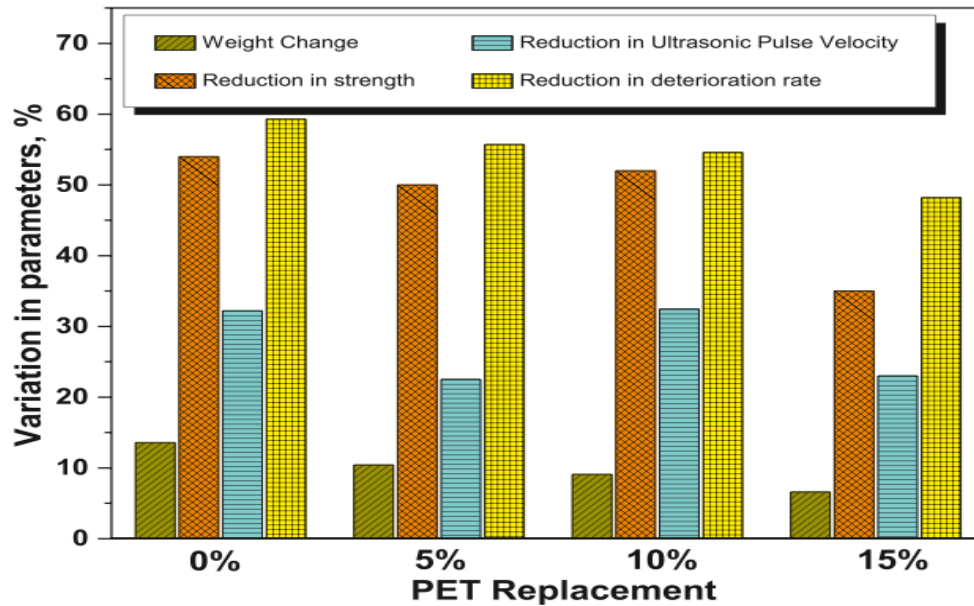


Figure I-17 Effet de l'attaque acide sur les propriétés du béton contenant PET [74].

Janfeshan Araghi H, et al. [74] ainsi que Nikbin IM, et al. [75] ont examiné l'impact de l'immersion d'échantillons de béton contenant des granulats fins de PET dans l'acide sulfurique à 5 %. Les effets de l'attaque acide sur le poids, la résistance à l'écrasement, la vitesse des impulsions ultrasoniques et le taux de détérioration ont été étudiés pour le béton témoin et le béton mélangé avec du PET pendant une période d'immersion de 60 jours, comme illustré sur la figure I-17. Basé sur Janfeshan et Nikbin, la plupart des chercheurs ont observé que l'incorporation de particules de PET pouvait atténuer la perte de poids, la diminution de la résistance à la compression et la réduction de la vitesse d'impulsion. Cet effet positif a été attribué à la capacité des particules de PET à absorber la pression interne résultant de l'augmentation du volume de la pâte de ciment. De plus, le taux de détérioration, exprimé comme le rapport entre la charge d'écrasement des échantillons immergés dans l'acide et celle des échantillons durcis à l'eau pour une période de durcissement donnée, a montré une tendance à la baisse avec l'augmentation des inclusions de PET.

Les déchets plastiques recyclés, ainsi que le sable des dunes, peuvent être envisagés comme une alternative parfaitement adaptée aux matériaux de construction traditionnels, offrant ainsi une solution plus durable et respectueuse de l'environnement [15].

I.8 Conclusion

Le contexte économique et environnemental incite à développer des matériaux de construction en considérant l'utilisation efficiente des ressources ainsi que les performances physico-mécaniques, chimiques et thermiques. Cette revue bibliographique sur les matériaux cimentaires met en lumière la production et l'analyse d'une variété de mortiers et de bétons par la communauté scientifique, utilisant divers granulats, déchets et autres matériaux.

Dans ce chapitre, une revue bibliographique approfondie des matériaux cimentaires a été entreprise, mettant particulièrement l'accent sur leur valorisation, notamment à travers des approches telles que l'utilisation de granulats et de fibres dans les matériaux à base cimentaire. Cette exploration des composites associant granulats et déchets s'avère être cruciale pour répondre aux exigences multiples des domaines environnementaux, techniques et économiques. En examinant les différentes facettes de cette valorisation matérielle, nous avons cherché à identifier des solutions durables et innovantes qui peuvent contribuer de manière significative à la résolution des défis contemporains liés à la construction et à l'industrie des matériaux.

À travers l'examen approfondi des études disponibles dans la littérature, il est manifeste que l'inclusion de granulats, la présence de fibres plastiques, ainsi que la valorisation des déchets de béton sous forme de sable recyclé et la mise en évidence du potentiel du sable de dune dans les mélanges de mortier, peuvent ensemble constituer une solution novatrice pour la conception de composites cimentaires. Ces approches multiples offrent une perspective prometteuse pour améliorer les propriétés des matériaux de construction, en intégrant des composants recyclés et en exploitant de manière plus efficiente les ressources disponibles. En combinant ces différentes techniques, il est possible de créer des matériaux composites cimentaires à la fois durables sur le plan environnemental et performants sur le plan technique, répondant ainsi aux besoins croissants de l'industrie de la construction.

Références bibliographiques

- [1] W.H. Khushefati, Demirboğa R, Farhan KZ. "Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites" *A review*. *Cleaner Materils* 2022;5. <https://doi.org/10.1016/jo.clema.2022.100127>.
- [2] O.Edenhofer, Pichs Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P. KS, Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G. S, , omer S., von Stechow C. (Eds.) C, University Press, United Kingdom and New York, NY, USA 1075. IPCC "Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation", 2011. 2011.
- [3] I.Sartori, Hestnes AG. "Energy use in the life cycle of conventional and low-Energy Buildings": A review article. *Energy Building* 2007;39:249–57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>.
- [4] A.Yacine Thèse de Doctorat en Science "Influence de l'ajout de déchets de céramique broyés sur les performances des mortiers à base de sable de dune". Polytech Ec Natl 2018.
- [5] D. Elhaj Guesmia . "Comportement d'un mélange Tuf -Sable de dune sous sollicitations monotones et cycliques". 2019.
- [6] ZA. Altameemi, Al-taie AJ. *Algerian Journal of Engineering and Sand Dunes Reviewing "Wind Effect and Dunes Classification"*. *Alger Jo Eng Technol* 2022;07:1–8.
- [7] MS.Al-Soud, Al-Shakarchi YJ. "Stabilization of Baiji sand dunes by petroleum residues". *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2020;870. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012081>.
- [8] N. Meftah, Hani A, Merdas A, Sadik C, Sdiri A. "A holistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications". *Arab J Geosci* 2021;14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08591-1>.
- [9] SEE. Khay, Neji J, Loulizi A. "Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements". *Construction Building Materiles* 2010;24:1790–5. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.008>.
- [10] A.Belferra, A Kriker, S Abboudi, ST Bi. "Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates". *J Clean Prod* 2016;112:3048–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.007>.
- [11] B. Krobba Bouhicha M, Kenai S, Courard L." Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and Stipa tenacissima microfibers plant". *Construction Building Materiles* 2018;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>.
- [12] W. Yan, Wu G, Dong Z. "Optimization of the mix proportion for desert sand concrete based on a statistical model". *Construction Building Materiles* 2019;226:469–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.287>.
- [13] S. Park S, Lee E, Ko J, Yoo J, Kim Y. "Rheological properties of concrete using dune sand". *Construction Building Materiles* 2018;172:685–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.192>.
- [14] M.Bédérina, Khenfer MM, Dheilily RM, Quéneudec M. Reuse of local sand "Effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes". *Cement Concrete Research* 2005;35:1172–9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.006>.
- [15] A. Boucedra, Bederina M, Ghernouti Y. "Study of the acoustical and thermo mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates". *Construction Building Materiles* 2020;256:119447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [16] EG.DAHEUR EG. "Comportement d'un mélange Tuf-Sable de dune sous sollicitations monotones Composition du Jury" et cycliques. Ecole Nationale Polytechnique, 2019.

- [17] Mechri ML, Chihi S, Mahdadi N, Beddiaf S. "Diagnosis of the heating effect on the electrical resistivity of Ouargla (Algeria) dunes sand using XRD patterns and FTIR spectra". *Journal African Earth Sciences* 2017;125:18–26. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.007>.
- [18] Kumara GHAJJ, Hayano K, Ogiwara K. "Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel". *International Journal GEOMATE* 2012;3:290–7. <https://doi.org/10.21660/2012.5.1261>.
- [19] A. Sdiri, Higashi T, Hatta T, Jamoussi F, Tase N. "Mineralogical and spectroscopic characterization, and potential environmental use of limestone from the Abiod formation", Tunisia. *Environ Earth Sci* 2010;61:1275–87. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0450-5>.
- [20] N.J. Saleh, Ibrahim RI, Salman AD. "Characterization of nano-silica prepared from local silica sand and its application in cement mortar using optimization technique". *Advanced Powder Technol* 2015;26:1123–33. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.05.008>.
- [21] M. Diago, Iniesta AC, Soum-Glaude A, Calvet N. "Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology". *Applied Energy* 2018;216:402–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.106>.
- [22] Elipe MGM, López-Querol S. Aeolian sands "Characterization, options of improvement and possible employment in construction" *The State of the art. Construction Building Materiles* 2014;73:728–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008>.
- [23] Nassima M, Hani A, Merdas A. "Extraction and Physicochemical Characterization of Highly pure Amorphous Silica Nanoparticles from Locally Available Dunes Sand". *Chem Africa* 2023. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00688-2>.
- [24] N Meftah, MS Mahboub. "Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses". *Silicon* 2020;12:147–53. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5>.
- [25] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EAB, Martinelli E. "Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete". *Construction Building Materiles* 2014;69:124–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>.
- [26] A. Mistri, Bhattacharyya SK, Dhami N, Mukherjee A, Barai S V. "A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials". *Construction Building Materiles* 2020;233:117894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>.
- [27] Yang W, Tang Z, Wu W, Zhang K, Yuan J, Li H, et al. "Effect of different fibers on impermeability of steam cured recycled concrete". *Construction Building Materiles* 2022;328:127063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127063>.
- [28] Jon Kim. "Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes" An overview. *Construction Building Materiles* 2022;328:127071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>.
- [29] M. Nedeljković, Visser J, Nijland TG, Valcke S, Schlangen E. "Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study". *Construction Building Materiles* 2021;270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121475>.
- [30] de Andrade Salgado F, Silva F. de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review". *J Build Eng* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [31] Xie J, Chen W, Wang J, Fang C, Zhang B, Liu F. "Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer

- concrete". *Construction Building Materiles* 2019;226:345–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>.
- [32] NBR N-53. Agregado graúdo - "Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água". ABNT-Brazilian Stand 2003:1–8.
- [33] ABNT. NBR NM 53 : Agregado graúdo - "Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água". Assoc Bras Normas Técnicas, Rio Janeiro 2006:8.
- [34] Naël-Redolfi J. "Absorption d'eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons. PhD Thesis, Univ Paris-Est 2016.
- [35] NF EN 1097-6. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats" Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. *Nf En 1097-6* 2014;33:56.
- [36] EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4 : "résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019".
- [37] Lydon FD, Balendran R V. "Some observations on elastic properties of plain concrete". *Cement Concrete Resarche* 1986;16:314–24. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90106-7).
- [38] B. Benabed, Kadri EH, Azzouz L, Kenai S. "Properties of self-compacting mortar made with various types of sand". *Cement Concrete Composite* 2012;34:1167–73. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>.
- [39] G.V. Bhagat, Savoikar PP. "Durability related properties of cement composites containing thermoplastic aggregates" A review. *J Build Eng* 2022;53:104565. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104565>.
- [40] Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2016;83:98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.
- [41] A. Mallat, Alliche A. "Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system". *Construction Building Materiles* 2011;25:1587–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.017>.
- [42] S. Kawashima, Shah SP. "Early age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber reinforced cementitious materials". *Cement Concrete Composite* 2011;33:201–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>.
- [43] MS. Meddah, Bencheikh M. "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials". *Construction Building Materiles* 2009;23:3196–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017>.
- [44] M. Ahmadi, Farzin S, Hassani A, Motamedi M. "Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates". *Construction Building Materiles* 2017;144:392–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.215>.
- [45] S. Spadea, Farina I, Carrafiello A, Fraternali F. "Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement". *Construction Building Materiles* 2015;80:200–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>.
- [46] G. Ramakrishna, Sundararajan T. "Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs" A comparative study. *Cement Concrete Composite* 2005;27:547–53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>.
- [47] F. Pacheco-Torgal, Jalali S. "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres" A review. *Construction Building Materiles* 2011;25:575–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [48] H. Mohammed, Sadique M, Shaw A, Bras A. "The influence of incorporating plastic within concrete and the potential use of microwave curing; A review". *J Build Eng* 2020;32:101824. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101824>.

- [49] I. Almeshal, Tayeh BA, Alyousef R, Alabduljabbar H, Mustafa Mohamed A, Alaskar A. "Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites" A review. *Construction Building Materiles* 2020;253:119146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119146>.
- [50] L. Gu, Ozbakkaloglu T. "Use of recycled plastics in concrete: A critical review". *Waste Manag* 2016;51:19–42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.005>.
- [51] AJ Babafemi, Šavija B, Paul SC, Anggraini V. "Engineering properties of concrete with waste recycled plastic" A review. *Sustain* 2018;10. <https://doi.org/10.3390/su10113875>.
- [52] BS Al-Tulaian, Al-Shannag MJ, Al-Hozaimy AR. "Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar". *Construction Building Materiles* 2016;127:102–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.
- [53] BS Al-Tulaian, Al-Shannag MJ, Al-Hozaimy AM. "Recycled plastic fibers for minimizing plastic shrinkage cracking of cement based mortar". *Int J Civil, Struct Constr Archit Eng* 2014;8:10–6. <https://doi.org/10.9790/1813-0610031625>.
- [54] R Sharma, Kausik R ST. "Effect of P.E.T Fibres Different Aspect Ratio on Fresh and Mechanical Properties of Cement Concrete". *Young Grad Res Symp* 2014;1:3–6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2418.7609>.
- [55] Ismail Abdulwahab Al-Hadithi A. "Improving Impact and Mechanical Properties of Gap- Graded Concrete By Adding Waste Plastic Fibers". *International Journal of Civil Engineering and Technology* 2013;4:976–6308.
- [56] C Albano, Camacho N, Hernández M, Matheus A, Gutiérrez A. "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios". *Waste Manag* 2009;29:2707–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>.
- [57] Marzouk OY, Dheilly RM, Queneudec M. "Valorization of post consumer waste plastic in cementitious concrete composites". *Waste management* 2007;27:310–8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>.
- [58] YW. Choi, Moon DJ, Kim YJ, Lachemi M. "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles". *Construction Building Materiles* 2009;23:2829–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>.
- [59] M. Frigione. "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete". *Waste Manag* 2010;30:1101–6. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>.
- [60] S. Akçaözöglü, Atiş CD, Akçaözöglü K. "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in light weight concrete". *Waste Management* 2010;30:285–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>.
- [61] Hannawi K, Kamali-Bernard S, Prince W. "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates". *Waste Management* 2010;30:2312–20. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>.
- [62] Hannawi K, Prince W, Kamali Bernard S. "Effect of thermoplastic aggregates incorporation on physical, mechanical and transfer behaviour of cementitious materials". *Waste and Biomass Valorization* 2010;1:251–9. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9021-y>.
- [63] Akaözolu S, Ati CD. "Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of light weight mortars containing waste PET aggregates". *Construction Building Materiles* 2011;25:4052–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.042>.
- [64] JCA Galvão, Portella KF, Joukoski A, Mendes R, Ferreira ES. "Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces". *Construction Building Materiles* 2011;25:1049–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073>.
- [65] L Ferreira, De Brito J, Saikia N. "Influence of curing conditions on the mechanical

- performance of concrete containing recycled plastic aggregate". *Construction Building Materiles* 2012;36:196–204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>.
- [66] Correia JR, Lima JS, De Brito J. "Post fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates". *Cement Concrete Composite* 2014;53:187–99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.004>.
- [67] N Saikia, De Brito J. "Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate". *Construction Building Materiles* 2014;52:236–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>.
- [68] B Safi, Saidi M, Aboutaleb D, Maallem M. "The use of plastic waste as fine aggregate in the self compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties". *Construction Building Materiles* 2013;43:436–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>.
- [69] Silva R V., De Brito J, Saikia N. "Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates". *Cement Concrete Composite* 2013;35:23–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>.
- [70] Iucolano F, Liguori B, Caputo D, Colangelo F, Cioffi R. "Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties". *Mater Des* 2013;52:916–22. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>.
- [71] Sadrumontazi A, Dolati-Milehsara S, Lotfi Omran O, Sadeghi-Nik A. "The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self compacting concrete". *Journal of Cleaner Production* 2016;112:2363–73. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.
- [72] Akçaözöğlü S, Ulu C. "Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali activated blast furnace slag/metakaolin blends". *Construction Building Materiles* 2014;58:31–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.011>.
- [73] Silva Da. AM, De Brito J, Veiga R. "Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars". *Construction Building Materiles* 2014;71:226–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>.
- [74] Janfeshan Araghi H, Nikbin IM, S Rahimi Reskati, E Rahmani, H Allahyari. "An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack". *Construction Building Materiles* 2015;77:461–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.037>.
- [75] IM Nikbin, R Saman Rahimi, H Allahyari, F Fallah. "Feasibility study of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and light weight concrete". *Journal of Cleaner Production* 2016;126:108–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.143>.
- [76] M Hossain, P Bhowmik, K Shaad. "Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent material". *Progress Agriculture* 2016;27:383–91. <https://doi.org/10.3329/pa.v27i3.30835>.
- [77] Gouasmi MT, Benosman AS, Taïbi H, Kazi Tani N, Belbachir M. "Destructive and non-destructive testing of an industrial screed mortar made with light weight composite aggregates WPLA". *International Journal of Engineering Research in Africa* 2017;33:140–58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.33.140>.
- [78] ST Wicaksono, H Ardhyanta, A Rasyida. "Study on mechanical and physical properties of composite materials with recycled PET as fillers for paving block application". *AIP Conf Proc* 2018;1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030288>.
- [79] Gouasmi MT, Benosman AS, Taïbi H. "Improving the properties of waste plastic lightweight aggregates based composite mortars in an experimental saline

- environment". Asian J Civ Eng 2019;20:71–85. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0089-1>.
- [80] ZH Lee, SC Paul, SY Kong, S. Susilawati , X Yang . "Modification of Waste Aggregate PET for Improving the Concrete Properties". Advances in Civil Engineering 2019;2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6942052>.
- [81] R Saxena, T Gupta, RK Sharma, S Chaudhary, A Jain. "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing PETwaste". Sci Iran 2020;27:1–9. <https://doi.org/10.24200/sc.i.2018.20334>.
- [82] Zerig T, Aidoud A, Belachia M, Djedid T, Abbas M. "Combined sand eco-mortar reinforced with polyethyleneTerephthalate: Behavior and optimization using RSM method". Construction Building Materiles 2023;404:133160. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133160>.
- [83] Adnan HM, Dawood AO. "Strength behavior of reinforced concrete beam using recycle of PET wastes as synthetic fibers". Case Studies in Construction Materials 2020;13:e00367. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00367>.
- [84] Nijland TG, Larbi JA. "Microscopic examination of deteriorated concrete". Non-Destructive Eval Reinf Concrete Structure Deterior Process Stand Test Methods 2010:137–79. <https://doi.org/10.1533/9781845699536.2.137>.

CHAPITRE II :

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DECHETS

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DECHETS

II.1 Introduction

La préservation de l'environnement et la conservation des ressources naturelles sont devenues des enjeux socio-économiques cruciaux. Les matériaux cimentaires (béton, mortier et coulis), étant le deuxième matériau le plus utilisé au monde après l'eau, contraignent les industries, en particulier celles du bâtiment, à revoir leurs méthodes de production et de mise en œuvre pour s'aligner sur des pratiques durables.

Ces dernières années, le secteur du BTP a connu une augmentation significative du nombre de constructions, entraînant une demande croissante en matières premières. Toutefois, les gisements naturels de granulats, une ressource essentielle, se raréfient, posant aux industriels des défis croissants en termes d'approvisionnement.

Le recyclage offre une solution permettant une gestion plus efficace des ressources en valorisant les déchets tels que le béton démolis, le plastique, le verre, etc., et en réduisant la dépendance aux ressources naturelles. Son impact environnemental et écologique est également lié à la réduction des zones de dépôt, à la diminution de l'ouverture de carrières et à la préservation des lits alluvionnaires.

Ce chapitre examine la réglementation relative aux déchets, la gestion et les pratiques de recyclage de ces matériaux, en mettant en lumière des pays ayant adopté ces politiques et en soulignant la situation en Algérie. Nous abordons également les divers types de déchets utilisés dans le domaine du génie civil.

II.2 Émergence d'une politique environnementale en Algérie

L'Algérie connaît actuellement une phase de développement économique et démographique sans précédent. La croissance démographique élevée a entraîné une urbanisation rapide et souvent désordonnée, provoquant la multiplication des habitats précaires. Cette expansion a eu des répercussions sur l'environnement, incitant le gouvernement algérien à prendre des mesures significatives en 2001. Une enveloppe budgétaire conséquente a été allouée pour atteindre les objectifs du Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), planifié jusqu'en 2010. Actuellement, le secteur de l'environnement subit des transformations, notamment par le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

- *Du point de vue de la politique environnementale*, Le Plan National d'Action de l'Algérie sur les Modes de Consommation et de Production Durables (MCPD) à l'horizon 2030, Ce plan s'inscrit dans les efforts de l'Algérie pour promouvoir le développement durable en intégrant cette dimension dans les politiques publiques, les politiques d'entreprise, et les initiatives de la société civile et des citoyens. Il intervient dans un contexte international où les enjeux du développement durable sont de plus en plus prioritaires, notamment avec l'adoption des Objectifs de Développement Durable (ODD)

par l'Assemblée générale des Nations Unies en septembre 2015 et l'accord international de la COP 21 sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La politique environnementale algérienne se définit comme l'ensemble des actions, des normes et des initiatives mises en place par le gouvernement algérien pour promouvoir la protection de l'environnement et le développement durable. Elle englobe divers domaines tels que la gestion des déchets, la préservation des ressources naturelles, la lutte contre la pollution, et la promotion de modes de production et de consommation durables. Cette politique vise à concilier le développement économique du pays avec la préservation des écosystèmes, en adoptant des mesures législatives, réglementaires et institutionnelles pour assurer une gestion responsable des ressources et minimiser les impacts environnementaux.

➤ *En termes de législation et de réglementation, plusieurs lois ont été promulguées .*

| N° de Législation et de réglementation | Bute |
|---|---|
| Arrêté interministériel du 4/4/ 2011 | Fixant les modalités de traitement des déchets anatomiques. |
| Loi N° 01/19 du 12/12/2001 | Relative à la gestion, contrôle et à l'élimination des déchets. |
| Décret exécutif N° 02/372 du 11/11/2002 | Relatif aux déchets d'emballages. |
| Décret exécutif N° 04/199 du 19/7/2004 | fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement des déchets d'emballages |
| Arrêté interministériel du 5/8/2009 | portant l'approbation le règlement technique relatif à la réglementation des matériaux d'emballage à base de bois destinés au commerce. |
| Décret exécutif N° 09/19 du 20/1/2009 | portant réglementation de l'activité de collecte de déchets spéciaux. |
| Décret exécutif N° 2004/210 du 28/7/2004 | définissant les modalités de détermination des caractéristiques techniques des emballages destinés à contenir directement des produits alimentaires ou des objets destinés à être manipulés par les enfants |
| Décret exécutif N° 2007-205 du 30/6/2007 | fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés |
| Décret exécutif N° 04-410 du 14/12/2004 | fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations. |
| Décret exécutif N° 2003/477 du 15 9/12/2003 | fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux |
| Décret exécutif n° 03-478 du 9/12/2003 | définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins. |
| Décret présidentiel N° 05/119 du 11/4/2005 | relatif à la gestion des déchets radioactifs. |
| Décret exécutif N° 05/314 du 10/9/2005 | fixant les modalités d'agrément des groupements de producteurs et / ou détenteurs de déchets spéciaux. |
| Décret exécutif N° 05/315 du 10/9/2005 | fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux. |
| Décret exécutif N° 06/104 du 28 /2/2006 | fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. |
| Décret présidentiel N° 06/170 du 22/5/2006 | portant ratification de l'amendement à la convention de bâle sur le contrôle des mouvements transfrontière de déchets dangereux et de leur élimination, adopté à Genève le 22/9/1995. |
| Arrêté interministériel du 2 septembre 2013 | fixant les caractéristiques techniques des étiquettes des déchets spéciaux dangereux |
| Arrêté du 8/6/2020 correspondant au 16 Chaoual 1441 | fixant les modalités d'habilitation de l'exportateur des déchets spéciaux dangereux. |
| Décret exécutif N°19/10 du 23/1/2019 | réglementant l'exportation des déchets spéciaux dangereux. |

➤ *Encequi concerne l'institutionnel, la création de plusieurs organismes est à noter.*

| L'organisme | N° et date de creation |
|--|------------------------|
| Centre National des Technologies de Production plus Propres | 2//262 du 17/8/2002 |
| L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable | 02/115 du 3 /4/2002 |
| L'Agence Nationale des Déchets (AND) | 02/175 du 20/5/2002 |
| Conservatoire National des Formations à l'environnement | 2/263 |
| Centre National de Développement des Ressources Biologiques | 04/198 du 2002 |
| Commissariat National du Littoral (CNL) | 02/02 du 5/2/2002 |
| Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable | 94/465 du 25/12/1994 |

II.3 Définition des déchets

La définition des déchets se réfère à des substances, matériaux ou produits dont le détenteur se défait, a l'intention de se défaire ou a l'obligation de se défaire. Ces substances ou produits sont abandonnés, jetés ou auxquels le détenteur n'a plus l'intention initiale d'en faire usage. Les déchets peuvent provenir de diverses sources, notamment des ménages, des entreprises, des industries et d'autres activités humaines. Ils peuvent être solides, liquides, gazeux, dangereux ou non dangereux, et leur gestion efficace est cruciale pour prévenir les impacts négatifs sur l'environnement et la santé publique.

Il est important de souligner que la gestion des déchets solides constitue l'une des principales préoccupations environnementales à l'échelle mondiale. Face à la diminution des décharges et à la hausse continue des coûts associés, l'utilisation des déchets s'est révélée être une alternative prometteuse pour diverses applications [1].

II.4 Influence des déchets sur l'écosystème

L'impact environnemental des déchets englobe divers aspects qui peuvent avoir des conséquences sur l'écosystème, la biodiversité, la qualité de l'air, de l'eau et des sols, ainsi que sur la santé humaine.

Voici quelques uns des principaux impacts environnementaux associés aux déchets :

II.4.1 Pollution de l'eau : Certains déchets peuvent contaminer les sources d'eau, entraînant une pollution des rivières, des lacs et des nappes phréatiques. Les produits chimiques provenant des déchets peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la qualité de l'eau potable.

II.4.2 Pollution de l'air : La combustion de déchets, en particulier celle des déchets plastiques, peut libérer des substances toxiques dans l'air. Cela peut contribuer à la pollution de l'air et avoir des effets sur la qualité de l'air, avec des implications pour la santé respiratoire.

II.4.3 Altération des sols : Les décharges non contrôlées peuvent entraîner une dégradation des sols, affectant leur fertilité et leur capacité à soutenir la végétation. Les déchets industriels peuvent également contenir des substances nocives qui polluent les sols.

II.4.4 Émissions de gaz à effet de serre : Certains déchets, en particulier ceux qui se décomposent organiquement, produisent des gaz à effet de serre lors de leur décomposition. Cela contribue au réchauffement climatique.

II.4.5 Impacts sur la faune et la flore : L'accumulation de déchets peut dégrader les habitats naturels, entraînant une perte de biodiversité. Certains animaux peuvent également être affectés par l'ingestion de déchets.

II.4.6 Problèmes de gestion des déchets : Une gestion inadéquate des déchets, telle que l'absence de tri sélectif, peut conduire à une surcharge des décharges, à des incinérations non contrôlées et à d'autres pratiques nuisibles à l'environnement.

II.4.7 Ressources épuisées : La production de biens consomme des ressources naturelles. La gestion inadéquate des déchets peut entraîner une utilisation inefficace de ces ressources et contribuer à l'épuisement des matières premières.

Comprendre et atténuer ces impacts environnementaux nécessite une approche globale de la gestion des déchets, axée sur la réduction à la source, le recyclage, la réutilisation et d'autres pratiques durables.

II.5 Diverses catégories de déchets

II.5.1 Déchets ultimes :

Tous les déchets ménagers et assimilés bruts provenant du ramassage parallèle à la collecte sélective, des refus de tri, des déchets industriels banals générés par les ménages et les déchetteries, ainsi que des boues issues des stations d'épuration.

II.5.2 Déchets inertes :

Déchet inaltéré par des modifications physiques, chimiques ou biologiques significatives ; il ne se décompose pas, ne brûle pas et n'entraîne aucune réaction physique ou chimique. Ces déchets ne sont pas biodégradables, n'altèrent pas d'autres matières au contact, ce qui pourrait causer une pollution environnementale ou nuire à la santé humaine. Ils sont autorisés dans les installations de stockage et proviennent principalement des chantiers de construction, des travaux publics et des industries de fabrication de matériaux de construction, tels que le béton, les tuiles, les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres et les enrobés bitumineux.

II.5.3 Déchets assimilés :

Les déchets ménagers et assimilés englobent les ordures ménagères (OM) générées par les ménages ainsi que tous les déchets traités comme tels par les autorités locales (tels que les déchets des artisans ou commerçants).

II.5.4 Déchets verts :

Déchets végétaux issus des parcs et jardins, comprenant notamment le gazon et les branchages.

II.5.5 Déchets organiques (DO):

Les déchets organiques sont des déchets d'origine biologique, généralement issus de matières vivantes ou d'activités biologiques. Ils comprennent des matières telles que les restes de nourriture, les déchets de jardin, les résidus de cuisine, les feuilles, les résidus de plantes, etc. Ces déchets contiennent une grande quantité de matière organique, telle que des composés carbonés, et ils sont souvent recyclables via des processus de compostage ou de méthanisation pour produire du compost ou du biogaz. La gestion appropriée des déchets organiques contribue à réduire les déchets destinés aux décharges et à favoriser des pratiques plus durables sur le plan environnemental.

II.5.6 Déchets industriels banals (DIB) :

Les déchets industriels banals sont des déchets générés par les activités industrielles qui ne présentent pas de caractéristiques particulières de dangerosité ou de nocivité. Il s'agit généralement de déchets courants issus des processus de production, de l'entretien des installations, ou des activités administratives au sein des entreprises. Ces déchets comprennent souvent des matériaux tels que le papier, le carton, le plastique, le verre, les métaux, les débris de bois, etc.

Contrairement aux déchets industriels spéciaux qui peuvent contenir des substances dangereuses, les déchets industriels banals ne nécessitent généralement pas de traitement spécialisé. Ils peuvent être collectés, triés et éliminés de manière plus conventionnelle, par exemple, à travers des centres de tri, des décharges contrôlées, ou des processus de recyclage.

II.5.7 Déchets dangereux (DD):

II.5.7.1 Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets sont répertoriés en raison de leurs propriétés dangereuses, par exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; issus de l'industrie pétrolière, etc.

II.5.7.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Il s'agit des déchets à risque présents dans les déchets ménagers, comprenant des éléments tels que les aérosols, colles, détergents, détachants, insecticides, peintures, piles, tubes néon, et produits de nettoyage. Ces déchets sont également qualifiés de DTQS, c'est-à-dire des déchets toxiques en quantité dispersée.

II.5.8 Déchets de la construction (démolition):

La démolition d'ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction génèrent des produits secondaires et des déchets. Le stockage de ces déchets solides dans des dépôts contribue à la pollution environnementale. Les granulats recyclés, issus de la démolition de bâtiments ou de routes, incluent des résidus provenant des processus de production et de transformation tels que des déchets chimiques, des emballages, du bois traité ou non traité, etc. Ces déchets de démolition sont classés parmi les déchets industriels, distincts des déchets urbains et agroalimentaires. Il est essentiel de distinguer les différentes catégories de déchets industriels, regroupées en quatre grandes catégories comme présenté dans la Figure II.1.

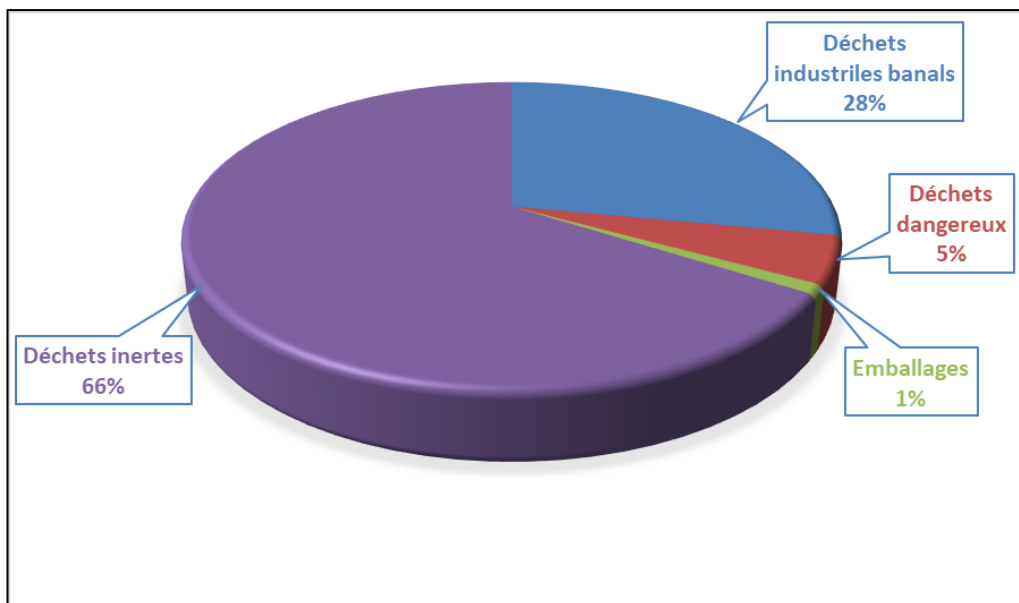


Figure II-1 Compositions des déchets du bâtiment [2].

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent comprendre l'ensemble de ces types de déchets. La composition estimée de ces déchets est illustrée à la Figure II-2 [3].

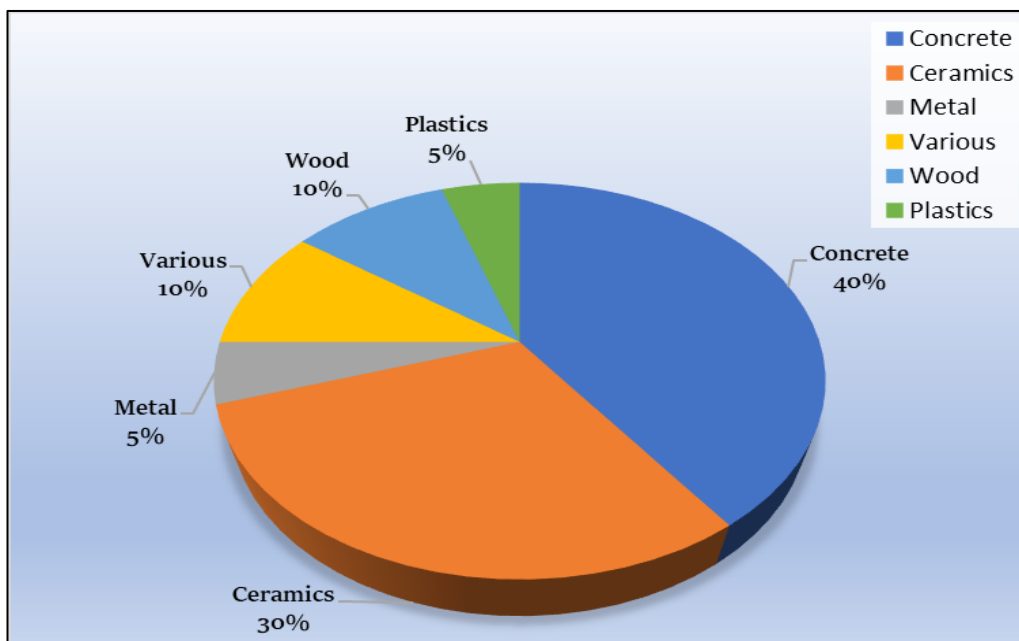


Figure II-2 Composition de base des déchets de démolition (environ) [3].

La valeur économique des déchets en Algérie a connu une croissance continue au fil des années, atteignant des niveaux inattendus. En 2023, les données du système informatique national de gestion des déchets indiquent une valeur estimée à 207 milliards de dinars. Cette augmentation remarquable témoigne de la conversion d'un problème environnemental en une opportunité économique significative [4].

Pour comprendre l'ampleur de cette progression dans l'augmentation de la valeur des déchets, un retour en arrière de quelques années s'impose. En 2021, la valeur marchande des déchets en

Algérie était estimée à 151 milliards de dinars, marquant ainsi une hausse significative par rapport aux 92 milliards de dinars enregistrés en 2020. Cette tendance à la hausse a attiré un intérêt croissant pour le potentiel économique des déchets.

Il est crucial de souligner que, malgré cette augmentation, seulement 10 % des 36 millions de tonnes de déchets collectés chaque année en Algérie sont recyclés. Cette statistique révèle un défi considérable en matière de gestion des déchets, mais elle met également en lumière le potentiel inexploité de cette ressource [4].

II.5.9 Les déchets utilisés dans cette étude:

En premier lieu, il convient de prendre en considération le sable des dunes, jusqu'à présent considéré comme un matériaux inerte et inexploité, malgré son abondance dans la région sud de l'Algérie. De plus, les déchets de béton démolis ainsi que les déchets plastiques de type PET sont également examinés. Il est important de noter que les trois types de déchets pris en compte dans cette étude sont recyclables et peuvent être utilisés dans la fabrication de matériaux cimentaires.

II.5.9.1 Sable de dune une ressource sous-exploitée:

Considérant que les dunes de sable sont laissées à l'abandon et inexploitées pour plusieurs raisons, dont la plus marquante est leur abondance dans le désert algérien. L'incapacité de les exploiter et de les valoriser convenablement dans les secteurs du bâtiment, des travaux publics et des infrastructures en général est notable, notamment en raison du coût élevé des matériaux de construction, y compris les matières premières. Ce type de sable peut être utilisé dans divers domaines, tels que la construction, l'industrie du béton, et d'autres applications où un matériau granulaire est nécessaire. Cependant, son exploitation doit être gérée de manière durable pour éviter des impacts négatifs sur l'environnement local.

Le conflit croissant entre l'utilisation croissante de produits inorganiques et la diminution des ressources minérales, ainsi que la grave tendance à la désertification, nous obligent à accélérer les applications industrielles du sable du désert pour le développement durable [5]. De plus, le sable provenant des dunes est employé dans l'industrie de la construction en substitut au sable de rivière, dont l'utilisation est limitée pour des considérations environnementales, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles [6].

De nombreux travaux récents, parmi lesquels figurent [7–12], ont porté sur la valorisation du sable des dunes dans la fabrication de mortiers et d'autres matériaux cimentaires. Ces études ont démontré que son inclusion dans une matrice cimentaire confère au composite des propriétés physico-mécaniques particulièrement intéressantes.

Actuellement, toutes les recherches sont orientées vers la production de mortier et de béton à moindre coût afin d'éliminer la forte consommation des matériaux de construction. Pour cette raison, divers matériaux ont été explorés et valorisés par plusieurs chercheurs [13–17].

II.5.9.2 Déchet de béton :

Les déchets de béton, également appelés débris de béton ou gravats de béton, font référence aux fragments, morceaux ou résidus de béton générés lors de la démolition, de la construction ou de la rénovation d'ouvrages en béton. Ces déchets peuvent provenir de diverses sources, telles que des bâtiments, des ponts, des routes ou d'autres structures en béton. Lorsque ces structures sont démolies ou rénovées, le béton existant est souvent cassé, concassé ou réduit en fragments, créant ainsi des déchets de béton.

Le recyclage des déchets de béton est de plus en plus pris en compte pour réduire l'impact environnemental de la construction et de la démolition. Les déchets de béton recyclés peuvent être réutilisés comme agrégats dans la production de nouveaux bétons, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles [18–21].

Les bétons de ciment recyclés sont sous-utilisés malgré la grande disponibilité de ce type de granulats issus de la démolition. De plus, les nouveaux bétons intégrant ces matériaux recyclés font l'objet d'études limitées. Afin d'obtenir un béton présentant de bonnes résistances mécaniques et une durabilité satisfaisante, il est impératif de suivre certaines règles de fabrication, telles que l'utilisation de granulats de qualité, une quantité d'air adéquate pour résister aux cycles de gel/dégel, et un rapport eau/ciment approprié. D'énormes quantités de déchets de démolition de construction sont produites chaque année [22,23].

Selon Quebaud M. [24], les bétons élaborés avec des granulats de béton de ciment recyclé présentent des propriétés distinctes par rapport aux bétons traditionnels. Ces propriétés incluent :

- ✓ Résistances à la compression et à la traction réduites de 10 à 30 % ;
- ✓ Retraits accrus de l'ordre de 50 à 100 % ;
- ✓ Modules élastiques diminués d'environ 15 à 40 % ;
- ✓ Adhérence moins efficace entre la pâte de ciment et le granulats.

La qualité des granulats joue un rôle fondamental dans la formulation d'un béton performant, car elle influe significativement sur la résistance mécanique. Dans notre cas, il est crucial d'opter pour les meilleurs granulats recyclés disponibles afin de ne pas compromettre les propriétés du nouveau béton.

La valorisation des déchets de démolition a dépassé la phase expérimentale et est en développement notable. Le tableau II-1 (voir annexe 2) résume les taux de recyclage dans plusieurs pays européens en 1992.

Bien que le sable recyclé de démolition présente une forme angulaire et une texture fortement rugueuse [26–29], ces granulats rencontrent toutefois un problème de retrait endogène en raison de la demande élevée en eau nécessaire pour atteindre le seuil acceptable de plastification [12,30,31].

Les chercheurs [28,32–34], encouragent tous ceux qui, de diverses manières, ont exprimé que le sable recyclé a démontré sa qualité dans la fabrication de matériaux cimentaires, soulignant ainsi son potentiel en tant que ressource valorisable et durable dans le domaine de la construction.

Selon de Andrade Salgado F. et al, la composition des déchets de construction et de démolition peut être affectée par plusieurs facteurs tels que les techniques architecturales, les matières premières et les procédures de construction/démolition. Néanmoins, le béton, le mortier et la céramique rouge sont les principaux composants du CDW, atteignant plus de 70 % en poids [35,36]. La figure II-3 montre un tas de déchets CDW et de béton provenant de la construction et de la démolition à l'usine de recyclage Reciclax à Ribeirao Preto, au Brésil. La classification des CDW comme suit :

- Classe A : brique, carrelage, parquet, mortier et béton ;
- Classe B : plastique, verre, carton, papier, bois et métal ;
- Classe C : matériaux pour lesquels aucune technique de recyclage économiquement réalisable (par exemple, le gypse) ;
- Classe D : déchets dangereux (par exemple, solvants, huiles, peintures et matériaux contenant de l'amiante).



Figure II-3 (a) Déchets de construction et de démolition, (b) Déchets de béton stockés à l'usine de recyclage [36].

Néanmoins, le béton concassé et la maçonnerie concassée constituent le principal matériau CDW pouvant être transformé en différents types de granulats recyclés, comme décrit ci-dessous [37]:

- Granulats de Béton Recyclé (RCA) : constitués d'un minimum de 90 % en poids de fragments à base de ciment Portland.
- Granulats de Maçonnerie Recyclés (RMA) : constitués d'un minimum de 90 % en poids de briques céramiques, de tuiles et d'enduits de mortier.
- Les Granulats Mixtes Recyclés (MRA) sont constitués des matériaux à base de maçonnerie et de fragments à base de ciment Portland, ces derniers représentant moins de 90 % en masse.

En 2010, les secteurs de la construction et de l'exploitation minière ont surpassé tous les autres secteurs économiques en termes de production de déchets (Fig. II-4a, annexe 1). Parmi ces déchets provenant des activités de construction, de démolition, d'exploitation minière et de carrière, 97 % étaient des déchets minéraux ou des sols, tels que terres excavées, déchets de construction routière, déchets de démolition, déblais de dragage, stériles, résidus, etc. La part des déchets minéraux et solidifiés par rapport à la quantité totale de déchets était de 76 % (Fig. II-4b, annexe 1) [37].

II.5.9.2.1 Constitution des granulats recyclés [25]:

Les agrégats recyclés de béton se distinguent des granulats naturels par leur composition, créant un matériau composite avec deux éléments distincts :

- Granulats naturels partiellement concassés.
- Pâte de ciment hydraté concassée, enveloppant les granulats naturels.

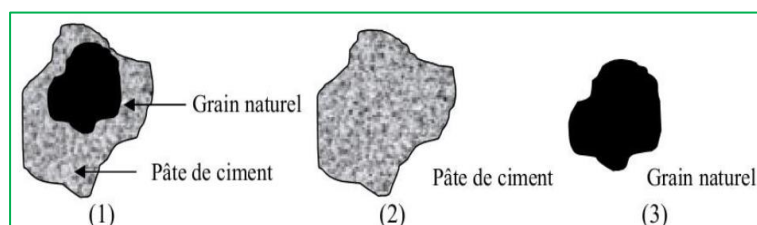


Figure II-5 Forme de granulats recyclés [25,38,39].

Ces éléments, cruciaux pour la structure et les propriétés du matériau, témoignent du processus de production spécifique du granulats recyclés de béton, qui implique le recyclage du béton préexistant et intègre des aspects environnementaux et durables dans le domaine des matériaux de construction .

II.5.9.3 Déchet plastiques:

Les déchets plastiques sont des déchets solides composés principalement de matières plastiques. Ces déchets sont issus de diverses sources, notamment les emballages, les produits de consommation, les équipements électroniques, etc. Les déchets plastiques posent des défis environnementaux en raison de leur durée de décomposition élevée et de leur impact potentiel sur les écosystèmes. Le recyclage des déchets plastiques est une stratégie visant à réduire leur impact environnemental en les réutilisant dans la fabrication de nouveaux produits.

II.5.9.3.1 Consommation des plastiques en Algérie:

Selon les chiffres du Centre National de l'Informatique et des Statistiques (CNIS), l'Algérie a importé près de 2,03 milliards de dollars d'intrants pour l'industrie de plastique en 2017, contre 1.9 milliards de dollars en 2016 et 1.7 milliards en 2015 [40,41].

En termes de consommation de cette matière, une augmentation de 11% par an a été enregistrée durant ces dix dernières années, passant d'un usage de 10 kg par habitant en 2007 à 23kg en 2017, avec une estimation de 25.8 kg en 2020, 60% de cette consommation est consacrée aux emballages, 20% au secteur du bâtiment et de la construction et le reste à d'autres industries. La figure II-6 illustre l'évolution de la consommation de plastique en Algérie, exprimée en kilogrammes par habitant, pour les années 2007, 2017 et 2020.

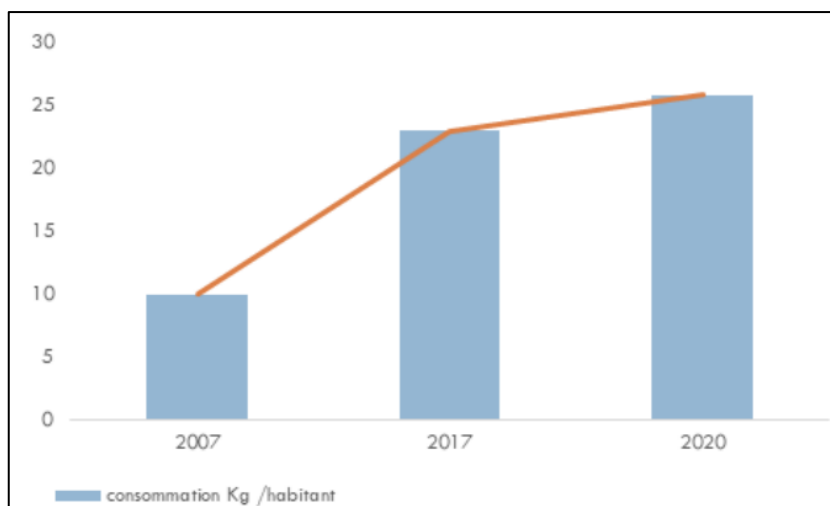


Figure II-6 L'augmentation de la consommation du plastique en Algérie à partir de 2007 à 2020 [40].

II.5.9.3.2 Polyéthylène téréphtalate PET

Le PET est un polymère de synthèse résultant de la polycondensation de l'éthylène glycol avec l'acide téréphtalique. En tant que thermoplastique, il peut être fondu et moulé à plusieurs reprises sans subir de dégradation significative de ses propriétés. Le PET est couramment utilisé dans l'industrie pour la fabrication de bouteilles, de flacons, de pots, de films, de feuilles et de fibres textiles. En raison de sa recyclabilité à 100%, ce qui en fait le matériau le plus récupéré et recyclé en raison de son utilisation généralisée, le PET est considéré comme respectueux de l'environnement par rapport à certains autres plastiques [40]. En Algérie, 60% de la consommation de plastique est dédiée aux emballages [40].

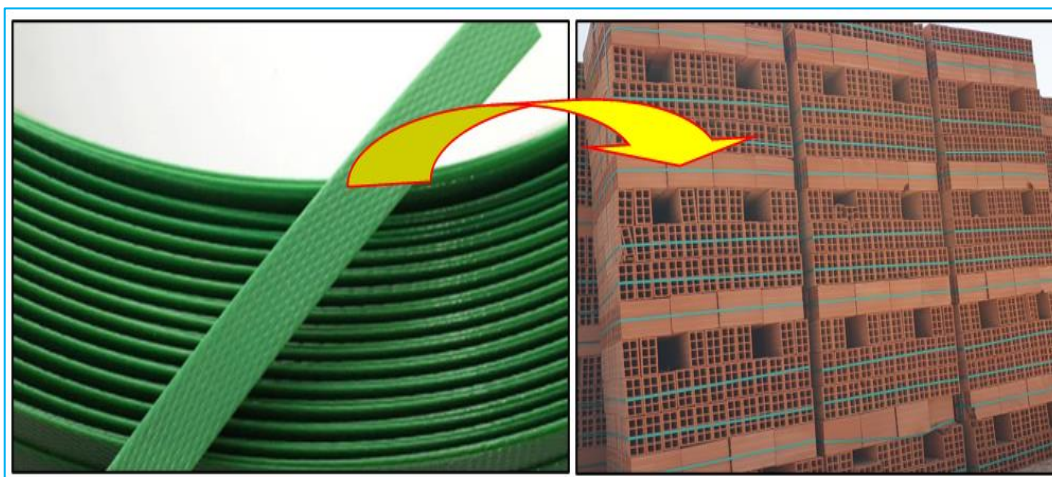


Figure II-7 Ceinture plastique de cerclage PET.

La ceinture d'emballage en plastique Figure II-7 est actuellement le nouveau matériau d'emballage écologique le plus populaire qui remplace les sangles en acier, les fils d'acier et les cerclages en PP dans le monde. Par rapport aux ceintures d'emballage ordinaires, les ceintures d'emballage en plastique sont plus économiques, pratiques à utiliser, respectueuses de l'environnement et sûres, et sont préférées par de plus en plus de clients.

La qualité de la ceinture de cerclage en polyester n'est pas affectée par les rayons ultraviolets. Contrairement aux bracelets en acier, il est beaucoup moins cher et plus sûr à utiliser car il n'a pas d'arêtes vives. Compte tenu des faits ci-dessus, le feuillard en polyester est devenu le meilleur substitut possible à l'acier. Le feuillard PET peut être utilisé pour les machines manuelles, à batterie ou automatiques. Il est disponible dans la largeur de 9-27 mm et de 0,5 à 1,27 mm d'épaisseur. Le bracelet PET varie en fonction de sa surface. La surface en relief est celle qui est standard et la courroie lisse est recommandée pour les tâches plus lourdes car la résistance à la traction est plus élevée.

Après le recyclage de ce type de plastique, les fibres plastiques courtes jouent un rôle particulièrement important dans la limitation de la fissuration et la prévention de sa propagation [1,42–44]. Ces fibres plastiques courtes apportent une résistance significative et contribuent à prévenir les fissures [42,43,45]. Récemment, la plupart des recherches se sont concentrées sur l'utilisation de fibres plastiques recyclées comme renfort secondaire dans le béton, en raison de leur réputation en tant que matériau non biodégradable, nécessitant potentiellement moins de purification et de séparation que les plastiques recyclés utilisés dans d'autres applications [42,46].

Afin d'évaluer l'évolution de la composition des déchets ménagers et assimilés (DMA) et de déterminer la possibilité de leur valorisation, l'Agence Nationale des Déchets (AND) a réalisé une campagne nationale de caractérisation entre avril 2018 et mars 2019. Le constat est saisissant (Figure II-8, voir annexe 1) : entre 80 et 85% des déchets trouvés sur les plages comprennent principalement des matières plastiques, et cela s'ajoute à ce que l'on trouve dans les zones résidentielles, telles que les ceintures de matériaux lourds de construction, et d'autres articles similaires.

Le plastique, une diversité de matériaux économiques en ressources, représente une alternative économique et polyvalente. Cependant, la gestion en fin de vie du plastique est perçue comme une menace significative pour la durabilité environnementale. Le recyclage des déchets plastiques a gagné en importance ces dernières décennies pour atténuer les défis liés à l'élimination. Dans cette optique, l'industrie du béton propose une alternative viable, générant des avantages tant sur le plan économique qu'écologique [47].

II.6 Collecte des déchets:

La collecte des déchets est un processus essentiel dans la gestion des déchets. Elle implique la collecte régulière des déchets solides générés par les ménages, les entreprises et d'autres sources. Ce processus peut être effectué par des services municipaux, des entreprises de collecte des déchets ou d'autres organismes spécialisés. L'objectif principal de la collecte des déchets est de transporter les déchets depuis leur lieu de génération jusqu'aux installations de traitement appropriées, telles que les centres de recyclage, les décharges sanitaires ou d'autres sites de gestion des déchets. La collecte des déchets contribue à prévenir la pollution de l'environnement et à promouvoir des pratiques durables de gestion des déchets.

II.7 Impacts du recyclage sur l'écosystème et le secteur industriel

Le recyclage exerce des impacts significatifs tant sur l'environnement que sur l'industrie. Sur

le plan environnemental, le recyclage contribue de manière positive à la réduction des déchets solides, limitant ainsi la nécessité d'incinération ou d'enfouissement, deux méthodes souvent préjudiciables à l'écosystème. En favorisant la réutilisation des matériaux, le recyclage permet également de préserver les ressources naturelles et de limiter l'exploitation excessive des matières premières.

Par ailleurs, le recyclage contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en comparaison avec la production de nouveaux matériaux, car il nécessite souvent moins d'énergie. Cela a un impact positif sur la lutte contre le changement climatique.

Du point de vue industriel, le recyclage peut générer de nouvelles opportunités économiques en favorisant le développement d'une économie circulaire. Les entreprises spécialisées dans le recyclage peuvent créer des emplois tout en répondant à la demande croissante de matériaux recyclés. De plus, l'utilisation de matériaux recyclés peut souvent être plus rentable que l'utilisation de matériaux vierges, ce qui encourage les entreprises à adopter des pratiques plus durables.

En résumé, le recyclage constitue une stratégie essentielle pour minimiser les impacts néfastes de la production et de la gestion des déchets sur l'environnement, tout en offrant des opportunités économiques aux industries engagées dans des pratiques durables.

II.8 Conclusion

La synthèse bibliographique sur les déchets offre un aperçu approfondi et éclairant sur les divers aspects de ce domaine crucial. À travers l'examen de multiples sources, il est clair que la gestion des déchets est un enjeu mondial majeur, présentant des défis environnementaux, économiques et sociaux significatifs. Les études consultées mettent en évidence la croissance rapide des volumes de déchets, en particulier les matériaux de construction tel que, béton démolé, plastiques ...etc, et soulignent l'importance cruciale de mettre en place des stratégies durables et efficaces pour faire face à cette problématique.

La compréhension des différentes approches de gestion des déchets, allant de la réduction à la source au recyclage et à l'élimination responsable, offre des perspectives sur les meilleures pratiques à adopter. Les implications de la pollution plastique, les défis liés à la mise en œuvre de systèmes de recyclage efficaces, et l'importance croissante de l'économie circulaire sont autant de points saillants mis en évidence par la synthèse.

Par ailleurs, il est essentiel de noter que la synthèse souligne l'importance des innovations technologiques, des politiques gouvernementales, et de la sensibilisation du public dans la transition vers une gestion des déchets plus durable. La collaboration entre les gouvernements, les entreprises et la société civile apparaît comme un élément clé pour relever ces défis complexes.

En conclusion, la synthèse bibliographique souligne l'urgence d'adopter des approches holistiques et collaboratives pour faire face à la crise des déchets. Cela nécessite une action concertée au niveau local, national et international pour promouvoir une gestion des déchets plus responsable et contribuer à la préservation de notre planète pour les générations futures.

Références bibliographiques

- [1] A. Boucedra, M. Bederina, Y. Ghernouti. "Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates". *Construction Building Materiles* 2020;256:119447. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [2] Nadjoua B. "granulats recycles de substitution pour betons hydrauliques". 2017.
- [3] ND Oikonomou. Recycled concrete aggregates. *Cement Concrete Composite* 2005;27:315–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>.
- [4] Cite Internet A focus. <https://www.algerie-focus.com/la-valeur-marchande-des-dechets-en-algerie-atteint-207-milliards-de-dinars-en-2023/> 2023.
- [5] Z. Shi. "Green manufacturing of silicate materials using desert sand as a raw material resource". *Construction Building Materiles* 2022;338:127539. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127539>.
- [6] M. Zhang, X Zhu, J Shi, B Liu, Z He, C Liang. "Utilization of desert sand in the production of sustainable cement-based materials A critical review". *Construction Building Materiles* 2022;327:127014. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127014>.
- [7] G Pastore, T Baird, P Vermeesch, A Resentini, E Garzanti. "Provenance and recycling of Sahara Desert sand". *Earth Science Rev* 2021;216:103606. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103606>.
- [8] A. Aidoud, M Bencheikh, N Khaldi, IMA Herga. "Mortar Based on Dune Sand and Substitute Wood Sawdust: Physico Mechanical Characterization and Relationship Between Properties in Young Age". *Ann Chim Sci Des Mater* 2021;45:447–53. <https://doi.org/10.18280/acsm.450603>.
- [9] Guettala S, Mezghiche B. Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Construction Building Materiles* 2011;25:1263–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.026>.
- [10] Y Abadou, R Mitiche-Kettab, A Ghrieb. "Ceramic waste influence on dune sand mortar performance". *Construction Building Materiles* 2016;125:703–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.083>.
- [11] Abu Seif ESS, Sonbul AR. "Geotechnical performance of sandy bricks made with fine aggregates of sand dunes, Saudi Arabia". *Arabian Journal of Geosciences* 2019;12. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4345-9>.
- [12] Pastore G, Baird T, Vermeesch P, Resentini A, Garzanti E, Ren QX, et al. "Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates". *Construction Building Materiles* 2020;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119447>.
- [13] T Cheboub, Y Senhadji, H Khelafi, G Escadeillas. "Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self-compacting lightweight mortar containing olive kernel shells as aggregate". *Journal of Cleaner Production* 2020;249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119406>.
- [14] T Djedid, M Mani, A Ouakouak, A Guettala. "Effect of varying silica limestone sand fines on the physical-mechanical performance of concrete". *Frat Ed Integrita Strutt* 2022;16:580–91. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.38>.
- [15] T Djedid, M Mani, A Guettala, A Hima. "Analysis of workability, mechanical strength and durability by the FT-IR method of concrete based on silica-limestone sand preserved in aggressive environments". *Frat Ed Integrita Strutt* 2021;15:566–79. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.59.37>.
- [16] Aidoud A, Bencheick M, Boukour S. "Valuation of Rubber Waste and Dune Sand:

- Mortar for Construction and Environmental Protection". *Materiles Geoenvironment* 2022;0:1–11. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2021-0007>.
- [17] Penacho P, De Brito J, Rosário Veiga M. "Physico-mechanical and performance characterization of mortar incorporating fine glass waste aggregate". *Cement Concrete Composite* 2014;50:47–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.007>.
- [18] Salgado F. de Andrade, Silva F. de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste to wards an application on structural concrete: A review". *J Build Eng* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [19] J Xie, W Chen, J Wang, C Fang, B Zhang, F Liu. "Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete". *Construction Building Materiles* 2019;226:345–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>.
- [20] A Mistri, SK Bhattacharyya, N Dhami, A Mukherjee, S V. Barai, "A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials". *Construction Building Materiles* 2020;233:117894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>.
- [21] S Kotwal, H Singh, R Kumar. "Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates". *Materials Today: Proceedings* 2021;48:1032–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.436>.
- [22] A Hammoudi, K Moussaceb, C Belebchouche, F Dahmoune. "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates". *Construction Building Materiles* 2019;209:425–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>.
- [23] L Ferreira, J De Brito, M Barra. "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties". *MagazineConcreteResearch* 2011;63:617–27. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>.
- [24] M Quebaud. "Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats". Université d'Artois, France. 250p., 1996.
- [25] B Elhadj . "Durabilité des bétons à base du sable de démolition et ajouts minéraux actifs". Thèse Univ. Biskra Dr2019.
- [26] B Krobba, M Bouhicha, S Kenai, L Courard. "Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and Stipa tenacissima microfibers plant". *Construction Building Materiles* 2018;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>.
- [27] Li L, Zhan BJ, Lu J, Poon CS. "Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars". *Construction Building Materiles*;209:147–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.044>.
- [28] Kachouh N, El-Hassan H, El-Maaddawy T. "Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand". *Construction Building Materiles* 2019;213:348–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.087>.
- [29] Meftah N, Mahboub MS. "Spectroscopic Characterizations of Sand Dunes Minerals of El-Oued (Northeast Algerian Sahara) by FTIR, XRF and XRD Analyses". *Silicon* 2020;12:147–53. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00109-5>.
- [30] Liu Y, Li Y, Jiang G. "Orthogonal experiment on performance of mortar made with dune sand". *Construction Building Materiles* 2020;264:120254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120254>.
- [31] Belferra A, Kriker A, Abboudi S, Bi ST. "Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates.

- Journal Cleaner Producted 2016;112:3048–56.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.007>.
- [32] S Jesus, C Maia, C Brazão Farinha, J de Brito, R Veiga. "Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste". *Construction Building Materiles* 2019;229:116844.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844>.
- [33] G Calcado, L Alves, E Vazquez, RD Toledo Filho. "Construction and demolition waste aggregates: Analysis of the physical and mechanical properties of mortars". *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2019;652. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/652/1/012016>.
- [34] SW Tabsh, AS bdelfatah. "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Construction Building Materiles* 2009;23:1163–7.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>.
- [35] AEB Cabral, V Schalch, DCCD Molin, JLD Ribeiro. "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete". *Construction Building Materiles* 2010;24:421–30.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>.
- [36] Salgado F de Andrade, Silva F de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste to wards an application on structural concrete: A review". *Journal Building Engineering* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104452>.
- [37] R V. Silva, J De Brito, RK Dhir. "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production". *Construction Building Materiles* 2014;65:201–17.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- [38] MS de Juan, PA Gutiérrez. "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate". *Construction Building Materiles* 2009;23:872–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>.
- [39] AK Padmini, K Ramamurthy, MS Mathews. "Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete". *Construction Building Materiles* 2009;23:829–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>.
- [40] ONA. Agence Nationale des dechetes 2020:23. <https://and.dz/site/wp-content/uploads/Rapport Plastique.pdf>.
- [41] CNIS. Centre National de l'Informatique et des Statistiques. <https://www.cnis.fr/> 2020. <https://www.cnis.fr/>.
- [42] BS Al-Tulaian, MJ Al-Shannag, AM Al-Hozaimy. "Recycled plastic fibers for minimizing plastic shrinkage cracking of cement based mortar". *International Journal of Civil Engineering and Architecture* 2014;8:10–6.
- [43] BS Al-Tulaian, MJ Al-Shannag, AR Al-Hozaimy. "Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar". *Construction Building Materiles* 2016;127:102–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.
- [44] Oliveira LA Pereira De, JP Castro-Gomes. "Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar". *Construction Building Materiles* 2011;25:1712–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [45] SB Kim, NH Yi, HY Kim, JHJ Kim, YC Song. "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete". *Cement Concrete Composite* 2010;32:232–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>.
- [46] FL Auchey. "The use of recycled polymer fibers as secondary reinforcement in concrete structures". *Journal Construction Education* 1998;3:131–40.
- [47] GV Bhagat, PP Savoikar. "Durability related properties of cement composites containing thermoplastic aggregates – A review". *Journal of Building Engineering* 2022;53:104565. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104565>.

CHAPITRE III :

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1 Introduction

L'utilisation judicieuse des matériaux récupérés en vue de leur réutilisation dans la construction exige une compréhension approfondie de leurs propriétés essentielles. Tels que, les propriétés mécaniques, physiques, chimiques, et minéralogiques, afin d'en savoir davantage sur la manière de les adapter à leur nouvelle utilisation. L'objectif fondamental de cette thèse est d'exploiter de manière optimale la richesse considérable des sables dorés du désert (sable de dune) pour substituer d'autres types de sable couramment utilisés dans la construction, notamment les sables alluviaux. En parallèle, cette recherche s'efforce de contribuer à la transformation des déchets de béton en sable recyclé, ainsi qu'à la valorisation des déchets plastiques pour la production des fibres. Dans l'ensemble, elle vise à aboutir à la création d'un mortier écologiquement durable.

Pour mettre en œuvre notre thèse, nous avons développé un programme pilote dont les principaux points sont présentés ci-dessous.

Dans la première section de ce chapitre, nous aborderons la caractérisation des matériaux de base pour la fabrication du mortier (ciment, sable de dune, sable recyclé, eau de gâchage et les déchets plastiques usagés).

Nous présenterons ensuite, dans une deuxième partie, les procédures et techniques utilisées pour caractériser le mortier d'étude à l'état frais et à l'état durci et certains indicateurs de résistance.

A l'état frais on précisera le consistence (l'étalement), la densité frais et l'air occlus.

A l'état durci : performances mécaniques (résistance à la compression, à la flexion et le déplacement flexionnel, module d'élasticité dynamique), variations de retrait dimensionnel, porosité accessible à l'eau, absorption d'eau par immersion totale et par capillarite, la masse volumique humide et sèche, résistance aux attaques des sulfates.

De plus, les composés seront caractérisés par ATG.

Les essais ont été réalisés dans les laboratoires suivants :

- Laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma-Algérie.
- Labo. de recherche (LGCH) de l'université 8 Mai 1945 Guelma-Algérie.
- Labo. de génie civil (LGC) de l'Université Badji Mokhtar Annaba Algérie.
- Labo. LEVRES, Université Echahid Hamma Lakhdar, El oued- Algérie.
- Labo.de Recherche GPSI Gabes- Tunis.

III.2 Matériaux utilisés

Afin de confectionner les échantillons de l'éco-mortier, nous avons employé du ciment, des granulats (composés de sable provenant des dunes et de sable recyclé), de l'eau, ainsi que des fibres plastiques. Les propriétés de ces échantillons sont exposées dans la suite.

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment gris CEM II/A-L 42.5 R provenant de l'usine « SPA BISKRIA CIMENT » à Biskra Algérie, disponible localement et conformément aux exigences de spécification standard ASTM C 150 [1], et la norme algérienne NA 442-2013 [2] avec une densité absolue de $3,10 \text{ g/cm}^3$, dont les caractéristiques physico-mécaniques ainsi que les compositions chimiques sont présentées dans le tableau III.1. L'analyse de la composition chimique, des propriétés physiques et mécaniques a été autorisée par le laboratoire du fabricant.

Tableau III.1 Récapitulation des caractéristiques de ciment.

| Propriétés chimiques et minéralogiques | | | | | | |
|--|-------|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------------|--------------|
| SO ₃ | MgO | Cl ⁻ | C ₃ S | C ₃ A | Résidu insoluble | Perte au feu |
| 2.5 - 2.9 | < 3.5 | < 0.08 | 60 - 65 | 6 - 10 | NA | 6 - 8 |
| Caractéristiques physiques | | | | | | |
| Temps de prise (min) | Début | 150 | Propriétés physiques | | Consistance normale (%) | 25.4 - 26 |
| | Fin | 260 | | | Expansion à chaud (mm) | < 1 mm |
| Caractéristiques mécaniques | | | | | | |
| Rc en (MPa) | | | | Valeur à 2 jours | | 23 - 26 |
| | | | | Valeur à 28 jours | | 45 - 50 |

III.2.2 Présentation des granulats utilisés

III.2.2.1 Sable de dune

Le sable de base utilisé est un sable de dune roulé (SD) de couleur dorée et de granulométrie comprise entre 0.063 et 1.25 mm. Il provient de la région d'Oued Souf, de la commune de Bayadha, dans la wilaya d'El-Oued en Algérie, comme le montre la Figure III-1. Ses caractéristiques physiques sont répertoriées dans le Tableau III-2 ci-après.

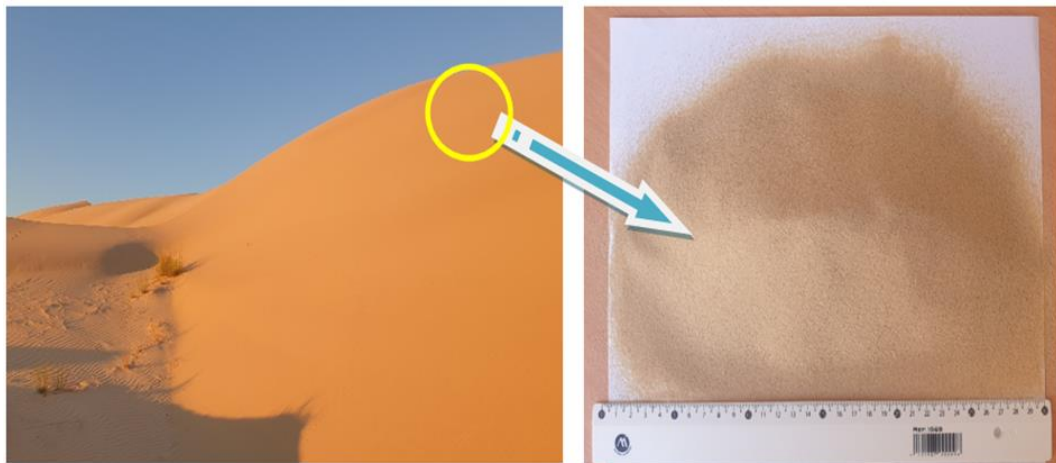


Figure III-1 : Sable de dune

III.2.2.2 Sable recyclé

Le deuxième sable utilisé est un sable recyclé (SR) provenant de béton de démolie, caractérisé par sa forme angulaire. Il a été utilisé comme agrégat de correction dans tous les mélanges de couleur grise et de granulométrie comprise entre 0.063 et 5 mm. Ce sable recyclé a été collecté à partir du concassage mécanique d'éprouvettes écrasées préalablement lors de la réalisation du tunnel d'El-Oued Souf. Cette tâche a été exécutée à l'aide d'un concasseur à mâchoires au sein du LGC de l'Université Badji Mokhtar – Annaba (LGC) puis tamisée à l'aide d'un tamis de 5mm, comme le montre la Figure III-2. Ses propriétés physiques sont résumées dans le Tableau III-2 ci-dessous.

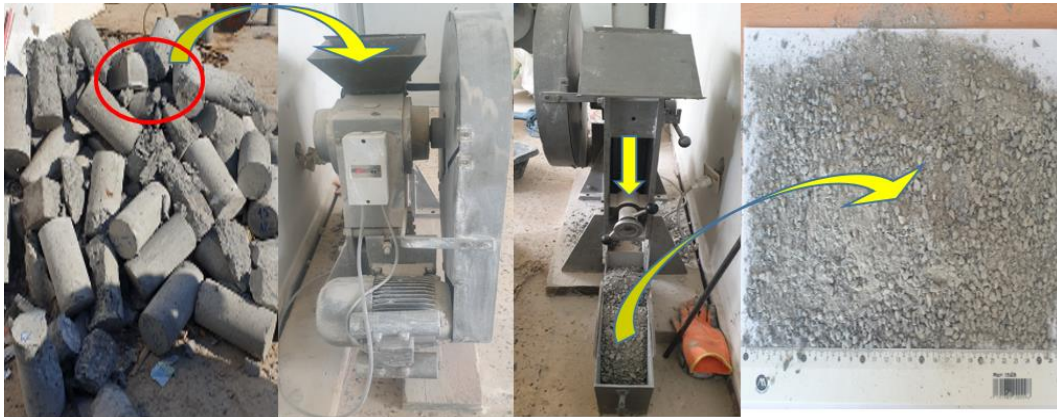


Figure III-2 : Sable recyclé

III.2.3 Fibre plastique (PET)

Les déchets de plastique recyclé ont été prélevés à partir d'une décharge publique, puis soumis à un processus de sciage pour créer des fibres de deux longueurs (l_f) différentes, à savoir 20 mm et 30 mm. Chaque longueur a été coupée en cinq parties longitudinales, présentant une largeur moyenne (da) de 2.44 mm et une épaisseur standard (ts) de 0.85 mm, comme illustré dans la Figure III-3. Les proportions de ces fibres sont détaillées avec un rapport d'aspect (l_f/da) de 8.20 et 12.30, ainsi qu'un rapport (l_f/ts) de 23.53 et 35.3 respectivement. De plus, le rapport largeur/épaisseur (da/ts) s'établit à 2.87 [51,52]. Les propriétés physiques de ces renforts sont synthétisées dans le Tableau III-2 ci-dessous, indiquant une résistance à la traction de 305 N/mm^2 et un module de Young de $210,000 \text{ N/mm}^2$.

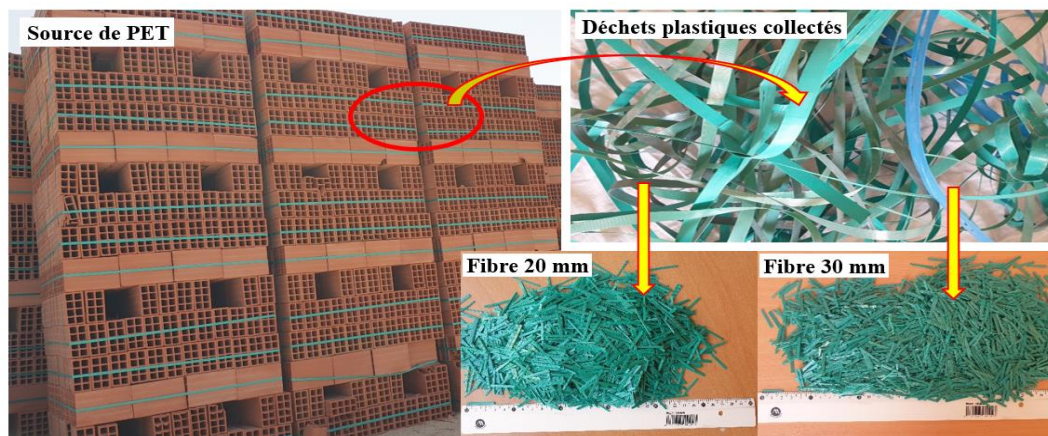


Figure III-3 : Fibre PET

Table III.2 Propriétés physiques des granulats et du fibre plastic utilisé

| Propriétés | Sable de dune | Sable recyclé | Plastic fibre |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Masse volumique absolue (g/cm ³) | 2.63 | 2.38 | 1.38 |
| Masse volumique apparente (g/cm ³) | 1.59 | 1.50 | / |
| Absorption d'eau (%) | 1.20 | 0.53 | 0 |
| Module de finesse | 1.13 | 3.53 | / |
| Coefficient d'uniformité (Cu) | 1.93 | 12.75 | / |
| Coefficient de courbure (Cc) | 0.93 | 1.25 | / |
| Equivalent de sable visuel (%) | 100 | 90.65 | / |
| Equivalent de sable par piston (%) | 98.92 | 88.14 | / |
| Forme | Roulé | Angulaire | prismatique |

III.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage de cette étude est l'eau du robinet du laboratoire de recherche (LGCH) de l'université 8 Mai 1945 Guelma-Algérie, avec un pH proche de 7.

III.3 Caractérisation physique des Matériaux utilisés

III.3.1 Analyse granulométrique

On a employé le tamisage électromécanique par voie sèche pour évaluer la distribution granulométrique du sable de dune et du sable recyclé, conformément à la norme NF EN 933-2 [3]. Les résultats sont récapitulés dans le Tableau III-3 (voir annexe 2).

Pour simplifier la comparaison de la répartition granulaire des sables analysés, leurs courbes granulométriques sont regroupées dans la Figure III-4. Il est notable que le sable de dune possède une proportion de fines plus importante par rapport au sable recyclé, D'après les courbes granulométriques du sable de dune et du sable recyclé avant les ajustements, on constate qu'elles se trouvent en dehors de la plage spécifiée. À chaque substitution du sable recyclé par le sable de dune, la courbe se rapproche graduellement de la zone optimale, aboutissant à une distribution équilibrée lorsque le pourcentage atteint 50/50. Cela permet d'obtenir une courbe bien graduée. De plus, il est à noter que le mélange des deux sables de parts égales conduit à une meilleure qualité du sable (sable préférentiel).

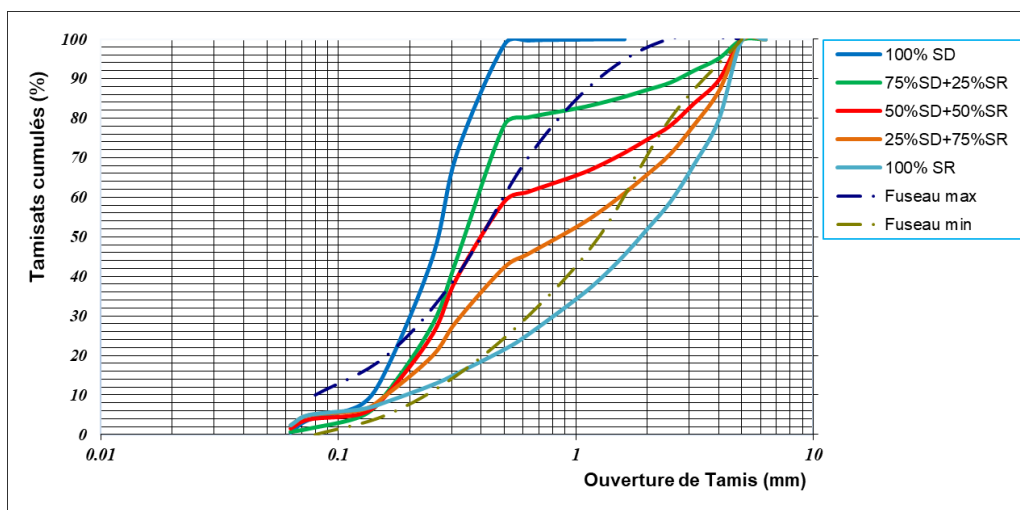


Figure III-4 : Courbes granulométriques du sable de dune, du sable recyclé et des différents mélanges de SD et SR.

III.3.2 Masses volumiques et absorption d'eau

Les masses volumiques absolues (ρ_{abs}) et apparentes (ρ_{app}) des granulats ont été établies en accord avec les directives des normes NF P18-555 [4] et NF EN 1097-6 [5] (Figure III-5). La méthode d'essai d'absorption d'eau sur le sable peut varier en fonction des normes ou des protocoles spécifiques utilisés. Pour commencer, sélectionnez un échantillon représentatif de sable, puis séchez le au four à une température de 110 °C jusqu'à obtenir un poids constant. Notez le poids initial (P1) du sable sec. Laissez l'échantillon refroidir à la température ambiante, puis tamisez le sable pour obtenir une granulométrie uniforme. Immergez complètement l'échantillon de sable dans de l'eau pendant 24 heures. Retirez délicatement l'échantillon de l'eau, en veillant à éliminer l'excès d'eau de la surface. Pesez immédiatement l'échantillon mouillé et notez le poids final (P2) du sable saturé. Enfin, calculez l'absorption d'eau en utilisant la formule suivante :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = [(P2 - P1) / P1] \times 100 \quad (1)$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-2 ci-dessus.

III.3.3 Equivalant de sable et module de finesse

Pour évaluer la qualité des granulats utilisés, nous avons effectué l'essai de l'équivalent de sable (E_s) des particules de taille 0/5 mm conformément à la norme NF P 18-598 [6] (voir Figure III-5). L'équivalent de sable est un paramètre qui caractérise la propreté d'un sable, en indiquant la présence de particules fines, principalement d'origine argileuse, végétale ou organique à la surface des grains.

Un autre paramètre lié à la granulométrie des granulats de taille inférieure à 0.16 mm est le module de finesse (M_f). Ce paramètre est d'autant plus bas que le granulat contient une proportion élevée d'éléments fins. Il a été calculé selon l'équation (1) suivante, conformément aux normes NF P 18-545, NF P 18-560 et NF EN 12620 [7].

$$Mf = \frac{1}{100} \sum Refus_{cumulé}(\%) \text{ des tamis } \{0, 16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\} \quad (1)$$



Figure III-5 : Mesure de la masse volumique des granulats, l'équivalent de sable et tamisage mécanique des granulats.

III.4 Étude minéralogique

III.4.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Les modèles de diffraction des rayons X (DRX) des sables de dune et recyclé utilisés dans cette étude sont illustrés dans la Figure III.6. Le sable des dunes (SD) se compose principalement de deux composants : le quartz α (SiO_2) et la calcite (CaCO_3), présents sous forme de phases cristallines carbonatées, comme indiqué dans les fiches PDF (#00-046-1045) et (#47-1743) respectivement [8]. En revanche, les modèles DRX du sable recyclé (SR) révèlent la présence de diverses phases cristallines, notamment le quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ainsi que le feldspath (albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et sanidine (KAlSi_3O_8)) [8,9]. De plus, conformément à la fiche PDF (fiche JCPDS n° 04-0733) [10], on observe des traces de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) résultant de l'hydratation du ciment. La plupart de ces phases minérales, présentes dans les deux types de sable, ont été identifiées précédemment grâce à des recherches antérieures [11–13].

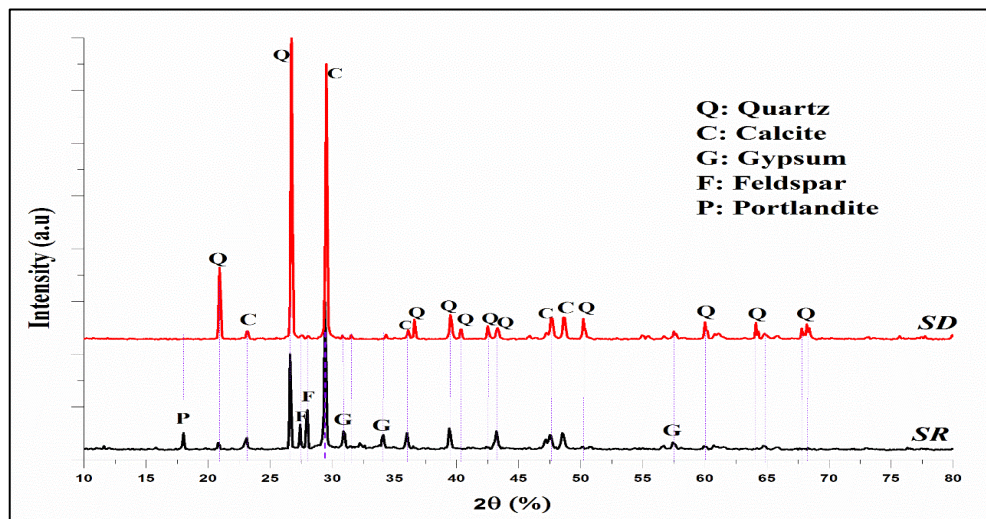


Figure III-6 : Diagrammes de diffraction des rayons X du SD et SR.

III.4.2 Analyse infrarouge par transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été employée pour analyser la composition chimique des matériaux géologiques, fournissant des informations détaillées sur la structure moléculaire des composés organiques et inorganiques. Les spectres FTIR du sable des dunes et du sable recyclé sont présentés dans la Figure III-7. Comme on peut l'observer, les deux types de sable présentent des spectres similaires, avec seulement des légères variations d'intensité dans les bandes. Une faible bande d'absorption à 2929 cm^{-1} , attribuée aux vibrations de liaison C-H, met en évidence la présence de matière organique dans les deux échantillons [14]. Les bandes d'absorption à 1028 et 771 cm^{-1} correspondent respectivement aux vibrations d'étirement symétriques et asymétriques du Si-O, confirmant ainsi la présence de quartz dans le sable des dunes et le sable recyclé [8,15].

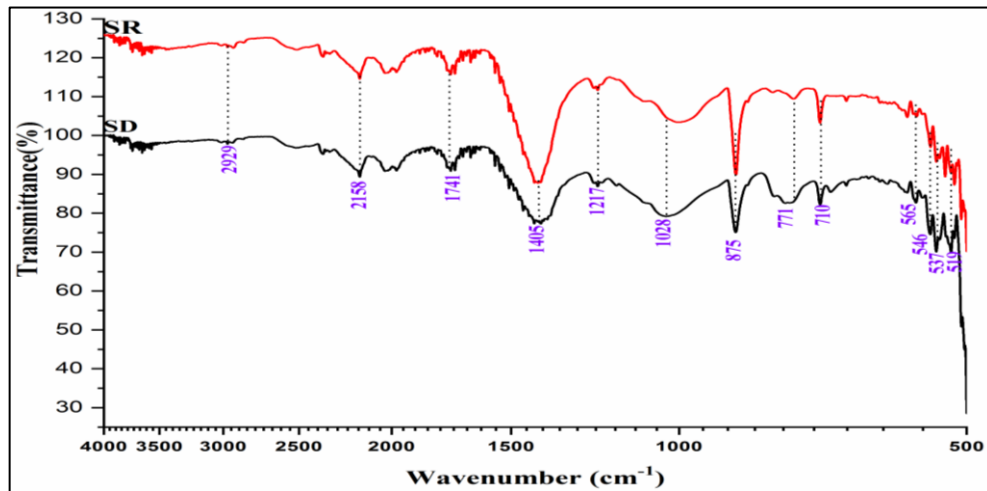


Figure III-7 : Analyse infrarouge par transformée de Fourier du SD et SR.

Les bandes d'absorption infrarouge à 565 et 519 cm^{-1} ont été identifiées respectivement comme résultant des vibrations de flexion Si-O-Al et Si-O-Si, ce qui peut être associé au minéral Albite [16]. Une bande d'absorption marquée, située à environ 1405 cm^{-1} , est attribuée à l'étirement symétrique du groupe $(\text{CO}_2)^{-3}$, tandis que les bandes nettes observées à 875 cm^{-1} et 710 cm^{-1} correspondent à la vibration d'étirement hors du plan du groupe $(\text{CO}_2)^{-3}$ [17]. Ces bandes d'absorption sont des caractéristiques distinctives du minéral calcite CaCO_3 .

III.4.3 Analyse par MEB

Les figures III-8a, 8b et 8c présentent respectivement des micrographies à un grossissement de x50 du sable des dunes et du sable recyclé, offrant une claire visualisation des différentes tailles et formes des particules. Ces distinctions résultent de leurs origines distinctes et de leur histoire de transformation. Le sable des dunes se caractérise par une distribution granulométrique relativement uniforme, composée de grains bien triés et de tailles approximativement égales. De plus, les particules de sable des dunes affichent une forme bien arrondie et une surface plus lisse, conséquence des processus naturels d'érosion et de transport sur de longues périodes.

En revanche, le sable recyclé, tel qu'illustré dans les figures III-8b et 8c, présente une texture de surface plus rugueuse par rapport au sable des dunes. Cette rugosité est principalement attribuable à la composition du sable recyclé, qui provient de matériaux concassés ou traités, tels que du béton fragmenté, de l'asphalte, ou d'autres déchets de construction [18]. Le sable recyclé présente une distribution granulométrique plus variée en raison des variations des matériaux d'origine utilisés lors du processus de recyclage. De plus, les particules de sable recyclé peuvent adopter des formes plus angulaires ou irrégulières en raison des opérations de concassage et de traitement utilisées lors de leur production.

Par ailleurs, la figure III-8b révèle la présence de contaminants de surface dans le sable recyclé, absents du sable des dunes. Ces contaminants peuvent inclure des résidus de matériaux cimentaires, des matières organiques ou d'autres particules issues des matériaux de construction d'origine. En outre, en raison de ses particules angulaires et d'une plus grande variété de tailles, le sable recyclé affiche une porosité de surface supérieure à celle du sable des dunes.

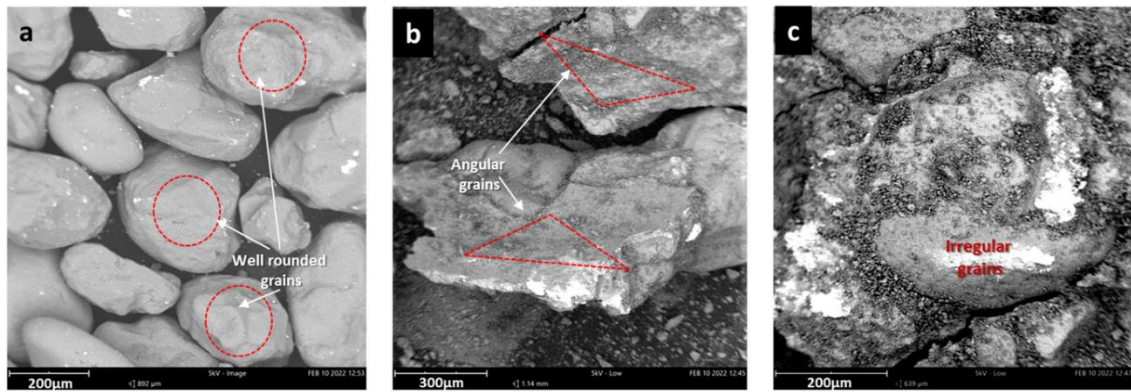


Figure III-8 : Images MEB de, (a) sable de dune et (b, c) sable recyclé.

III.5 Méthodes d'essais

Après avoir effectué la caractérisation des matières premières, cette section se concentre sur les diverses techniques de mesure employées pour caractériser les éco-mortiers la fois à l'état frais et à l'état durci. Les propriétés rhéologiques, mécaniques et thermo-physiques de ces matériaux à matrice cimentaire sont fortement influencées par leurs différents constituants, et cette influence dépend de la forme et de la nature de ces constituants. Afin de sélectionner les compositions de mortier qui seront étudiées pour leurs caractéristiques physico-mécaniques et leur durabilité, nous avons élaboré une composition de référence (sans fibre plastique) en nous basant sur des critères mécaniques.

III.5.1 Formulation et fabrication des éprouvettes d'essai

Initialement, une étude préliminaire a été réalisée sur la composition d'échantillons témoins pour l'une des formules du plan expérimental, à savoir la formule $C = 450$ g, $DS = 100\%$, dans le but d'obtenir un mortier plastique avec des valeurs d'étalement comprises entre 140 et 200 mm. Après plusieurs essais, les ratios liant/granulats (C/S) et eau/ciment (E/C) ont été déterminés pour tous les mélanges à respectivement 1:3 et 0,6, en tenant compte de la masse volumétrique des solides dans le cas des ratios de remplacement. Deuxièmes, l'objectif est de remplacer le sable des dunes par un autre produit de recyclage du béton afin de produire un mortier écologique et durable. Ce remplacement en volume s'effectue dans les proportions suivantes : 0%, 25%, 50%, 75% et 100% de sable recyclé.

Le tableau III-4, montrent les détails des codifications des échantillons qui ont été élaborés et le nombre utilisé pour déterminer les propriétés physico-mécaniques. Les compositions des mortiers et les taux de substitution de sable de dune (SD) par le sable recyclé (SR) pour les échantillons de contrôle, les échantillons avec les fibres plastiques recyclées (RPF) de 20 mm et de 30 mm de longueur et la fraction de fibre ont été préparées conformément au plan d'expérience. La formulation du mortier de référence est composée d'une portion de ciment pour trois portions de sable en masse, dans laquelle les fibres en termes de pourcentage et de long sont incorporés en différentes quantités.

Un mélangeur électromécanique rotatif planétaire d'une capacité de 5 litres, équipé d'une palette à deux vitesses (lente et rapide), a été employé lors de cette enquête. Cette procédure a eu un impact significatif sur le résultat final du produit. En ce qui concerne les mélanges de mortier, le processus de mélange suivi est conforme à la norme EN 196-1 [19], en observant rigoureusement l'ordre suivant :

- Introduction des deux types de sable, et ajout du ciment dans le malaxeur du laboratoire. Ensuite ont été ajoutés les fibres pendant le malaxage de chaque fraction pour assurer une distribution aléatoirement des fibres dans le mélange.
- Mise en marche du malaxeur à petite vitesse pendant la 1^{ère} min, en mélangeant à sec afin de permettre aux particules de SD et SR une meilleure dispersion et l'obtention d'un mélange homogène, y compris les fibres.
- Introduire régulièrement l'eau et poursuivre le malaxage pendant 2mn.

La vérification de la conformité de la consistance, définie par les valeurs d'étalement mesurées entre 140 et 200 mm, qui traduisent la plasticité du mortier, a été effectuée pour l'ensemble des mélanges en se conformant à la norme européenne EN 1015-6 [20] grâce à l'essai de la table à secousses.

Des mélanges de mortier ont été élaborés en utilisant du sable de dune abandonné, en substitution volumique du sable recyclé, à des taux de 0, 25, 50, 75 et 100%, tout en incorporant des déchets plastiques de type polyéthylène téréphtalate (PET). De plus, des fibres ont été ajoutées aux mélanges à des concentrations de 0, 0.5, 1, 1.5 et 2% (comme indiqué dans le Tableau III-4). Il convient de noter que des mélanges contenant des sables recyclés et des fibres plastiques ont également été préparés dans le but d'évaluer les effets de leur remplacement.

Les mortiers étudiés ont été désignés par Mx/y/z désignent le mortier étudié. x, y et z sont les taux variables de sable recyclé et le fibre (en %) et longueur de fibre (en mm) respectivement. C'est à dire M_{0/0.5/20} mortier de 100% sable de dune et 0.5% taux de fibre de longueur 20 mm. Pour plus de détaillé voir le tableau III-4.

Table III.4 Les différents formulation des mortiers étudiés.

| N° Ordre | Code de mortier | Ciment (g) | Sable de dune (g) | Sable recyclé (g) | Taux PF (%) | PF (g) | Eau (g) | Total | Volume (dm ³) |
|----------|-------------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------|--------|---------|---------|---------------------------|
| 1 | M _{0/0} | 450 | 1350 | 0 | 0 | 0 | 270 | 2070 | 1.000 |
| 2 | M _{25/0} | 450 | 1012.5 | 305,42 | 0 | 0 | 270 | 2037,92 | 1.012 |
| 3 | M _{50/0} | 450 | 675 | 610,84 | 0 | 0 | 270 | 2005,84 | 1.023 |
| 4 | M _{75/0} | 450 | 337.5 | 916,25 | 0 | 0 | 270 | 1973,75 | 1.035 |
| 5 | M _{100/0} | 450 | 0 | 1221,67 | 0 | 0 | 270 | 1941,67 | 1.046 |
| 6 | M _{0/0.5/20} | 450 | 1350 | 0 | 0.5 | 2,25 | 270 | 2072,25 | 1.003 |
| 7 | M _{25/0.5/20} | 450 | 1012.5 | 305,42 | 0.5 | 2,25 | 270 | 2040,17 | 1.015 |
| 8 | M _{50/0.5/20} | 450 | 67 | 610,84 | 0.5 | 2,25 | 270 | 2008,09 | 1.026 |
| 9 | M _{75/0.5/20} | 450 | 337.5 | 916,25 | 0.5 | 2,25 | 270 | 1976,00 | 1.038 |
| 10 | M _{100/0.5/20} | 450 | 0 | 1221,67 | 0.5 | 2,25 | 270 | 1943,92 | 1.049 |
| 11 | M _{0/1/20} | 450 | 1350 | 0 | 1 | 4,5 | 270 | 2074,50 | 1.007 |
| 12 | M _{25/1/20} | 450 | 1012.5 | 305,42 | 1 | 4,5 | 270 | 2042,42 | 1.019 |
| 13 | M _{50/1/20} | 450 | 67 | 610,84 | 1 | 4,5 | 270 | 2010,34 | 1.030 |
| 14 | M _{75/1/20} | 450 | 337.5 | 916,25 | 1 | 4,5 | 270 | 1978,25 | 1.042 |
| 15 | M _{100/1/20} | 450 | 0 | 1221,67 | 1 | 4,5 | 270 | 1946,17 | 1.053 |
| 16 | M _{0/1.5/20} | 450 | 1350 | 0 | 1.5 | 6,75 | 270 | 2076,75 | 1.011 |
| 17 | M _{25/1.5/20} | 450 | 1012.5 | 305,42 | 1.5 | 6,75 | 270 | 2044,67 | 1.023 |
| 18 | M _{50/1.5/20} | 450 | 675 | 610,84 | 1.5 | 6,75 | 270 | 2012,59 | 1.034 |
| 19 | M _{75/1.5/20} | 450 | 337.5 | 916,25 | 1.5 | 6,75 | 270 | 1980,50 | 1.046 |
| 20 | M _{100/1.5/20} | 450 | 0 | 1221,67 | 1.5 | 6,75 | 270 | 1948,42 | 1.057 |
| 21 | M _{0/2/20} | 450 | 1350 | 0 | 2 | 9 | 270 | 2079,00 | 1.015 |
| 22 | M _{25/2/20} | 450 | 1012.5 | 305,42 | 2 | 9 | 270 | 2046,92 | 1.027 |
| 23 | M _{50/2/20} | 450 | 675 | 610,84 | 2 | 9 | 270 | 2014,84 | 1.038 |
| 24 | M _{75/2/20} | 450 | 337.5 | 916,25 | 2 | 9 | 270 | 1982,75 | 1.050 |

| | | | | | | | | | |
|----|-------------------------|-----|--------|---------|-----|------|-----|---------|-------|
| 25 | M _{100/2/20} | 450 | 0 | 1221.67 | 2 | 9 | 270 | 1950.67 | 1.061 |
| 26 | M _{0/0.5/30} | 450 | 1350 | 0 | 0,5 | 2.25 | 270 | 2072.25 | 1.003 |
| 27 | M _{25/0.5/30} | 450 | 1012.5 | 305.42 | 0,5 | 2.25 | 270 | 2040.17 | 1.015 |
| 28 | M _{50/0.5/30} | 450 | 675 | 610.84 | 0,5 | 2.25 | 270 | 2008.09 | 1.026 |
| 29 | M _{75/0.5/30} | 450 | 337.5 | 916.25 | 0,5 | 2.25 | 270 | 1976.00 | 1.038 |
| 30 | M _{100/0.5/30} | 450 | 0 | 1221.67 | 0,5 | 2.25 | 270 | 1943.92 | 1.049 |
| 31 | M _{0/1/30} | 450 | 1350 | 0 | 1 | 4.5 | 270 | 2074.50 | 1.007 |
| 32 | M _{25/1/30} | 450 | 1012.5 | 305.42 | 1 | 4.5 | 270 | 2042.42 | 1.019 |
| 33 | M _{50/1/30} | 450 | 675 | 610.84 | 1 | 4.5 | 270 | 2010.34 | 1.030 |
| 34 | M _{75/1/30} | 450 | 337.5 | 916.25 | 1 | 4.5 | 270 | 1978.25 | 1.042 |
| 35 | M _{100/1/30} | 450 | 0 | 1221.67 | 1 | 4.5 | 270 | 1946.17 | 1.053 |
| 36 | M _{0/1.5/30} | 450 | 1350 | 0 | 1,5 | 6.75 | 270 | 2076.75 | 1.011 |
| 37 | M _{25/1.5/30} | 450 | 1012.5 | 305.42 | 1,5 | 6.75 | 270 | 2044.67 | 1.023 |
| 38 | M _{50/1.5/30} | 450 | 675 | 610.84 | 1,5 | 6.75 | 270 | 2012.59 | 1.034 |
| 39 | M _{75/1.5/30} | 450 | 337.5 | 916.25 | 1,5 | 6.75 | 270 | 1980.50 | 1.046 |
| 40 | M _{100/1.5/30} | 450 | 0 | 1221.67 | 1,5 | 6.75 | 270 | 1948.42 | 1.057 |
| 41 | M _{0/2/30} | 450 | 1350 | 0 | 2 | 9 | 270 | 2079.00 | 1.015 |
| 42 | M _{25/2/30} | 450 | 1012.5 | 305.42 | 2 | 9 | 270 | 2046.92 | 1.027 |
| 43 | M _{50/2/30} | 450 | 675 | 610.84 | 2 | 9 | 270 | 2014.84 | 1.038 |
| 44 | M _{75/2/30} | 450 | 337.5 | 916.25 | 2 | 9 | 270 | 1982.75 | 1.050 |
| 45 | M _{100/2/30} | 450 | 0 | 1221.67 | 2 | 9 | 270 | 1950.67 | 1.061 |

Nomenclature : M_{x/y/z} : M, Spécimen de mortier. x, %SR. y, % PF et z, longueur de fibre.

III.5.2 Préparation des échantillons d'essai

Les expérimentations sont menées en utilisant des échantillons prismatiques de dimensions (4×4×16) cm³.

Après avoir terminé le processus de malaxage pour chaque formulation, nous avons procédé immédiatement à la réalisation des essais de caractérisation à l'état frais, à savoir l'étalement, l'air occlus et la masse volumique, comme illustré respectivement dans les figures la Figure III-9 (a, b et c). Et ont ensuite été coulés dans des moules préalablement huilés Figure III-10. Le mortier frais a été disposé en deux couches et vibré pendant une minute à l'aide de la table vibrante. Une fois les moules remplis, l'excédent de mortier a été nivelé et la surface égalisée à l'aide d'une truelle Figure III-11 Les moules contenant le mortier frais ont ensuite été conservé à la température ambiante de laboratoire jusqu'au moment du démoulage, qui a été effectué après 24 heures. Les éprouvettes ainsi obtenues ont été conservées dans l'eau Figure III-12 pendant une période de 28 jours. Il est important de noter que pour chaque mélange de mortier, six éprouvettes ont été préparées. trois éprouvettes pour les essais physico-mécaniques et les autres éprouvettes pour les essais physico-chimique.

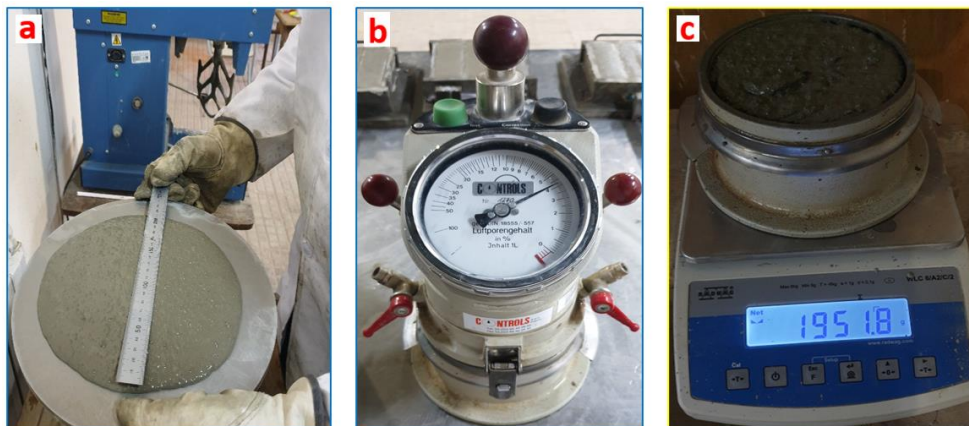


Figure III-9 :
Les essais à l'état frais, (a) l'étalement, (b) air occlus, (c) la masse volumique



Figure III-10 : Lubrification de moule à l'huile.



Figure III-11 : Nivellement de la surface du mortier avec une truelle.



Figure III-12 : Conservation des échantillons d'essai dans l'eau.

III.6. Méthodologie expérimentale

Pour évaluer les caractéristiques physiques, mécaniques et la durabilité du mortier d'étude, nous avons mené divers tests en variant les proportions de sable recyclé et les fibres plastiques, et en les comparant aux propriétés du mortier témoin à 28 jours de conservations.

III.6.1. Caractéristiques physico-mécaniques

III.6.1.1. A l'état frais

Nous décrivons ci-dessous l'essai de la table à secousses qui nous a permis de mesurer la consistance des mortiers étudiés pour en assurer le contrôle. Nous avons choisi de confectionner des mortiers présentant des consistances similaires. De plus, nous avons calculé individuellement le pourcentage d'air occlus et la masse volumique de chaque mélange.

Tout d'abord, nous détaillons l'essai d'étalement (Figure III-13), une mesure spécifique de l'aptitude du béton et du mortier à s'étaler par écoulement [21]. La consistance de tous les mortiers étudiés dans ce travail a été évaluée selon la norme européenne EN 1015-3 [22].

La mesure de l'étalement s'effectue en prenant le diamètre moyen d'un échantillon de mortier frais, disposé dans un moule spécifique positionné sur le plateau d'une table à secousses définie. Ce mortier est ensuite soumis à 15 secousses verticales provoquées par le

soulèvement de la table à secousses, suivies de sa chute libre depuis une hauteur préalablement déterminée.

Le moule utilisé est de forme tronconique, avec un diamètre inférieur de 100 mm, un diamètre supérieur de 70 mm et une hauteur de 60 mm, et il est positionné au centre de la table. Le mortier est versé dans le moule en deux couches, chacune étant compactée à l'aide de 10 coups de pilon pour assurer une homogénéité de la matière dans la partie inférieure tronconique. L'échantillon est ensuite arasé à l'aide d'une règle en acier. Le moule est soulevé lentement et verticalement, tandis que la table à secousses effectue 15 secousses à une cadence d'une par seconde, qui sont appliquées au mortier. Ensuite, l'étalement de l'échantillon est mesuré en deux points diamétralement opposés comme montré à la Figure III-13. Le calcul de l'étalement consiste à prendre la moyenne des deux diamètres, d_1 et d_2 , en millimètres.

Où d_1 et d_2 représentent respectivement les diamètres de la galette.

L'étalement noté D_{moy} est la moyenne de d_1 et d_2 selon l'équation (2).

$$D_{moy} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$

Dans chaque formulation, nous avons observé une répartition uniforme du mortier, sans aucune concentration ni séparation, y compris sur les bords de la galette. De plus, les fibres étaient correctement dispersées.

Les valeurs sont arrondies au millimètre près, et pour chaque combinaison, nous avons effectué trois mesures distinctes. En calculant ensuite la moyenne de ces mesures, nous avons pu déterminer le diamètre d'étalement.

Les classes de consistance sont définies en fonction de la variation de l'affaissement, comme indiqué dans le tableau 2.11.

Table III.5 Valeurs d'étalement NF EN 1015-6 [20].

| Propriété de consistance | Valeurs d'étalement en mm |
|--------------------------|---------------------------|
| Mortier raide | < 140 |
| Mortier plastique | Entre 140 et 200 |
| Mortier fluide | > 200 |



Figure III-13 : Equipements tables à secousses et méthode de la mesure de l'étalement.

Ensuite, immédiatement après avoir réalisé le processus de détermination de la densité à l'état frais et de la quantité d'air occlus, comme illustré respectivement dans la Figure III-9 (c et d), nous avons calculé la masse volumique du mortier frais à partir des mesures gravimétriques des moules remplis après le coulage, donnée par l'équation ci-dessous.

$$\rho = \frac{M (g)}{V (cm^3)} \quad (3)$$

Où M, la masse de mortier en gramme. V, volume de récipient en cm^3

La quantité d'air occlus représente le pourcentage volumique de bulles d'air présentes dans le mortier après sa mise en place. Cette teneur en air est évaluée à l'aide d'un aéromètre gradué, exprimée directement en pourcentage sur l'affichage de l'appareil, et le test est effectué conformément aux conditions spécifiées dans la norme NF EN 12350-7 [23,24], comme illustré dans la Figure III-9 b ci-dessus.

III.6.1.2. A l'état durci

III.6.1.2.1. Mesure des masses volumiques humide et sèche

Pendant le travail expérimental, et en parallèle de la mesure de l'absorption d'eau par immersion, il peut s'avérer bénéfique de calculer la masse volumique à l'état humide et à l'état sèche des différents mortiers, selon la norme NF EN 12390-7 [25].

Le volume de l'éprouvette est déterminé grâce à une pesée hydrostatique. Après obtention de la M_h constant, la $M_{\text{sous l'eau}}$ de l'éprouvette est déterminée.

Le volume V de l'éprouvette est calculé par l'équation (4):

$$V = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sous eau}}}{\rho_w (=1000)} \quad (4)$$

Avec :

M_{humide} , la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;

$M_{\text{sous l'eau}}$, la masse sous l'eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;

ρ_w , la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m^3

Les valeurs de la masse volumique à l'état humide (MVH) et à l'état sèche (MVS) sont déterminées en utilisant les formules suivantes :

$$MVH = \frac{M_{\text{humide}}}{V} \quad \text{et} \quad MVS = \frac{M_{\text{sèche}}}{V} \quad (5)$$

La procédure de pesage hydrostatique des éprouvettes est présentée ci-dessous.

- Peser la masse d'une éprouvette sous l'eau $M_{\text{sous l'eau}}$ après la conservé dans l'eau pendant 28 jours hydrostatique comme illustré à la figure III-14.
- Peser la masse d'une éprouvette sature M_{humide} après la cure dans l'eau pendant 28 jours.
- Peser la masse d'une éprouvette sèche $M_{\text{sèche}}$ après passage à l'étuve à 105°C pendant 72 heures, ayant subi une cure dans l'eau pendant 28 jours.
- Une fois les trois poids obtenus $M_{\text{sèche}}$, M_{humide} et $M_{\text{sous l'eau}}$, hydrostatiquement, le volume des éprouvettes est calculé à partir de la formuler ci-dessus de chaque éprouvette séparément (Figure III-14).



Figure III-14 : Pesage hydrostatique des éprouvettes (4x4x16) cm³ (Sèche, humide et sous l'eau).

Pour vérifier la répartition uniforme des fibres et s'assurer qu'il n'y a aucune agglomération de fibres sur une surface donnée, il est possible d'observer des échantillons de mortier durci avec des extrémités de cisaillement. Il convient ensuite d'évaluer le degré de compacité sur les deux faces coupées de l'échantillon, comme illustré dans la Photo III-15.

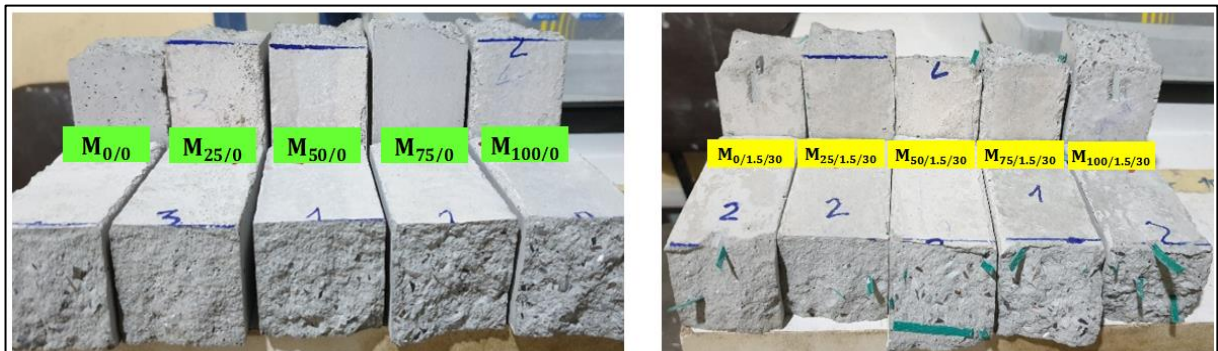


Figure III-15 : Visualisation optique des échantillons témoin et fibrés des mortiers étudiés

Cette figure illustre clairement la répartition adéquate des granulats sur la surface coupée, suite à l'essai de flexion, pour le mortier de référence avec différentes proportions de sable de dune remplacé par du sable recyclé ($M_{0/0}$, $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$), ainsi que pour d'autres mortiers ayant la même composition mais avec l'ajout de différents ratios de fibres ($M_{0/1.5/30}$, $M_{25/1.5/30}$, $M_{50/1.5/30}$, $M_{75/1.5/30}$ et $M_{100/1.5/30}$). Ces images démontrent de manière concluante que les cinq compositions de mortier, qu'elles contiennent ou non des fibres, ont été correctement réalisées, avec une distribution homogène des sables dans la matrice cimentaire. Aucun regroupement de fibres ni apparition de vides en l'absence de particules de sable n'ont été observés.

III.6.1.2.2. Essais des résistances mécaniques

Tout d'abord, avant de procéder aux essais destructifs, nous commençons par l'essai non destructif, à savoir l'essai ultrasonique. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³. Après avoir été conservées dans l'eau pendant 28 jours, ces éprouvettes sont ensuite séchées dans une étuve ventilée à 105°C jusqu'à atteindre une masse constante, avant d'être soumises aux essais.

III.6.1.2.2.1 Essais d'auscultation dynamique (essai ultrasonique)

La mesure de la vitesse de propagation ultrasonique est un essai non destructif fréquemment utilisé. Elle consiste à émettre une onde acoustique à travers le matériau à l'aide d'un émetteur, à récupérer le signal via un récepteur, puis à mesurer le temps de propagation entre deux points pour déduire la vitesse de l'onde acoustique. Cette grandeur physique offre des indications sur les propriétés mécaniques du matériau, notamment sa compacité. L'essai est effectué conformément à la norme ASTM C597-02 [26], Il est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, qui sont préalablement conservées dans l'eau pendant 28 jours. Par la suite, ces éprouvettes sont séchées dans une étuve à une température de 105°C jusqu'à atteindre une masse constante.

Une vitesse sonique plus élevée est généralement associée à un module d'élasticité plus important, indiquant une résistance accrue du matériau. Les mesures ultrasoniques permettent d'évaluer la résistance des mortiers de manière non destructive, avec des critères d'interprétation définis dans le tableau III-6. En résumé, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est un paramètre essentiel pour obtenir des informations qualitatives sur le matériau et sa structure, en fonction du temps nécessaire à la traversée des impulsions ultrasoniques à travers le mortier, mesuré à l'aide d'une appareil de marque "Controls" comme illustré dans la Figure III-16 .



Figure III-16 : Mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique

Tableau III- 6 : Critères de vitesse pour le classement de la qualité du béton [27].

| N° | Vitesse d'impulsion par sondage croisé (m/s) | Classement de la qualité du béton |
|----|--|-----------------------------------|
| 1 | Supérieur à 4500 | Excellent |
| 2 | Entre 3500 à 4500 | Bien |
| 3 | Entre 3000 à 3500 | Moyen |
| 4 | Inférieur à 3000 | Douteux |

Remarque : En cas de qualité « douteuse », il peut être nécessaire d'effectuer des tests supplémentaires.

L'essai exige une surface de contact qui s'adapte parfaitement à la forme de l'appareil, nécessitant l'application d'une fine couche de gel de contact. Après avoir parcouru une distance connue dans le mortier, un deuxième transducteur (récepteur) convertit les vibrations en signal électrique. Des compteurs électroniques mesurent ensuite le temps de parcours de l'impulsion, exprimé en microsecondes (μsec), une fois l'appareil activé. La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour le calcul de la vitesse de propagation, selon l'expression suivante : $V = \frac{L}{T}$ (6)

Où

V: La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (m/sec).

L: La distance entre les têtes (m).

T : Le temps de propagation (μsec).

III.6.1.2.2.2 Module d'élasticité dynamique E_{dyn}

En utilisant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est envisageable de déterminer le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) en se basant sur la formule empirique suivante :

$$E_{\text{dyn}} = V^2 \cdot \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (7)$$

Où : E_{dyn} est le module d'élasticité dynamique (GPa), V est l'UPV (km/s), γ la masse volume (kg/m^3) et ν le coefficient de Poisson, nous utiliserons une valeur courante de $\nu = 0,3$, conforme aux standards pour les mortiers.

III.6.1.2.2.3 Essai de flexion à trois point et déplacement flexionnel

L'essai de flexion par trois points a été réalisé sur des éprouvettes prismatique (4x4x16) cm selon le norme NF EN 1015-11 [28], par une machine de modèle UNIFRAME universelle d'une capacité 50 kN, la charge de rupture et le déplacement sont affichés avec une précision de 10^{-3} KN et 10^{-2} mm respectivement .

Trois échantillons ont été soumis au test de chaque formulation. L'éprouvette est positionnée sur le bâti de la presse, avec une distance de 10 cm entre les deux points d'appui, puis elle est

sollicitée jusqu'à atteindre la rupture. La résistance à la flexion est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$R_f = \frac{1,5.F_{f\max}.L}{b^3} \quad (8)$$

Avec :

R_f : La résistance en flexion du mortier en MPa ;

$F_{f\max}$: la charge maximale appliquée au milieu du prisme à la rupture en Newtons ;

L : la distance entre les appuis en mm ($L=100$ mm) ;

b : Le coté de la section carrée de l'éprouvette en mm ($b=40$ mm).

Les Figures III-17 et III-18 ci-dessous illustrent les essais de résistance à la flexion effectués dans cette étude.

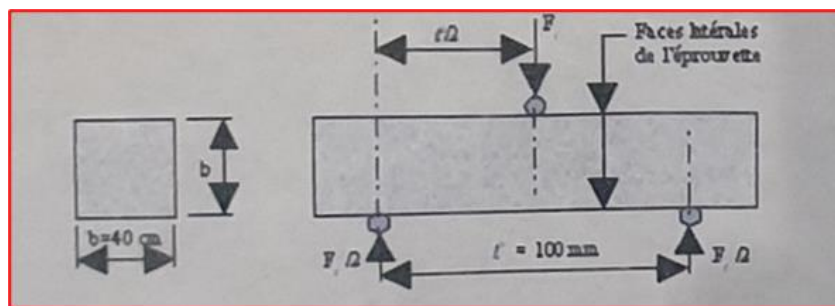


Figure III-17 : Principe de l'essai de la flexion



Figure III-18 : Matériels utilisés et essai de traction par flexion trois points.

III.6.1.2.2.4 Essai de compression

L'essai de compression a été réalisé directement sur les deux pièces obtenues après l'essai de flexion, à l'aide d'une presse d'une capacité de 2000 kN et à une vitesse de 0.5 MPa/s, conformément à la norme NF EN 12390-4 [29]. Les dimensions des éprouvettes cubiques

utilisées pour la compression sont de $(4 \times 4 \times 4)$ cm³. L'éprouvette est positionnée au centre du plateau de la presse, comme illustré dans la Figure III-20, avec une surface de contact de 16 cm² entre l'éprouvette et le plateau de compression.

La Figure III-19 présente les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après la rupture en flexion. La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée pendant l'essai. La résistance à la compression est calculée comme le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, selon l'expression ci-dessous. La valeur retenue est la moyenne de trois mesures pour chaque composition.

$$R_c = \frac{F_{c \max}}{b^2} \quad (9)$$

Avec :

R_c : la résistance en compression en MPa;

$F_{c \max}$: La force maximale de compression conduisant à la rupture en newtons;

b : Le coté de la section carrée de spécimen en mm.

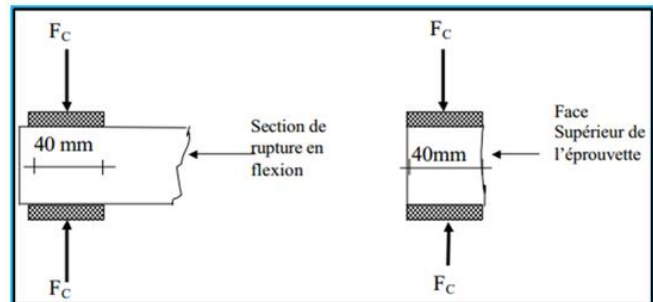


Figure III-20: Presse d'essai de compression.

Figure III-19 : Principe de l'essai de la compression.

III.6.1.2.3. Essai de variation dimensionnel (*Retrait/gonflement*)

Le retrait/gonflement est crucial, car il est souvent responsable de la formation de fissures pouvant compromettre la durabilité du béton et du mortier. Les déformations de la matrice peuvent résulter de processus physico-chimiques pendant l'hydratation ou du gradient hydrique entre le matériau et son environnement extérieur. Les variations dimensionnelles ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage numérique très sensible, avec une précision de 0.001 mm (voir Figure III-21).

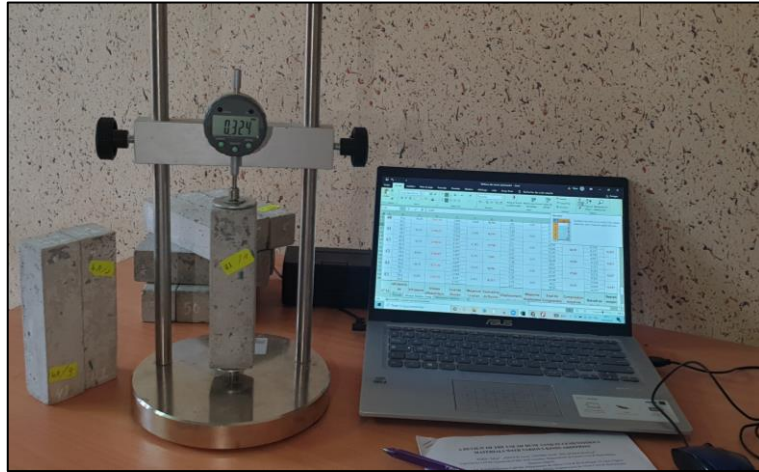


Figure III-21 : Mesure du retrait par un rétractomètre numérique.

L'objectif de cet essai est de mesurer les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes durcies au fil du temps, conformément à la norme NF P15-433 [310]. Ces mesures ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm³, après 28 jours de durcissement à l'eau.

Pour chaque formulation, les mesures ont été réalisées sur trois éprouvettes, et les résultats présentés sont la moyenne des valeurs obtenues.

III.6.1.2.4 Caractéristiques des indicateurs de durabilité

Les propriétés de durabilité ont été examinées et évaluées en mesurant la porosité accessible à l'eau, l'absorption d'eau par capillarité et par immersion totale. Enfin, une immersion complète a été effectuée dans un milieu agressif composé d'eau distillée contenant d'acide sulfurique H₂SO₄ de concentration 5% avec un pH de 1.

III.6.1.2.4.1 Porosité accessible à l'eau

La porosité des mortiers est l'une des propriétés physiquement couramment évaluées en raison de son impact sur des caractéristiques telles que la résistance et la durabilité, constituant un indicateur de la qualité du matériau et reflétant sa compacité.

La mesure de la porosité accessible à l'eau a été réalisée conformément aux normes ASTM C642-13 [30] et NF EN 18-459. Les mesures par pesée hydrostatique ont été effectuées après la conservation des échantillons de dimensions (40×40×160) mm³ dans l'eau à température ambiante pendant 28 jours. Cette mesure est obtenue en calculant la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et le même échantillon à l'état saturé d'eau. La porosité est définie comme le rapport entre le volume vide (occupé par l'eau) et le volume apparent de l'échantillon.

La méthode de pesée hydrostatique, illustrée dans la Figure III-22 (voir annexe 1), est la plus simple parmi toutes les méthodes permettant d'obtenir différents indicateurs de durabilité, avec une préférence pour la porosité à l'eau.

Le déroulement de l'essai effectuée est comme suite :

En premier lieu, la pesée hydrostatique est réalisée en immergeant entièrement l'éprouvette dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique (avec une précision de 0,01 g) afin d'obtenir la masse M_{eau} de l'éprouvette immergée. Ensuite, après la pesée à l'eau, essuyer rapidement et superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans retirer l'eau des pores. Puis, peser immédiatement l'éprouvette à l'air avec une précision de 0,01 g, obtenant ainsi la masse M_{air} de l'échantillon imbibé. Pour une meilleure caractérisation du mortier, l'essai est réalisé sur trois échantillons.

Finalement, on place l'éprouvette dans une étuve à une température de 105 ± 5 °C pendant 72 heures. La masse obtenue à ce stade est notée M_{sec} . La formule suivante est alors utilisée pour calculer la porosité accessible à l'eau (P) :

$$P (\%) = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (10)$$

III.1.2.4.2 Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'absorption d'eau par capillarité résulte de la disparité entre la pression capillaire à la surface du fluide et la force de gravité, entraînant le déplacement du liquide jusqu'à l'atteinte d'un équilibre. Cette pression capillaire augmente avec le rétrécissement des capillaires, se manifestant surtout près des limites des éléments en béton. Ce phénomène se produit principalement en conditions de faible humidité et prédomine à proximité de la surface de l'élément.

La mesure de la sorptivité est une méthode simple et pratique pour évaluer la vitesse d'absorption des matériaux. Une sorptivité plus élevée indique une susceptibilité accrue à l'infiltration rapide du liquide. Elle fournit également des informations sur la configuration des pores du matériau, qui jouent un rôle dans l'absorption et le transport capillaire de l'eau.

Cet essai vise à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire des échantillons de mortier non saturés, en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Il offre des informations générales sur la structure et l'importance du réseau capillaire, complémentaires à d'autres tests pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au protocole des normes européenne NF EN 480-5 et ASTM C1585-13 [31]. Les échantillons ont d'abord été séchés à l'étuve à une température de 105 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (M_0). Pour mesurer la quantité d'eau absorbée par le mortier au fil du temps, une éprouvette prismatique de mortier de dimensions (4×4×16) cm³ a été placée sur des supports non absorbants dans un bac d'eau. Seuls les 5 premiers millimètres de l'éprouvette sont immergés, tandis que le reste est imperméabilisé avec deux films, l'un en aluminium et l'autre en plastique autocollant, assurant un sens unidirectionnel d'écoulement et empêchant la transmission de l'humidité extérieure. Le bac d'eau est équipé d'un système d'alimentation automatique maintenant le niveau constant, comme illustré dans les Figures III-23 et III-24.

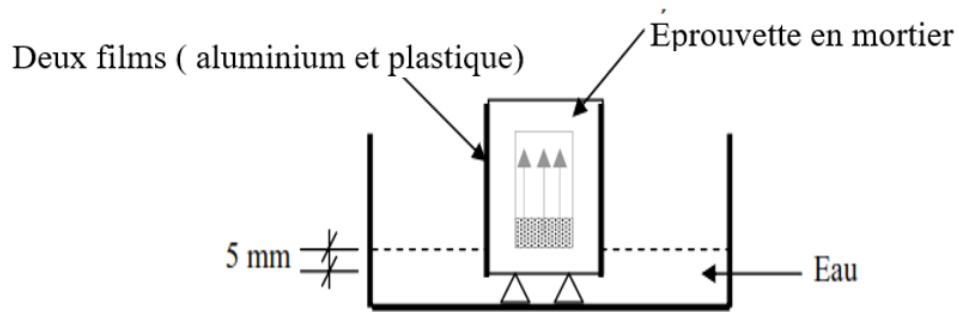


Figure III-23 : Schéma du dispositif d'absorption d'eau par capillarité.



Figure III-24 : Dispositif expérimental d'absorption d'eau par capillarité.

Ensuite, des mesures de masse sont effectuées successivement à l'aide d'une balance de précision de 0,01 g à des intervalles de temps très courts au début de l'expérience, puis de plus en plus espacés au fur et à mesure que l'expérience progresse (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 minutes, 2 heures, 4 heures, 8 heures, jusqu'à 24 heures). À chaque intervalle de temps, l'éprouvette est retirée du récipient, légèrement essuyée, puis pesée (M_j), et replacée verticalement dans le récipient. De chaque période donnée, l'absorption capillaire, notée "CA," est exprimée g/mm^2 , à l'aide selon l'équation (11).

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \text{ en } \left(\frac{g}{mm^2} \right) \quad (11)$$

Avec :

M_0 : Masse de l'éprouvette sèche avant immersion dans l'eau en (g).

M_j : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en (g).

S : Section de la base de l'éprouvette en mm^2 (1600 mm^2).

Les résultats obtenus à chaque intervalle de temps pour les trois échantillons de chaque type de mortier sont exprimés en prenant la moyenne des trois mesures.

Le coefficient de sorptivité S a été déterminée en fonction de la pente formée entre la quantité d'eau absorbée et la racine carrée du temps par l'équation suivant :

$$\frac{Q}{A} = S \cdot \sqrt{t} \quad (12)$$

Où :

Q est la quantité d'eau absorbée en (g), A est la surface de l'échantillon en contact avec l'eau en (mm^2), t est le temps en (second).

S est le coefficient de sorptivité de l'échantillon en ($\text{g}/\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$).

III.6.1.2.4.3 Absorption d'eau / immersion totale

L'essai d'absorption d'eau par immersion totale vise à évaluer la présence interne des pores ouverts dans les matériaux, généralement associés aux cavités dans les granulats, à l'air résiduel post-mélange des composants, et à une quantité d'eau excédant celle nécessaire à l'hydratation du ciment [32].

L'essai commence par le séchage des échantillons prismatiques de mortier ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 pendant 72 heures dans une étuve ventilée maintenue à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Ensuite, les échantillons sont immergés complètement dans un bac d'eau à une température de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant au moins 48 heures, jusqu'à ce que le matériau atteigne sa saturation en eau (voir Figure III-25 dans l'annexe 1). Avant la pesée, les échantillons sont essuyés avec une éponge humide pour éliminer toute trace d'eau en surface. La masse est considérée comme constante lorsque deux pesées successives, réalisées à 24 heures d'intervalle, ne présentent pas de différence supérieure à 0,1%. Une fois la masse de saturation atteinte (M_a) et la masse à sec préalablement mesurée (M_s), la masse d'eau absorbée est calculée.

L'absorption d'eau par immersion, notée Ab , est exprimée en pourcentage de la masse sèche et est calculée avec l'équation (13) :

$$Ab (\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (13)$$

M_a : Masse de l'éprouvette imbibé d'eau.

M_s : Masse de l'éprouvette sec après passage à l'étuve à $105 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque formulation de mortier sont exprimés en pourcentage sous forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

III.6.1.2.4.4 Analyse thermo-gravimétrique ATG/DSC

Les techniques d'analyse thermique offrent des informations sur la stabilité thermique des matériaux et les changements pendant la décomposition thermique. Parmi ces analyses, la thermogravimétrie (ATG) est une technique qui mesure la quantité et la vitesse de changement de masse (perte de masse) d'un échantillon en fonction de la température et du temps dans une atmosphère contrôlée. Elle permet de prédire la stabilité thermique des matériaux [33].

La mesure thermogravimétrique est réalisée à l'aide d'un appareil d'analyse thermogravimétrique comprenant un four dans lequel l'échantillon est placé, directement relié à une balance. Cette technique quantifie les pertes de masse liées à la décomposition, à l'oxydation ou à la désolvatation. Elle permet de déterminer la stabilité thermique des matériaux développés, notamment l'influence des particules sur la température de dégradation [33]. L'analyse est effectuée sur des fragments réduits en poudre par broyage. Les échantillons subissent une montée en température à une vitesse de 10°C/min sous balayage d'azote.

Associée à l'analyse TG, la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) confirme certaines observations précédentes.

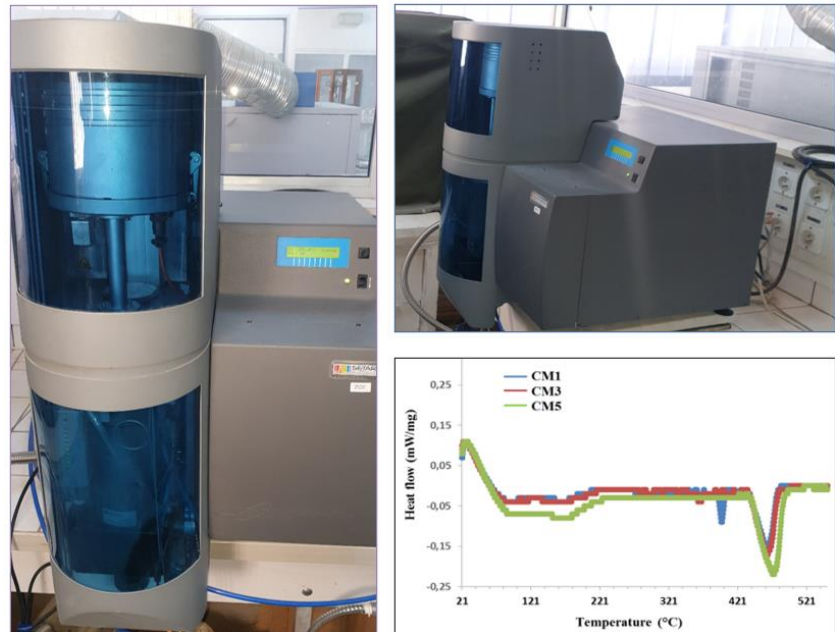
La Figure III-26 présente les résultats de la DSC pour un mortier du 100 % de SD ($M_{0/0}$), 50 % SD + 50 % SR ($M_{50/0}$) et 100 % SR ($M_{100/0}$). Les courbes de flux de chaleur révèlent des pics endothermiques associés à la décomposition de liaisons aqueuses dans deux plages de température spécifiques.

La première plage de décomposition s'étend de 100 °C à 350 °C, caractérisée par la présence d'eau adsorbée [34], et peut être liée à la décomposition de l'ettringite, à la déshydratation du gel d'hydrate de silicate de calcium (C-S-H) et d'hydrate d'aluminate de calcium (C-A-H) [35]. Il est important de noter que, dans cette première phase, toutes les courbes présentent des tendances similaires. Cependant, les mortiers contenant du SR affichent un pic de flux thermique endothermique relativement élevé.

La deuxième étape de décomposition survient entre 400 °C et 500 °C, correspondant à la décomposition de l'eau cristallisée et à la décomposition de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dans cette étape, le mortier contenant du SD présente deux pics, l'un vers 400 °C et l'autre vers 500 °C. Toutes les courbes des mortiers montrent des pics à 500 °C avec différentes intensités, les mortiers contenant du sable recyclé affichant l'intensité la plus élevée à 500 °C.

En comparant ces observations avec la littérature pertinente, il apparaît que la plage de température entre 50 °C et 300 °C est généralement associée à la décomposition de l'ettringite, du C-S-H, du C-A-H et du monosulfoaluminate, tandis que la plage entre 400 °C et 500 °C est attribuée à la décomposition de l'hydroxyde de calcium [36,37].

Figure III-26 : Appareil d'analyses thermogravimétriques et les courbes DSC du mortier .



III.6.1.2.4.5 Essais d'attaque par acide sulfurique H_2SO_4

En général, les environnements les plus corrosifs sont soit acides, soit salins, notamment en présence de chlorures, de nitrates, mais surtout de sulfates. Dans de tels cas, on peut observer des détériorations des structures en béton, telles que la dissolution et l'érosion en cas d'attaques acides, ou la fissuration et l'éclatement en cas d'attaques salines, en particulier les attaques sulfatiques.

Dans le cadre de notre étude, la résistance à l'attaque chimique de l'acide sulfurique H_2SO_4 , avec une concentration de 5% et un pH de 1, a été évaluée sur des échantillons prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, préparés conformément à la norme NF EN 196-1[19], Cette concentration est fréquemment utilisée dans la littérature spécialisée. Opter pour des concentrations plus faibles aurait nécessité un temps d'investigation plus long, c'est pourquoi nous avons choisi celle de 5%, qui représente le seuil maximal pour un environnement très corrosif.

Après une période de cure de 28 jours sous l'eau (temps initial), les échantillons de mortier sont pesés pour déterminer leur masse (M_1), puis ils sont immergés dans la solution d'attaque. Ils ont été placés individuellement dans des bacs (voir Figure III-27) pendant 180 jours. À la fin de cette période, les échantillons sont nettoyés à l'eau douce pour éliminer le mortier altéré, puis séchés pendant trente minutes avant d'être replongés dans des solutions d'attaque fraîches. Ensuite, une nouvelle pesée est effectuée (M_2) à l'aide d'une balance de précision à 0,01 gramme, et la solution d'attaque est renouvelée à des intervalles de sept jours (en fonction du pH). Pour évaluer la durabilité des mortiers vis-à-vis de l'acide sulfurique H_2SO_4 , nous avons mesuré les résistances à la compression, à la flexion, ainsi que l'expansion en fonction de la durée d'exposition à cette solution. À chaque intervalle de test, l'expansion moyenne est déterminée à l'aide d'un comparateur sur trois prismes de chaque type de mortier.

La résistance des échantillons aux agressions chimiques subies dans ces solutions est vérifiée en mesurant leur perte de poids. Le degré d'attaque de l'acide sulfurique H_2SO_4 a été évalué conformément à la norme ASTM C 267-96 [38] en se basant sur la perte de masse, selon l'équation (14):

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (14)$$

D'où :

M_1 : la masse à l'état saturé d'eau ;

M_2 : la masse après l'immersion dans l'acide à un temps désiré.



Figure III-27 : Essai de l'attaque d'acide H_2SO_4 sur les éprouvettes (4x4x16) cm^3

III.7 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence les caractéristiques des différentes matières premières recyclées intégrées dans les matériaux composites développés au sein de cette étude, en mettant particulièrement l'accent sur les fibres plastiques de type Polyéthylène Téréphtalate. L'incorporation de ces fibres dans la composition des mortiers revêt une importance cruciale. De plus, l'ajustement du sable de dune par le sable recyclé peut avoir des implications majeures sur la granulométrie, la cohésion de la matrice, la rhéologie du matériau, et par conséquent, sur les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité du matériau.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation des méthodes de caractérisation des matériaux utilisées, majoritairement issues de normes en vigueur ou adaptées à partir de tests préliminaires.

Au cours de ce chapitre, les compositions chimiques et minéralogiques des matières premières employées ont été exposées, déterminées à l'aide de l'analyse par diffraction des rayons X, de l'analyse thermogravimétrique (ATG) et de l'analyse infrarouge. De plus, la méthode de préparation des matériaux ainsi que les protocoles des méthodes de caractérisation ont été expliqués.

En conclusion, nous aborderons la formulation des mortiers renforcés en utilisant diverses techniques de caractérisation.

Références bibliographiques

- [1] ASTM C-150-97a n.d. <https://www.scribd.com/doc/312026435/ASTM-C-150-97-pdf> (accessed March 17, 2023).
- [2] 442-2013 N. CIMENT COMPOSITION, SPÉCIFICATIONS ET CRITÈRES DE CONFORMITÉ DES CIMENTS COURANTS. NORME Alger 2013.
- [3] 933-2 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures 2020.
- [4] NF EN P18-555. Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables. 1990.
- [5] 1097-6 NE. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau 2014.
- [6] NF EN P18-598. Granulats Équivalent de sable analyse descripteurs. NORME Eur 1993:1–8.
- [7] 18-560 NE. Granulats Analyse granulométrique par tamisage analyse descripteurs modifications corrections 1990:1–9.
- [8] N Meftah, A Hani, A Merdas, C Sadik, A Sdiri. A holistic approach towards characterizing the El-Oued siliceous sand (eastern Algeria) for potential industrial applications. *Arab Jo Geosci* 2021;14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08591-1>.
- [9] Oglesbee T, McLeod CL, Chappell C, Vest J, Sturmer D, Krekeler MPS. A mineralogical and geochemical investigation of modern aeolian sands near Tonopah, Nevada: Sources and environmental implications. *Catena* 2020;194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104640>.
- [10] Breuer S, Schwotzer M, Speziale S, Schilling FR. Thermoelastic properties of synthetic single crystal portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Temperature-dependent thermal diffusivity with derived thermal conductivity and elastic constants at ambient conditions. *Cem Concr Res* 2020;137. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106199>.
- [11] Meftah N, Hani A. Characterization of Algerian dune sand as a source to metallurgical-grade silicon production. *Materiles Today Proceeding* 2022;51:2105–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.366>.
- [12] Aalil I, Badreddine D, Beck K, Brunetaud X, Cherkaoui K, Chaaba A, et al. Valorization of crushed bricks in lime-based mortars. *Construction Building Materiles* 2019;226:555–63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.265>.
- [13] Nedeljković M, Visser J, Nijland TG, Valcke S, Schlangen E. Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study. *Construction Building Materiles* 2021;270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121475>.
- [14] Zojaji I, Esfandiarian A, Taheri-Shakib J. Toward molecular characterization of asphaltene from different origins under different conditions by means of FT-IR spectroscopy. *Adv Colloid Interface Sci* 2021;289:102314. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102314>.
- [15] Kaufhold S, Hein M, Dohrmann R, Ufer K. Quantification of the mineralogical

- composition of clays using FTIR spectroscopy. *Vib Spectrosc* 2012;59:29–39. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2011.12.012>.
- [16] Muttashar HL, Ali N Bin, MohdAriffin MA, Hussin MW. Microstructures and physical properties of waste garnets as a promising construction materials. *Case Stud Constr Mater* 2018;8:87–96. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.12.001>.
- [17] B Myszka, M Schüßler, K Hurle, B Demmert, R Detsch, AR Boccaccini, et al. Phase-specific bioactivity and altered Ostwald ripening pathways of calcium carbonate polymorphs in simulated body fluid. *RSC Adv* 2019;9:18232–44. <https://doi.org/10.1039/c9ra01473j>.
- [18] Fan CC, Huang R, Hwang H, Chao SJ. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction Building Materiles* 2016;112:708–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>.
- [19] EN 196-1. Methods of Testing Cement e Part 1: Determination of Strength, European Committee for Standardization. *NORME Eur* 2016;2:21.
- [20] 1015-6 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie6: détermination de la masse volumique apparente du mortier frais". Octobre 1999. Norme Française 1999.
- [21] Dreux, G., Festa J. Nouveau guide du béton et ses constituants. eighth ed. Eyrolles, Eyrolles, Paris.; 1998.
- [22] 1015-3 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie-Partie3: détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses 1999).
- [23] 12350-7 NE. Testing fresh concrete- Part 7: Air Content-Pressure methods. *AFNOR P18B*, 2009, p. P18-443.
- [24] Norme NF EN 12350-7 n.d. https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-123507/essais_pour_beton_frais_partie_7_teneur_en_air_methode_de_la_compressibilit/fa190563/83427#Areas_Store_Products_Summary_View (accessed April 20, 2023).
- [25] 12390-7 EN. "Essai pour béton durci-Partie 7:masse Volumique du béton " 2019.
- [26] ASTM C 597-02. Pulse Velocity Through Concrete. *United States Am Soc Test Mater* 2016;04:3–6. <https://doi.org/10.1520/C0597-16.2>.
- [27] IS 13311 (Part 1). Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity. *Bur Indian Satandards* 1992;1:1–14.
- [28] 1015-11 NE. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci 2019.
- [29] EN N 12390-4. Essais pour béton durci - Partie 4: résistance à la compression - Caractéristiques des machines d'essai 2019.
- [30] ASTM C642-13 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concreten.d.https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/ASTMC64213?gclid=CjwKCAjwoMSWBhAdEiwAVJ2ndpRBA3OaF26fpU9JXm0o_b4TDmQLNsAS-cqW8Ow44fMCzmNVWoDMiRoCle4QAvD_BwE (accessed July 15, 2022).
- [31] ASTM C1585-13 - Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes n.d. <https://www.astm.org/c1585-20.html> (accessed July 15, 2022).
- [32] Bravo M, De Brito J, Pontes J, Evangelista L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants.

- Construction Building Materiles 2015;77:357–69.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103>.
- [33] Tayyib C. Contribution à l' étude des matériaux cimentaires contenant des inclusions végétales Année Universitaire. 2021.
- [34] Meftah N, Hani A, Merdas A. Extraction and Physicochemical Characterization of Highly-pure Amorphous Silica Nanoparticles from Locally Available Dunes Sand. Chem Africa 2023. <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00688-2>.
- [35] A Bouaziz, R Hamzaoui, S Guessasma, R Lakhal, D Achoura, N Leklou. Efficiency of high energy over conventional milling of granulated blast furnace slag powder to improve mechanical performance of slag cement paste. Powder Technol 2017;308:37–46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.014>.
- [36] Y Fan, S Zhang, Q Wang, SP Shah. The effects of nano-calcined kaolinite clay on cement mortar exposed to acid deposits. Construction Building Materiles 2016;102:486–95. <https://doi.org/10.1016/j.construction build-mat.2015.11.016>.
- [37] S Kumar, R Kumar, A Bandopadhyay, Alex TC, Ravi Kumar B, Das SK, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement. Cement Concrete Composite 2008;30:679–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.005>.
- [38] ASTM C267-96. Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacing and polymer concretes. Am Soc Test Mater 1996.

CHAPITRE IV :

ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

IV. 1 Introduction

Ce chapitre se consacre à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'une programme expérimentale menée dans le cadre de cette recherche. Une approximation prédictive par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est également présente pour optimiser les paramètres influençant les propriétés des matériaux composites cimentaires.

Bien que la thématique des mortiers à base de différents types de granulats et de fibres soit vaste, couvrant un grand nombre d'études, les mortiers à base de sable de dune, corrigé par le sable recyclé, renforcé par des fibres de type polyéthylène terephthalate, restent peu explorés. Cette partie expérimentale expose les éléments essentiels à l'étude de la rhéologie de ces mortiers à l'état frais, à la caractérisation de leurs propriétés physiques et mécaniques à l'état durci, ainsi qu'à l'évaluation de leur durabilité. De plus, elle présente les conclusions issues des analyses microstructurales effectuées sur ces trois types importants de mortiers.

IV.2 Propriétés à l'état frais

IV.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité du mortier, incorporant divers pourcentages de remplacement de SR et la fraction massique de PET-F, a été évaluée en mesurant l'étalement à l'aide d'une table à secousse, dans le but de quantifier la teneur en eau nécessaire pour obtenir la plasticité souhaitée.

La Figure IV-1 présente les étalements des différents mortiers étudiés. Ces étalements sont exprimés en termes de rapport par rapport au diamètre initial du cône d'essai, qui mesure 10 cm à la base inférieure et 7 cm de diamètre supérieur, avec une hauteur de 6 cm. Pour le mortier de référence, l'étalement relatif moyen est de 19,47, ce qui correspond à la consistance typique d'un mortier plastique. Le mortier M0/50, composé de parts égales de sable de dune et de sable recyclé, présente le meilleur étalement avec 21,76 cm.

L'incorporation de fibres, que ce soit en termes de longueur ou de pourcentage dans le mortier fibré, réduit de manière significative l'étalement du matériau, avec un étalement minimum de 14 cm pour le mortier M0/2/30, sont présentées dans les tableaux IV-1. Cependant, malgré cette réduction importante de l'étalement, le mortier conserve tout de même une consistance fluide, caractéristique d'un mortier plastique. En revanche, il est également à noter que les composés M50/y/z présentent des valeurs d'étalement préférentielles parmi les autres mélanges, et que la variation de l'étalement de ces composés est très limitée, quelles que soient les valeurs de y et z,

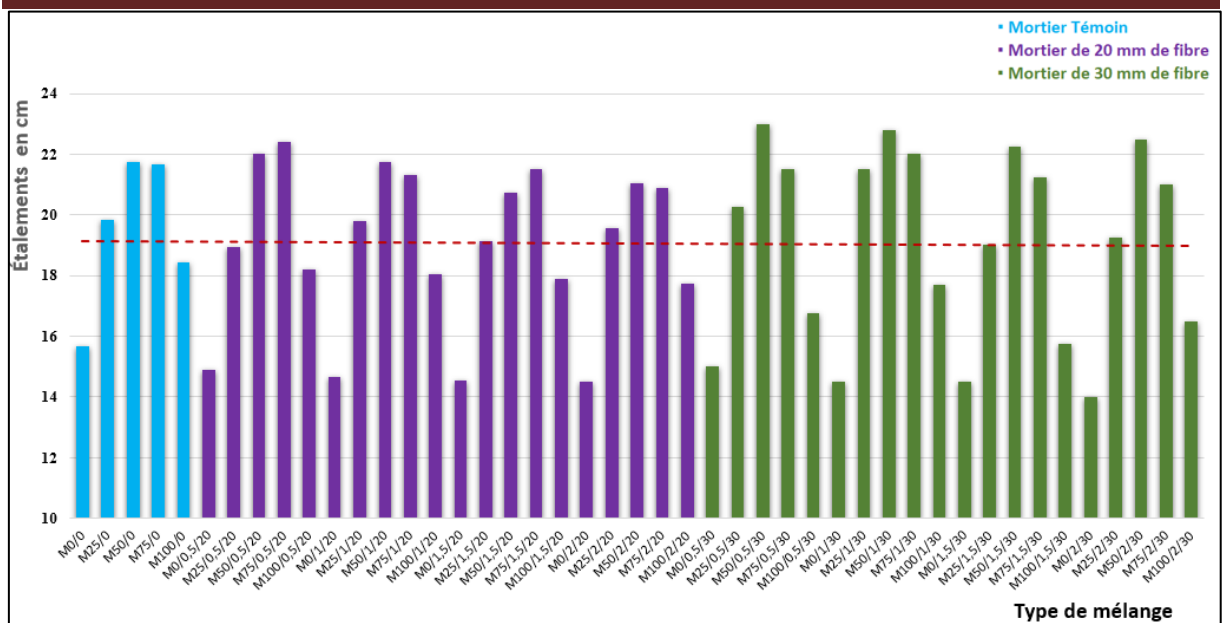


Figure IV-1 Répartition des mortiers en fonction du pourcentage de substitution du sable de dune par le sable recyclé et du taux de fibre pour chaque longueur.

Comme elle a été indiquée au colonne 7 du tableau IV-1. De plus, malgré la capacité élevée d'absorption des granulats recyclés, le sable des dunes (SD) a absorbé une plus grande quantité d'eau par rapport à ce dernier (SR), et cela est dû à la présence d'une grande proportion des fines qu'il contient [1,2].

Le trait horizontal discontinu représente la courbe de tendance, ce qui signifie la moyenne des valeurs expérimentales de tous les mélanges.

Tableau IV-1 Densité des mortiers à l'état frais, durcis et les valeurs d'étalement.

| N° | Notations | Densité du mortier frais (ρ_f) (kg/m^3) | Densité du mortier durci (ρ_h) (kg/m^3) | Différence entre densité fraîche et durcie (%) | Étalement en (mm) | Change en étalement (%)* |
|----|-------------------------|---|---|--|-------------------|--------------------------|
| 1 | M _{0/0} | 2151.91 | 1988.75 | 7.58 | 156.5 | / |
| 2 | M _{25/0} | 2182.24 | 1987.48 | 8.92 | 198.5 | 26.84 |
| 3 | M _{50/0} | 2166.45 | 1967.98 | 9.16 | 217.6 | 39.04 |
| 4 | M _{75/0} | 2110.52 | 1931.05 | 8.5 | 216.5 | 38.34 |
| 5 | M _{100/0} | 2013.46 | 1882.09 | 6.52 | 184.5 | 17.89 |
| 6 | M _{0/0.5/20} | 2130.01 | 1967.09 | 7.65 | 149 | -4.79 |
| 7 | M _{25/0.5/20} | 2148.58 | 1958.38 | 8.85 | 189.5 | -4.53 |
| 8 | M _{50/0.5/20} | 2160.02 | 1971.4 | 8.73 | 220 | 1.1 |
| 9 | M _{75/0.5/20} | 2110.33 | 1950 | 7.6 | 224 | 3.46 |
| 10 | M _{100/0.5/20} | 1994.51 | 1888.01 | 5.34 | 182 | -1.36 |
| 11 | M _{0/1/20} | 2115.1 | 1910.14 | 9.69 | 146.5 | -6.39 |
| 12 | M _{25/1/20} | 2142.92 | 1979.67 | 7.62 | 198 | -0.25 |
| 13 | M _{50/1/20} | 2150.6 | 2004.42 | 6.8 | 217.5 | -0.05 |
| 14 | M _{75/1/20} | 2116.15 | 1949.88 | 7.86 | 213 | -1.62 |
| 15 | M _{100/1/20} | 2013.57 | 1892.48 | 6.01 | 180.5 | -2.17 |
| 16 | M _{0/1.5/20} | 2082.2 | 1981.77 | 4.82 | 145.5 | -7.03 |
| 17 | M _{25/1.5/20} | 2122.25 | 1958.22 | 7.73 | 191.5 | -3.53 |
| 18 | M _{50/1.5/20} | 2137.18 | 1984.87 | 7.13 | 215 | -1.19 |

| | | | | | | |
|----|-------------------------|---------|---------|------|-------|--------|
| 19 | M _{75/1.5/20} | 2108.96 | 1935.64 | 8.22 | 215 | -0.69 |
| 20 | M _{100/1.5/20} | 2032.62 | 1903.78 | 6.34 | 179 | -2.98 |
| 21 | M _{0/2/20} | 2067.3 | 1981.28 | 4.16 | 145 | -7.35 |
| 22 | M _{25/2/20} | 2106.59 | 2013.56 | 4.42 | 195.5 | -1.51 |
| 23 | M _{50/2/20} | 2135.75 | 1991.79 | 6.74 | 210.5 | -3.26 |
| 24 | M _{75/2/20} | 2117.78 | 1934.61 | 8.65 | 209 | -3.46 |
| 25 | M _{100/2/20} | 2042.68 | 1882.35 | 7.85 | 177.5 | -3.79 |
| 26 | M _{0/0.5/30} | 2129.68 | 2012.42 | 5.51 | 150 | -4.15 |
| 27 | M _{25/0.5/30} | 2153.95 | 2002.58 | 7.03 | 202.5 | 2.02 |
| 28 | M _{50/0.5/30} | 2164.78 | 2003.93 | 7.43 | 215 | -1.19 |
| 29 | M _{75/0.5/30} | 2139.14 | 1954.68 | 8.62 | 215 | -0.69 |
| 30 | M _{100/0.5/30} | 2101.17 | 1914.9 | 8.87 | 167.5 | -9.21 |
| 31 | M _{0/1/30} | 2106.38 | 1952.29 | 7.32 | 145 | -7.35 |
| 32 | M _{25/1/30} | 2133.55 | 2000.5 | 6.24 | 215 | 8.31 |
| 33 | M _{50/1/30} | 2144.85 | 1975.65 | 7.89 | 228 | 4.78 |
| 34 | M _{75/1/30} | 2126.88 | 1938.72 | 8.85 | 220 | 1.62 |
| 35 | M _{100/1/30} | 2048.51 | 1877.02 | 8.37 | 177 | -4.07 |
| 36 | M _{0/1.5/30} | 2075.27 | 2000.56 | 3.6 | 145 | -7.35 |
| 37 | M _{25/1.5/30} | 2113.61 | 2005.93 | 5.09 | 190 | -4.28 |
| 38 | M _{50/1.5/30} | 2114.86 | 1985.73 | 6.11 | 222.5 | 2.25 |
| 39 | M _{75/1.5/30} | 2110.9 | 1925.32 | 8.79 | 212.5 | -1.85 |
| 40 | M _{100/1.5/30} | 2085.93 | 1886.63 | 9.55 | 157.5 | -14.63 |
| 41 | M _{0/2/30} | 2049.34 | 1966.56 | 4.04 | 140 | -10.54 |
| 42 | M _{25/2/30} | 2079.74 | 1994.75 | 4.09 | 192.5 | -3.02 |
| 43 | M _{50/2/30} | 2090.02 | 1958.17 | 6.31 | 225 | 3.4 |
| 44 | M _{75/2/30} | 2085.85 | 1929.3 | 7.51 | 210 | -3 |
| 45 | M _{100/2/30} | 2068.73 | 1887.79 | 8.75 | 165 | -10.57 |

*Les formulations témoins sont calculées sur la base d'un éco-mortier 100% DS sans fibres, tandis que les autres formulations avec fibres sont calculées pour les mêmes types d'éco-mortier sans fibres.

2.2 Densité à l'état frais

La variation de la densité des mortiers en fonction du taux du sable de dune par le sable recyclé et l'incorporation de fibre en termes de taux et de longueur sont montrée dans le tableau IV-1.

Les valeurs de la densité à l'état frais variaient dans un intervalle entre 1994.5 et 2182.24 kg/m³. On a observé que la densité a diminué au fur et à mesure où le pourcentage de remplacement de SR et le taux de fibre augmentaient, ce qui est confirmé par plusieurs auteurs [3]. Une réduction significative de 8.60 % de la densité a été remarquée de différentes formulations lors de l'augmentation du taux de remplacement de SR et FP de 0 à 100 % et de 0 à 2 % de suite. Il est bien connu que la densité du mortier est principalement affectée par la masse volumique des constituants et également la teneur en air.

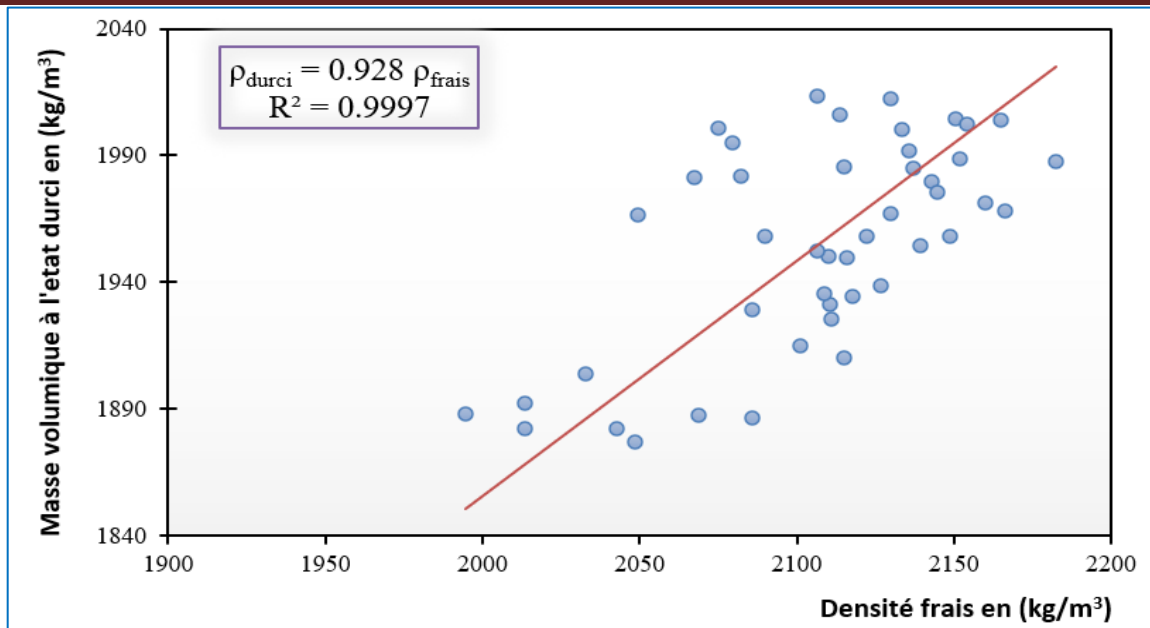


Figure IV-2 Relation entre la densité du mortier à l'état frais et l'état durci.

La pâte attachée aux agrégats peut produire une texture de surface rugueuse et poreuse et peut augmenter la teneur en air. Cette tendance descendante a été également suscitée pour tous les mélanges fibrés de 20 et 30 mm, il est à noter que l'ajout de 0,5% de PET-F dans un mélange de $M_{0/0,5/20}$ et de $M_{0/0,5/30}$ a causé une réduction de la valeur de densité fraîche de l'ordre de 1% par rapport au mortier de référence $M_{0/0}$. Autrement, le remplacement du SD par SR dans la formulation $M_{50/y/z}$ (quelque soit la valeur de y et z) a produit une meilleure densité fraîche par rapport à d'autres formulations combinées (y et $z \neq 0$). En effet, le rôle de l'arrangement idéal des grains solides aide la formulation $M_{50/y/z}$ à gagner la valeur optimisée. Néanmoins, le mortier témoin sans fibres $M_{50/0}$ reste favorisé via la densité fraîche.

Il apparaît que le mortier $M_{0/1,5/30}$ donne la moindre valeur en raison que les grains SD absorbent une quantité importante d'eau. Ceci est confirmé par la valeur minimale obtenue lors de son test d'étalement. De plus, pour toutes les formulations qui contiennent 100% SD on remarque des basses valeurs d'étalement par rapport aux autres formulations. La figure IV-2 montre une bonne corrélation de $R^2 = 0,9997$ de 45 points entre la densité à l'état frais et durci de différents mortiers étudiés. La relation permet de prédire avec une grande précision la densité du mortier durci à 28j à partir de la densité du mortier à l'état frais mesurée.

IV.2.3 Air occlus

L'essai de l'air occlus a été réalisé juste après le malaxage de chaque formulation de mortier à l'aide d'un aéromètre à mortier manuel, le résultat exprimé en % arrondi à 0,1 % près, sont présentés dans la Figure IV-3.

La teneur en air présente dans les bétons ou les mortiers constitue un paramètre essentiel. Une augmentation de la proportion d'air occlus provoquerait une réduction de la résistance à la compression, notamment après une période de durcissement spécifiée [these Boukour salima].

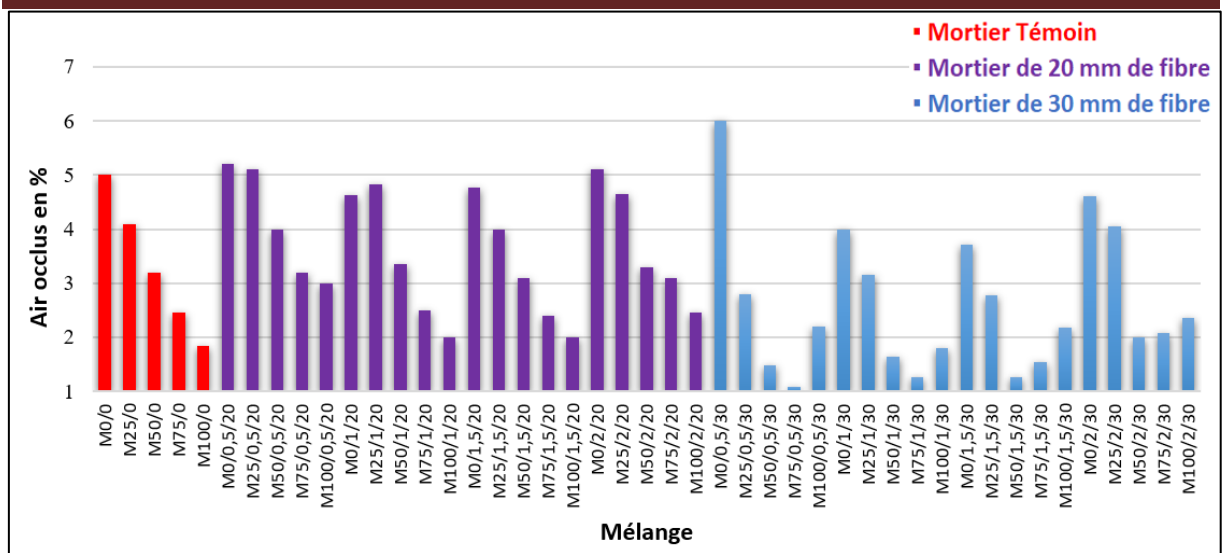


Figure IV-3 Teneur en air des mortiers en fonction du % de sable recyclé et de taux de fibre de chaque longueur.

Le remplacement des différentes doses de SD par du SR présente une diminution significative de la teneur en air du mortier de ciment, ce qui réduit les vides à l'intérieur du matériau et influence directement sa résistance ainsi que sa durabilité. Selon des études antérieures, la teneur en air du mortier de ciment varie entre 5 à 15,5 % [4] et d'environ de 6 % [5,6]. La variation de la teneur en air en fonction de la substitution du sable de dune par du sable recyclé, ainsi que l'effet de la fibre plastique PET-F en termes de longueur et de pourcentage. La teneur en air diminue de 18 %, 36 %, 51 % et 63 % pour les mortiers de contrôle M25/0, M50/0, M75/0 et M100/0 par rapport à celle du mortier de référence M0/0 respectivement. Cependant, on constate que l'incorporation de fibres de 20 mm de longueur ne réduit pas la teneur en air, mais elle l'augmente légèrement, à l'exception des formulations M0/1/20, M0/1.5/20, M25/1.5/20, M50/1.5/20 et M75/1.5/20 contenant 1,5% de PF. D'autre part, les formulations contenant des fibres de 30 mm de longueur ont enregistré une diminution de la teneur en air allant jusqu'à 60,31 %. Cependant, les formulations M0/1/30, M100/0.5/30, M100/1.5/30 et M100/2/30 ont montré une augmentation de 20,20 %, 19,46 %, 17,84 % et 27,57 % respectivement, Cela signifie que l'absence d'un des deux sables soit de dune ou recyclé influence négativement sur la teneur en air.

IV.3 Propriétés à l'état durci

IV.3.1 Résistance à la compression

La Figure IV-4 représente graphiquement l'évolution de la résistance à la compression de chaque type de mortier témoin testé après 28 jours en fonction du pourcentage de sable recyclé. La résistance à la compression a été déterminée en prenant la moyenne de six échantillons cubiques de mortier (4x4x4) cm³ composés de sable de dune, ajusté avec du sable recyclé issu de béton recyclé.

Il est observable à partir de cette figure que plus le taux de remplacement de sable de dune par du sable recyclé augmente, plus la résistance à la compression des mortiers étudiés augmente, jusqu'à atteindre un pourcentage de 75 % de remplacement. Au-delà de ce taux de substitution,

la résistance à la compression des composites diminue. En effet, les mortiers $M_{50/0}$ et $M_{75/0}$ présentent une meilleure résistance avec une augmentation de 15.50% et 15.92% par rapport au $M_{0/0}$.

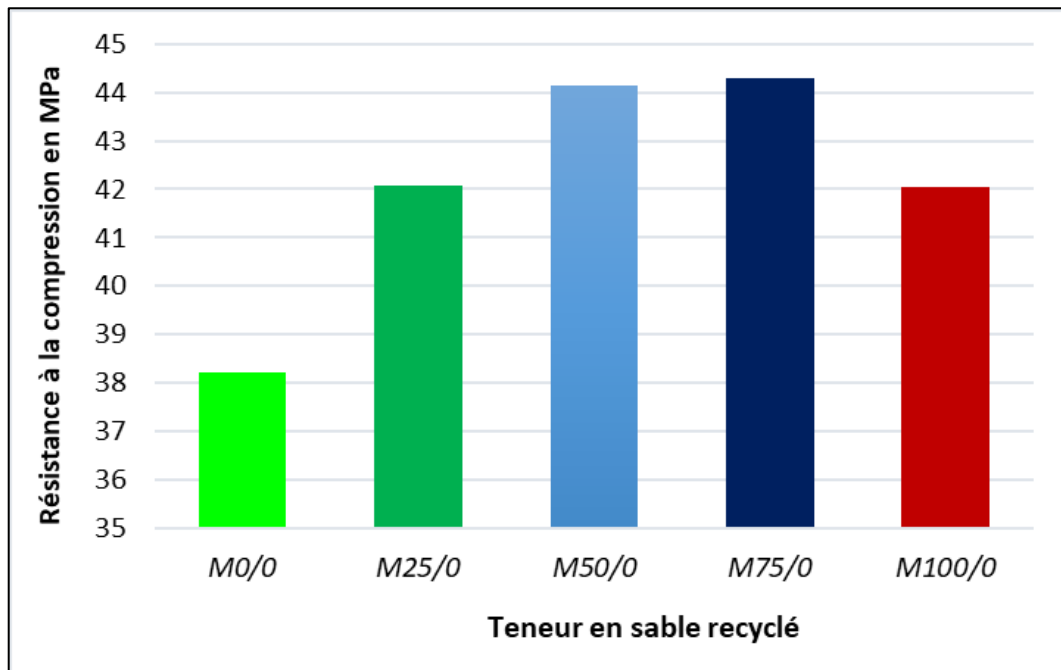


Figure IV-4 Rc des mortiers témoins après 28 j de cure à l'eau .

La diminution de la résistance des mortiers $M_{0/0}$, composés à 100 % de sable de dune, et $M_{100/0}$, composés à 100 % de sable recyclé, est due à la distribution des tailles de grains se situant à l'extérieur des limites du fuseau maximal et minimal. De plus, leur capacité d'absorption d'eau est très élevée, ce qui entraîne une obstruction importante de l'air à l'état frais, conduisant ainsi à la formation d'une porosité supplémentaire à l'état durci.

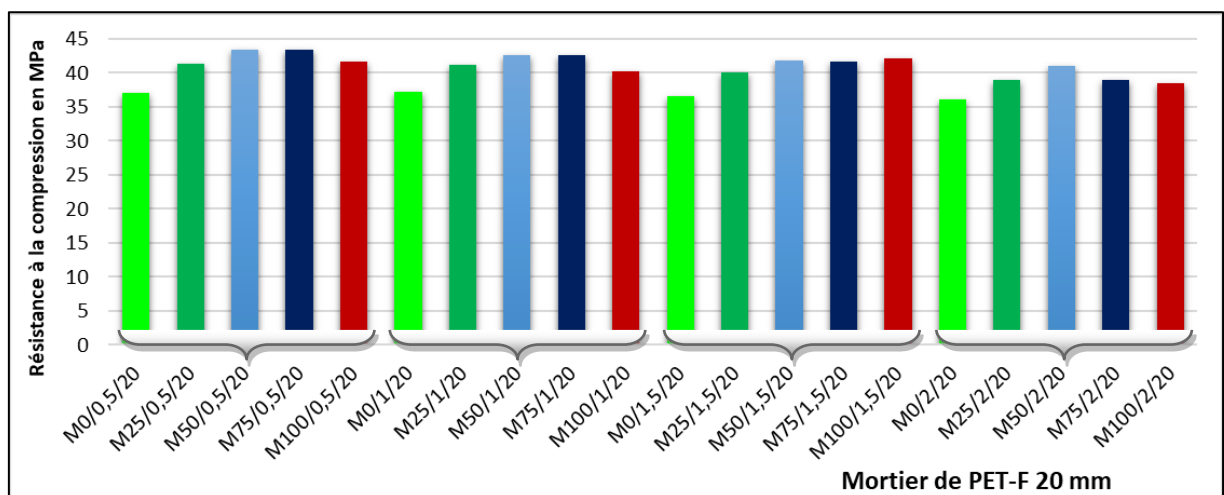


Figure IV-5 Rc des mortiers en fonction du taux de PET-F 20 mm.

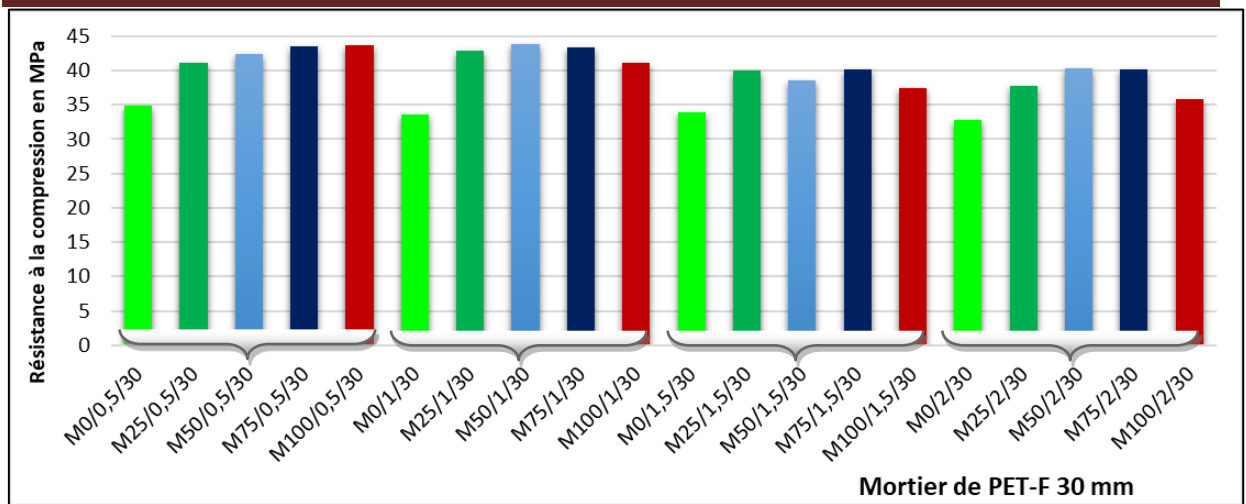


Figure IV-6 Rc des mortiers en fonction du taux de PET-F 30 mm.

Les résultats des essais de compression sur éco-mortiers fibrés à 28 jours sont présentés dans les figures IV-5 et IV-6. Nous avons constaté que la résistance mécanique en compression est acceptable.

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes conservées dans l'eau jusqu'au jour de l'essai ont montré que l'existence des fibres dans la matrice cimentaire n'a aucune influence remarquable. Par contre, elle entraîne une légère diminution de la résistance à la compression (R_c) par rapport aux mortiers témoins [3,7]. Ceci est principalement dû à la densité de fibre comparant au densité de mortier confectionné par SD et SR, comme il est indiqué au chapitre III (Table III.2 Propriétés physiques des granulats et du fibre plastique utilisé), ce constat a été confirmé par El Ouni MH et al. [8]. Une autre raison de la diminution de la résistance à la compression et la dispersé aléatoirement des fibres PET-F, ce qui engendre une accumulation de filaments des fibres. Cela entraîne une augmentation globale du volume des vides à l'interface fibre-mortier [9–12]. Par ailleurs, pour les mortiers avec une longueur de PET-F de 30 mm, la résistance R_c est légèrement faible par rapport au même mortier de fibre PET-F de 20 mm. Cela pourrait être attribué à une plus grande quantité des vides dans les mortiers en raison d'un mauvais compactage pour les fibres de grand longueur [13,14]. D'après les essais sur les propriétés des matériaux, les mortiers sans fibres $M_{50/0}$ et $M_{75/0}$ (témoins) présentent des meilleures résistances à la compression que les mêmes types des mortiers fibrés de 20 et 30 mm de long. Cette diminution de la résistance à la compression des échantillons fibrés $M_{50/y/(20,30)}$ et $M_{75/y/(20,30)}$ a été estimée de 1.8% à 7% , 0.6% à 12.4% et 1.9% à 12.2% , 1.7% à 9.3% respectivement (voir tableau IV.2, colonne 5 et 7). Des résultats similaires ont été rapportés par Kim et al. [15], indiquent que la résistance mécanique de béton avec des fibres Polyéthylène téréphtalate (PET) et polypropylène (PP) baisse de 1 à 9 % et de 1 à 10 %, respectivement, par rapport aux échantillons non renforcés par des fibres.

IV.3.2 Résistance à la flexion trois points

Les résultats de flexion trois points des éco-mortiers à 28 jours sont présentés aux Figures IV-7, IV.8 et IV-9, correspondant aux mortiers témoins, aux mortiers composés de fibres de 20 mm et aux mortiers confectionnés avec des fibres de 30 mm, respectivement. Nous avons noté que les

résultats en termes de résistance à la flexion sont devenus généralement satisfaisants. Pour commencer, nous avons constaté une amélioration de la résistance à la flexion des mortiers $M_{75/2(20-30)}$ et $M_{100/2(20-30)}$ de l'ordre de 34.85% et 38.12%, ainsi que 45.85% et 54.01%, respectivement, par rapport aux échantillons témoins ($M_{75/0}$ et $M_{100/0}$). En outre, la moindre valeur a été caractérisée par le mortier $M_{100/0}$ d'une valeur de 5.527 MPa. Cette dernière valeur a été réduite d'un pourcentage de 19.18% par rapport au mélange composé uniquement de DS ($M_{0/0}$).

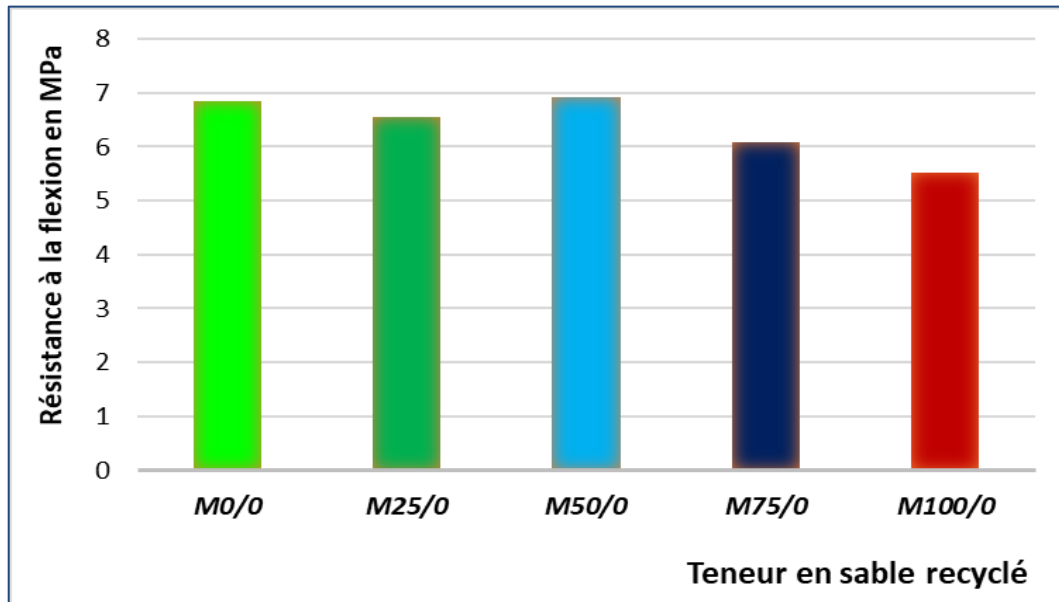


Figure IV-7 R_f des mortiers témoins après 28 j de cure à l'eau .

Dans cette investigation nous avons pu dire que la flexion a évolué lorsqu'on commence à substituer SD par SR. Ceci peut être expliqué par l'effet de forme angulaire et de la surface rugueuse des granulats recyclés, qui ont conduit à un meilleur mode d'adhérence entre la pâte et les grains combinés. Il a apparu clairement que le mélange $M_{50/0}$ est favorisé aux autres formulations témoins. En effet la répartition optimisée des grains solides (fig.III-4) et la valeur préférentielle du module de finesse qui est égale à 2.43, ont participé profondément à l'augmentation de la compacité et par la suite à la résistance de flexion. Le tableau IV-2 colonne 6 et 8 (voir annexe 2), a montré l'effet significatif de PET-F pour tous les mélanges confectionnés. Il est évident, que les composés de 30 mm de PET-F a une préférence remarquable que les mêmes composés de 20 mm en termes de résistance à la flexion (F_s). Cela était dû probablement à l'effet bénéfique de la longueur pour résister aux contraintes de traction dans les zones tendues de l'éprouvette.

Une augmentation graduelle de la résistance à la flexion a été mentionnée dans les mélanges $M_{x/y/30}$, en particulier lorsque x compris entre 25 à 100 et y est supérieur ou égal à 1.

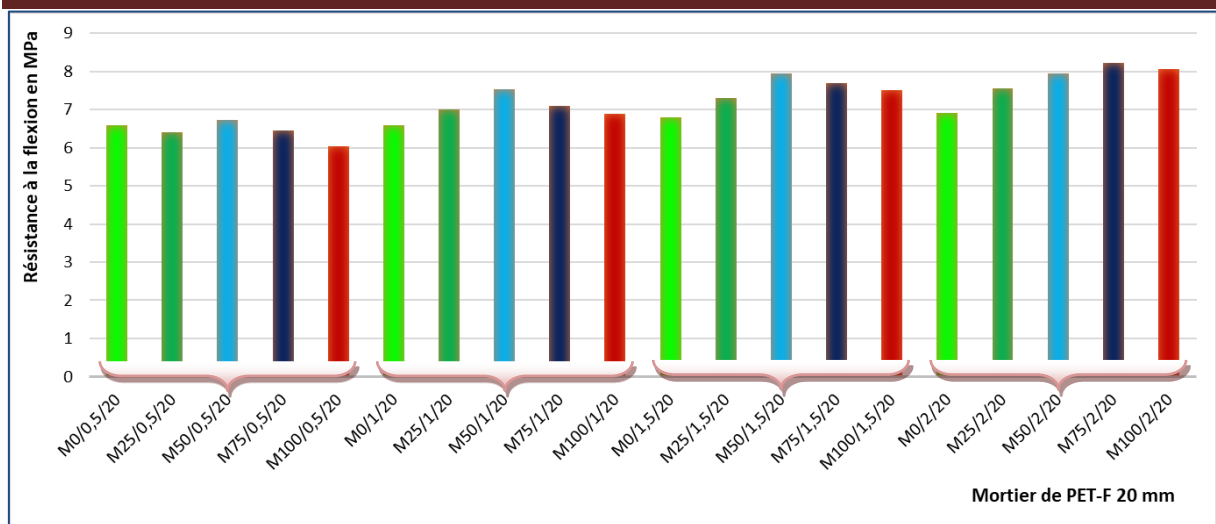


Figure IV-8 R_f des mortiers en fonction du taux de PET-F 20 mm.

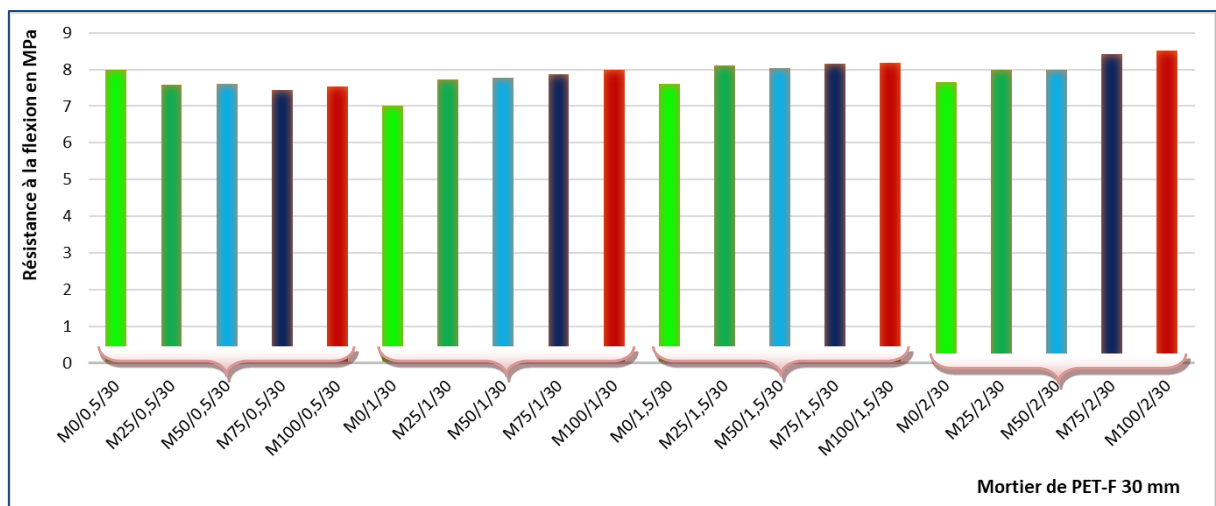


Figure IV-9 R_f des mortiers en fonction du taux de PET-F 30 mm.

D'après les Figures IV-10 et IV-11 On peut observer les différentes modalités de rupture des éprouvettes soumises à la charge de flexion. Une rupture fragile, correspondant à un comportement élastique, est observée sur les échantillons de mortier de référence allant de M_{0/0} à M_{100/0}, comme illustré à la Figure IV-10. Les ruptures brutales sont plus fréquentes pour les échantillons composés à 100% de sable de dune, tandis que les échantillons constitués d'un mélange de sable de dune et de sable recyclé présentent un comportement différent. Après une déformation plastique, les échantillons de mortier renforcé de fibres présentent une rupture ductile, caractérisée par la densification des microfissures. Les échantillons avec une faible teneur en fibres montrent une plus grande fréquence de microfissures. Il est à noter que les échantillons fabriqués à partir de PET-F de 30 mm favorisent davantage la rupture par rapport aux échantillons de PET-F de 20 mm (voir Figure IV-11a et b). En résumé, les facteurs clés qui affectent la résistance comprennent l'hydratation du ciment, la qualité des fines entre les deux types de sable, et l'humidité relative de l'environnement de stockage, d'une part, et la quantité de fibres en termes de taux et de longueur, d'autre part.

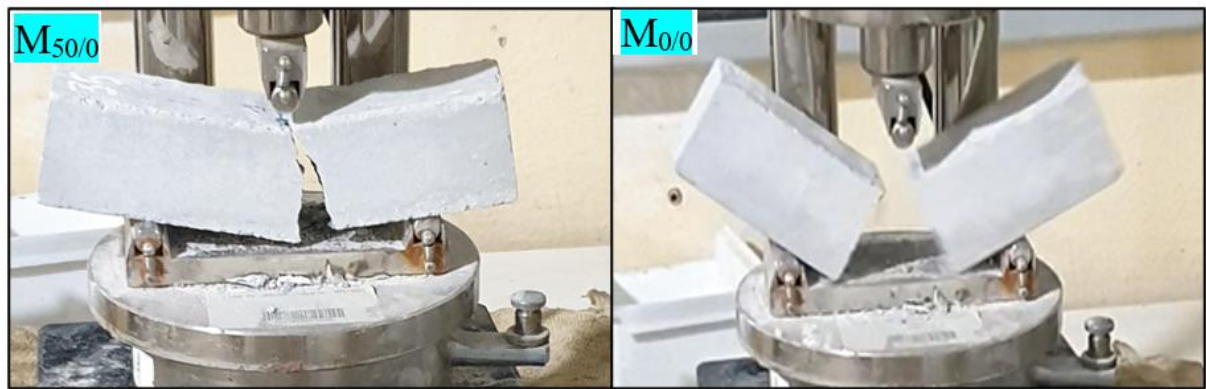


Figure IV-10 Mécanisme de défaillance des mortiers de références (sans fibres).

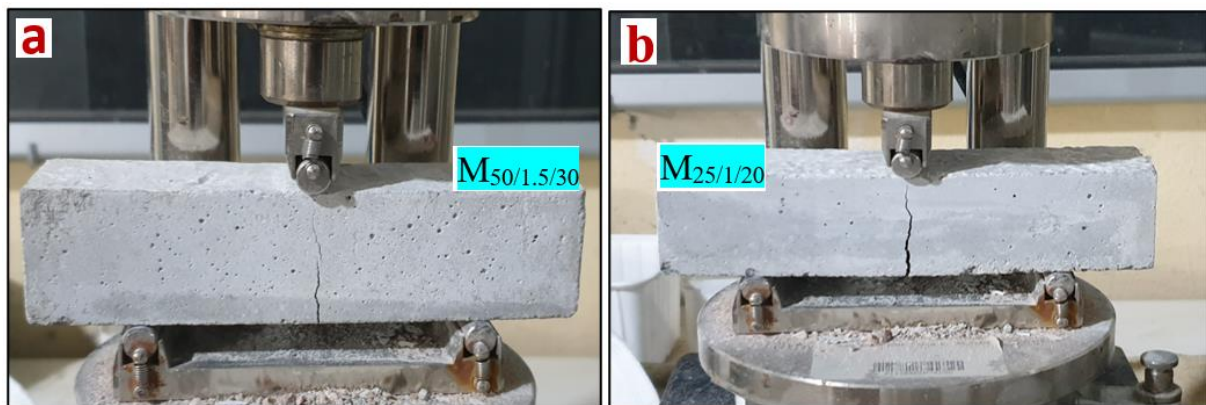


Figure IV-11 Mécanisme de défaillance (a), mortier fibré PET-F 30 mm et (b), mortier fibré PET-F 20 mm.

IV.3.3 Vitesse d'impulsion des ultrasons (UPV)

La Figure IV-12 montre les résultats des essais UPV. Dans l'ensemble, les UPV se situent entre 3248,67 m/s et 3786,96 m/s pour l'ensemble des éprouvettes de cette étude. Ces valeurs témoignent de la qualité et de la cohérence des éprouvettes examinées. Plus spécifiquement, le mortier $M_{50/0}$ se distingue par sa cohérence supérieure par rapport aux autres formulations de contrôle (mortier de référence), avec une augmentation de 11,15 %, 2,32 %, 1,06 % et 3,84 % par rapport à $M_{0/0}$, $M_{25/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$, respectivement. Cette amélioration est le résultat d'un mélange équilibré entre le sable de dune et le sable recyclé (50/50) %, ceci est dû à la fine de SD qui remplit les vides dans la matrice, réduisant ainsi la porosité.

De la même manière, le mortier fibré de type $M_{50/2/20}$ et $M_{50/1.5/30}$ a fourni la meilleure vitesse d'onde ultrasonore par rapport aux mêmes formulations pour chaque longueur séparément et avec une augmentation de 4,87% et 0,67% par rapport au mortier de contrôle $M_{50/0}$.

Sur la base des résultats obtenus (Tableau IV-2 voir annexe 2), Les échantillons avec fibres plastiques recyclées (FPR) de 20 mm et de 30 mm de longueur présentait clairement la valeur la plus élevée par rapport au mortier de témoin, Cela signifie que les fibres plastiques jouent un rôle bénéfique en comprimant la matrice cimentaire pour réduire les vides. En outre, l'arrangements des grains solides de sable de dune avec sable recyclé de teneurs (50/50)% s'est avérée être la plus efficace pour remplir les vides, améliorer la cohésion et obtenir une valeur ultrasonore plus élevée, ce qui est une bonne indicateurs de la résistance mécanique.

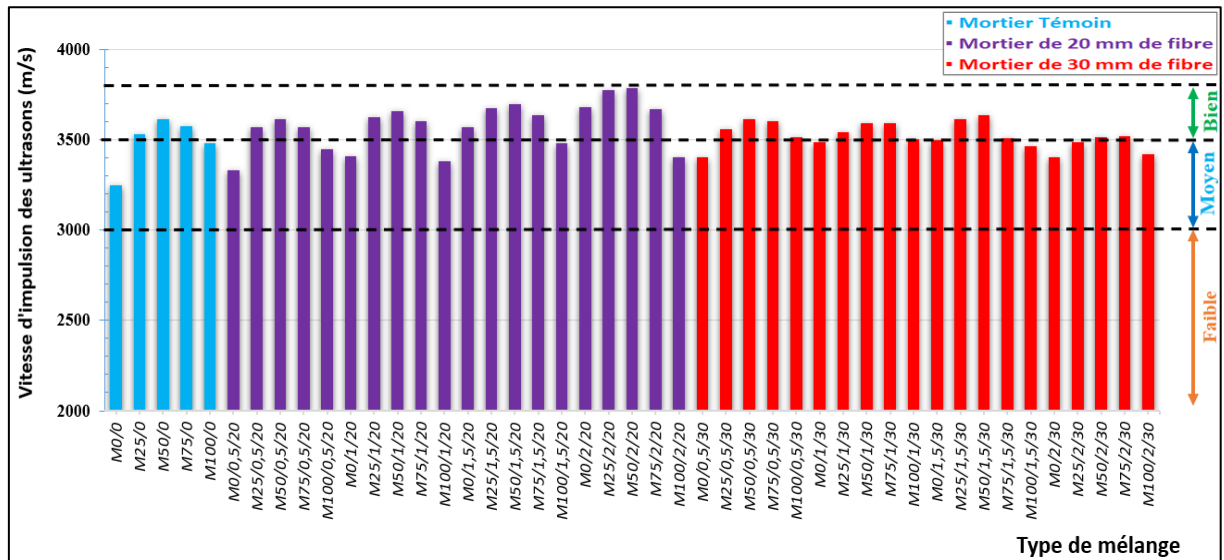


Figure IV-12 Effet de la substitution de SD par SR et du taux de fibre sur UPV .

On observe une légère diminution de la vitesse dans le mortier confectionné avec des fibres de 30 mm de longueur par rapport au mortier contenant des fibres de 20 mm de long. Cette réduction peut être attribuée à la présence de fibres plastiques de 30 mm de longueur disposées de manière aléatoire, ce qui conduit à la formation de nids, provoquant ainsi une augmentation de la taille des pores dans la matrice cimentaire.

Ces résultats sont en coordination avec ceux obtenus à partir des essais d'écrasement (Figure IV-4, IV-5 et IV-6), où les mortiers ayant des vitesses élevées présentent logiquement des résistances élevées.

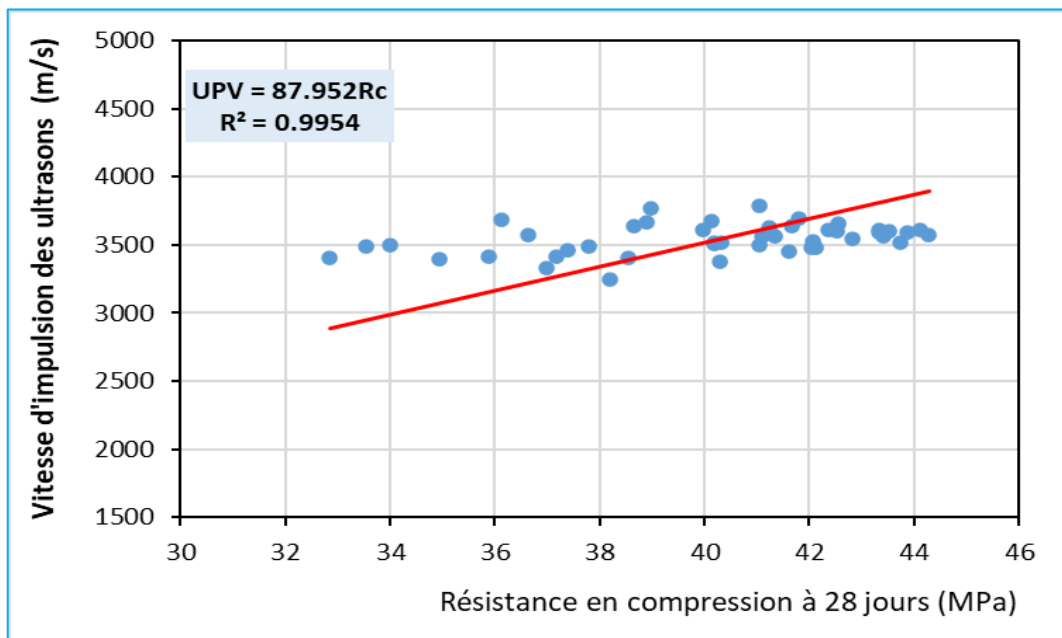


Figure IV-13 Corrélation entre la résistance en compression et la vitesse UPV.

La Figure IV-13 illustre la relation entre la résistance à la compression et les valeurs d'UPV correspondantes à 28 jours pour les mortiers, qu'ils contiennent ou non des fibres. On observe que la tendance de l'UPV est similaire à celle de la résistance à la compression, avec une

augmentation de la vitesse ultrasonique parallèle à l'augmentation de la résistance à la compression pour tous les mélanges.

Cette corrélation peut être représentée par la formule suivante (equation 1) :

$$UPV = 87.952 \times R_c \quad (1)$$

Ce modèle linéaire est solidement étayé par un coefficient de détermination R^2 égal à 0,9954, ce qui atteste l'efficacité des mesures d'UPV pour évaluer les propriétés mécaniques du mortier. Par conséquent, l'UPV peut également être employée pour surveiller sur le terrain les éco-mortiers et contrôler leur résistance à la compression.

IV.3.4 Module d'élasticité dynamique (E_{dyn})

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé pour chaque type de mortier de référence (sans fibre) à l'état durci à l'âge de 28 jours, la composition étant spécifiée en ce qui concerne la substitution du sable de dune par le sable recyclé dans la Figure IV-14.

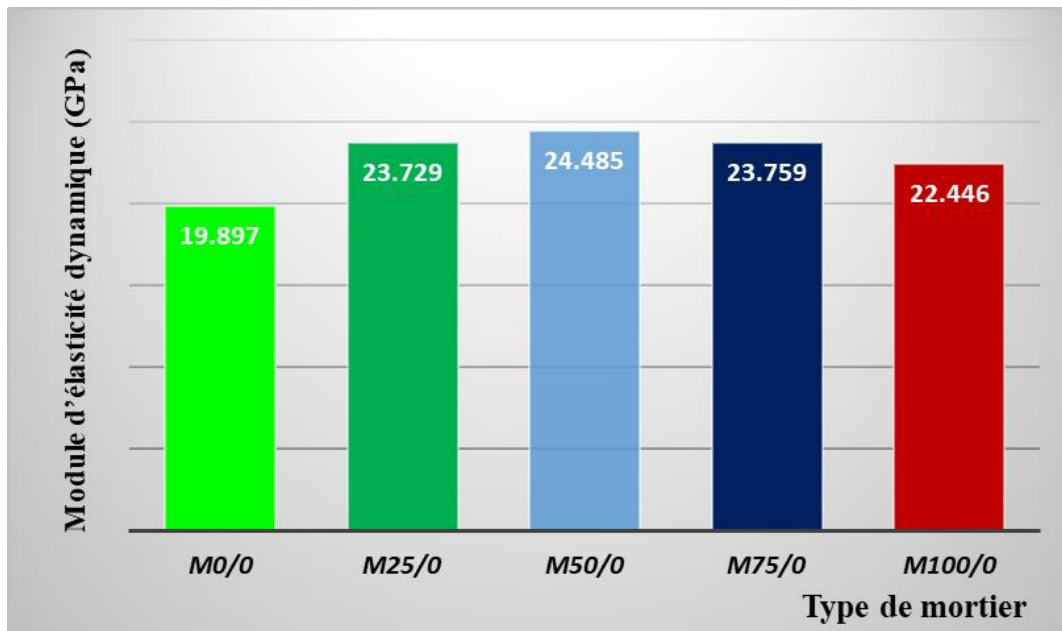


Figure IV-14 Effet de la substitution de SD par SR sur E_{dyn} .

À partir de ces résultats, le module d'élasticité dynamique des mortiers suit la même tendance que la résistance à la compression (Figure IV-4).

Ces résultats, ils suggèrent que le module d'élasticité dynamique des éco-mortiers atteint un point d'inflexion dans le mélange $M_{50/y/z}$, indépendant du pourcentage de fibres et de la valeur de longueur.

On constate également que le module d'élasticité dynamique augmente jusqu'à 50/50 % de substitution, puis diminue à nouveau. L'incorporation de granulats recyclés à 25 %, 50 %, 75% et 100 % dans les éco-mortiers a un effet bénéfique. Il améliore le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}) de 19,26%, 23,06%, 19,41% et 12,81% par rapport à l'éco-mortier composé uniquement de granulats de dunes purs ($M_0/0$). Pour les éco-mortiers contenant des fibres de

20 mm et 30 mm (voir Figure IV-15 et Figure IV-16), le module d'élasticité atteint respectivement des valeurs de 26,350 GPa et 25,351 GPa dans le cas du composé $M_{50/1,5/z}$ (z représente les longueurs des fibres). Il est intéressant de noter une légère augmentation d' E_{dyn} dans les échantillons de fibres de 20 mm par rapport à ceux de 30 mm.

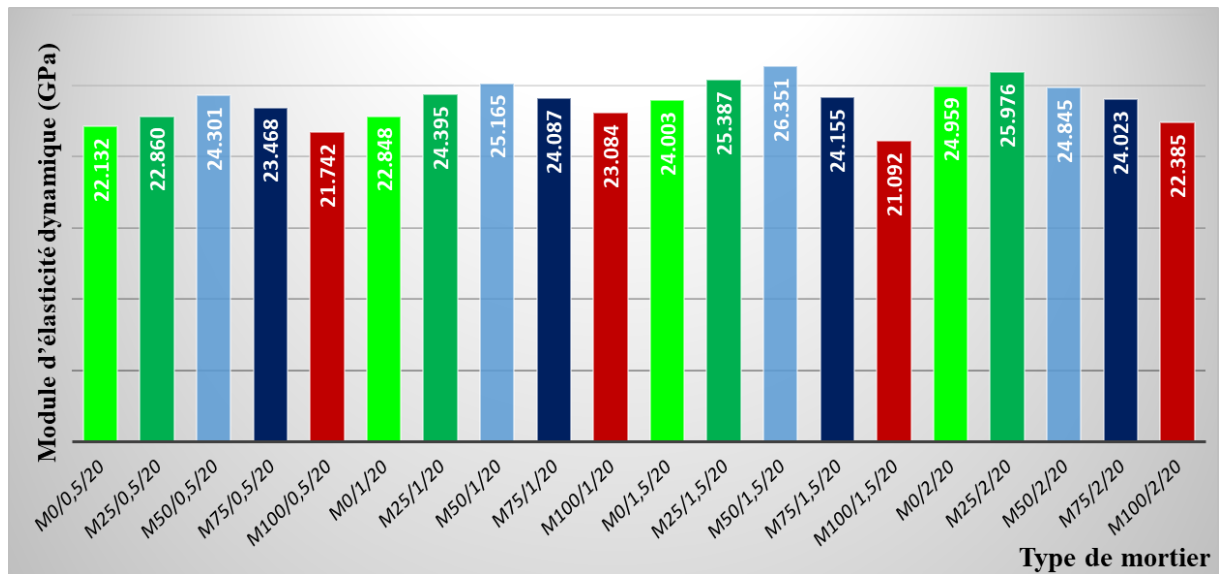


Figure IV-15 Effet du pourcentage de PET-F de 20 mm sur le module d'élasticité dynamique de chaque type de mortier.

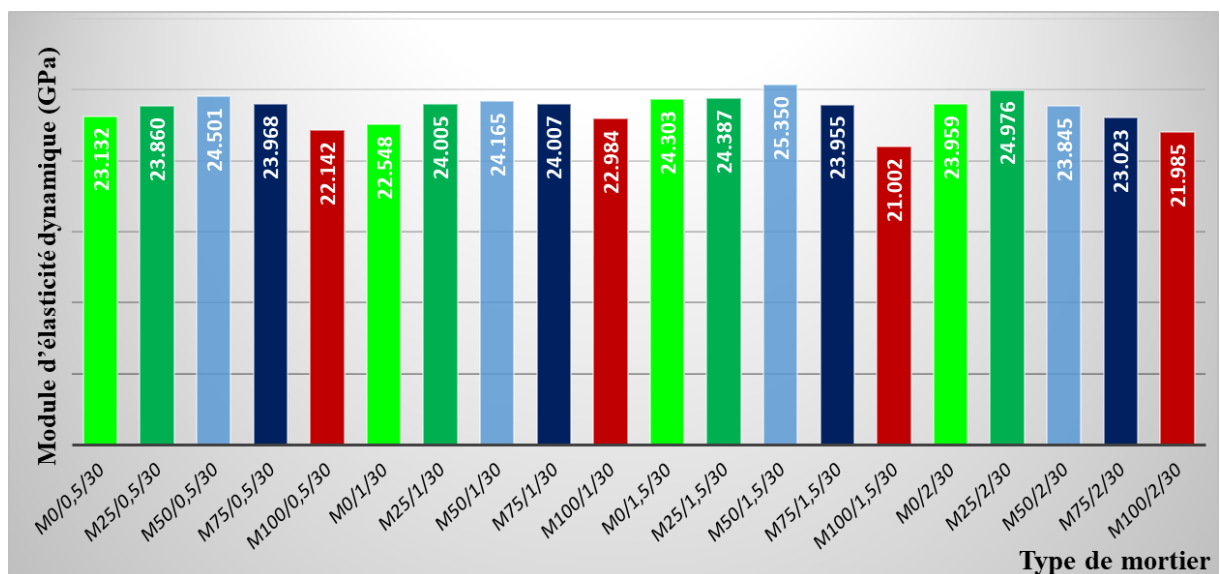


Figure IV-16 Effet du pourcentage de PET-F de 30 mm sur le module d'élasticité dynamique de chaque type de mortier.

Plusieurs études ont montré que l'ajout de fibres plastiques augmente le module d'élasticité dynamique, indiquant une amélioration de la rigidité de l'éco-mortier [9,13]. Cependant, il est essentiel de noter que les résultats peuvent varier en fonction des types de fibres plastiques utilisées, de leurs spécifications et des conditions expérimentales.

IV.4 Propriétés des facteurs de durabilité.

Suite aux développements précédents sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci, cette section s'intéresse à un aspect tout aussi crucial qui est les facteurs de durabilité.

La durabilité d'un béton ou mortier peut se définir, par sa capacité à résister à la fois aux dommages internes (compatibilité entre ciment et le fibre plastique, l'homogénéité de particule de sable de dune et le sable recyclé, changement de volume...etc.) et externes (les agents agressive, variation de température et d'humidité...etc.) [16,17]. En termes simples, la durabilité d'un béton ou d'un mortier fait référence à sa capacité à maintenir ses caractéristiques opérationnelles au fil du temps, dans des conditions d'utilisation courantes. La durabilité du matériau est influencée non seulement par les performances de ses composants, mais également par leur compatibilité [16,18,19].

La durabilité des matériaux cimentaires peut être menacée par diverses influences physiques ou chimiques qui facilitent le passage de fluides (liquides ou gaz) à travers la structure de ces matériaux. Parmi les processus fondamentaux, on trouve la perméabilité, la diffusion et l'absorption, qui peuvent permettre à des substances agressives de pénétrer dans la structure des matériaux cimentaires, entraînant une altération de leurs propriétés mécaniques et protectrices.

Les attaques provenant du milieu extérieur peuvent compromettre la durabilité du matériau cimentaire et éventuellement entraîner une diminution des propriétés mécaniques. La porosité accessible à l'eau joue un rôle déterminant dans la régulation de la durabilité et des résistances des bétons et mortiers [16].

IV.4.1 Absorption d'eau par immersion la sorptivité

Lorsqu'un matériau composite est immergé dans l'eau pendant une durée spécifique, la quantité d'eau qu'il absorbe est désignée sous le terme "absorption d'eau". Cette mesure est utilisée pour évaluer la capacité du composite insaturé à permettre l'infiltration d'eau à travers ses pores, qui jouent un rôle important dans ce processus d'absorption lorsqu'il est en contact avec un environnement aqueux, comme expliqué dans la référence [20]. En d'autres termes, l'absorption d'eau est un indicateur de la susceptibilité du matériau composite à la pénétration d'eau à travers ses pores, ce qui peut être particulièrement important pour évaluer sa performance dans des conditions où l'exposition à l'humidité est un facteur critique.

Les résultats de l'essai de capillarité d'absorption d'eau sur les divers mortiers examinés sont illustrés dans la figure IV-17 et IV-18 sous forme de courbes lissées représentant l'augmentation de la masse des échantillons en fonction de la racine carrée du temps (\sqrt{t}). Il est observé que l'absorption d'eau, notée "I" des mortiers étudiés (par unité de surface) augmente proportionnellement à la racine carrée du temps à différents moments.

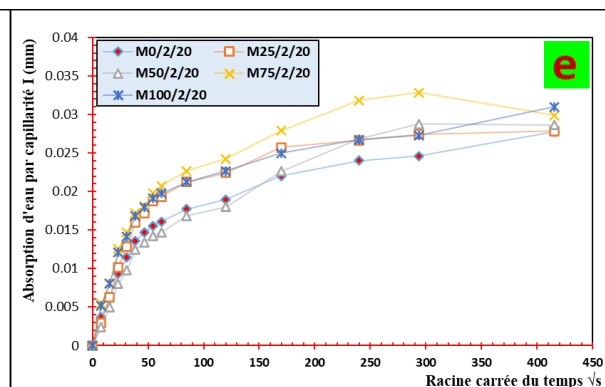
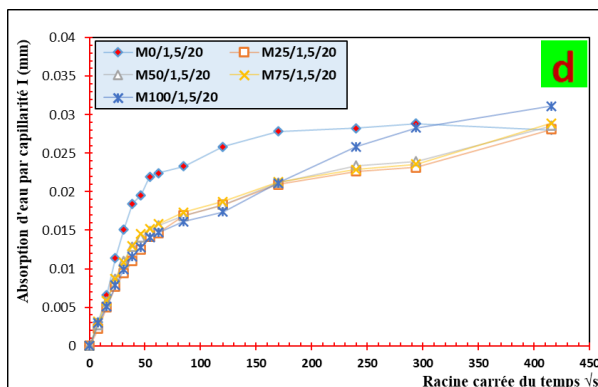
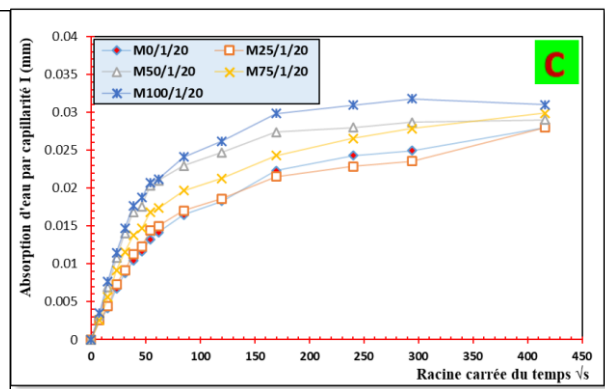
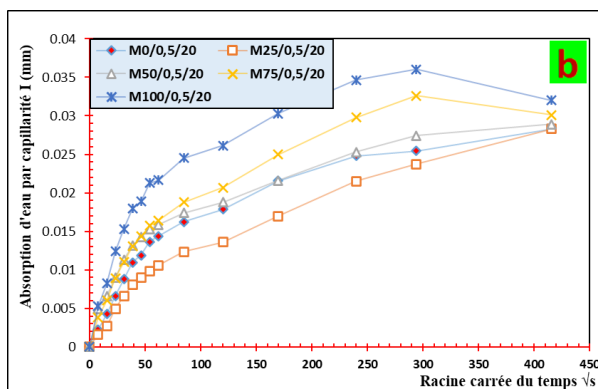
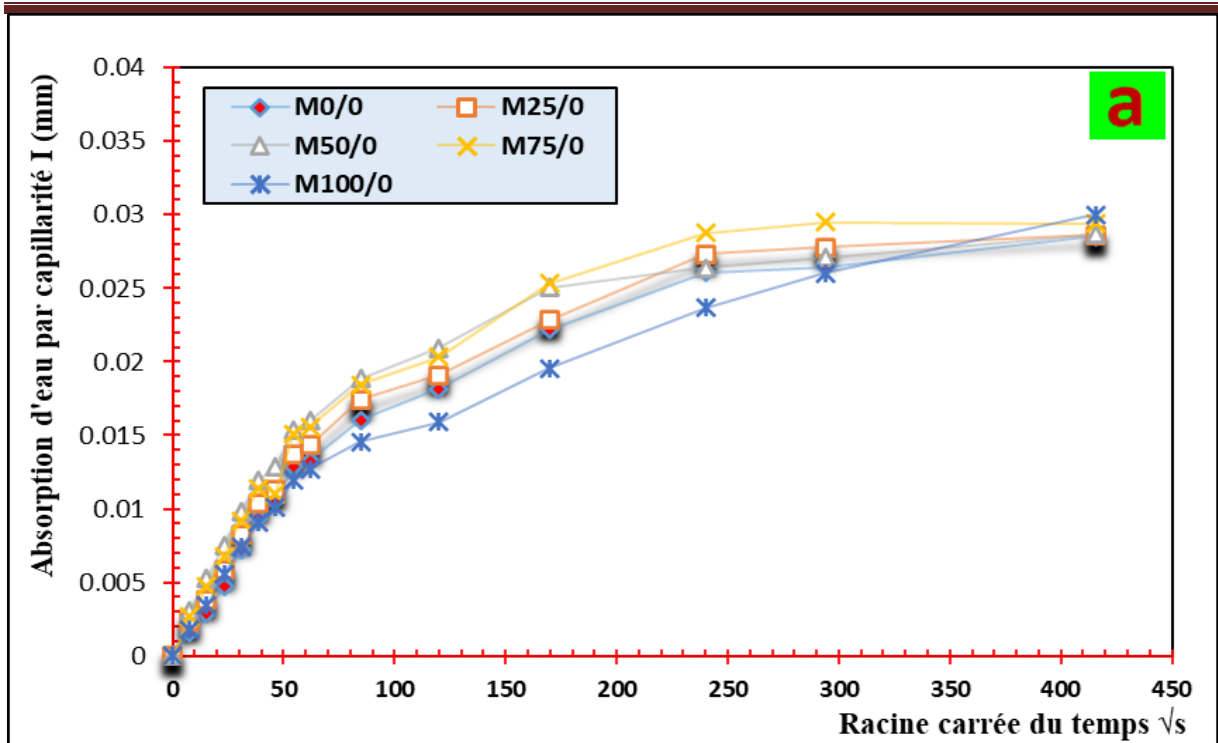


Figure IV-17 Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction de a) taux de substitution de SD par SR de mortier témoin, b) avec 0.5% de PET-F 20 mm, c) avec 1% de PET-F 20 mm, d) avec 1.5% de PET-F 20 mm et e) de 2% de PET-F 20 mm.

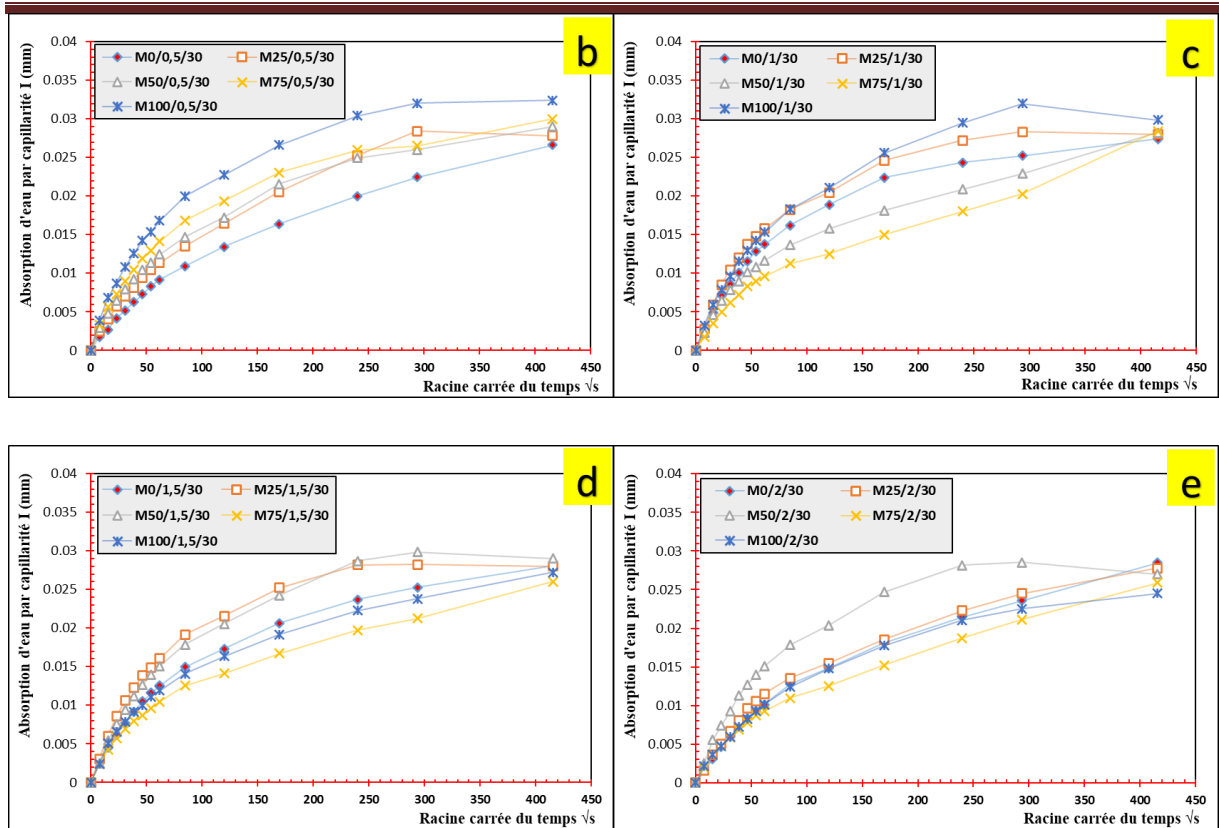


Figure IV-18 Cinétique d'absorption d'eau par capillarité en fonction de **b)** avec 0.5% de PET-F 30 mm, **c)** avec 1% de PET-F 30 mm, **d)** avec 1.5% de PET-F 30 mm et **e)** de 2% de PET-F 30 mm.

Le Tableau IV-3 synthétise les résultats des essais expérimentaux sur l'absorption d'eau. La formulation à 100 % de sable de dune ($M_{0/y/z}$) présente la plus faible valeur d'absorption d'eau. Les mélanges sans fibres de 20 mm et 30 mm de longueur affichent des valeurs moyennes d'absorption par immersion de 12,73 %, 12,70 % et 12,49 %, respectivement. Dans ce contexte, une diminution de l'absorption d'eau est observée pour les mélanges contenant des fibres de 30 mm de longueur, suggérant probablement la capacité de ces fibres à repousser et à bloquer le passage de l'eau. La quatrième colonne du tableau indique que le remplacement du sable de dune par du sable recyclé accroît l'absorption d'eau [1]. Ainsi, à mesure que le pourcentage de sable recyclé augmente, l'absorption d'eau connaît également une augmentation. Cette observation est principalement attribuée à la structure poreuse de l'éco-mortier qui adhère aux granulats, créant d'importants espaces vides et conduisant à une augmentation de l'absorption d'eau [13,21–27].

La structure interne des matériaux cimentaires et la répartition des pores sont deux facteurs qui influencent la sorptivité.

Les éco-mortiers étudiés sont soumis à une montée capillaire de l'eau, qui est principalement retenue dans les pores capillaires [1]. Toutefois, les pores du gel de silicate de calcium hydraté (CSH) contribuent très peu à l'absorption en raison de l'étroitesse de l'espace entre les feuillets de CSH, d'environ 28 Å [28,29].

En général, la sorptivité initiale est calculée en prenant en compte le temps d'absorption final.

Les valeurs d'absorption d'eau sont représentées en fonction de la racine carrée du temps en secondes, comme illustré dans les figures IV-17 et IV-18. La pente de la courbe de sorptivité est plus prononcée au cours des 49 premières minutes ($54 \sqrt{s}$) par rapport à la période d'exposition ultérieure. La figure IV-17 (a) présente les courbes d'absorption capillaire pour les mélanges d'éco-mortiers sans fibres PET-F (éco-mortier témoin). L'augmentation du pourcentage de remplacement du sable recyclé entraîne une augmentation de l'absorption capillaire et des pentes plus marquées. L'impact des fibres PET-F sur le taux d'absorption capillaire est illustré dans les figures IV-17 et IV-18 (b, c, d et e).

De manière générale, l'absorption totale sur une période de $415\sqrt{s}$ diminue avec l'augmentation de la longueur de PET-F. Les fibres plus longues présentes dans la matrice cimentaire entravent le déplacement de l'eau, réduisant ainsi le taux d'absorption capillaire [8,30].

Les résultats de la sorptivité des échantillons d'éco-mortier à 28 jours sont répertoriés dans le tableau IV-3. Pour les mélanges de référence, c'est-à-dire les mélanges sans l'additif PET-F, comprenant $M_{0/0}$, $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$, et $M_{100/0}$, il est évident que la sorptivité augmente à mesure que le pourcentage de remplacement de SD par SR augmente. L'incorporation de fibres de type PET-F réduit la sorptivité des mélanges à différents pourcentages grâce au rôle des fibres dans le comblement des vides et dans le renforcement de la cohésion de la matrice, ce qui entraîne une absorption et une sorptivité moindres [1,31–33].

Concernant, les valeurs moyennes d'absorption capillaire des échantillons, à savoir les échantillons de 20 mm et 30 mm de long, l'éco-mortier de 30 mm de long présente une absorption minimale de 3,45 % par rapport à l'échantillon témoin de 20 mm, comme indiqué dans la colonne 6 du tableau IV-3.

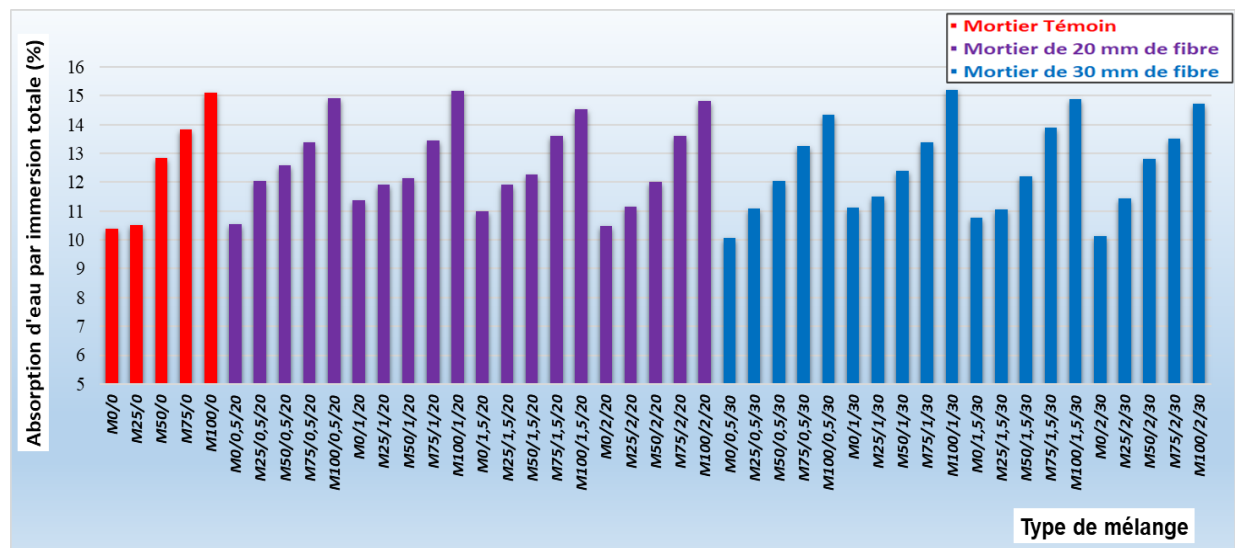


Figure IV-19 Absorption d'eau des mélanges témoins et des mélanges avec PET-F de 20 et 30 mm.

La figure IV.19 illustre la cinétique d'absorption d'eau des mortiers étudiés. On observe que les mortiers de référence présentent le taux d'absorption le plus bas par rapport au mortier fibré, que ce soit en termes de taux ou de longueur. De plus, on remarque une augmentation du taux d'absorption d'eau avec l'augmentation du pourcentage de sable recyclé.

Les variations des taux d'absorption d'eau dans le mortier de référence sont de 10,58%, 23,46%, 32,98%, et 45,10% lorsque le pourcentage de sable recyclé augmente de 25%, 50%,

75%, et 100%, respectivement, par rapport au mortier composé à 100% de sable de dune. Cette observation peut être attribuée aux pores générés par l'agrégat recyclé en raison de la présence de l'ancienne pâte attachée aux granulats. D'une part, l'air emprisonné dans le mortier le rend plus poreux, augmentant ainsi sa perméabilité et favorisant une absorption accrue d'eau.

Les fibres n'ont pas joué un rôle significatif dans la limitation du processus d'absorption d'eau dans les matrices cimentaires, comme clairement démontré par la figure ci-dessus.

IV.4.2 Porosité

La colonne 7 du tableau IV-3 présente les résultats expérimentaux de la porosité, tandis que la colonne 8 du même tableau montre la différence de porosité entre les éco-mortiers témoins, calculée à partir d'un mélange à 100 % SD, et les autres formulations fibrées qui sont calculées à partir du même type de mélange de référence (sans fibre).

La Figure IV-20 présente la corrélation entre la porosité des éco-mortiers sans fibres et des éco-mortiers contenant des fibres de 30 mm et 20 mm. Il montre une porosité ouverte en fonction de la substitution SD par SR, du taux de fibres et de la longueur du PET-F. Il est important de noter qu'augmenter le pourcentage de substitution entraîne une augmentation de la porosité. De plus, l'ajout progressif de fibres PET-F entraîne un volume poreux supplémentaire. Cependant, il est intéressant de noter que la longueur des fibres a un effet négligeable sur la porosité (Figure IV-22 et IV-23).

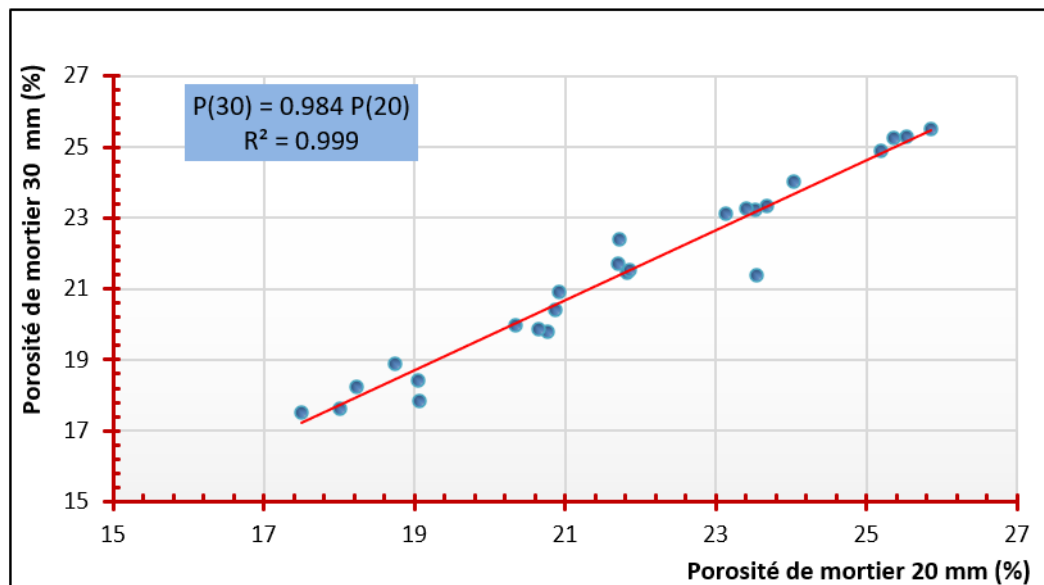


Figure IV-20 Relation entre la porosité du mortier témoin et avec PET-F (30 mm, 20 mm).

Le mélange contenant uniquement du SD présente la porosité la plus faible par rapport aux autres mélanges sans fibres (mortiers témoins). Les mélanges $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$ ont montré respectivement des pourcentages de porosité supérieurs de 4,23 %, 19,51 %, 32,17 % et 37,31 % par rapport au mélange $M_{0/0}$ (Figure IV-21). L'ajout de fibres, que ce soit en termes de longueur ou de pourcentage, a un effet négatif sur le volume total des vides dans les mortiers solides. L'incorporation des fibres de 20 mm de longueur entraîne une augmentation

du volume poreux de 1,69 % à 14,42 % (Figure IV-22). De même, les éco-mortiers contenant des fibres de 30 mm de longueur ont un pourcentage de volume poreux de 0,43 % à 11,95 % supérieur à leurs formulations de référence (Figure IV-23). Cela contribue à l'apparition de pores supplémentaires dans la pâte attachée au SR [34,35].

On conclure une forte corrélation existe entre les différents mélanges de fibres de 20 mm et 30 mm, avec un coefficient R^2 égal à 0,999 et une équation prédictive prouvant l'effet négligeable de l'augmentation de la longueur des fibres.

$$P(30) = 0,984 \times P(20) \tag{2}$$

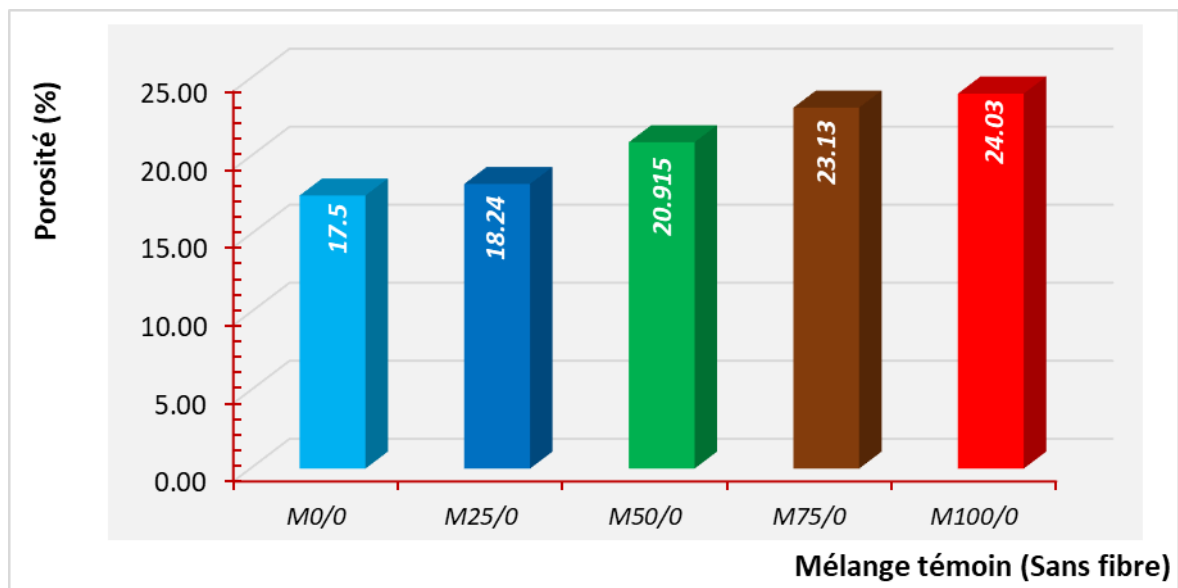


Figure IV-21 Porosité en fonction de la teneur SR.

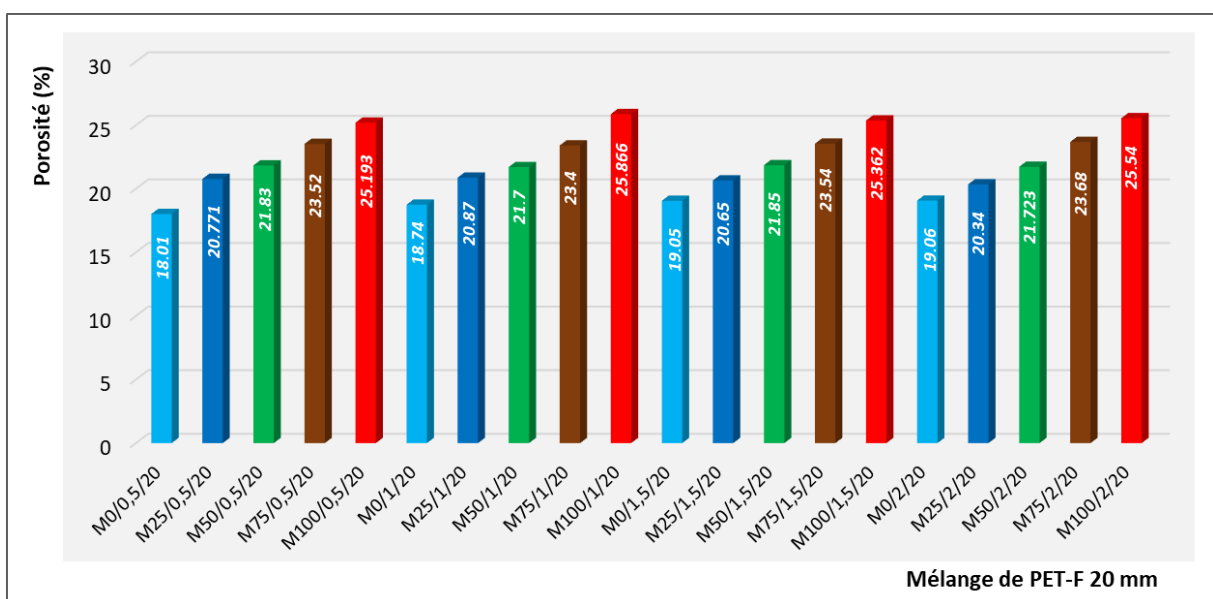


Figure IV-22 Effet du taux de PET-F 20 mm sur la porosité.

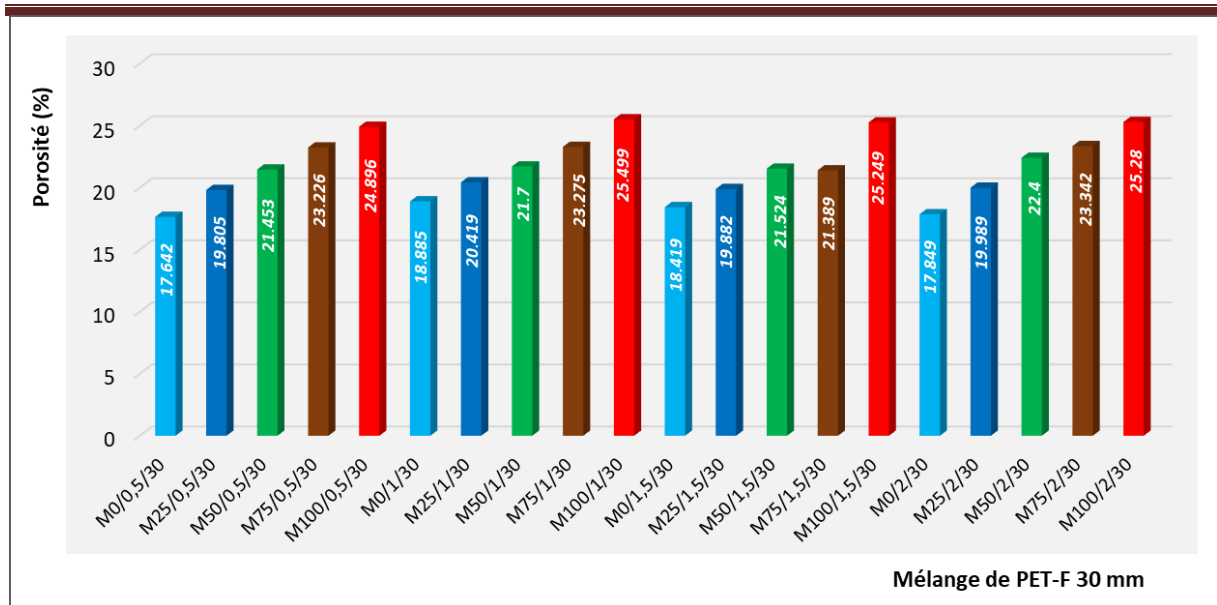


Figure IV-23 Effet du taux de PET-F 30 mm sur la porosité .

La porosité et l'absorption d'eau sont des indicateurs cruciaux de la durabilité des bétons ou mortiers, révélant la propension des agents agressifs à infiltrer et à altérer la structure de la matrice cimentaire. Le Tableau IV-3 récapitule les résultats pour la porosité accessible à l'eau et le taux d'absorption d'eau par immersion totale des mortiers testés.

Une corrélation entre les deux paramètres émerge : les mortiers affichant une plus grande porosité sont ceux qui absorbent plus d'eau. Cette porosité accrue peut être attribuée à l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour assurer la maniabilité du mortier. Au cours de la prise et du durcissement, l'eau non réactive avec le ciment s'évapore progressivement, créant des vides qui contribuent à la porosité. Cette explication rend compte du taux élevé d'absorption d'eau, notamment dans les bétons à base d'agréats recyclés.

IV.4.2 Retrait

Les résultats du retrait plastique des échantillons sont présentés dans la Figure IV-24. Les fissures résultant du retrait plastique constituent la principale cause de détérioration des performances des matériaux, pouvant permettre la pénétration d'agents agressifs au sein des structures en béton ou de mortier. Ces fissures peuvent entraîner une diminution de la résistance et provoquer le collapsus prématuré des structures en béton armé ou du mortier.

Les échantillons de contrôle $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$ ont montré une réduction du retrait en fonction de l'augmentation du pourcentage de sable recyclé, avec des taux de -0,81 %, -15,71 %, -11,96 % et -22,36 % par rapport au mortier témoin ($M_{0/0}$ à 100 % de sable de dune), respectivement. De plus, tous les échantillons composés de fibres de 20 mm et 30 mm de longueur ont présenté une diminution du retrait par rapport aux mêmes formulations sans fibres (mortier de contrôle). La longueur des fibres a joué un rôle crucial dans la réduction de la valeur de retrait, et le pourcentage de fibres a également joué un rôle très important dans l'élimination du retrait, pouvant également prévenir la propagation des fissures les plus courtes.

La formulation M_{50/2/30} a enregistré une diminution du retrait de -91,7 % par rapport à la même formulation sans fibres M_{50/0}. Sur la base des résultats obtenus, les échantillons avec des fibres plastiques recyclées PET-F de 30 mm de longueur ont clairement montré la valeur la plus basse par rapport au mortier confectionné avec les PET-F de longueur de 20 mm, ainsi qu'au mortier de contrôle. Cela indique que les fibres plastiques jouent un rôle utile dans le renforcement des spécimens et le maintien de la forme géométrique.

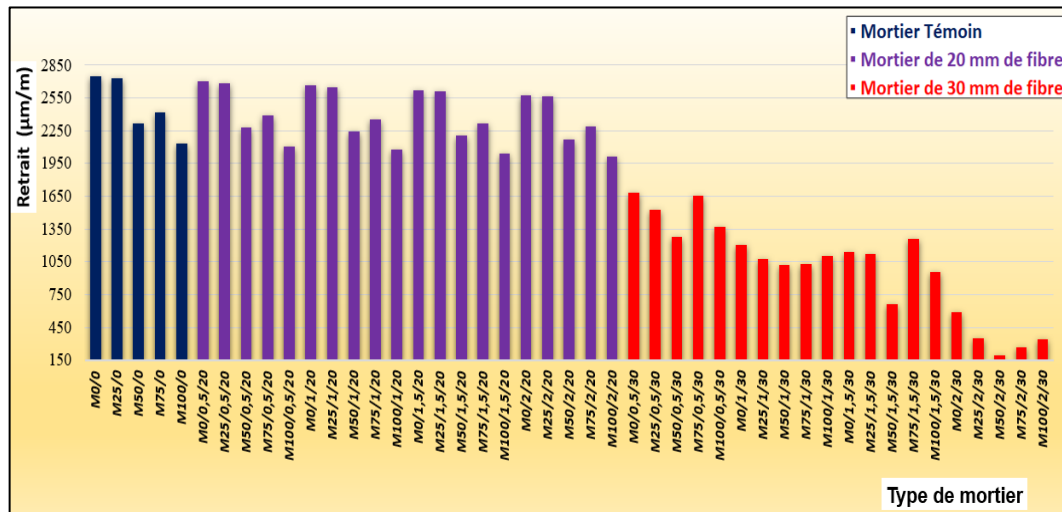


Figure IV-24 Effet de l'incorporation des fibres PET-F (20 et 30) mm sur le retrait de mortier.

IV.4.3 Exposition des éco-mortiers à l'acide sulfurique H₂SO₄

Tout d'abord, le protocole d'attaque par l'acide sulfurique H₂SO₄ est basé sur une application des cycles alternatifs de mouillage/ séchage 7j/7j pour accélérer le processus de dégradation. En d'autres termes, Les échantillons ont été immergés pendant 7 jours dans une solution concentrée d'eau distillée contenant 5% d'H₂SO₄, puis exposés à l'air libre pendant 7 jours suivants, et ce processus se répétait de manière ininterrompue jusqu'à atteindre une période de 240 jours. Ce protocole a été méticuleusement mis en place afin de garantir une évaluation exhaustive et régulière des échantillons soumis à cette forme spécifique d'agression chimique.

L'évaluation a été conduite en mesurant la perte de poids des éprouvettes et en effectuant des examens visuels réguliers. Cette approche méthodique a permis d'analyser de manière approfondie l'effet de l'acide sulfurique sur les éco-mortiers. La mesure précise de la perte de poids a fourni des données quantitatives, tandis que les examens visuels réguliers ont offert une perspective qualitative sur l'évolution des échantillons exposés à l'acide sulfurique. Ces inspections visuelles, réalisées à des intervalles réguliers, ont contribué à obtenir une compréhension complète de la réaction des éco-mortiers face aux conditions d'exposition, mettant en évidence tout changement physique ou altération de leur aspect au fil du temps.

IV.4.3.1 Observation visuelle

L'inspection visuelle périodique des échantillons exposés à des solutions d'acide sulfurique constitue une méthode complémentaire pour évaluer la dégradation des propriétés physiques et les altérations de l'aspect extérieur. Cette approche fournit des informations précieuses pour comparer différents échantillons. Après l'immersion des mortiers d'étude dans des solutions à

5 % de H_2SO_4 , on a constaté une lixiviation de la pâte de ciment, accompagnée de la formation de gypse cristallisé dès les premiers jours du vieillissement accéléré. De plus, après plusieurs cycles de mouillage et de séchage, une couche vitreuse cristallisée d'une teinte jaune foncé est apparue à la surface du mortier composé de sable de dune mélangé avec du sable recyclé. Cette observation suggère une précipitation du produit formé dans la solution d'essai, particulièrement remarquable avec un temps d'immersion prolongé. Ces résultats mettent en lumière les effets visuels distincts associés à l'interaction entre les matériaux et l'acide sulfurique, soulignant les changements morphologiques significatifs au fil du temps.

Les figures IV-25 (a et b) illustrent l'état initial des échantillons avant leur immersion et leur évolution après des périodes de test de 60, 120 et 240 jours d'immersion. L'observation détaillée de ces échantillons révèle une déformation significative, avec des pertes de masse après 240 jours d'exposition. Cette dégradation notable peut être attribuée à la dissolution de la pâte de ciment provoquée par l'action agressive de l'acide sulfurique. Les échantillons, soumis à une exposition prolongée, montrent une tendance à la détérioration progressive, soulignant l'effet corrosif de l'acide sulfurique sur la structure du matériau. Les résultats de ces observations offrent des perspectives importantes sur la résistance à l'attaque acide des différents mélanges, mettant en évidence les variations significatives dans leur comportement au fil du temps.

À l'observation visuelle, il est manifeste que la dimension de l'échantillon $M_{100/0}$ est plus favorable que celle des échantillons $M_{75/0}$, $M_{50/0}$, $M_{25/0}$ et $M_{0/0}$. Cette détérioration à long terme est perceptible à l'œil nu. Les mélanges incorporant de SR démontrent une résistance accrue à l'acide sulfurique par rapport aux mortiers de référence à base de SD, et ce, à divers stades de vieillissement. Ces constatations visuelles soulignent les différences notables dans le comportement des échantillons en fonction de la composition des matériaux, mettant en évidence l'impact de SR sur la résistance aux effets délétères de l'acide sulfurique au fil du temps.

En plus de ce qui a été mentionné précédemment, il est important de souligner que les fibres utilisées dans cette étude ne réagissent pas avec l'acide sulfurique. Par conséquent, l'ajout de fibres, que ce soit en termes de quantité ou de longueur, n'a pas d'incidence sur la qualité des échantillons. Ainsi, les mortiers fibrés ne sont pas affectés de manière différente par rapport aux mortiers de référence de compositions similaires.



Figure IV-25 Apparence extérieure des mortiers élaborés, a) mortier témoin, b) mortier fibré.

IV.4.3.2 Perte de masse par l'effet H_2SO_4

Les résultats relatifs aux attaques des mortiers à base de sable de dune et celles contenant des différents pourcentages de granulats recyclé et les mêmes compositions des mortiers fibré dans une solution de 5% H_2SO_4 sont présentés dans les figures ci-dessous.

Le sulfate, un composé chimique omniprésent dans pratiquement toutes les eaux naturelles, résulte de l'oxydation de minerais de sulfites tels que le sulfate de sodium, le sulfate de magnésium et le sulfate de calcium. Sa présence peut également découler de schistes ou de résidus industriels. Même dans l'eau de pluie, le sulfate fait souvent partie des composés présents, et malheureusement, il se retrouve fréquemment dans l'eau que nous consommons. Les ions sulfate se trouvent également naturellement dans des environnements variés, tels que l'eau de mer, certains sols et les eaux souterraines. Lorsqu'ils attaquent un matériau cimentaire, cela entraîne la précipitation de produits sulfatés, une expansion significative, et une détérioration chimico-mécanique. Ces processus conduisent inévitablement à la dégradation du matériau cimentaire, avec des conséquences plus ou moins étendues à long terme, en fonction de la nature de l'attaque (type, teneur et concentration en sulfates au contact) et du type de ciment utilisé.

Les figures IV-26 et IV-27 montrent les résultats des tests de changement de poids en fonction du temps pour des échantillons de mortier exposés à une solution à 5 % de H_2SO_4 pendant 240 jours.

L'analyse des résultats présentés sur les figures IV-26a révèle que, au cours de la première semaine, le mortier témoin à l'état humide présente une augmentation de poids de 3.68%, 2.87%, 2.92%, 3.98% et 4.40% des mélanges $M_{0/0}$, $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$ respectivement. Cela peut être dû à la formation de gypse et l'ettringite secondaire par la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium et les ions sulfate. Autrement, en raison de la masse molaire plus élevée du sulfate SO_4 dans le nouveau produit, celui-ci devient plus lourd que la masse molaire de la portlandite. Puis il a commencé à perdre du poids continuellement jusqu'à atteindre 10,66%, 8,55%, 9,01%, 6,29% et 3,64% respectivement, à 240 jours. Ceci est dû au phénomène de lessivage du $Ca(OH)_2$.

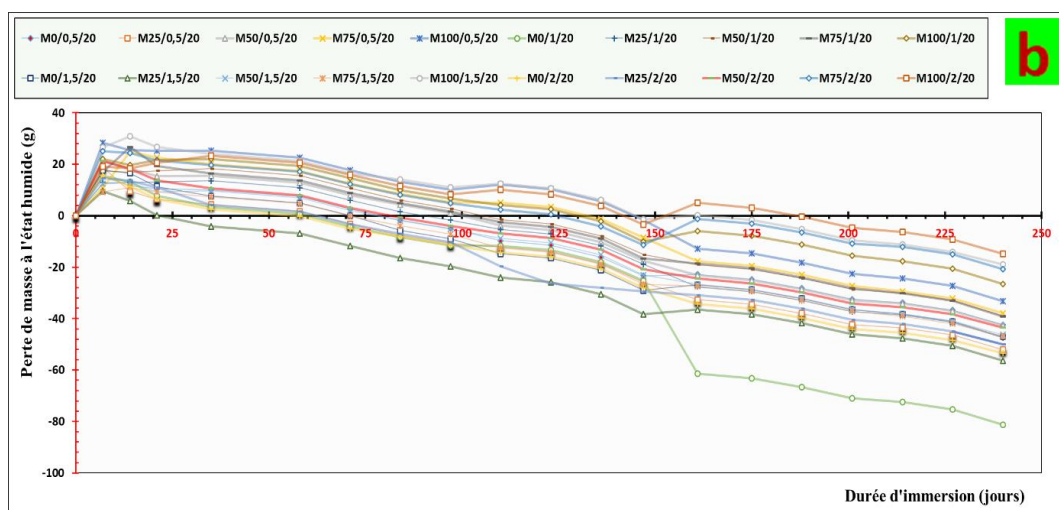
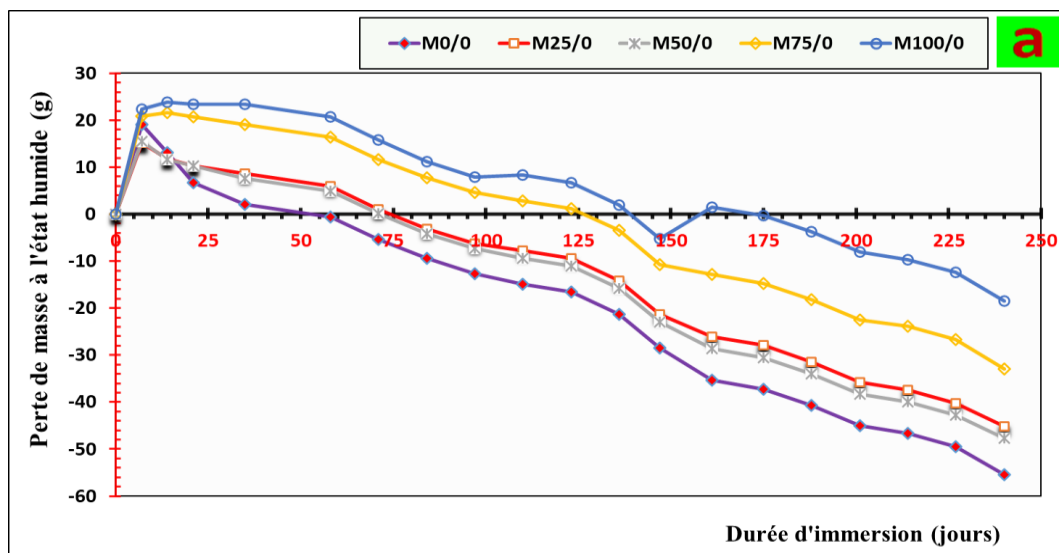
Les figures IV-27a montre dans la première semaine du mortier témoin sèche à l'air libre après 7 jours une augmentation de poids de 0.32%, 0.22%, 0.04%, 0.07% et 0.32% des mélanges $M_{0/0}$, $M_{25/0}$, $M_{50/0}$, $M_{75/0}$ et $M_{100/0}$ respectivement. Cela peut être dû à la formation de gypse et d'ettringite secondaire par la réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium et les ions sulfate. Autrement, en raison de la masse molaire plus élevée du sulfate SO_4 dans le nouveau produit, celui-ci devient plus lourd que la masse molaire de la portlandite. Puis il a commencé à perdre du poids continuellement jusqu'à atteindre 18.49%, 15.81%, 16.49%, 15.08% et 9.32% respectivement, à 240 jours. Ceci est dû au phénomène de lessivage du $Ca(OH)_2$.

Les figures IV-26 (b et c) et IV-27 (b et c) présentent une structure distincte par rapport aux deux formes mentionnées précédemment, IV-26a et IV-27a, à l'exception de l'ajout des fibres en termes de proportions et de longueurs. Nous avons antérieurement souligné que ce type de fibre ne subissait aucune altération due à l'acide sulfurique au cours de la période d'immersion de 240 jours. De cette constatation, nous pouvons déduire que les structures des deux formes,

qui intègrent des fibres, sont interprétées de la même manière que décrit dans les deux paragraphes précédents.

Au cours des 14 premiers jours, l'attaque de l'acide sulfurique H_2SO_4 sur les mortiers composés de sable de dune sans ajustement par du sable recyclé se révèle relativement agressive dans tous les mélanges fibrés. À la fin de cette période, on constate une légère augmentation des pertes de poids des mortiers par rapport au mortier témoin. Ce résultat peut être attribué à la perte de fibres situées en surface des éprouvettes et à l'effet de la réaction pouzzolanique, conduisant à la formation à long terme d'un CSH supplémentaire selon la réaction chimique : $SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CSH$.

Cette réduction de la porosité capillaire du mortier se traduit par une structure plus dense et compacte [20,26,36]. Les mortiers à base de sable recyclé et les autres mélanges avec des SR présentent des pertes de poids moins importantes que celles du mortier à base de sable de dune. Ces améliorations de résistance peuvent s'expliquer par la présence probable de constituants anhydres du ciment qui n'ont pas encore subi d'hydratation, induisant ainsi la formation de nouveaux hydrates et, par conséquent, une adhérence accrue entre l'ancien mortier et la nouvelle matrice cimentaire [23,37–39].



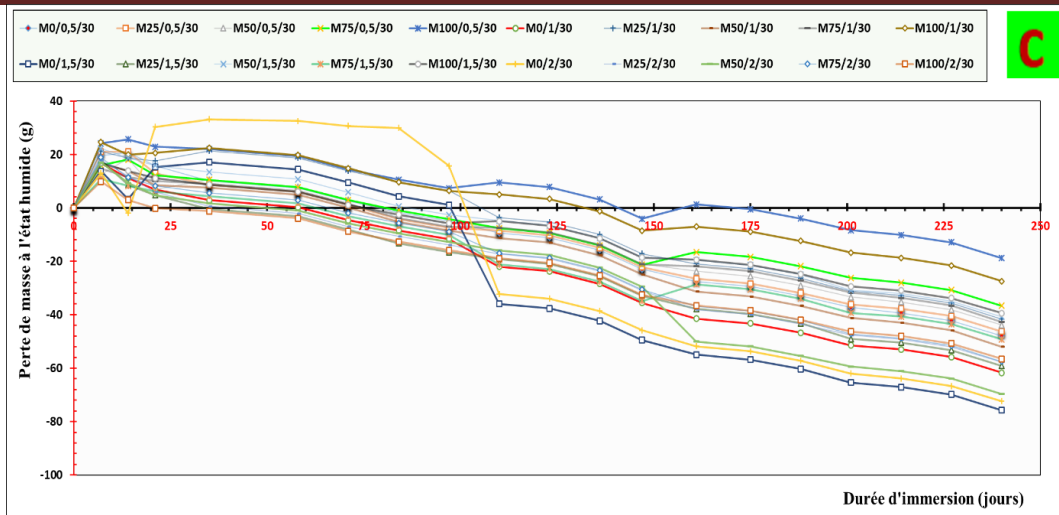
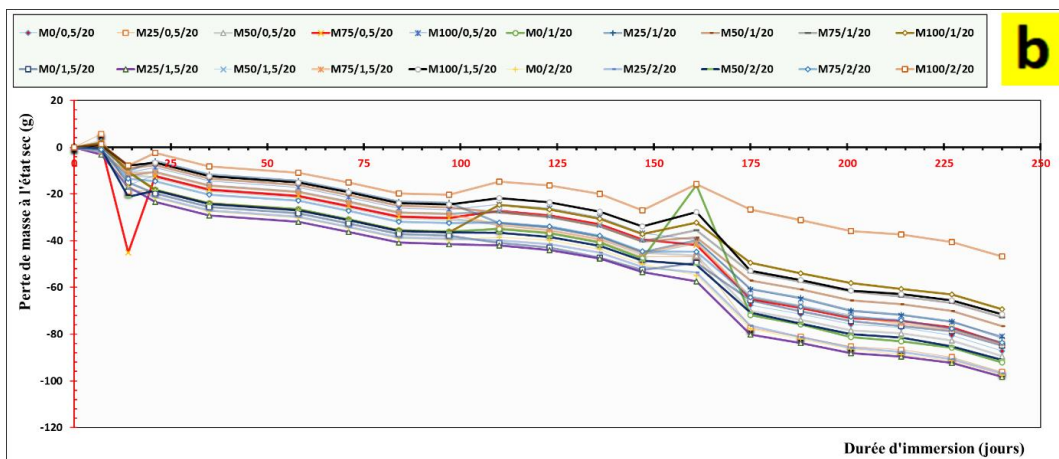
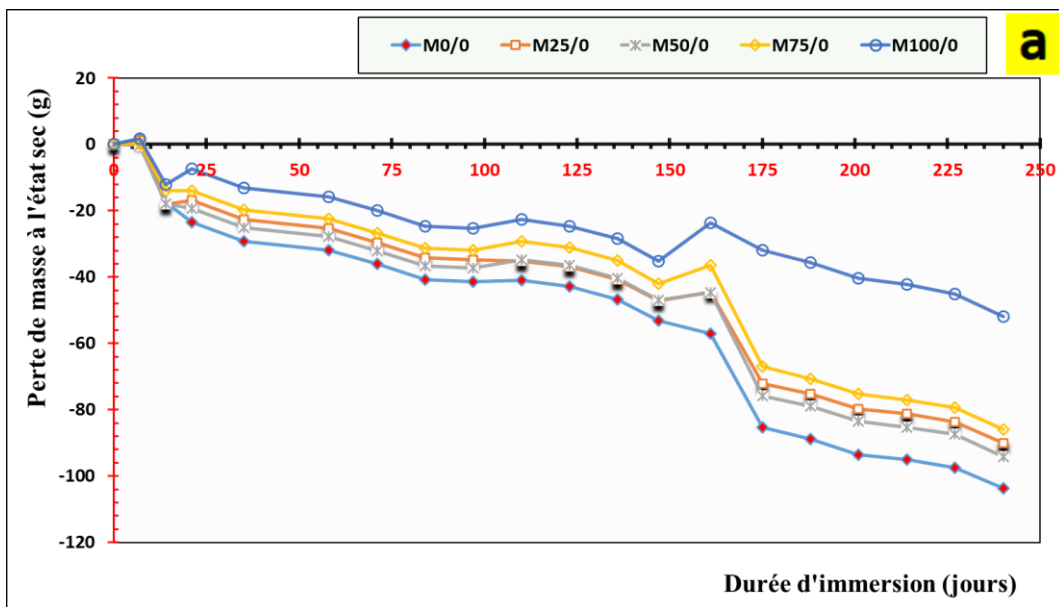


Figure IV-26 Variations de la perte de masse des mortiers humidifiés en fonction de la durée d'immersion (Tout juste après chaque 7 jours d'immersion.) en fonction de la durée d'immersion à 5 % de H2SO4 : **a)** mortier témoin, **b)** mortier avec du PET-F de 20 mm, **c)** mortier avec du PET-F de 30 mm.



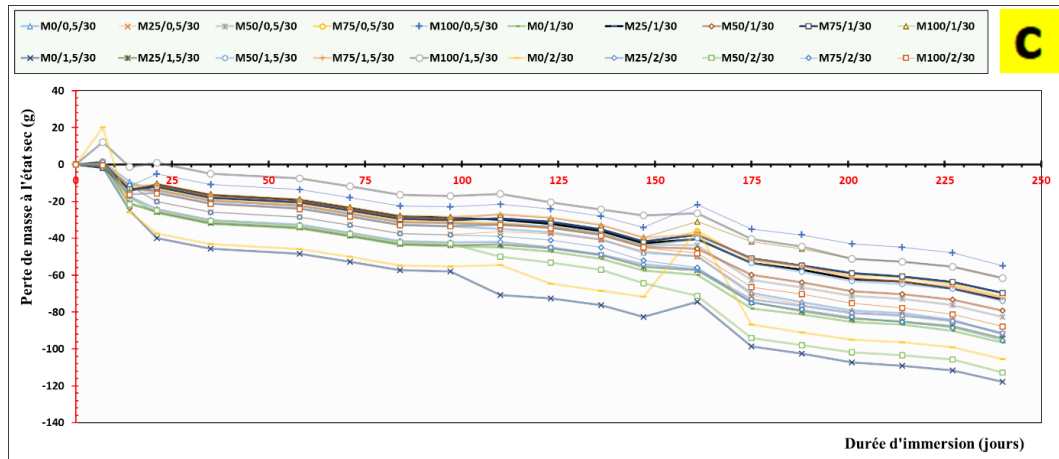


Figure IV-27 Variations de la perte de masse des mortiers secs en fonction de la durée d'immersion (Après chaque 7 jours à l'air libre) en fonction de la durée d'immersion à 5% de H_2SO_4 : **a)** mortier témoin, **b)** mortier avec du PET-F de 20 mm, **c)** mortier avec du PET-F de 30 mm.

IV.5 Étude statistiques par (RSM)

La méthodologie de surface de réponse (RSM) englobe une série de techniques mathématiques/statistiques pour la construction des modèles empiriques et l'exploitation du modèle. Grâce à une conception et une analyse d'expériences appropriées, RSM cherche à relier une réponse aux niveaux d'un certain nombre de variables d'entrée ou de facteurs qui l'influencent.

Récemment, la méthodologie de surface de réponse, et les méthodes des réseaux de neurones artificiels (ANN) sont considérées comme les techniques les plus appropriées pour résoudre le problème de traitement des données non linéaires et l'optimisation des processus et des conditions expérimentaux, afin de prédire ou de modéliser leurs propriétés physico-mécaniques [40–45]. Compte tenu des avantages de la RSM et des progrès des programmations, l'interaction entre cette technique et la méthode des éléments finis a été hautement reconnue et largement utilisée dans le secteur de l'ingénierie, ouvrant des nombreux horizons dans la résolution des problèmes techniques d'ingénierie [46]. Cependant, très peu des recherches ont touchés le domaine de recyclage du béton et surtout l'interaction entre les agrégats recyclés et les sables dunaires [47–49].

Parmi les articles scientifiques [50–53], ont utilisé la méthodologie des surfaces de réponse basée sur le plan Box-Behnken (BBD), et d'autres afin de réduire le nombre d'expériences nécessaires en utilisant un modèle mathématique. Cela permet non seulement d'économiser du temps et de l'argent, mais aussi d'éviter le gaspillage associé à la réalisation d'essais empiriques coûteux et chronophages pour tester différentes combinaisons de variables. Les méthodes de modélisation par régression, telles que la RSM, sont largement appréciées dans le domaine de l'ingénierie et dans de nombreux autres secteurs. Elles offrent un cadre efficace pour analyser et optimiser les paramètres influençant la composition des mortiers, contribuant ainsi à l'analyse et à l'optimisation des processus.

Dans le cadre de cette thèse, le logiciel Design-Expert V13.0.5.0 est utilisé pour effectuer une analyse de régression quadratique des données présentées dans le tableau IV-5 (voir annexe 2). La relation entre les variables de réponse Y et les facteurs d'influence X1 (pourcentage de SD), X2 (pourcentage de SR), X3 (pourcentage de PET-F) et X4 (longueur des fibres LF) sont présentés à l'aide des équations de régression du second ordre (Eq. 4-11).

IV.5.1 Plan expérimental de la méthodologie RSM

Les expériences ont été planifiées en utilisant le plan de Box-Behnken (BBD) qui implique l'analyse de quatre facteurs (% SD, % SR, % PET-F et FL en mm). Pour analyser les résultats expérimentaux, nous avons utilisé le logiciel Design-Expert V13.0.5.0 afin d'effectuer une régression de la surface de réponse, en utilisant la résistance à la compression, résistance à la flexion, déplacement, vitesse d'impulsion ultrasonique, absorption d'eau, porosité, air occlus, et retrait comme variables de réponses. Nous avons ajusté la relation fonctionnelle en utilisant un polynôme de second ordre (Eq. 3), ce qui nous a permis d'établir le modèle de surface de réponse suivant :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (3)$$

Où, Y désigne la valeur de la réponse, tandis que X représente la variable indépendante des facteurs. β_0 représente l'intercept, et β_i , β_{ii} , et β_{ij} représentent les coefficients respectifs des termes linéaires, quadratiques et interactifs [50,51]. Le tableau IV-3 présente les facteurs et les niveaux utilisés pour concevoir l'expérience, les niveaux des variables impliquées dans la conception des expériences sont indiqués par des codes (-1) et (+1), représentant respectivement les valeurs les plus basses et les plus élevées, centrées autour d'un niveau moyen (0). Pour mener cette recherche, 45 expériences ont été réalisées en fonction des différents niveaux de variables testés comme indiqué au tableau IV-4.

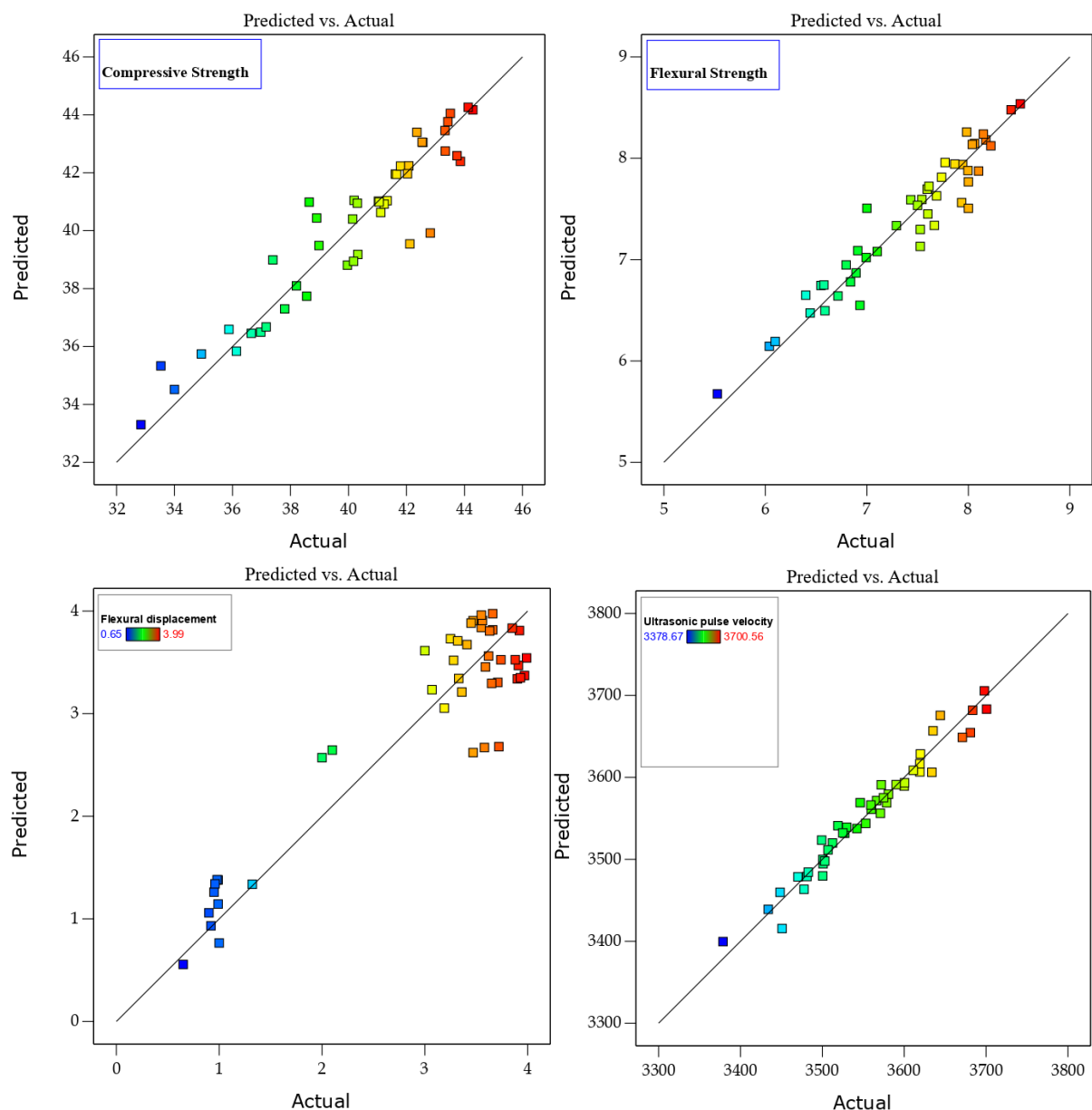
Tableau IV- 4 Facteurs et niveaux de code de la RSM

| Facteurs | Codé | Niveaux de code | | |
|------------------------|------|-----------------|-----------|-------------|
| | | Minimum (-1) | Moyen (0) | Maximum (1) |
| Sable de dune (%) | A | 0 | 50 | 100 |
| Sable recyclé (%) | B | 0 | 50 | 100 |
| Fibre de PET (%) | C | 0 | 1 | 2 |
| Longueur de fiber (mm) | D | 0 | 20 | 30 |

IV.5.2 ANOVA et analyse des interactions

Lors de l'analyse de la variance, il est évident que les valeurs R^2 pour la résistance à la compression, résistance à la flexion, déplacement flexionnel, vitesse d'impulsion ultrasonique, absorption d'eau, porosité accessible à l'eau, air occlus, et le retrait sont respectivement égales à 0.89, 0.9207, 0.8641, 0.9614, 0.9695, 0.9678, 0.9162 et 0.9692 ce qui indique une très

bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Cela confirme que le modèle de régression correspond bien aux différents tests sur les données. En outre, le R^2 ajusté est égal à 0.8617, 0.9003, 0.8292, 0.9515, 0.9617, 0.9595, 0.8946 et 0.9613 respectivement. Ainsi, le modèle quadratique peut expliquer 86,17%, 90,03%, 82,92%, 95,15%, 96,17%, 95,95%, 89,46% et 96,13% des variations des valeurs de réponse (R_c , R_f , Y_f , UPV, Ab, P, Ac et Retrait). Seuls 13,83%, 9,97%, 17,08%, 4,85%, 3,83, 4,05, 10,54 et 3,87% de la variance totale restent inexpliqués. La figure IV-28 montre les relations entre les valeurs prédites et expérimentales (prédites vs réelles), qui sont très proches d'une ligne droite. Manifestement, les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les prédictions. La figure IV-29, qui représente la distribution normale des résidus, montre que les résidus sont raisonnablement alignés sur une ligne droite, ce qui indique une distribution normale des erreurs et l'absence d'écart de variance pour toutes les réponses. La figure IV-30 montre le schéma des résidus par rapport aux valeurs prédites. Les points sont distribués de manière irrégulière, ce qui signifie que le modèle ne viole pas l'indépendance ou que la variance n'est pas constante pour chaque valeur de réponse.



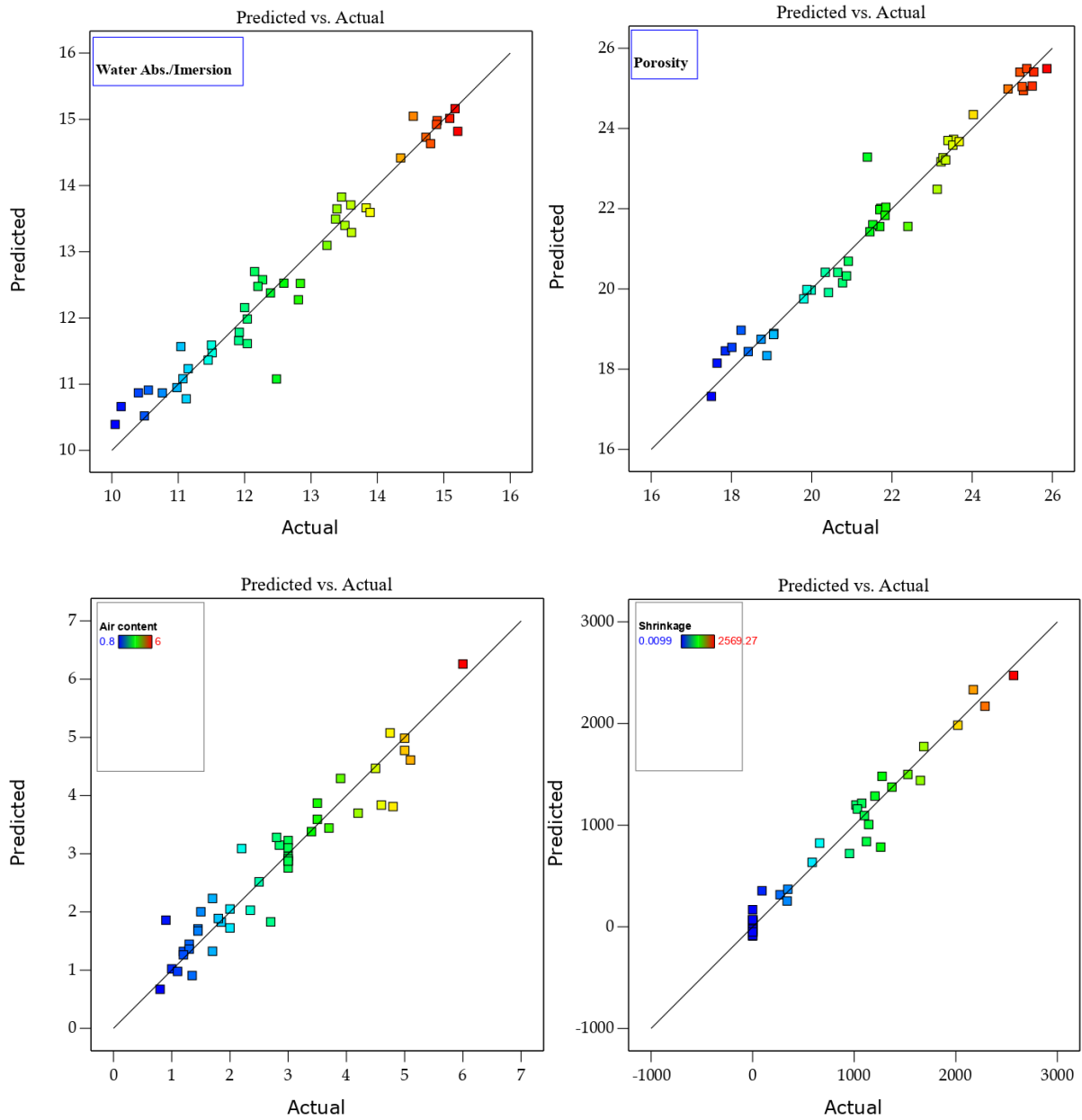
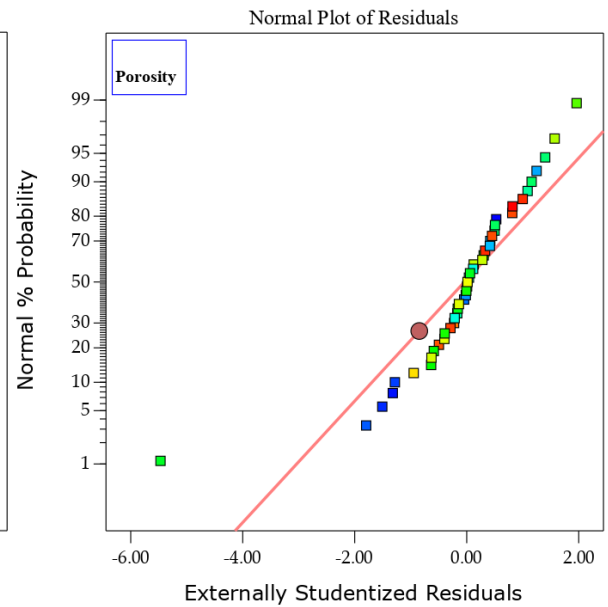
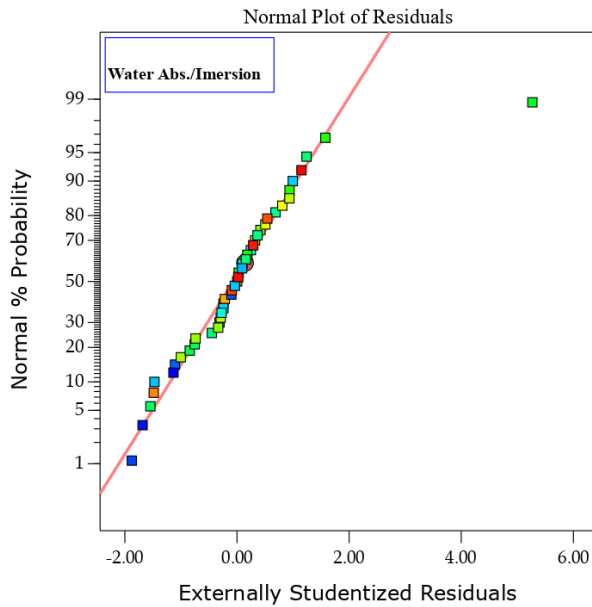
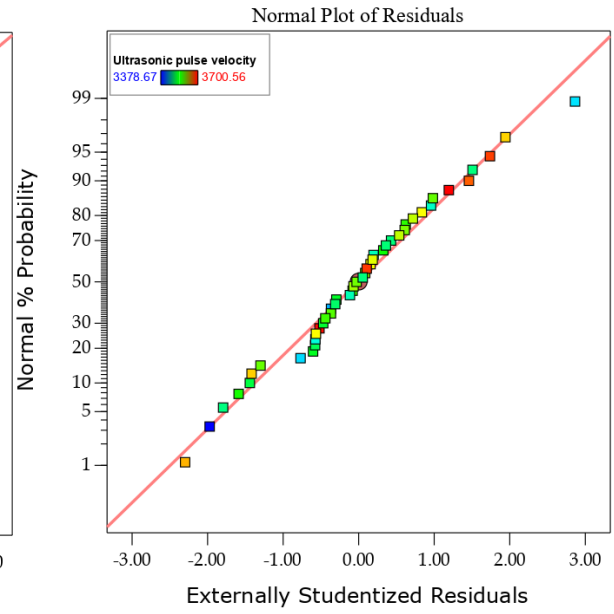
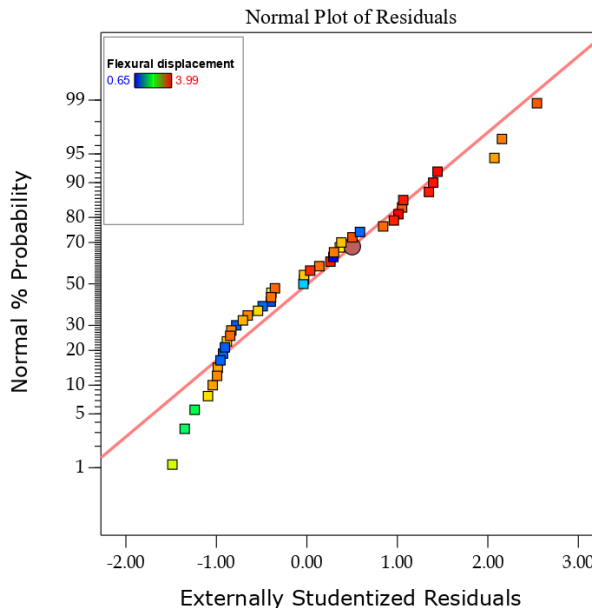
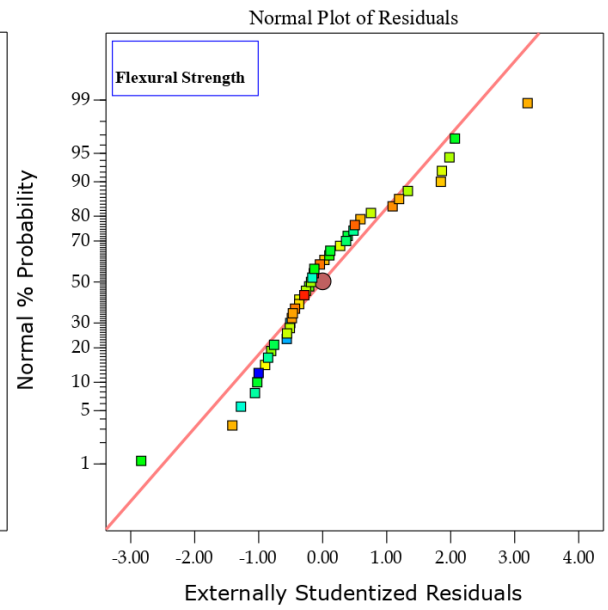
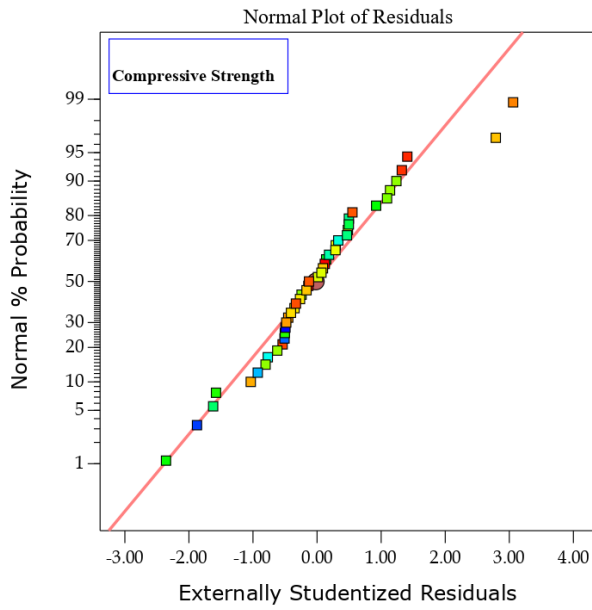


Figure IV-28. Corrélation entre les valeurs prédites et les réelles de l'éco-mortier.



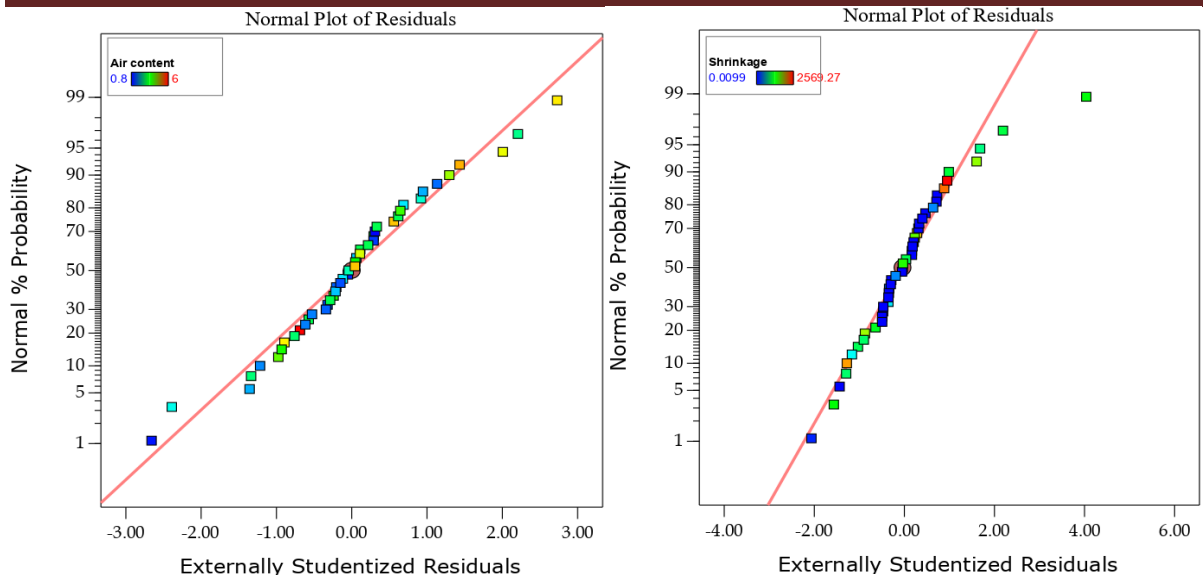
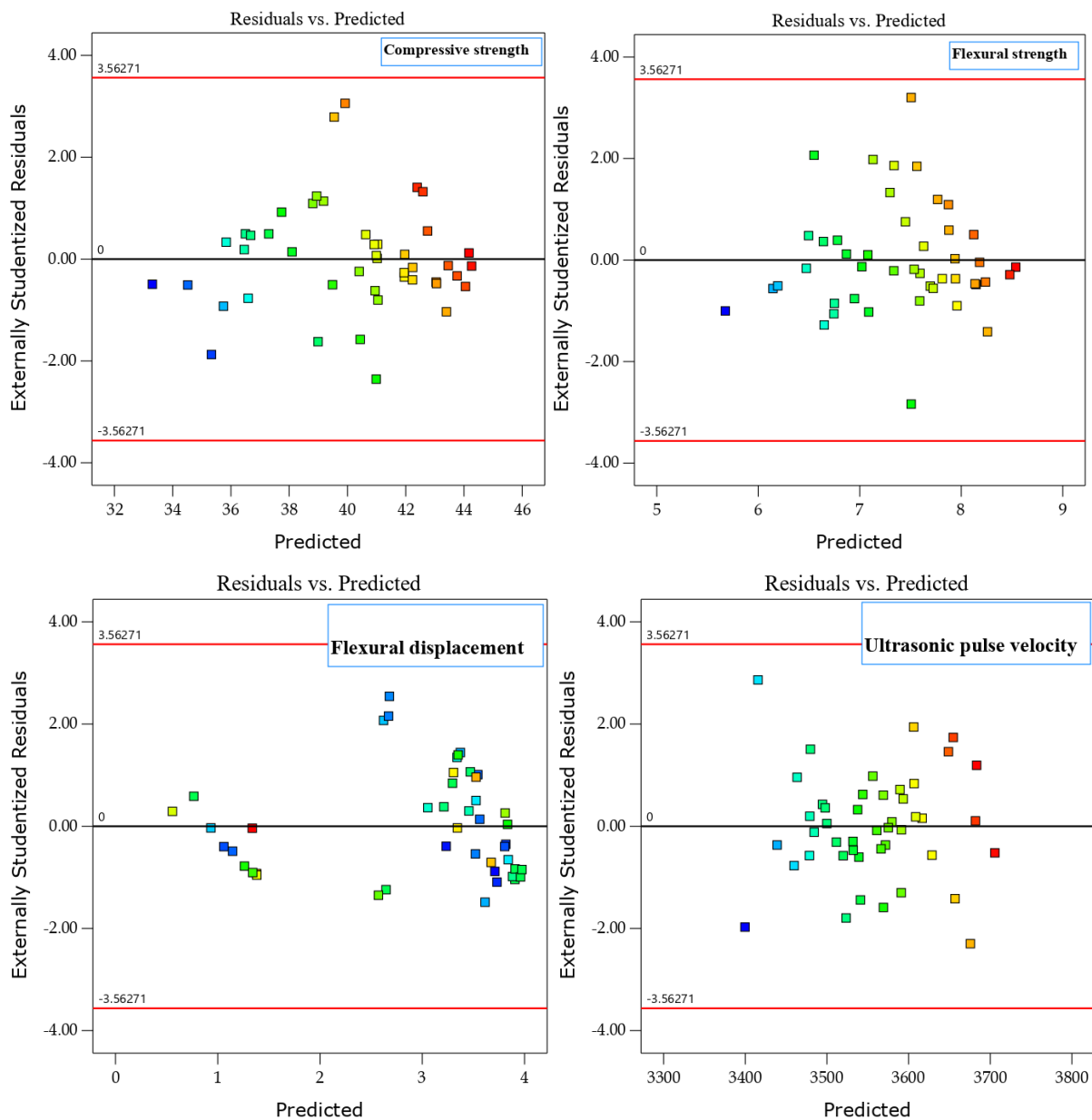


Figure IV-29 Différents tracés de probabilité normale des résidus de l'éco-mortier.



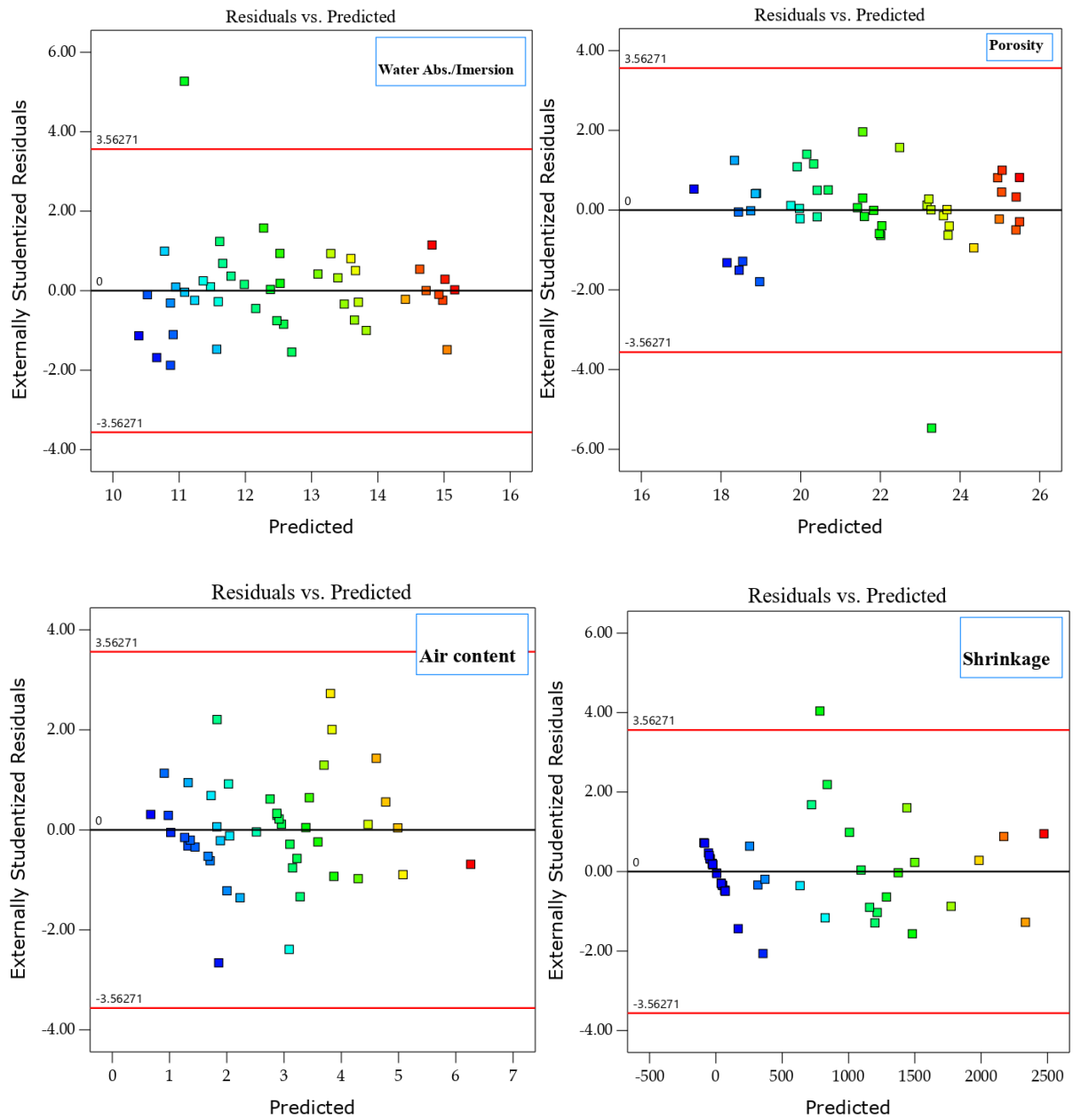


Figure IV-30 Différents tracés des résidus par rapport à la réponse prédite de l'éco-mortier.

$$R_c = 43.6 - 1.79A - 0.631C - 1.91D + 4.23AB + 1.1AC - 1.04AD - 1.78CD - 0.8005C^2 + 0.6984D^2 \quad (4)$$

$$R_f = 7.11 - 0.0237A + 1.17C - 0.32D + 0.3213AB - 0.4695AC - 0.1066AD - 0.7613CD - 0.1131C^2 + 1.17D^2 \quad (5)$$

$$P = 21.98 - 3.38A + 0.218C + 0.2151D - 0.1423AB + 0.1143AC + 0.0193AD - 0.044CD - 0.172C^2 - 0.6352D^2 \quad (6)$$

$$A_c = 1.3 + 1.23A - 2.71C + 3.34D - 1.09AB - 0.2616AC - 0.066AD + 1.74CD + 3.08C^2 - 3.66D^2 \quad (7)$$

$$Ret = 1311.61 + 164.79A - 1029.81C - 66.93D + 47.27AB - 3.86AC - 181.15AD + 1123.12CD - 186.84C^2 - 1174.07D^2 \quad (8)$$

$$Y_f = 2.98 - 0.1235A + 2.99C - 1.79D + 0.0821AB - 0.1259AC + 0.2965AD - 2.56CD - 0.9108C^2 + 2.62D^2 \quad (9)$$

$$UPV = 3690.93 - 14.02A + 133.77C - 139.79D + 104.59AB + 19.66AC + 6.05AD - 174.26CD - 18.85C^2 + 40.06D^2 \quad (10)$$

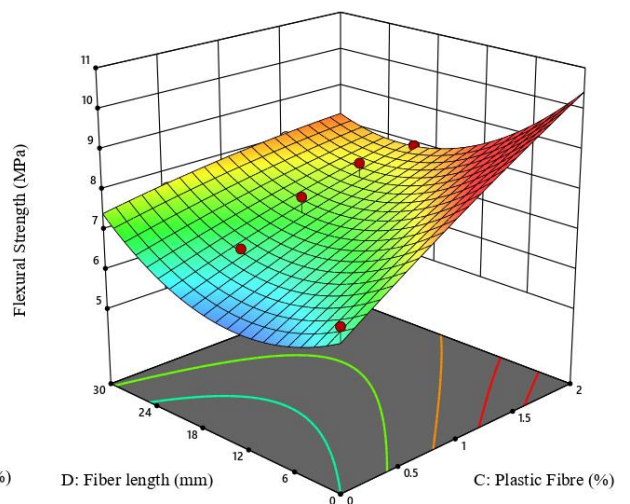
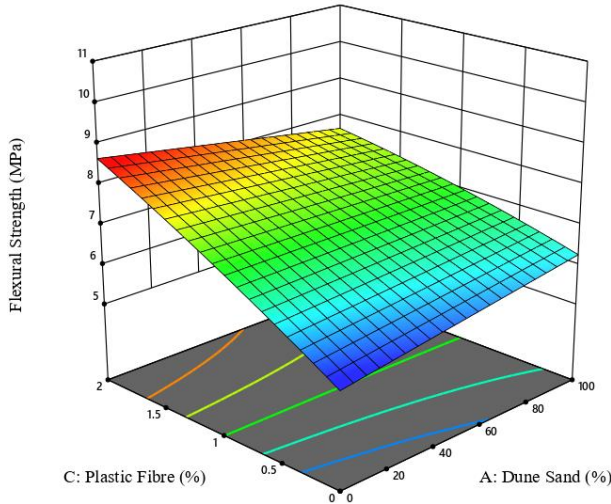
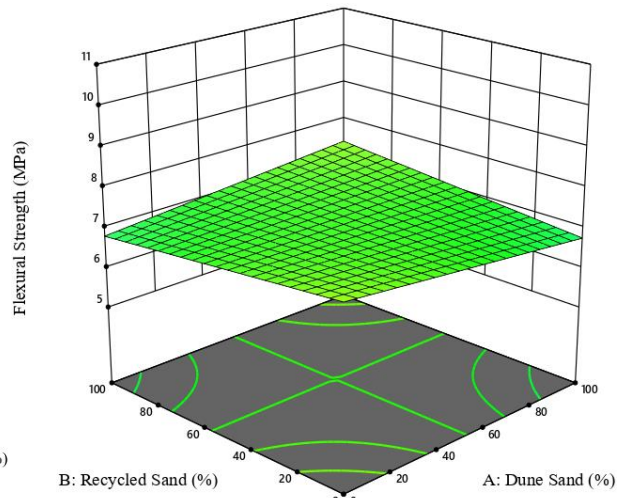
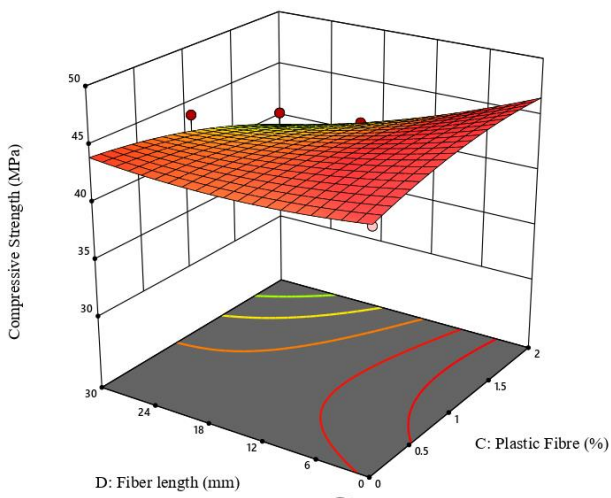
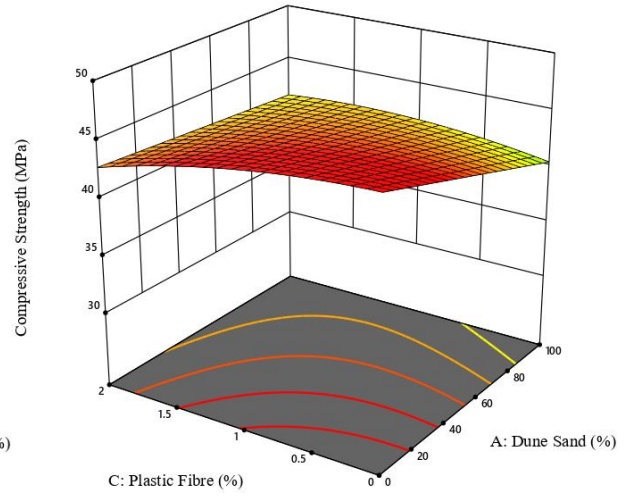
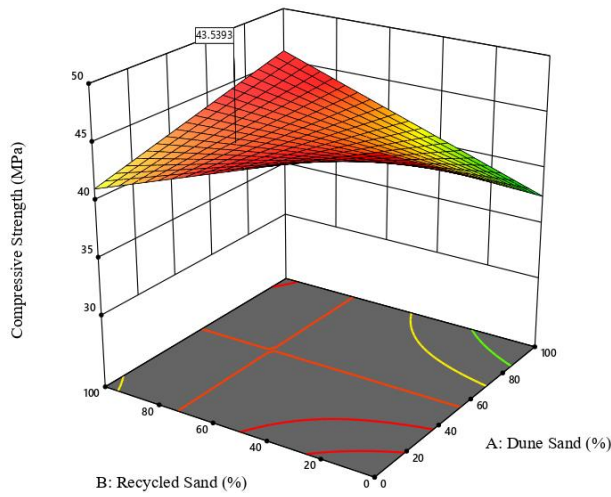
$$Ab = 12.66 - 2.11A - 0.1569C + 0.0473D - 0.3502AB - 0.0098AC + 0.0504AD + 0.5934CD - 0.485C^2 - 0.3228D^2 \quad (11)$$

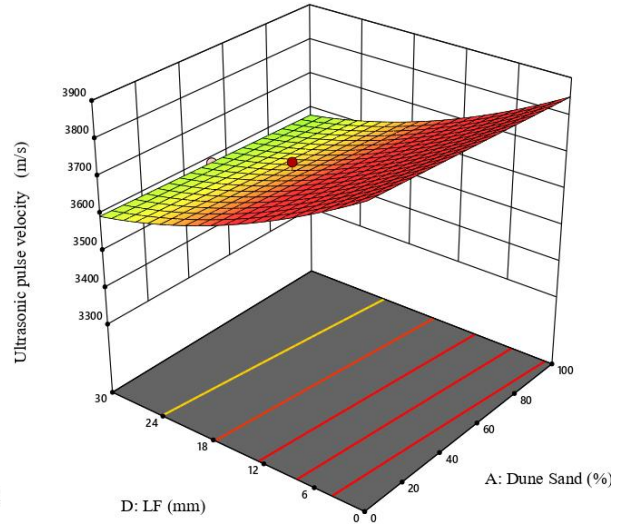
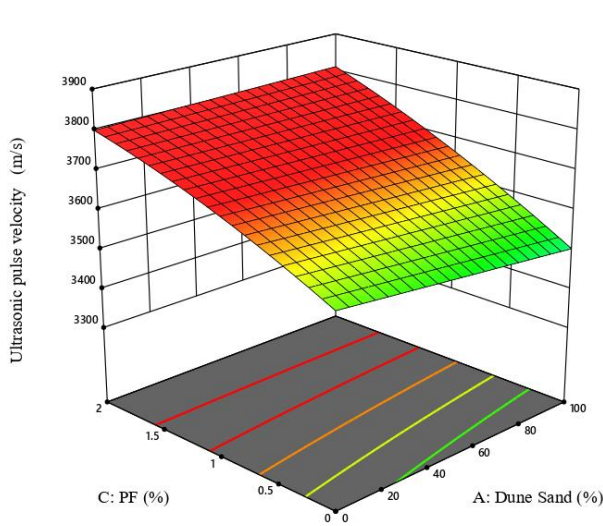
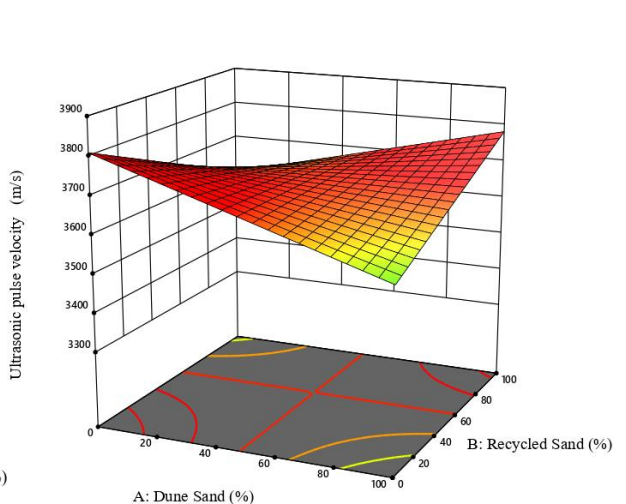
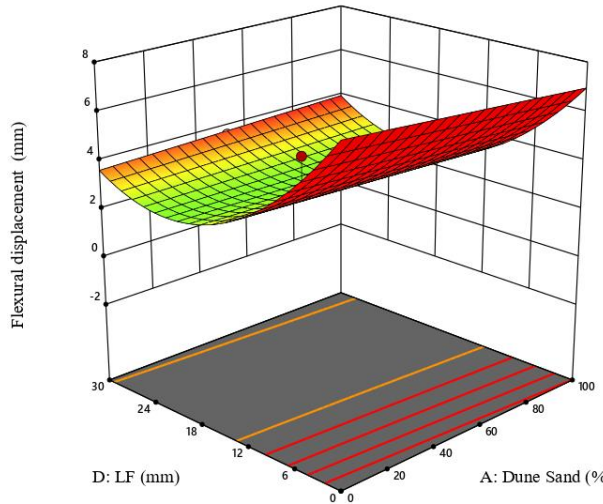
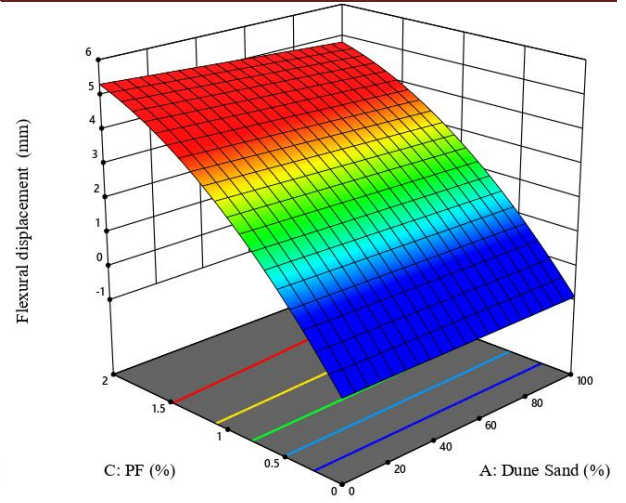
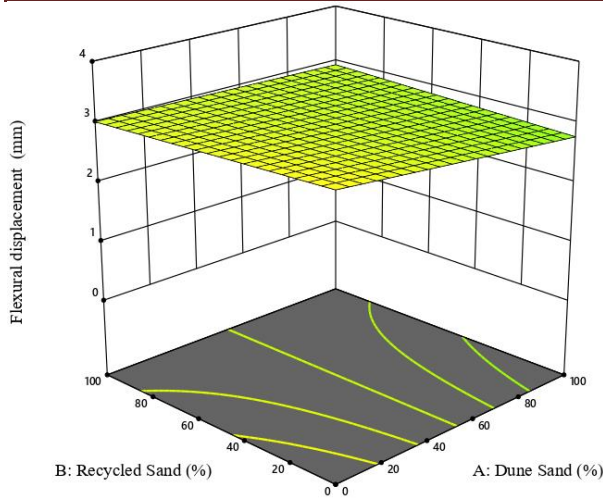
Toutes les informations ci-dessus prouvent que les équations de régression présentées sont appropriées pour prédire la résistance à la compression, la résistance à la flexion, déplacement flexionnel, vitesse d'impulsion ultrasonique, absorption d'eau, porosité accessible à l'eau, air occlus, et retrait à 28 jours de conservation à l'eau. En outre, le modèle fonctionne efficacement pour optimiser les paramètres de préparation de l'éco-mortier basé sur le sable combiné SD/SR renforcé avec des fibres PET-F.

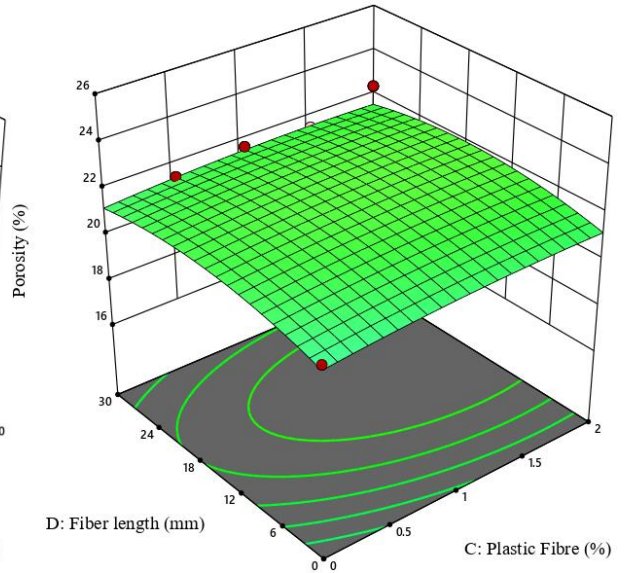
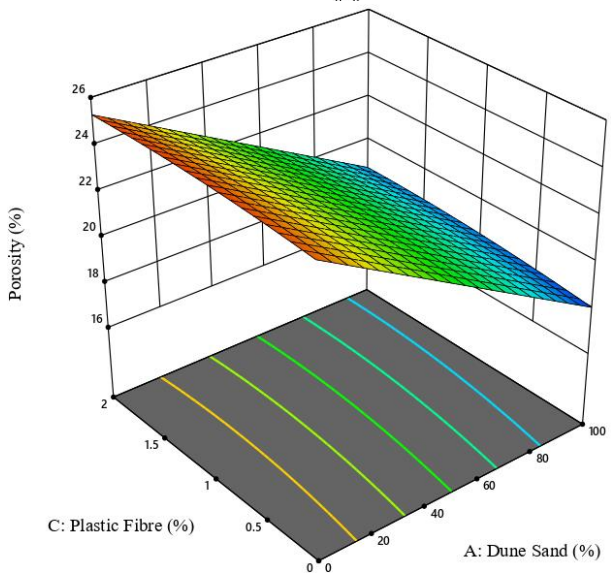
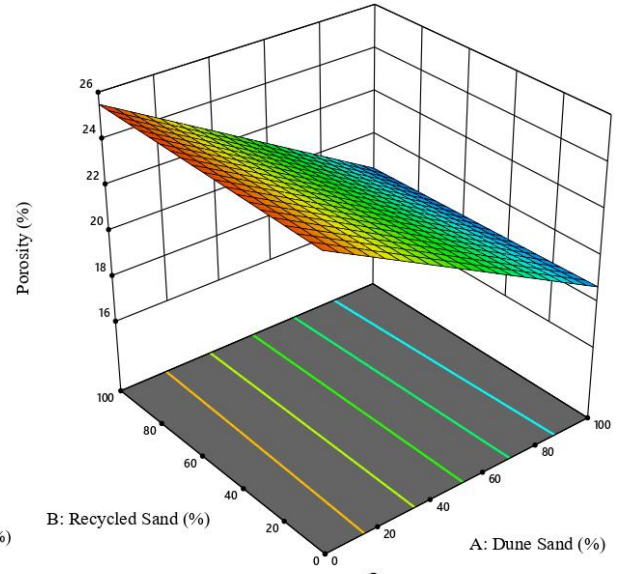
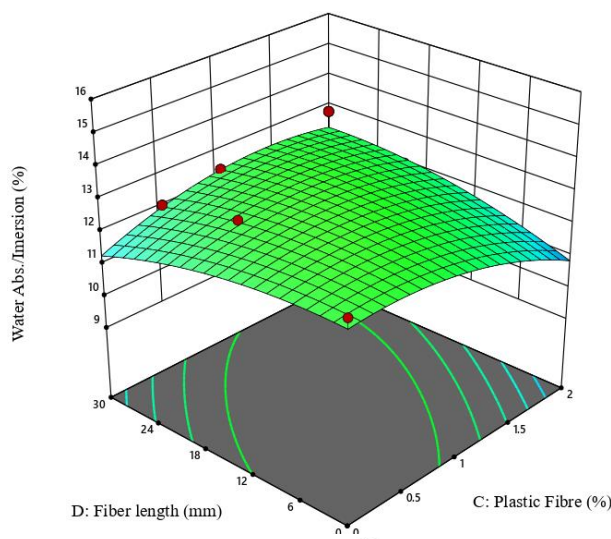
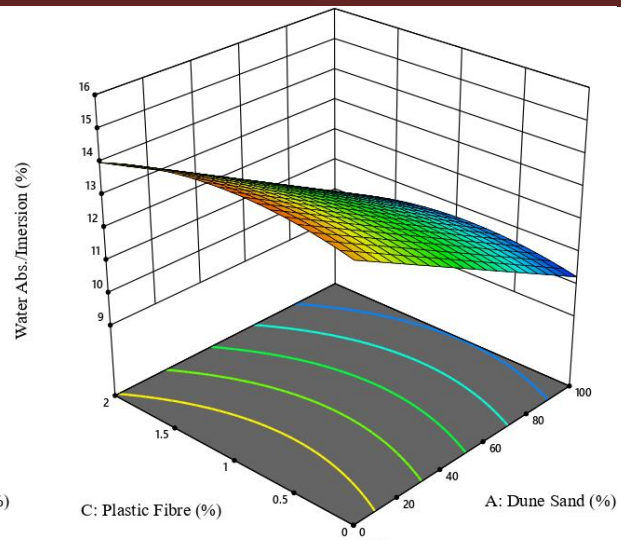
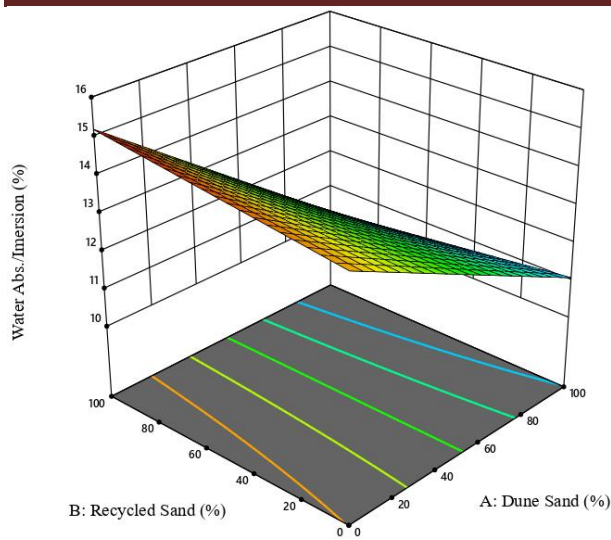
Le tableau IV-6 (voir annexe 2) présente l'analyse de la variance (ANOVA) et indique que le modèle de régression de la surface de réponse atteint un niveau de signification très élevé ($P < 0,0001$). En outre, toutes les valeurs P sont considérablement inférieures à 0,050, ce qui confirme la validité des modèles obtenus par l'analyse ANOVA et la signification des termes du modèle. Les modèles pour la résistance à la compression, la résistance à la flexion, déplacement flexionnel, vitesse d'impulsion ultrasonique, absorption d'eau, porosité accessible à l'eau, air occlus, et retrait ont des valeurs F de 31.46, 45.16, 24.73, 96.94, 123.82, 116.97, 42.49 et 122.37, respectivement, ce qui indique l'excellente signification des modèles obtenus par cette analyse. Il n'y a que 0,01% de chances qu'une valeur F aussi importante soit due au bruit. Pour la résistance à la compression à 28 jours, les termes A, D, AB, AC et AD sont considérés comme significatifs, tandis que pour la résistance à la flexion à 28 jours, les termes C, AB, AC, CD et D^2 sont considérés comme importants. Les termes A, AB et C^2 sont également considérés comme significatifs pour l'absorption d'eau par immersion et le facteur A est important pour la porosité. En outre, les termes du modèle A, C, D, AB, CD, C^2 , D^2 pour l'air occlus, A, C, AD, CD, D^2 pour retrait, C, D, CD, C^2 , D^2 pour déplacement, A, C, D, AB, AC, CD, D^2 pour vitesse d'impulsion ultrasonique et les termes A, AB, CD, C^2 pour absorption d'eau sont des termes significatifs pour les modèles de notre étude, ce qui est expliqué plus en détail dans le tableau IV-6 pour ces modèles actuels.

Les valeurs de R^2 prédits, comme le montrent les statistiques d'ajustement du tableau IV-6, suggèrent que la moyenne globale peut être un prédicteur plus fiable de la réponse. Dans notre cas, les valeurs R^2 prédites pour la résistance à la compression, la résistance à la flexion, déplacement flexionnel, vitesse d'impulsion ultrasonique, absorption d'eau, porosité accessible à l'eau, air occlus, et retrait sont respectivement de 0.8324, 0.8549, 0.7957, 0.931, 0.9483, 0.9487, 0.8641 et 0.9515. L'utilisation de modèles R^2 prédits d'ordre supérieur permet d'améliorer la précision. L'écart entre les valeurs R^2 prédites et ajustées est inférieur à 0,2 dans tous les modèles, et les valeurs de précision adéquate évaluant les rapports signal/bruit sont supérieures à 4 [33]. Il s'agit de 20.6978, 27.4623, 15.476, 39.4716, 33.5161, 34.8237, 26.7987 et 36.1427 pour les modèles R_c , R_f , Y_f , UPV, Ab, P, Ac et Retrait, respectivement. Ces valeurs indiquent la présence d'un signal approprié, permettant à ces modèles de naviguer efficacement dans le champ conceptuel. Il est également essentiel de vérifier la précision et l'adéquation des modèles quadratiques des éco-mortiers de sable combiné renforcé par des fibres PET-F (SD/SR) à l'aide des diagrammes de diagnostic pour les valeurs expérimentales.

Les modèles obtenus proviennent de l'équation polynomiale du second ordre utilisée pour évaluer R_c , R_f , Y_f , UPV, Ab, P, A_c et Retrait selon le plan expérimental BBD, et correspondent aux équations du (4-11). L'analyse de la variance confirme que ces équations décrivent correctement la relation entre les variables indépendantes et les réponses. Les figures IV-28, IV-29 et IV-30 montrent ces graphiques qui prouvent l'adéquation et la précision des modèles.







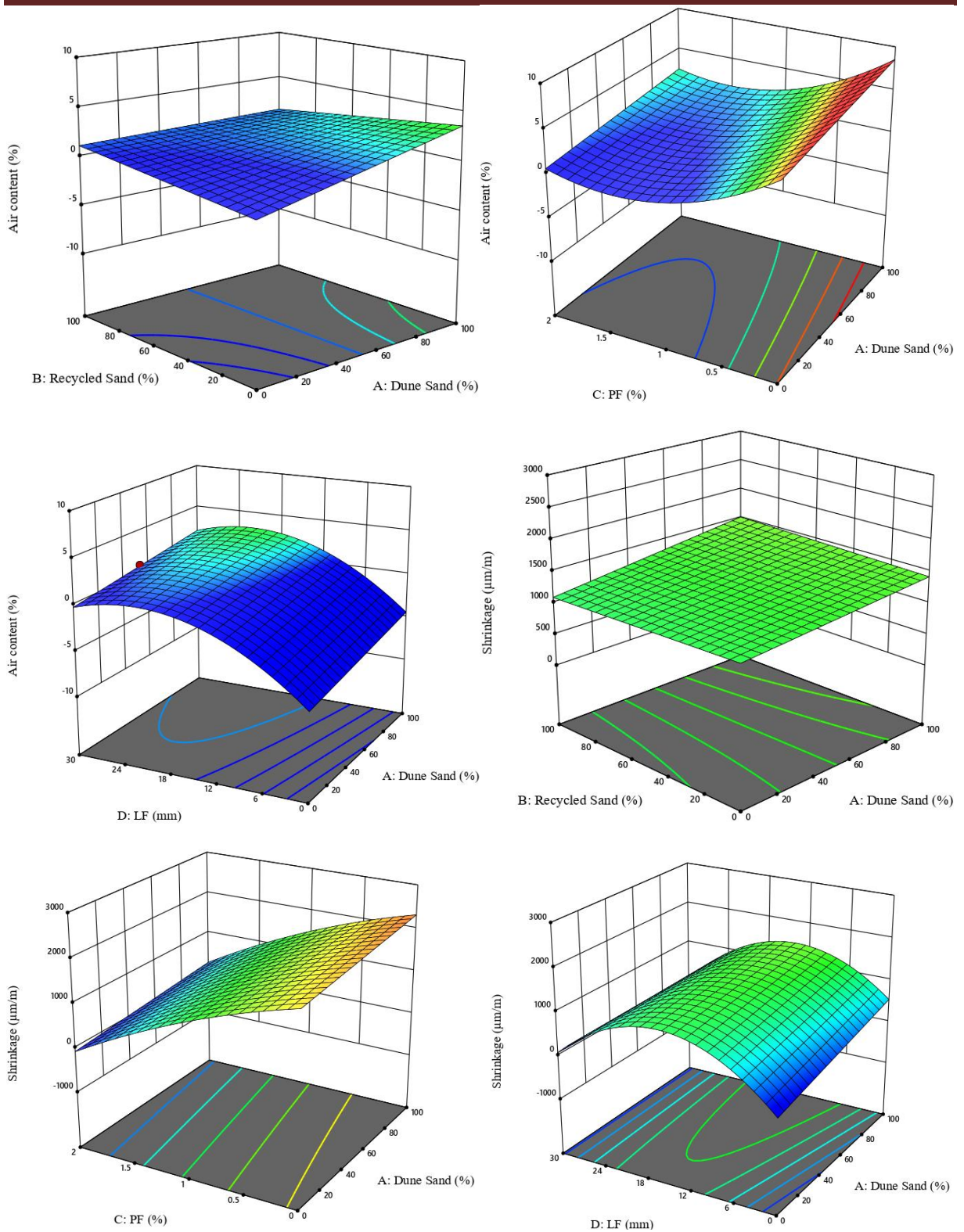


Figure IV-32 Graphiques de réponse 3D Modèles RSM, pour la Rc, Rf, Yf, UPV, Ab, P, Ac et retrait en fonction de (DS/RS), (DS/PET-F) et (PET-F/FL) de l'éco-mortier.

IV.5.3 Interprétation des réponses de 2D et 3D

Les figures IV-31 (voir annexe 1) et IV-32 présentent la représentation bidimensionnelle et les graphiques tridimensionnels de la surface de réponse, mettant en lumière l'interaction entre trois facteurs : le pourcentage de SD, le pourcentage de SR et la teneur en fibres PET-F. Ces graphiques analysent plusieurs paramètres tels que la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le déplacement flexionnel, la vitesse d'impulsion ultrasonique, l'absorption d'eau par immersion, la porosité, l'air occlus et le retrait.

Les résultats indiquent que l'introduction de fibres entraîne une diminution de la résistance à la compression, bien que l'augmentation de la teneur en SD ou en SR ait un effet similaire. En revanche, l'augmentation de la teneur en fibres PET-F entraîne une augmentation de la résistance à la flexion. L'augmentation du pourcentage de RS conduit à une augmentation de l'absorption d'eau par immersion et de la porosité en raison de l'adhérence de la pâte plus ancienne. Cependant, l'augmentation des valeurs des fibres réduit l'absorption d'eau, confirmant les conclusions de cette expérience.

Une fois les modèles de réponses étudiés validés, les effets principaux et les résultats des courbes de surface de réponse ont été analysés. Les figures IV-31 (voir annexe 1) et IV-32 ont également illustré les contours de surface de réponse 2D ainsi que les graphiques 3D pour les variables de réponse étudiées. Ces représentations ont été obtenues en traçant les réponses en fonction de deux variables indépendantes : SD vs. SR, SD vs. PET-F et SD vs. LF, le troisième facteur restant constant pour chaque réponse.

Toutes les réponses étudiées ont été principalement influencées par les variables d'entrée. L'augmentation progressive du sable recyclé a eu un effet positif sur l'air occlus, le retrait et le déplacement par flexion. Cependant, l'ajout de fibres, que ce soit en termes de longueur ou de pourcentage, a eu un effet négatif sur l'air occlus, tandis qu'il a eu un effet très bénéfique sur le retrait et le déplacement par flexion.

Il convient de noter que la vitesse d'impulsion des ultrasons augmente avec l'augmentation de la teneur en sable recyclé jusqu'à un remplacement de 50/50, après quoi la valeur diminue (mortier sans fibre). De plus, une amélioration significative de l'UPV a été observée dans toutes les formulations contenant des fibres de différentes valeurs.

Après avoir étudié l'effet des paramètres expérimentaux sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le déplacement flexionnel, la vitesse d'impulsion ultrasonique, l'absorption d'eau par immersion, la porosité, l'air occlus et le retrait à 28 jours des éco-mortiers renforcés au PET-F, les plages de ces variables et l'approche d'optimisation (objectif et importance) conduisant aux valeurs optimales sont présentées dans le tableau IV-7.

La section désirabilité du logiciel Design Expert a été utilisée pour optimiser les modèles, fournissant des informations sur les paramètres optimaux d'entrée et de sortie simultanément en fonction des paramètres d'entrée, comme illustré à la Figure IV-33.

Les valeurs maximales des réponses, obtenues à partir de l'analyse effectuée avec Design Expert V13.0.5.0 selon la conception Box-Behnken, sont les suivantes : 43.399 MPa, 7.723 MPa, 3.373 mm, 3606.741 m/s, 12.047%, 21.426%, 2.232%, et 22.761 $\mu\text{m}/\text{m}$. Les taux

correspondants pour les contenus DS, RS, PET-F et FL sont respectivement de 50 %, 50 %, 0,5 % et 30 mm, comme indiqué dans le tableau IV-8.

Tableau IV-7. Contraintes des facteurs du mortiers avec leurs réponses

| | Nome | Objectif | Limite inférieure | Limite supérieure | L'importance |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Facteurs | R : Sable des dunes | is target = 50 | 0 | 100 | 5 |
| | B : Sable recyclé | is target = 50 | 0 | 100 | 5 |
| | C : Fibre plastique | is target = 0.5 | 0 | 2 | 5 |
| | D : longueur de la fibre | is target = 30 | 0 | 30 | 3 |
| Réponse | Résistance à la compression | maximize | 32.842 | 44.288 | 3 |
| | Résistance à la flexion | maximize | 5.527 | 8.512 | 3 |
| | Déplacement | maximize | 0.65 | 3.99 | 3 |
| | Vitesse d'impulsion ultrasonique | maximize | 3378.67 | 3700.56 | 1 |
| | Absorption d'eau/immersion | minimize | 10.05 | 15.21 | 1 |
| | Porosité | minimize | 17.5 | 25.866 | 1 |
| | Oculus d'air | minimize | 0.8 | 6 | 1 |
| | Retraite | minimize | 0.0099 | 2569.27 | 3 |

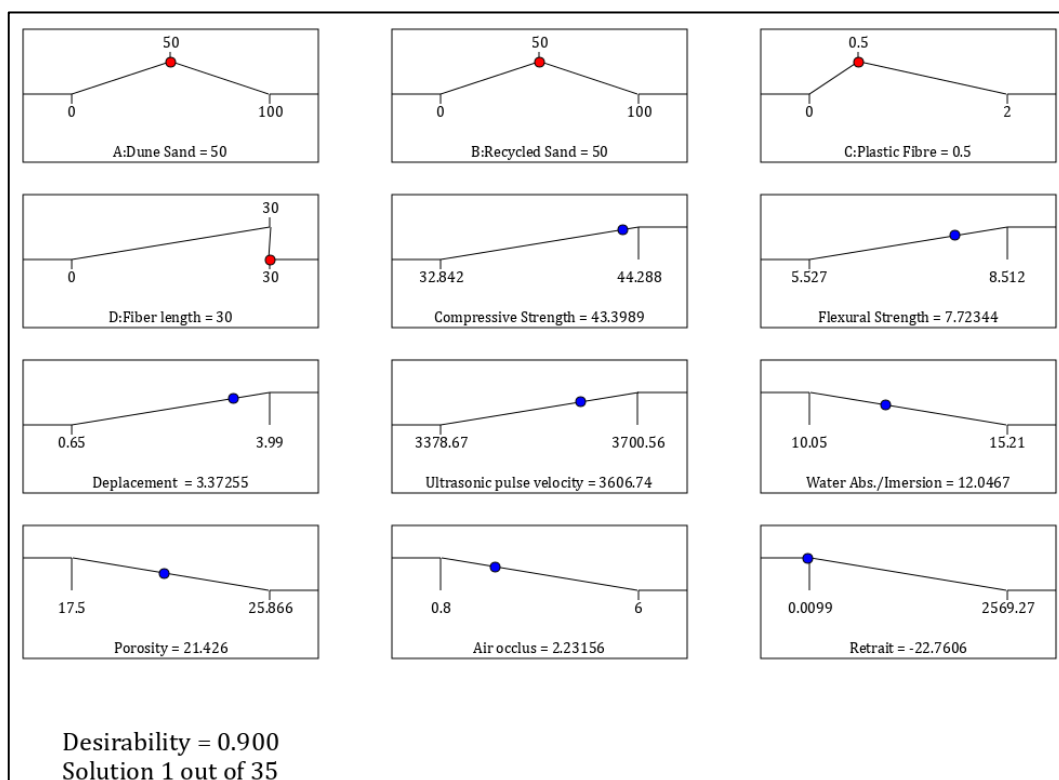


Figure IV-33 Meilleures données de rampes de désirabilité pour les valeurs optimales de R_c , R_f , Y_f , UPV , Ab , P , Ac et retrait de l'éco-mortier.

IV.6 CONCLUSION

Cette étude vise à préserver les ressources naturelles et à contribuer à la protection de l'environnement en récupérant plusieurs types de déchets, tels que le plastique, le béton démolé et le sable de dune, pour fabriquer des matériaux cimentaires respectueux de l'environnement qui répondent aux exigences de durabilité au moindre coût. Le RSM a été utilisé pour étudier les taux de remplacement du sable de dune par du sable recyclé et l'effet de l'ajout de fibres sur les propriétés de la suspension produite en termes de taux et de longueur, avec une analyse des résultats expérimentaux et prédictifs. Les principaux résultats obtenus sont résumés ci-dessous

- La combinaison de sable de dune et de sable recyclé en proportions de part égales (50/50) a augmenté la densité fraîche de 0,68% et amélioré l'étalement de 39,04%, par rapport à un mortier composé exclusivement de sable de dune. Cependant, l'ajout de fibres PET-F à la matrice cimentaire a réduit la densité à l'état frais et a légèrement augmenté l'étalement.

- L'augmentation progressive du remplacement du sable de dune par du sable recyclé entraîne une augmentation de l'absorption d'eau par immersion et de la sorptivité. Néanmoins, l'ajout de fibres PET-F joue un rôle inverse crucial en réduisant la quantité d'eau qui pénètre dans la structure interne du mortier.

- L'existence de la pâte adhérent aux agrégats de sable et l'incorporation de fibres PET-F dans la matrice ont conduit à une augmentation significative du volume total des pores par rapport au mortier à base de sable de dune.

- L'effet de la longueur des PET-F et de l'augmentation du SR dans la substitution du SD sur la résistance à la flexion par rapport aux autres formulations de contrôle était évident. Les mortiers $M_{100/2/(20,30)}$ ont montré les valeurs les plus élevées, avec une augmentation de 45,85% et 54,01% par rapport à leurs échantillons de contrôle ($M_{100/0}$). Par conséquent, la présence des fibres n'a pas été bénéfique pour la résistance à la compression dans tous les mélanges étudiés. Les valeurs optimales ont été observées dans les mélanges de référence $M_{50/0}$ et $M_{75/0}$, avec une augmentation de 15,50 % et 15,92 %, respectivement, par rapport au $M_{0/0}$, composé uniquement de sable de dune.

- La présence de SR dans toutes les formulations conçues améliore de manière significative le module d'élasticité dynamique (E_{dyn}). Ceci est dû au bon arrangement granulaire caractérisant la formulation 50/50. Cette dernière a montré une valeur préférentielle d'environ 23,06% par rapport au mortier de contrôle ($M_{0/0}$).

L'augmentation de la fraction de sable recyclé a entraîné une amélioration significative de la réduction de la teneur en air.

- Une réduction significative des fissures de retrait plastique a été observée entre 1,0 % et 1,50 % de fibres plastiques de 30 mm de long.

- Les valeurs de vitesse d'impulsion ultrasonique pour les formulations de sable 50/50 de cette étude étaient comprises entre 3,61 et 3,79 km/s, ce qui prouve la qualité et la cohérence de l'éco-mortier. Cela indique une bonne résistance mécanique prévue.

- Les fibres plastiques augmentent considérablement la ténacité des éco-mortiers, selon les résultats de déplacement obtenus expérimentalement. Les fibres de 30 mm de long donnent de meilleures propriétés physiques et mécaniques.

- Les modèles mathématiques, inspirés de l'analyse de variance ANOVA, estimant les propriétés des éco-mortiers renforcés par des fibres plastiques (PET-F) se sont révélés très pertinents et précieux avec un taux d'erreur de 8%.

Pour obtenir un meilleur coefficient de désirabilité, nous avons constaté que la longueur de fibre de 30 mm était la meilleure dans les résultats expérimentaux, contrairement à ce qui était attendu dans l'optimisation ciblée de 20 mm.

- La caractérisation physico-chimique des sables dunaires et recyclés révèle une abondance de minéraux de quartz et de calcite, qui contribuent au comportement du mortier produit.

Grâce à la modélisation RSM basée sur les interactions des composants SD-SR-PET-F, le déplacement maximal en flexion (5,794 mm) et la vitesse des impulsions ultrasoniques (3855,11 m/s) ont été atteints. Dans le même temps, des valeurs minimales pour la teneur en air (0,799 %), le retrait (-95,2829 $\mu\text{m}/\text{m}$) et l'absorption d'eau (11,913 %) ont été obtenues.

- Les informations techniques obtenues grâce à cette étude permettront de concevoir efficacement des éco-mortiers durables, rentables et orientés vers l'avenir.

- Enfin, nous avons déterminé les paramètres de préparation optimaux à l'aide de la méthode Box-Behnken Design BBD de la Response Surface Methodology RSM. Ces paramètres comprenaient une teneur en sable de dune de 50 %, une teneur en sable recyclé de 50 %, une teneur en fibres plastiques de 0,5 % et une longueur de fibre de 30 mm. Sur la base de ces paramètres optimaux, nous avons prédit une résistance maximale à la compression de 43,399 MPa, une résistance maximale à la flexion de 7,723 MPa, un taux d'absorption minimal de 11,984 % et un taux de porosité minimal de 21,426 %. Ces prédictions ont été confirmées par les résultats expérimentaux, ce qui a permis d'optimiser un modèle de surface de réponse fiable.

Références bibliographiques

- [1] N Kachouh, H El-Hassan, T El-Maaddawy. Effect of steel fibers on the performance of concrete made with recycled concrete aggregates and dune sand. *Construction Building Materiles* 2019;213:348–59. <https://doi.org/10.1016/journal.con.build.mat.2019.04.087>.
- [2] FJ Luo, L He, Z Pan, WH Duan, XL Zhao, Collins F. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand. *Construction Building Materiles* 2013;47:131–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.005>.
- [3] Pereira De Oliveira LA, Castro-Gomes JP. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction Building Materiles* 2011;25:1712–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [4] Wang S, Zhang G, Wang Z, Huang T, Wang P. Effect of defoaming agent on the properties of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose through adjusting air content gradient. *Cement Concrete Composite* 2023;139:105024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105024>.
- [5] Li J, Wang R, Li L. Influence of cellulose ethers structure on mechanical strength of calcium sulphoaluminate cement mortar. *Construction Building Materiles* 2021;303:124514. <https://doi.org/10.1016/journal.con-build-mat.2021.124514>.
- [6] Chen G, Li F, Geng J, Jing P, Si Z. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity. *Construction Building Materiles* 2021;294:123572. <https://doi.org/10.1016/journal.con-build-mat.2021.123572>.
- [7] AI Al-hadithi. "Improving Impact and Mechanical Properties of Gap-Graded Concrete by Adding Waste Plastic Fibers" 2014.
- [8] İ Şanal. "Performance of Macrosynthetic and Steel Fiber-Reinforced Concretes Emphasizing Mineral Admixture Addition". *Journal Materiles Civil Engineering* 2018;30. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002292](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002292).
- [9] M.H El Ouni, SHA Shah, A Ali, S Muhammad, MS Mahmood, B Ali, et al. "Mechanical performance, water and chloride permeability of hybrid steel-polypropylene fiber-reinforced recycled aggregate concrete". *Case Studies in Construction Materials* 2022;16:e 00831. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00831>.
- [10] Das CS, Dey T, Dandapat R, Mukharjee BB, Kumar J. "Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete". *Construction Building Materiles* 2018;189:649–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036>.
- [11] Ali-Boucetta T, Ayat A, Laifa W, Behim M. Treatment of date palm fibres mesh: Influence on the rheological and mechanical properties of fibre-cement composites. *Construction Building Materiles* 2021;273:121056. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121056>.
- [12] GHD Tonoli, MN Belgacem, J Bras, Silva MA Pereira-Da, FA Rocco Lahr, "Savastano H. Impact of bleaching pine fibre on the fibre/cement interface". *Journal of Materials Science* 2012;47:4167–77. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6271-z>.
- [13] MJ Islam, K Islam, M Shahjalal, E Khatun, S Islam, AB Razzaque. "Influence of different types of fibers on the mechanical properties of recycled waste aggregate

- concrete". *Construction Building Materiles* 2022;337:127577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127577>.
- [14] FMZ Hossain, M Shahjalal, K Islam, M Tiznobaik, MS Alam. "Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber". *Construction Building Materiles* 2019;225:983–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.245>.
- [15] SB Kim, NH Yi, HY Kim, JHJ Kim, YC Song. "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete". *Cement Concrete Composite* 2010;32:232–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002>.
- [16] Tayyib C. Contribution à l' étude des matériaux cimentaires contenant des inclusions végétales Année Universitaire. 2021.
- [17] F Pacheco-Torgal, S Jalali. "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review". *Construction Building Materiles* 2011;25:575–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [18] A Akkaoui. "Bétons de granulats de bois : Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles". Université Paris-Est, ÉCOLE Dr Sci INGÉNIERIE Environ 2014:230.
- [19] L Boulos. "Effet d'un revêtement de dioxyde de zirconium sur la durabilité des fibres de lin en milieu cimentaire". Univ SHERBROOKE Fac Génie Département Génie Civ 2018.
- [20] Salima B. Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco- composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés. 2017.
- [21] Salgado F de Andrade, Silva F de Andrade. "Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: Areview". *Journal Building Engineering* 2022;52:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [22] Xie J, Chen W, Wang J, Fang C, Zhang B, Liu F. "Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete". *Construction Building Materiles* 2019;226:345–59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>.
- [23] Mistri A, Bhattacharyya SK, Dhama N, Mukherjee A, Barai SV. "Areview on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials". *Construction Building Materiles* 2020;233:117894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>.
- [24] Yang W, Tang Z, Wu W, Zhang K, Yuan J, Li H, et al. "Effect of different fibers on impermeability of steamcured recycled concrete". *Construction Building Materiles* 2022;328:127063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127063>.
- [25] Kim J. Influenceof quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction Building Materiles* 2022;328:127071. <https://dio.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127071>.
- [26] Zhu L, Ning Q, Han W, Bai L. "Compressive strength and microstructural analysis of recycled coarse aggregate concrete treated with silica fume". *Construction Building Materiles* 2022;334:127453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127453>.
- [27] S Kotwal, H Singh, R Kumar. "Experimental investigation of Steel Fibre reinforced Self Compacting Concrete (SCC) using recycled aggregates as partial replacement of coarse aggregates".*Materiles Today Proceeding* 2021,48:1032–7.

- <https://doi.org/10.1016/j.materilesproected.2021.06.436>.
- [28] PK Mehta, PJM Monteiro. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 3rd Ed doi 101036/0071462899 McGraw-Hill, New York, 2006.
- [29] NS Martys, CE Ferraris. "Capillary transport in mortars and concrete". Cement Concrete Research 1997;27:747–60.
- [30] P Ramadoss, K Nagamani. "Tensile strength and durability characteristics of high-performance fiber reinforced concrete". Arabian Journal for Science and Engineering 2008;33:307–19.
- [31] A Aidoud, M Bencheick, S Boukour. "Valuation of RubberWaste and DuneSand: Mortar for Construction and Environmental Protection". Materiles Geo-environment 2022;0:1–11. <https://doi.org/10.2478/rmzmag-2021-0007>.
- [32] B Krobba, M Bouhicha, S Kenai, L Courard. "Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and Stipatenacissima microfibers plant". Construction Building Materiles 2018;171:950–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200>.
- [33] M Boumaaza, A Belaadi, H Alshahrani, M Bouchak, M Jawaïd. "Response Surface Methodology Optimization of Palm Rachis Biochar Content and Temperature Effects on Predicting Bio-Mortar Compressive Strength, Porosity and Thermal Conductivity". Journal of Natural Fibers 2023;20. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2162184>.
- [34] JMV Gómez-Soberón. "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study". Cement Concrete Research 2002;32:1301–11. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0).
- [35] ZH Duan, CS Poon. "Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars". MaterDes 2014;58:19–29. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>.
- [36] NHAS Lim, H Mohammad hosseini, MM Tahir, M Samadi, ARM Sam. "Microstructure and Strength Properties of Mortar Containing Waste Ceramic Nanoparticles". Arabian Journal for Science and Engineerin 2018;43:5305–13. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3154-x>.
- [37] L Berredjem, N Arabi, L Molez. "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete". Construction Building Materiles 2020;246:118421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421>.
- [38] MC Limbachiya, E Marrocchino, A Koulouris. "Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate". Waste Management 2007;27:201–8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.005>.
- [39] SC Angulo, C Ulsen, VM John, H Kahn, MA Cincotto. "Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil". Waste Management 2009;29:721–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.009>.
- [40] Moodi Y, Mousavi SR, Ghavidel A, Sohrabi MR, Rashki M. "Using RSM and providing a modified model using whale algorithm for estimating the compressive strength of columns confined with FRP sheets". Construction Building Materiles 2018;183:163–70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.081>.
- [41] Tenza-Abril AJ, Villacampa Y, Solak AM, Baeza-Brotons F. "Prediction and sensitivity analysis of compressive strength in segregated light weight concrete based

- on artificial neural network using ultrasonic pulse velocity". *Construction Building Materiles* 2018;189:1173–83. <https://doi.org/10.1016/j.con-build-mat.2018.09.096>.
- [42] Ł Sadowski, M Piechówka-Mielnik, T Widziszowski, A Gardynik, S Mackiewicz. "Hybrid ultrasonic-neural prediction of the compressive strength of environmentally friendly concrete screeds with high volume of waste quartz mineral dust". *Journal Cleaner Producted* 2019;212:727–40. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.059>.
- [43] Ghafoori N, Najimi M, Sobhani J, Aqel MA. "Predicting rapid chloride permeability of self-consolidating concrete: A comparative study On Statistical and neural network models". *Construction Building Materiles* 2013;44:381–90. <https://doi.org/10.1016/j.con-build-mat.2013.03.039>.
- [44] MK Mohammed, AI Al-Hadithi, MH Mohammed. Production and optimization of eco-efficient self compacting concrete SCC with limestone and PET. *Construction Building Materiles* 2019;197:734–46. <https://doi.org/10.1016/j.con-build-mat.2018.11.189>.
- [45] Ferdosian I, Camões A. Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement Concrete Composite* 2017;84:146–56. <https://doi.org/10.1016/j.cement.concrete.comp.2017.08.019>.
- [46] J Bian, W Zhang, Z Shen, S Li, Z Chen. Analysis and optimization of mechanical properties of recycled concrete based on aggregate characteristics. *Science Engineering Composite Materiales* 2021;28:516–27. <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0050>.
- [47] Li W, Cai L, Wu Y, Liu Q, Yu H, Zhang C. Assessing recycled pavement concrete mechanical properties under joint action of freezing and fatigue via RSM. *Construction Building Materiles* 2018;164:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.219>.
- [48] ATA Dantas, M Batista Leite, K D Nagahama. Prediction of compressive strength of concrete containing construction and demolition waste using ANN. *Construction Building Materiles* 2013;38:717–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.026>.
- [49] Ghafari E, Costa H, Júlio E. RSM based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers. *Construction Building Materiles* 2014;66:375–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.064>.
- [50] Q Sun, H Zhu, H Li, H Zhu, M Gao. Application Of Response Surface Methodology In The Optimization Of Fly Ash Geopolymer Concrete. *ISA Trans* 2018;48:45–52.
- [51] L Zhang, Y Yue. Influence of Waste Glass Powder usage on the properties of alkali-activated slag mortars based on response surface methodology. *Construction Building Materiles* 2018;181:527–34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.040>.
- [52] Q Zhang, X Feng, X Chen, K Lu. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on Response Surface Methodology. *Construction Building Materiles* 2020;259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119776>.
- [53] Hammoudi A, Moussaceb K, Belebchouche C, Dahmoune F. Comparison of a ANN and RSM prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Construction Building Materiles* 2019;209:425–36. <https://doi.org/10.1016/journal.con,build,mat2019.03.119>.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES & **RECOMMANDATIONS**

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

Ces travaux ont principalement exploré la faisabilité de valoriser divers types de déchets, notamment les dunes de sable, les résidus de béton provenant de démolitions, ainsi que les déchets de matières plastiques. L'objectif était d'intégrer ces matériaux dans la fabrication de mortiers à caractère environnemental.

Cet éco-mortier est formulé à trois séries:

1. Cinq formulations de mortier de contrôle sans fibres ont été composées, avec des variations de 0 à 100 % de sable de dunes et de 100 à 0 % de sable recyclé, par pas de substitution de 25 %, du ciment CEM II/A-L 42.5R et de l'eau potable, pour le gâchage.
2. Vingt formulations de mortier fibré de 20 mm de long ont été composées avec différentes proportions, allant de 0 à 100 % de sable de dunes et de 100 à 0 % de sable recyclé, par pas de substitution de 25 %. Ces formulations étaient renforcées par des fibres de type PET, avec des taux de 0.5, 1, 1.5 à 2 %, en plus du ciment CEM II/A-L 42.5R et de l'eau potable, pour le gâchage.
3. Vingt formulations de mortier fibré de 30 mm de long ont été composées avec différentes proportions, allant de 0 à 100 % de sable de dunes et de 100 à 0 % de sable recyclé, par pas de substitution de 25 %. Ces formulations étaient renforcées par des fibres de type PET, avec des taux de 0.5, 1, 1.5 à 2 %, en plus du ciment CEM II/A-L 42.5R et de l'eau potable, pour le gâchage.

Les conclusions principales sont synthétisées comme suit :

L'utilisation exclusive de sable de dune dans la fabrication de mortier présente des caractéristiques mécaniques acceptables, notamment en termes de résistance. Cependant, il est important de noter une limitation dans la marge de plasticité observée dans la plage de ductilité du matériau, comme indiqué par les résultats des déplacements de flexion obtenus lors des essais. Cette observation suggère que bien que le mortier puisse atteindre des niveaux de résistance mécanique acceptables, sa capacité à se déformer de manière ductile, notamment sous l'effet de contraintes ou de déformations importantes, peut être limitée. Cette caractéristique peut avoir des implications sur la capacité du matériau à absorber et à dissiper l'énergie dans des conditions de charges variables, ce qui est crucial pour la performance globale du matériau dans diverses applications de construction. Ainsi, il serait bénéfique d'explorer des mélanges alternatifs ou des ajustements de formulation pour améliorer la plasticité du mortier tout en maintenant ses propriétés de résistance.

Le granulats de béton recyclé, également connu sous le nom de sable recyclé, joue un rôle crucial en tant que correcteur majeur des caractéristiques de la granulométrie de sable des dunes. Son impact sur ces propriétés physiques et performances mécaniques résulte principalement des différences de granulométrie entre ces deux matériaux. Une analyse approfondie de la courbe granulométrique a démontré que le remplacement du sable de dune par le sable recyclé à parts égales représentait la solution optimale.

Cette approche a été validée en obtenant un module de finesse préférentiel de 2,43, soulignant ainsi la pertinence de cette proportion équilibrée pour améliorer les caractéristiques du mélange.

L'incorporation de fibres plastiques de type polyéthylène téréphtalate (PET) dans la matrice cimentaire a un impact significatif sur la ténacité des éco-mortiers, améliorant considérablement leurs propriétés physiques et mécaniques. Cependant, il est important de noter que cette intégration de fibres PET-F dans la matrice a conduit à une augmentation substantielle du volume total des pores par rapport au mortier à base de sable de dune, ce qui peut potentiellement influencer la durabilité de la structure à long terme.

D'une manière générale, les résultats obtenus suite à l'incorporation de fibres plastiques d'une longueur de 30 mm dans les compositions de mortier, avec un ajustement de 50% de sable de dune et 50% de sable recyclé, ont démontré leur efficacité. Cette approche a permis d'améliorer diverses propriétés du mortier, notamment sa résistance mécanique, son comportement à l'état frais, et d'autres caractéristiques essentielles. Ces conclusions suggèrent que l'utilisation de cette combinaison spécifique de matériaux peut être une stratégie prometteuse pour le développement des mortiers écologiques présentant des performances optimisées.

En conclusion de cette partie basée sur la méthode de Réponse de Surface (RSM), l'application réussie de la modélisation RSM, en considérant les interactions entre les composants SD-SR-PET-F, a permis d'atteindre des performances optimales dans le béton éco-mortier. Les résultats indiquent que les paramètres de préparation optimaux, déterminés par la méthode Box-Behnken Design de la RSM, incluent une teneur en sable de dune de 50 %, une teneur en sable recyclé de 50 %, une teneur en fibres plastiques de 0,5 % avec une longueur de fibre de 30 mm. Ces paramètres ont conduit à des propriétés physico-mécaniques exceptionnelles. Ces résultats expérimentaux confirment la fiabilité du modèle de surface de réponse, soulignant ainsi le potentiel de cette approche pour concevoir efficacement des éco-mortiers durables, rentables et orientés vers l'avenir.

Recommandations

Quelques recommandations visant à guider les futures recherches dans le domaine de la valorisation du sable de dune, des agrégats recyclés et des fibres plastiques, ainsi que leur utilisation dans le mortier, peuvent être formulées à la suite de cette étude. Il serait intéressant de compléter ces travaux par une étude microscopique pour évaluer l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire.

En premier lieu, il serait bénéfique de poursuivre les investigations sur les propriétés mécaniques, thermiques, et chimiques des éco-mortiers élaborés avec des formulations variées de sable de dune, d'agrégats recyclés et de fibres plastiques. Une attention particulière devrait être accordée à l'optimisation des proportions de ces composants pour maximiser les performances du mortier tout en garantissant une durabilité accrue au régions à température élevée et de zone agressives.

En outre, des études approfondies sur les aspects environnementaux des éco-mortiers, tels que leur empreinte carbone, leur recyclabilité, et leur impact global sur l'écosystème, pourraient offrir des perspectives cruciales pour le développement durable de ces matériaux de construction. Cette dimension environnementale est de plus en plus essentielle dans le contexte actuel de préoccupations croissantes concernant le changement climatique et la gestion des ressources.

Par ailleurs, des investigations approfondies sur la durabilité à long terme des structures construites à partir de ces éco-mortiers devraient être entreprises. Cela inclut des études sur la résistance à l'abrasion, la résistance aux cycles de gel-dégel, et la résistance aux attaques chimiques, afin de mieux comprendre comment ces matériaux se comportent dans des conditions environnementales réalistes.

Enfin, l'intégration de technologies émergentes et de méthodologies innovantes dans la fabrication des éco-mortiers pourrait être une avenue intéressante à explorer. L'utilisation de techniques avancées de caractérisation des matériaux, de modélisation numérique, et d'approches expérimentales novatrices pourrait contribuer à enrichir la compréhension des interactions complexes entre les composants du mortier.

En somme, la poursuite des recherches dans ces directions pourrait jouer un rôle crucial dans l'évolution des pratiques de construction vers des approches plus durables et respectueuses de l'environnement. Cependant, des investigations plus approfondies et des études complémentaires pourraient être nécessaires afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et d'optimiser davantage les proportions des composants pour atteindre des résultats encore plus performants.

ANNEXES

Annexe 1

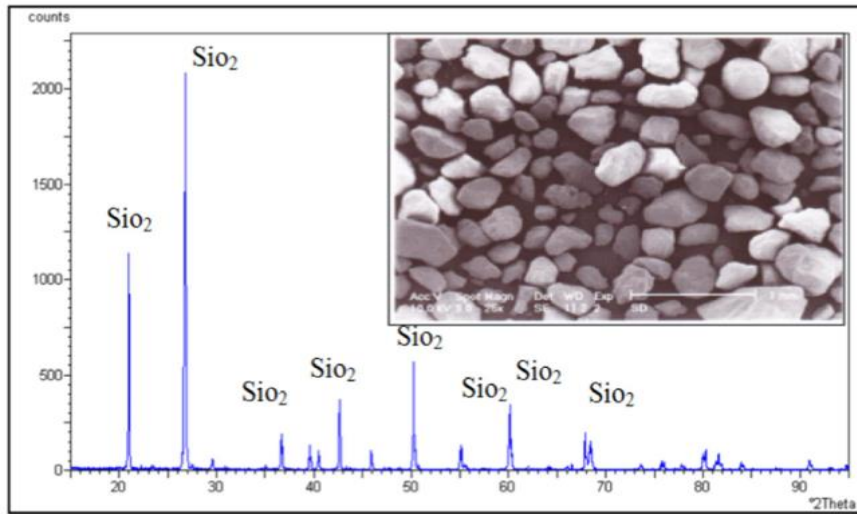


Figure I-4: Analyse DRX et forme granulaire des sables de dune [15].

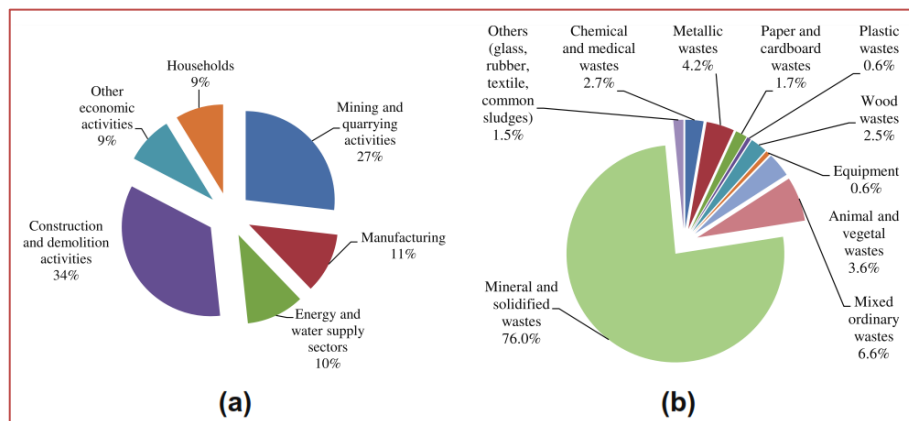


Figure II-4 Total des déchets générés dans l'Union européenne: (a) l'activité économique; (b) catégorie de déchets [37].

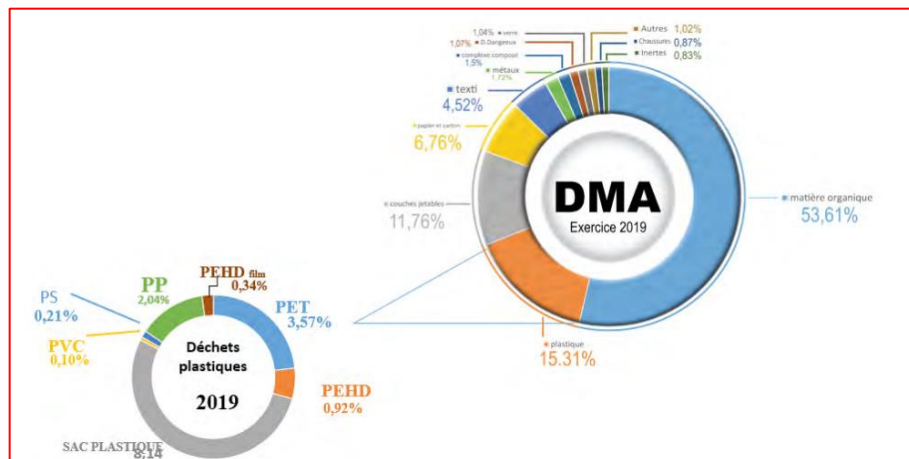


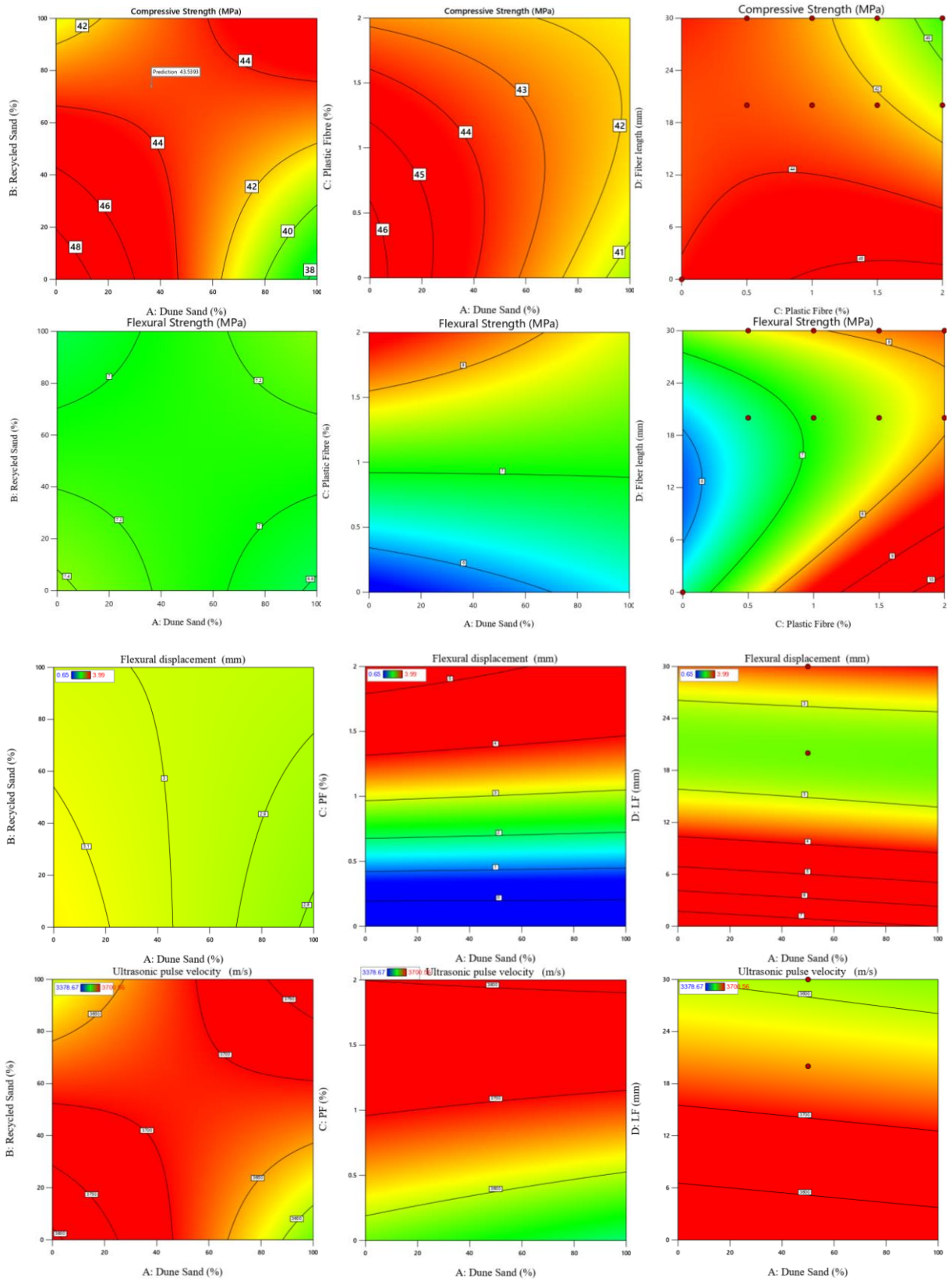
Figure II-8 Composition des déchets plastiques (par sous-catégories) [40]



Figure III-22 : Dispositif hydrostatique.



Figure III-25 : Principe expérimental d'absorption d'eau.



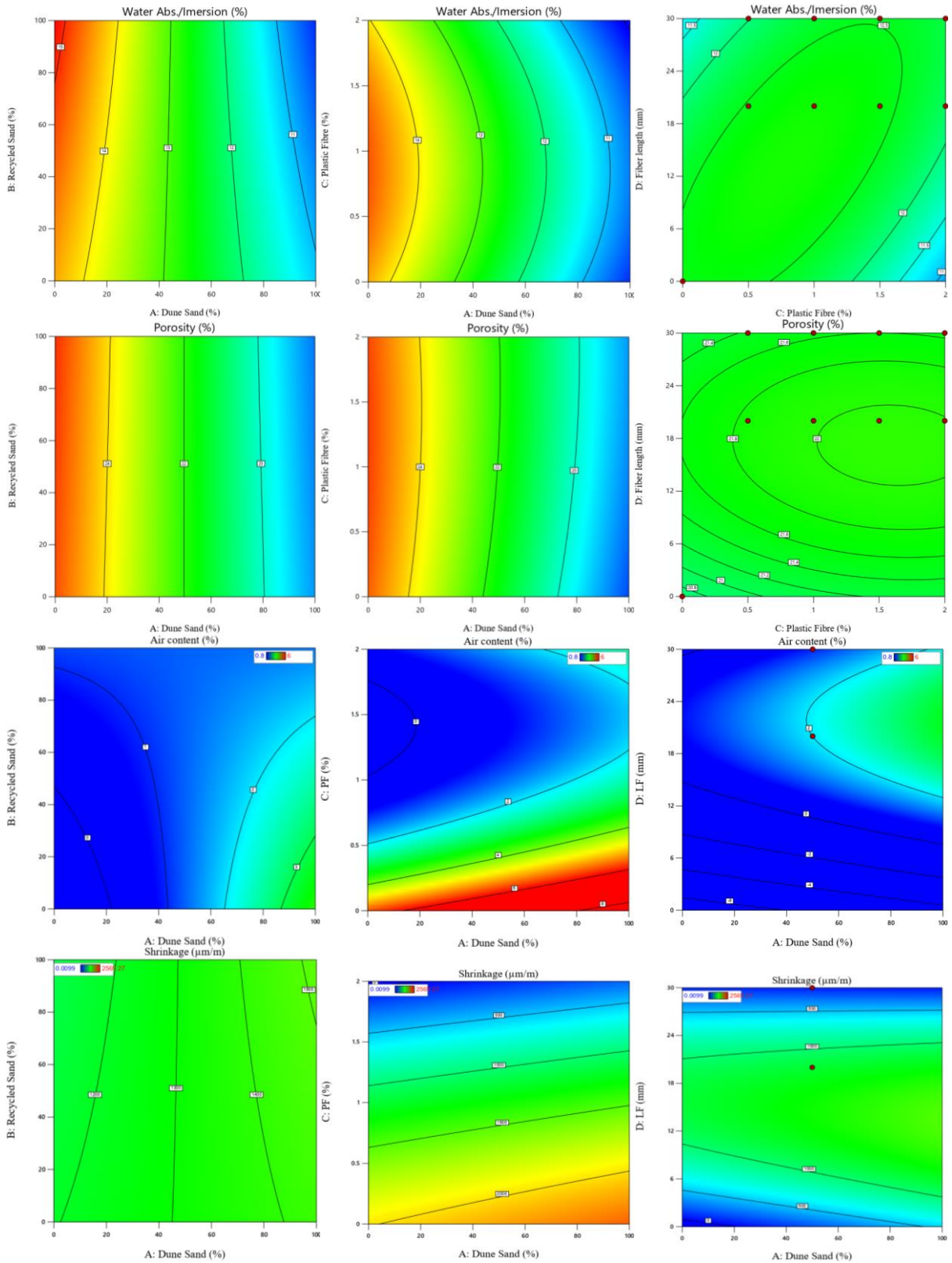


Figure IV-31 Courbes de contour 2D pour la Rc, Rf, Yf, UPV, Ab, P, Ac et retrait en fonction de (DS/RS), (DS/PET-F) et (PET-F/FL) de l'éco-mortier.

Annexe 2

Tableau I.2 Analyse chimique des sables de dune [16].

| Origine du sable | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | SO ₃ (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | P.F (%) |
|------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------------------|----------------------|-----------------------|---------|
| Boussaâda | 94,14 | 0,89 | 0,27 | 2,03 | 0,01 | 0,01 | 0,3 | 0,01 | 2,09 |
| Hassi bahbah | 95,21 | 0,97 | 0,23 | 1,32 | 0,01 | 0,05 | 0,4 | 0,27 | 1,52 |
| Oum zabed | 94,21 | 1,37 | 0,39 | 1,24 | 0,25 | 0,13 | 0,62 | 0,25 | 1,17 |
| Touggourt | 96,17 | 0,73 | 0,21 | 1,06 | 0,01 | 0,05 | 0,25 | 0,01 | 1,48 |
| Ouargla | 96,18 | 1,14 | 0,36 | 0,68 | 0,01 | 0,10 | 0,42 | 0,01 | 0,79 |
| Timarine | 94,49 | 1,27 | 0,38 | 1,68 | 0,01 | 0,06 | 0,42 | 0,01 | 1,69 |
| Hamria | 93,70 | 2,11 | 0,71 | 0,9 | 0,19 | 0,01 | 0,78 | 0,01 | 1,46 |
| Maaraf | 79,18 | 1,19 | 0,52 | 7,1 | 0,62 | 7,18 | 0,52 | 0,21 | 3,26 |
| Laghouat | 88,64 | 0,92 | 0,33 | 5,23 | 0,01 | 0,07 | 0,41 | 0,37 | 4,03 |

Tableau II-1 Niveau de recyclage en Europe [25].

| Nations | Déchets de démolition en millions de tonnes annuelles | Matériaux recyclés en millions de tonnes annuelles | Taux de recyclage par rapport à la génération de déchets | Taux de recyclage par rapport à la production de granulats naturels |
|---------------|---|--|--|---|
| Le Pays Bas | 12,20 | 8,50 | 73,0 | 2,60 |
| La RoyaumeUni | 24,00 | 11,00 | 45,8 | 3,80 |
| Allemagne | 58,00 | 14,90 | 34,6 | 3,60 |
| La Belgique | 7,50 | 2,20 | 29,0 | 5,80 |
| Danemarke | 5,00 | 1,25 | 25,0 | 4,25 |
| La France | 25,00 | 3,00 | 13,0 | 0,75 |
| L'Espagne | 13,50 | 0,50 | 3,70 | 0,20 |
| Total | 14,50 | 42,0 | moy = 31 | 21,0 |

Table III.3 Répartition granulométrique du sable de dune, sable de recyclage et des différents mélanges de SD et SR.

| Diamètre des Tamis (mm) | Tamisâtes cumulés (%) | | | | |
|-------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| | 100% SD | 75%SD+25%SR | 50%SD+50%SR | 25%SD+75%SR | 100% SR |
| Type de sable | | | | | |
| 6.3 | | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 5 | | 99.9 | 99.84 | 99.78 | 99.76 |
| 4 | | 95.175 | 89.58 | 86.93 | 79.72 |
| 3.15 | | 92.11 | 83.71 | 78.41 | 68.38 |
| 2.5 | | 89.065 | 78.08 | 71.05 | 58.89 |
| 2 | | 87.245 | 74.57 | 65.87 | 52.01 |
| 1.6 | 100 | 85.47 | 71.19 | 61.08 | 45.41 |
| 1.25 | 99.99 | 83.765 | 67.91 | 56.25 | 39.05 |
| 1 | 99.91 | 82.475 | 65.46 | 52.47 | 34.20 |
| 0.63 | 99.70 | 80.25 | 61.35 | 45.75 | 25.31 |
| 0.50 | 98.71 | 78.325 | 58.88 | 42.37 | 21.52 |
| 0.315 | 71.04 | 44.34 | 39.53 | 28.76 | 15.41 |
| 0.25 | 45.08 | 27.96 | 25.49 | 20.05 | 12.59 |
| 0.16 | 16.69 | 10.525 | 10.18 | 10.17 | 8.28 |
| 0.125 | 7.60 | 4.61 | 5.33 | 6.28 | 6.39 |
| 0.075 | 3.72 | 1.46 | 3.90 | 4.94 | 4.92 |
| 0.063 | 0.50 | 0.67 | 1.60 | 2.39 | 2.31 |

Tableau IV-2 Résistance à la compression, à la flexion et la vitesse d'impulsion des ultrasons des éco-mortiers renforcés avec PET-F (20 et 30) mm et sans PET-F.

| N° | Notations | Rc en (MPa) | Rf en (MPa) | Vitesse UPV (m/s) | Différence en Compression (%)* | Différence en Flexion (%)* |
|----|-------------------------|--------------|-------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | M _{0/0} | 38.205±3.032 | 6.839±0.106 | 3248.67±7.750 | - | - |
| 2 | M _{25/0} | 42.079±6.922 | 6.548±0.166 | 3528.97±23.70 | 10.14 | -4.26 |
| 3 | M _{50/0} | 44.127±2.613 | 6.932±0.605 | 3610.97±23.70 | 15.5 | 1.36 |
| 4 | M _{75/0} | 44.288±2.690 | 6.097±1.249 | 3573.21±72.41 | 15.92 | -10.85 |
| 5 | M _{100/0} | 42.035±0.622 | 5.527±0.000 | 3477.26±42.41 | 10.02 | -19.18 |
| 6 | M _{0/0.5/20} | 36.974±1.587 | 6.587±0.532 | 3329.43±41.72 | -3.22 | -3.68 |
| 7 | M _{25/0.5/20} | 41.333±1.549 | 6.398±0.244 | 3567.21±25.41 | -1.77 | -2.29 |
| 8 | M _{50/0.5/20} | 43.329±1.277 | 6.715±0.085 | 3612.81±26.34 | -1.81 | -3.13 |
| 9 | M _{75/0.5/20} | 43.427±4.093 | 6.441±0.154 | 3566.01±11.00 | -1.94 | 5.64 |
| 10 | M _{100/0.5/20} | 41.615±0.841 | 6.039±0.397 | 3449.24±53.78 | -1 | 9.26 |
| 11 | M _{0/1/20} | 37.161±2.423 | 6.577±0.615 | 3410.05±14.77 | -2.73 | -3.83 |
| 12 | M _{25/1/20} | 41.228±0.749 | 6.993±1.002 | 3625.12±43.13 | -2.02 | 6.8 |
| 13 | M _{50/1/20} | 42.565±4.883 | 7.526±0.650 | 3658.99±28.14 | -3.54 | 8.57 |
| 14 | M _{75/1/20} | 42.539±3.536 | 7.102±0.260 | 3600.76±36.37 | -3.95 | 16.48 |
| 15 | M _{100/1/20} | 40.306±2.456 | 6.893±0.428 | 3380.98±55.31 | -4.11 | 24.72 |
| 16 | M _{0/1.5/20} | 36.648±3.055 | 6.796±0.346 | 3570.74±17.66 | -4.08 | -0.63 |
| 17 | M _{25/1.5/20} | 40.143±2.687 | 7.291±0.616 | 3673.87±47.38 | -4.6 | 11.35 |
| 18 | M _{50/1.5/20} | 41.797±7.090 | 7.934±0.609 | 3694.58±12.62 | -5.28 | 14.45 |
| 19 | M _{75/1.5/20} | 41.661±1.169 | 7.687±0.612 | 3634.18±33.19 | -5.93 | 26.08 |
| 20 | M _{100/1.5/20} | 42.117±1.603 | 7.499±0.803 | 3481.78±31.97 | 0.2 | 35.68 |
| 21 | M _{0/2/20} | 36.135±3.149 | 6.910±0.622 | 3681.12±17.03 | -5.42 | 1.04 |
| 22 | M _{25/2/20} | 38.981±2.098 | 7.542±0.952 | 3771.56±39.66 | -7.36 | 15.18 |
| 23 | M _{50/2/20} | 41.034±5.554 | 7.944±1.155 | 3786.96±17.02 | -7.01 | 14.6 |
| 24 | M _{75/2/20} | 38.902±3.944 | 8.222±0.208 | 3667.08±33.60 | -12.16 | 34.85 |
| 25 | M _{100/2/20} | 38.558±3.878 | 8.061±0.840 | 3403.41±23.87 | -8.27 | 45.85 |
| 26 | M _{0/0.5/30} | 34.927±3.973 | 8.000±0.543 | 3400.01±10.76 | -8.58 | 16.98 |
| 27 | M _{25/0.5/30} | 41.112±7.778 | 7.594±0.201 | 3560.13±42.62 | -2.3 | 15.97 |
| 28 | M _{50/0.5/30} | 42.358±1.001 | 7.612±0.679 | 3612.98±57.31 | -4.01 | 9.81 |
| 29 | M _{75/0.5/30} | 43.513±3.026 | 7.433±0.398 | 3600.71±85.79 | -1.75 | 21.91 |
| 30 | M _{100/0.5/30} | 43.742±3.125 | 7.526±0.350 | 3513.39±10.76 | 4.06 | 36.17 |
| 31 | M _{0/1/30} | 33.529±2.892 | 7.000±0.219 | 3484.45±19.66 | -12.24 | 2.35 |
| 32 | M _{25/1/30} | 42.820±0.424 | 7.736±0.982 | 3541.31±71.70 | 1.76 | 18.14 |
| 33 | M _{50/1/30} | 43.859±1.541 | 7.771±1.047 | 3592.13±18.92 | -0.61 | 12.1 |
| 34 | M _{75/1/30} | 43.338±3.652 | 7.866±0.784 | 3589.99±17.17 | -2.15 | 29.01 |
| 35 | M _{100/1/30} | 41.059±0.954 | 8.000±0.446 | 3501.62±36.02 | -2.32 | 44.74 |
| 36 | M _{0/1.5/30} | 33.999±0.967 | 7.601±0.686 | 3498.51±46.04 | -11.01 | 11.14 |
| 37 | M _{25/1.5/30} | 39.962±2.194 | 8.101±0.697 | 3610.42±58.53 | -5.03 | 23.72 |
| 38 | M _{50/1.5/30} | 38.645±1.660 | 8.039±0.840 | 3635.28±25.38 | -12.42 | 15.97 |
| 39 | M _{75/1.5/30} | 40.192±1.692 | 8.148±0.922 | 3507.09±16.17 | -9.25 | 33.64 |
| 40 | M _{100/1.5/30} | 37.393±3.183 | 8.172±0.465 | 3463.85±60.30 | -11.04 | 47.86 |
| 41 | M _{0/2/30} | 32.842±1.498 | 7.665±0.510 | 3400.97±20.91 | -14.04 | 12.08 |
| 42 | M _{25/2/30} | 37.801±4.370 | 7.996±0.617 | 3485.53±20.91 | -10.17 | 22.11 |
| 43 | M _{50/2/30} | 40.321±0.990 | 7.983±0.310 | 3515.43±16.52 | -8.63 | 15.16 |
| 44 | M _{75/2/30} | 40.175±4.868 | 8.421±0.334 | 3519.28±48.35 | -9.29 | 38.12 |
| 45 | M _{100/2/30} | 35.877±5.337 | 8.512±0.836 | 3417.09±34.67 | -14.65 | 54.01 |

* Les formulations témoins sont calculées sur la base d'un éco-mortier 100% SD sans fibres, tandis que les autres formulations avec fibres sont calculées pour les mêmes types d'éco-mortier sans fibres.

Tableau IV-3 Absorption d'eau, Sorptivité capillaire et la porosité de l'éco-mortiers renforcés avec PET-F (20 et 30) mm et sans PET-F.

| N° | Notations | Ab (%) | Différence en Ab (%)* | Sorptivité capillaire (mm/√s)* | Différence de taux d'absorption (%)* | Porosité accessible à l'eau (%) | Différence en porosité (%) |
|----|-------------|--------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | M0/0 | 10.4 | - | 0.0285 | - | 17.5 | - |
| 2 | M25/0 | 11.5 | 10.58 | 0.0286 | 0.35 | 18.24 | 4.23 |
| 3 | M50/0 | 12.84 | 23.46 | 0.0287 | 0.6 | 20.91 | 19.51 |
| 4 | M75/0 | 13.83 | 32.98 | 0.0294 | 3.16 | 23.13 | 32.17 |
| 5 | M100/0 | 15.09 | 45.1 | 0.03 | 5.23 | 24.03 | 37.31 |
| 6 | M0/0.5/20 | 10.55 | 1.44 | 0.0283 | -0.7 | 18.01 | 2.91 |
| 7 | M25/0.5/20 | 12.04 | 4.7 | 0.0283 | -0.98 | 20.77 | 13.88 |
| 8 | M50/0.5/20 | 12.59 | -1.95 | 0.0289 | 0.8 | 21.83 | 4.37 |
| 9 | M75/0.5/20 | 13.39 | -3.18 | 0.0301 | 2.38 | 23.52 | 1.69 |
| 10 | M100/0.5/20 | 14.9 | -1.26 | 0.032 | 6.7 | 25.19 | 4.84 |
| 11 | M0/1/20 | 12.48 | 9.42 | 0.028 | -1.75 | 18.74 | 7.09 |
| 12 | M25/1/20 | 11.92 | 3.65 | 0.028 | -2.1 | 20.87 | 14.42 |
| 13 | M50/1/20 | 12.15 | -5.37 | 0.029 | 1.15 | 21.7 | 3.75 |
| 14 | M75/1/20 | 13.46 | -2.68 | 0.0299 | 1.7 | 23.4 | 1.17 |
| 15 | M100/1/20 | 15.17 | 0.53 | 0.031 | 3.37 | 25.86 | 7.64 |
| 16 | M0/1.5/20 | 10.98 | 5.58 | 0.028 | -1.75 | 19.05 | 8.86 |
| 17 | M25/1.5/20 | 11.91 | 3.57 | 0.0281 | -1.64 | 20.65 | 13.21 |
| 18 | M50/1.5/20 | 12.27 | -4.44 | 0.0286 | -0.31 | 21.85 | 4.47 |
| 19 | M75/1.5/20 | 13.6 | -1.66 | 0.0289 | -1.7 | 23.54 | 1.77 |
| 20 | M100/1.5/20 | 14.54 | -3.64 | 0.0311 | 3.7 | 25.63 | 5.54 |
| 21 | M0/2/20 | 10.49 | 0.87 | 0.0278 | -2.63 | 19.06 | 8.91 |
| 22 | M25/2/20 | 11.15 | -3.04 | 0.0279 | -2.59 | 20.34 | 11.51 |
| 23 | M50/2/20 | 12 | -6.54 | 0.0286 | -0.17 | 21.72 | 3.86 |
| 24 | M75/2/20 | 13.61 | -1.59 | 0.0299 | 1.67 | 23.68 | 2.38 |
| 25 | M100/2/20 | 14.8 | -1.92 | 0.031 | 3.37 | 25.54 | 6.28 |
| 26 | M0/0.5/30 | 10.05 | -3.37 | 0.0266 | -6.67 | 17.64 | 0.8 |
| 27 | M25/0.5/30 | 11.07 | -3.74 | 0.0278 | -2.8 | 19.8 | 8.55 |
| 28 | M50/0.5/30 | 12.04 | -6.23 | 0.029 | 1.15 | 21.45 | 2.56 |
| 29 | M75/0.5/30 | 13.24 | -4.27 | 0.03 | 2.04 | 23.22 | 0.43 |
| 30 | M100/0.5/30 | 14.35 | -4.9 | 0.0324 | 8.04 | 24.89 | 3.62 |
| 31 | M0/1/30 | 11.12 | 6.92 | 0.0274 | -3.86 | 18.88 | 7.94 |
| 32 | M25/1/30 | 11.51 | 0.09 | 0.028 | -2.1 | 20.42 | 11.95 |
| 33 | M50/1/30 | 12.39 | -3.5 | 0.0283 | -1.46 | 21.7 | 3.75 |
| 34 | M75/1/30 | 13.37 | -3.33 | 0.0284 | -3.4 | 23.27 | 0.61 |
| 35 | M100/1/30 | 15.21 | 0.8 | 0.0299 | -0.4 | 25.5 | 6.12 |
| 36 | M0/1.5/30 | 10.76 | 3.46 | 0.0281 | -1.58 | 18.42 | 5.26 |
| 37 | M25/1.5/30 | 11.04 | -4 | 0.028 | -2.06 | 19.88 | 8.99 |
| 38 | M50/1.5/30 | 12.2 | -4.98 | 0.029 | 1.15 | 21.52 | 2.89 |
| 39 | M75/1.5/30 | 13.89 | 0.43 | 0.026 | -11.56 | 21.39 | -7.52 |
| 40 | M100/1.5/30 | 14.89 | -1.33 | 0.0272 | -9.3 | 25.25 | 5.08 |
| 41 | M0/2/30 | 10.14 | -2.5 | 0.0285 | 0 | 17.85 | 2 |
| 42 | M25/2/30 | 11.45 | -0.43 | 0.0278 | -2.8 | 19.99 | 9.59 |
| 43 | M50/2/30 | 12.81 | -0.23 | 0.027 | -5.82 | 22.4 | 7.1 |
| 44 | M75/2/30 | 13.51 | -2.31 | 0.0259 | -11.9 | 23.34 | 0.91 |
| 45 | M100/2/30 | 14.73 | -2.39 | 0.0245 | -18.31 | 25.28 | 5.2 |

* Les formulations témoins sont calculées sur la base d'un éco-mortier 100% DS sans fibres, tandis que les autres formulations avec fibres sont calculées pour les mêmes types d'éco-mortier sans fibres.

Tableau IV-5 Conception expérimentale et résultats de : Résistance à la compression, Résistance à la flexion, Déplacement, Vitesse d'impulsion ultrasonique, Absorption d'eau, Porosité, Air occlus, et Retrait des éco-mortiers renforcés avec du PET-F (20 et 30 mm) et sans PET-F.

| N° | Input factors | | | | Outputs at 28 jours | | | | | | | |
|----|---------------|--------|-----------|---------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------------|
| | SD (%) | SR (%) | PET-F (%) | LF (mm) | Résistance à la compression (MPa) | Résistance à la flexion (MPa) | déplacement flexural (mm) | Vitesse d'impulsion ultrasonique (m/s) | Absorption d'eau par immersion (%) | Porosité accessible à l'eau (%) | Air occlus (%) | Retrait ($\mu\text{m/m}$) |
| 1 | 100 | 0 | 0 | 0 | 38.205±3.032 | 6.839±0.106 | 1.34±1.06 | 3248.67±7.750 | 10.40±0.16 | 17.50±0.071 | 5.00±1.8 | 2749.58±28.69 |
| 2 | 75 | 25 | 0 | 0 | 42.079±6.922 | 6.548±0.166 | 2.31±0.07 | 3528.97±23.70 | 11.50±0.15 | 18.24±0.108 | 4.10±1.1 | 2727.42±16.33 |
| 3 | 50 | 50 | 0 | 0 | 44.127±2.613 | 6.932±0.605 | 3.00±0.07 | 3610.97±23.70 | 12.84±0.14 | 20.915±0.166 | 3.20±0.5 | 2317.67±05.46 |
| 4 | 25 | 75 | 0 | 0 | 44.288±2.690 | 6.097±1.249 | 3.21±0.30 | 3573.21±72.41 | 13.83±0.18 | 23.13±0.164 | 2.45±0.2 | 2420.83±11.21 |
| 5 | 0 | 100 | 0 | 0 | 42.035±0.622 | 5.527±0.000 | 3.37±0.00 | 3477.26±42.41 | 15.09±0.16 | 24.03±0.167 | 1.85±0.3 | 2134.75±17.08 |
| 6 | 100 | 0 | 0.5 | 20 | 36.974±1.587 | 6.587±0.532 | 1.92±0.03 | 3329.43±41.72 | 10.55±1.75 | 18.01±3.181 | 5.20±2.0 | 2707.08±26.25 |
| 7 | 75 | 25 | 0.5 | 20 | 41.333±1.549 | 6.398±0.244 | 2.37±0.05 | 3567.21±25.41 | 12.04±0.11 | 20.771±0.146 | 5.10±1.9 | 2688.08±18.77 |
| 8 | 50 | 50 | 0.5 | 20 | 43.329±1.277 | 6.715±0.085 | 2.84±0.11 | 3612.81±26.34 | 12.59±0.53 | 21.83±0.903 | 4.00±2.0 | 2281.75±07.83 |
| 9 | 25 | 75 | 0.5 | 20 | 43.427±4.093 | 6.441±0.154 | 2.93±0.06 | 3566.01±11.00 | 13.39±0.08 | 23.52±0.139 | 3.20±1.1 | 2386.51±10.99 |
| 10 | 0 | 100 | 0.5 | 20 | 41.615±0.841 | 6.039±0.397 | 2.56±0.03 | 3449.24±53.78 | 14.90±0.24 | 25.193±0.333 | 3.00±0.7 | 2104.17±24.21 |
| 11 | 100 | 0 | 1 | 20 | 37.161±2.423 | 6.577±0.615 | 2.31±0.02 | 3410.05±14.77 | 12.48±1.77 | 18.74±2.556 | 4.63±1.1 | 2664.91±26.04 |
| 12 | 75 | 25 | 1 | 20 | 41.228±0.749 | 6.993±1.002 | 2.99±2.43 | 3625.12±43.13 | 11.92±0.06 | 20.87±0.083 | 4.82±1.0 | 2648.16±22.52 |
| 13 | 50 | 50 | 1 | 20 | 42.565±4.883 | 7.526±0.650 | 3.99±0.55 | 3658.99±28.14 | 12.15±0.01 | 21.70±0.016 | 3.35±0.2 | 2245.82±08.44 |
| 14 | 25 | 75 | 1 | 20 | 42.539±3.536 | 7.102±0.260 | 3.92±0.16 | 3600.76±36.37 | 13.46±0.03 | 23.40±0.133 | 2.50±0.3 | 2353.67±10.73 |
| 15 | 0 | 100 | 1 | 20 | 40.306±2.456 | 6.893±0.428 | 3.48±0.28 | 3380.98±55.31 | 15.17±0.16 | 25.866±0.236 | 2.00±0.4 | 2074.83±18.34 |
| 16 | 100 | 0 | 1.5 | 20 | 36.648±3.055 | 6.796±0.346 | 4.76±0.23 | 3570.74±17.66 | 10.98±1.10 | 19.05±1.999 | 4.76±0.9 | 2621.09±20.19 |
| 17 | 75 | 25 | 1.5 | 20 | 40.143±2.687 | 7.291±0.616 | 4.78±0.41 | 3673.87±47.38 | 11.91±0.09 | 20.65±0.099 | 4.00±0.3 | 2608.25±15.80 |
| 18 | 50 | 50 | 1.5 | 20 | 41.797±7.090 | 7.934±0.609 | 4.33±1.22 | 3694.58±12.62 | 12.27±0.15 | 21.85±0.246 | 3.10±0.1 | 2208.08±09.44 |
| 19 | 25 | 75 | 1.5 | 20 | 41.661±1.169 | 7.687±0.612 | 4.11±1.45 | 3634.18±33.19 | 13.60±0.14 | 23.54±0.217 | 2.40±0.1 | 2320.92±12.76 |
| 20 | 0 | 100 | 1.5 | 20 | 42.117±1.603 | 7.499±0.803 | 3.63±0.21 | 3481.78±31.97 | 14.54±0.19 | 25.362±0.277 | 2.00±0.3 | 2044.81±04.98 |
| 21 | 100 | 0 | 2 | 20 | 36.135±3.149 | 6.910±0.622 | 5.88±0.16 | 3681.12±17.03 | 10.49±0.65 | 19.06±1.226 | 5.10±1.9 | 2578.56±19.13 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|----|--------------|-------------|-----------|---------------|------------|--------------|----------|---------------|
| 22 | 75 | 25 | 2 | 20 | 38.981±2.098 | 7.542±0.952 | 5.89±0.65 | 3771.56±39.66 | 11.15±0.14 | 20.34±0.252 | 4.66±1.4 | 2569.27±06.22 |
| 23 | 50 | 50 | 2 | 20 | 41.034±5.554 | 7.944±1.155 | 4.29±1.84 | 3786.96±17.02 | 12.00±0.25 | 21.723±0.422 | 3.30±0.7 | 2172.85±33.07 |
| 24 | 25 | 75 | 2 | 20 | 38.902±3.944 | 8.222±0.208 | 4.39±1.21 | 3667.08±33.60 | 13.61±0.08 | 23.68±0.058 | 3.1±0.28 | 2287.43±06.77 |
| 25 | 0 | 100 | 2 | 20 | 38.558±3.878 | 8.061±0.840 | 3.47±1.81 | 3403.41±23.87 | 14.80±0.24 | 25.54±0.366 | 2.45±0.6 | 2014.24±03.64 |
| 26 | 100 | 0 | 0.5 | 30 | 34.927±3.973 | 8.000±0.543 | 4.00±0.31 | 3400.01±10.76 | 10.05±0.11 | 17.642±0.022 | 6.01±1.8 | 1684.81±12.38 |
| 27 | 75 | 25 | 0.5 | 30 | 41.112±7.778 | 7.594±0.201 | 4.14±0.09 | 3560.13±42.62 | 11.07±0.09 | 19.805±0.209 | 2.80±0.5 | 1528.55±10.10 |
| 28 | 50 | 50 | 0.5 | 30 | 42.358±1.001 | 7.612±0.679 | 4.41±0.19 | 3612.98±57.31 | 12.04±0.99 | 21.453±1.520 | 1.49±0.2 | 1274.11±09.24 |
| 29 | 25 | 75 | 0.5 | 30 | 43.513±3.026 | 7.433±0.398 | 4.19±0.26 | 3600.71±85.79 | 13.24±0.13 | 23.226±0.214 | 1.08±0.0 | 1651.51±07.09 |
| 30 | 0 | 100 | 0.5 | 30 | 43.742±3.125 | 7.526±0.350 | 3.99±0.03 | 3513.39±10.76 | 14.35±0.00 | 24.896±0.021 | 2.21±0.6 | 1370.73±23.05 |
| 31 | 100 | 0 | 1 | 30 | 33.529±2.892 | 7.000±0.219 | 3.33±0.18 | 3484.45±19.66 | 11.12±0.12 | 18.885±0.226 | 4.00±0.9 | 1203.92±10.04 |
| 32 | 75 | 25 | 1 | 30 | 42.820±0.424 | 7.736±0.982 | 3.32±2.09 | 3541.31±71.70 | 11.51±0.08 | 20.419±0.141 | 3.16±0.5 | 1074.51±15.26 |
| 33 | 50 | 50 | 1 | 30 | 43.859±1.541 | 7.771±1.047 | 3.45±0.07 | 3592.13±18.92 | 12.39±0.07 | 21.70±0.121 | 1.65±0.1 | 1016.93±06.48 |
| 34 | 25 | 75 | 1 | 30 | 43.338±3.652 | 7.866±0.784 | 3.73±1.93 | 3589.99±17.17 | 13.37±0.05 | 23.275±0.095 | 1.26±0.2 | 1031.18±05.92 |
| 35 | 0 | 100 | 1 | 30 | 41.059±0.954 | 8.000±0.446 | 3.72±0.41 | 3501.62±36.02 | 15.21±0.11 | 25.499±0.124 | 1.81±0.1 | 1100.25±08.44 |
| 36 | 100 | 0 | 1.5 | 30 | 33.999±0.967 | 7.601±0.686 | 4.63±0.16 | 3498.51±46.04 | 10.76±0.14 | 18.419±0.161 | 3.72±0.3 | 1143.03±07.34 |
| 37 | 75 | 25 | 1.5 | 30 | 39.962±2.194 | 8.101±0.697 | 4.32±1.61 | 3610.42±58.53 | 11.04±0.22 | 19.882±0.349 | 2.77±0.3 | 1120.47±12.11 |
| 38 | 50 | 50 | 1.5 | 30 | 38.645±1.660 | 8.039±0.840 | 4.31±0.42 | 3635.28±25.38 | 12.20±0.12 | 21.524±0.188 | 1.27±0.1 | 659.74±115.42 |
| 39 | 25 | 75 | 1.5 | 30 | 40.192±1.692 | 8.148±0.922 | 4.26±0.23 | 3507.09±16.17 | 13.89±0.17 | 21.389±0.251 | 1.54±0.2 | 1260.85±90.33 |
| 40 | 0 | 100 | 1.5 | 30 | 37.393±3.183 | 8.172±0.465 | 3.69±1.34 | 3463.85±60.30 | 14.89±0.09 | 25.249±0.119 | 2.18±0.6 | 953.78±141.52 |
| 41 | 100 | 0 | 2 | 30 | 32.842±1.498 | 7.665±0.510 | 4.56±1.00 | 3400.97±20.91 | 10.14±0.30 | 17.849±0.509 | 4.62±1.4 | 586.13±84.61 |
| 42 | 75 | 25 | 2 | 30 | 37.801±4.370 | 7.996±0.617 | 4.47±0.54 | 3485.53±20.91 | 11.45±0.11 | 19.989±0.161 | 4.06±1.8 | 346.43±70.49 |
| 43 | 50 | 50 | 2 | 30 | 40.321±0.990 | 7.983±0.310 | 4.16±2.01 | 3515.43±16.52 | 12.81±0.03 | 22.40±0.081 | 2.00±0.3 | 92.43±44.17 |
| 44 | 25 | 75 | 2 | 30 | 40.175±4.868 | 8.421±0.334 | 4.19±0.03 | 3519.28±48.35 | 13.51±0.11 | 23.342±0.133 | 2.08±0.6 | 270.51±49.77 |
| 45 | 0 | 100 | 2 | 30 | 35.877±5.337 | 8.512±0.836 | 3.06±1.27 | 3417.09±34.67 | 14.73±0.17 | 25.28±0.251 | 2.36±0.1 | 340.30±62.00 |

Tableau IV-8 Les vingt et un premières meilleures solutions pour les paramètres de production du mortier renforcé de PET-F et leurs réponses correspondantes.

| N° | SD (%) | SR (%) | PET-F (%) | LF (mm) | Resistance de la compression (MPa) | Resistance de la flexion (MPa) | Déplacement (mm) | vitesse d'impulsion ultrasonique (m/s) | Absorption d'eau (%) | Porosité (%) | Air occlus (%) | Retrait (µm/m) | Désirabilité | |
|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------------------------|--------------------------------|------------------|--|----------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|-----------------|
| 1 | 50 | 50 | 0.5 | 30 | 43.399 | 7.723 | 3.373 | 3606.741 | 12.047 | 21.426 | 2.232 | -22.761 | 0.900 | Selected |
| 2 | 50 | 50 | 0.507 | 30 | 43.387 | 7.727 | 3.382 | 3606.581 | 12.053 | 21.429 | 2.202 | -20.712 | 0.900 | |
| 3 | 50 | 50 | 0.522 | 30 | 43.363 | 7.735 | 3.402 | 3606.254 | 12.067 | 21.434 | 2.144 | -16.665 | 0.900 | |
| 4 | 50 | 50 | 0.541 | 30 | 43.332 | 7.745 | 3.426 | 3605.832 | 12.083 | 21.44 | 2.073 | -11.704 | 0.899 | |
| 5 | 50 | 49.403 | 0.5 | 30 | 43.399 | 7.723 | 3.373 | 3606.74 | 12.047 | 21.426 | 2.231 | -22.723 | 0.899 | |
| 6 | 49.999 | 50.56 | 0.505 | 30 | 43.39 | 7.726 | 3.38 | 3606.625 | 12.052 | 21.428 | 2.21 | -21.268 | 0.899 | |
| 7 | 50 | 49.999 | 0.553 | 30 | 43.312 | 7.751 | 3.441 | 3605.547 | 12.094 | 21.444 | 2.027 | -8.502 | 0.899 | |
| 8 | 50.001 | 49.999 | 0.561 | 30 | 43.297 | 7.755 | 3.452 | 3605.343 | 12.101 | 21.447 | 1.995 | -6.276 | 0.898 | |
| 9 | 49.296 | 50.064 | 0.5 | 30 | 43.447 | 7.722 | 3.369 | 3606.985 | 12.076 | 21.474 | 2.213 | -22.506 | 0.898 | |
| 10 | 50 | 51.15 | 0.5 | 30 | 43.399 | 7.723 | 3.373 | 3606.739 | 12.047 | 21.426 | 2.231 | -22.74 | 0.897 | |
| 11 | 50 | 50 | 0.5 | 29.846 | 43.395 | 7.699 | 3.324 | 3606.462 | 12.056 | 21.437 | 2.281 | 7.776 | 0.897 | |
| 12 | 50.271 | 50 | 0.587 | 30 | 43.235 | 7.769 | 3.483 | 3604.639 | 12.112 | 21.436 | 1.911 | 0.007 | 0.897 | |
| 13 | 50 | 48.256 | 0.5 | 30 | 43.399 | 7.723 | 3.373 | 3606.738 | 12.047 | 21.426 | 2.231 | -22.673 | 0.896 | |
| 14 | 52.066 | 50 | 0.5 | 29.997 | 43.257 | 7.727 | 3.381 | 3606 | 11.962 | 21.285 | 2.286 | -22.769 | 0.895 | |
| 15 | 50 | 47.825 | 0.502 | 30 | 43.395 | 7.725 | 3.375 | 3606.694 | 12.049 | 21.427 | 2.223 | -22.159 | 0.895 | |
| 16 | 50.782 | 50 | 0.608 | 30 | 43.164 | 7.78 | 3.511 | 3603.937 | 12.108 | 21.408 | 1.85 | 5.112 | 0.894 | |
| 17 | 50 | 50.002 | 0.512 | 29.717 | 43.373 | 7.685 | 3.301 | 3606.017 | 12.074 | 21.449 | 2.273 | 35.94 | 0.893 | |
| 18 | 50.001 | 52.76 | 0.54 | 30 | 43.333 | 7.744 | 3.425 | 3605.849 | 12.083 | 21.439 | 2.075 | -11.908 | 0.892 | |
| 19 | 53.584 | 50 | 0.5 | 30 | 43.153 | 7.731 | 3.39 | 3605.461 | 11.9 | 21.181 | 2.323 | -23.733 | 0.891 | |
| 20 | 50 | 50.001 | 0.475 | 29.966 | 43.438 | 7.705 | 3.327 | 3607.199 | 12.025 | 21.42 | 2.346 | -23.1 | 0.891 | |
| 21 | 50.001 | 53.964 | 0.5 | 30 | 43.399 | 7.723 | 3.372 | 3606.74 | 12.047 | 21.426 | 2.232 | -22.719 | 0.890 | |

Tableau IV-6 Analyse de variance du modèle quadratique et les statistiques d'ajustement du Plan Box-Behnken.

| <i>Response</i> | <i>Source of Variation</i> | <i>Degree of Freedom</i> | <i>Sum of Squares</i> | <i>Mean Square</i> | <i>F-value</i> | <i>p-value</i> | <i>Observation</i> |
|--|----------------------------|--------------------------|---|--|------------------------------------|----------------|--------------------|
| Resistance à la compression (Mpa) | ANOVA Model | 9 | 357.32 | 39.7 | 31.46 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 42.47 | 42.47 | 33.66 | < 0.0001 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 0.7977 | 0.7977 | 0.6321 | 0.4319 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 5.2 | 5.2 | 4.12 | 0.0499 | |
| | AB | 1 | 141.07 | 141.07 | 111.79 | < 0.0001 | |
| | AC | 1 | 10.08 | 10.08 | 7.99 | 0.0077 | |
| | AD | 1 | 6.71 | 6.71 | 5.32 | 0.0272 | |
| | CD | 1 | 4.41 | 4.41 | 3.49 | 0.0701 | |
| | C ² | 1 | 1.6 | 1.6 | 1.27 | 0.2675 | |
| | D ² | 1 | 0.7342 | 0.7342 | 0.5818 | 0.4507 | |
| | Residual | 35 | 44.16 | 1.26 | | | |
| | Cor Total | 44 | 401.48 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 1.12 | R² = 0.89 | | | |
| | | Mean | 40.1 | R² Adjusted = 0.8617 | | | |
| | CV % | 2.8 | R² Predicted = 0.8324 | | | | |
| Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 67.28 | | | | | Adequate Precision= 20.6978 | | |
| Resistance à la flexion (MPa) | ANOVA Model | 9 | 19.86 | 2.21 | 45.16 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 0.0075 | 0.0075 | 0.1528 | 0.6982 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 2.76 | 2.76 | 56.49 | < 0.0001 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 0.1461 | 0.1461 | 2.99 | 0.0927 | |
| | AB | 1 | 0.8128 | 0.8128 | 16.63 | 0.0002 | |
| | AC | 1 | 1.58 | 1.58 | 32.33 | < 0.0001 | |
| | AD | 1 | 0.0704 | 0.0704 | 1.44 | 0.2381 | |
| | CD | 1 | 0.8051 | 0.8051 | 16.47 | 0.0003 | |
| | C ² | 1 | 0.032 | 0.032 | 0.6544 | 0.424 | |
| | D ² | 1 | 2.06 | 2.06 | 42.25 | < 0.0001 | |
| | Residual | 35 | 1.71 | 0.0489 | | | |
| | Cor Total | 44 | 21.57 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 0.221 | R² = 0.9207 | | | |
| | | Mean | 7.38 | R² Adjusted = 0.9003 | | | |
| | CV % | 2.99 | R² Predicted = 0.8549 | | | | |
| Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 3.13 | | | | | Adequate Precision= 27.4623 | | |
| Déplacement Flexionl (mm) | ANOVA Model | 9 | 48.87 | 5.43 | 24.73 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 0.2025 | 0.2025 | 0.9223 | 0.3435 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 17.89 | 17.89 | 81.51 | < 0.0001 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 4.56 | 4.56 | 20.76 | < 0.0001 | |
| | AB | 1 | 0.053 | 0.053 | 0.2417 | 0.6261 | |
| | AC | 1 | 0.1137 | 0.1137 | 0.5178 | 0.4765 | |
| | AD | 1 | 0.5441 | 0.5441 | 2.48 | 0.1244 | |
| | CD | 1 | 9.08 | 9.08 | 41.38 | < 0.0001 | |
| | C ² | 1 | 2.07 | 2.07 | 9.45 | 0.0041 | |

| | | | | | | | |
|---|---|-----------|----------|----------|--------|---|-------------|
| | D ² | 1 | 10.34 | 10.34 | 47.12 | < 0.0001 | |
| | Residual | 35 | 7.68 | 0.2195 | | | |
| | Cor Total | 44 | 56.55 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 0.4685 | | | R² = 0.8641 | |
| | | Mean | 2.93 | | | R² Adjusted = 0.8292 | |
| | | CV % | 15.98 | | | R² Predicted = 0.7957 | |
| | Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 11.55 | | | | | Adequate Precision= 15.476 | |
| Vitesse d'impulsion ultrasonique (m/s) | ANOVA Model | 9 | 2.36E+05 | 26222.5 | 96.94 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 2607.79 | 2607.79 | 9.64 | 0.0038 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 35786.47 | 35786.47 | 132.3 | < 0.0001 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 27867.22 | 27867.22 | 103.02 | < 0.0001 | |
| | AB | 1 | 86149.08 | 86149.08 | 318.49 | < 0.0001 | |
| | AC | 1 | 2770.2 | 2770.2 | 10.24 | 0.0029 | |
| | AD | 1 | 226.56 | 226.56 | 0.8376 | 0.3664 | |
| | CD | 1 | 42177.12 | 42177.12 | 155.93 | < 0.0001 | |
| | C ² | 1 | 888.12 | 888.12 | 3.28 | 0.0786 | |
| | D ² | 1 | 2415.47 | 2415.47 | 8.93 | 0.0051 | |
| | Residual | 35 | 9467.35 | 270.5 | | | |
| | Cor Total | 44 | 2.46E+05 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 16.45 | | | R² = 0.9614 | |
| | | Mean | 3556.87 | | | R² Adjusted = 0.9515 | |
| | | CV % | 0.4624 | | | R² Predicted = 0.931 | |
| | Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 16938.61 | | | | | Adequate Precision= 39.4716 | |
| Absorption d'eau par immersion (%) | ANOVA Model | 9 | 100.46 | 11.16 | 123.82 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 59.09 | 59.09 | 655.42 | < 0.0001 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 0.0492 | 0.0492 | 0.5461 | 0.4648 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 0.0032 | 0.0032 | 0.0354 | 0.8519 | |
| | AB | 1 | 0.9656 | 0.9656 | 10.71 | 0.0024 | |
| | AC | 1 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0076 | 0.9311 | |
| | AD | 1 | 0.0157 | 0.0157 | 0.1743 | 0.6788 | |
| | CD | 1 | 0.4891 | 0.4891 | 5.42 | 0.0257 | |
| | C ² | 1 | 0.5881 | 0.5881 | 6.52 | 0.0152 | |
| | D ² | 1 | 0.1568 | 0.1568 | 1.74 | 0.1958 | |
| | Residual | 35 | 3.16 | 0.0902 | | | |
| | Cor Total | 44 | 103.61 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 0.3003 | | | R² = 0.9695 | |
| | | Mean | 12.59 | | | R² Adjusted = 0.9617 | |
| | | CV % | 2.39 | | | R² Predicted = 0.9483 | |
| | Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 5.35 | | | | | Adequate Precision= 33.5161 | |
| Porosité accessible à l'eau (%) | ANOVA Model | 9 | 260.86 | 28.98 | 116.97 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 151.44 | 151.44 | 611.16 | < 0.0001 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 0.095 | 0.095 | 0.3836 | 0.5397 | |
| | D-Longueur de | 1 | 0.066 | 0.066 | 0.2662 | 0.6092 | |

| | | | | | | | |
|--|-----------|--------|--------|--------|---|--|--|
| fibre | | | | | | | |
| AB | 1 | 0.1594 | 0.1594 | 0.6434 | 0.4279 | | |
| AC | 1 | 0.0936 | 0.0936 | 0.3778 | 0.5428 | | |
| AD | 1 | 0.0023 | 0.0023 | 0.0093 | 0.9237 | | |
| CD | 1 | 0.0027 | 0.0027 | 0.0109 | 0.9176 | | |
| C ² | 1 | 0.074 | 0.074 | 0.2985 | 0.5883 | | |
| D ² | 1 | 0.6073 | 0.6073 | 2.45 | 0.1265 | | |
| Residual | 35 | 8.67 | 0.2478 | | | | |
| Cor Total | 44 | 269.53 | | | | | |
| Fit Statistics | Std. Dev. | 0.4978 | | | R² = 0.9678 | | |
| | Mean | 21.7 | | | R² Adjusted = 0.9595 | | |
| | CV % | 2.29 | | | R² Predicted = 0.9487 | | |
| Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 13.83 | | | | | Adequate Precision= 34.8237 | | |

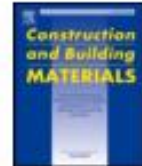
| | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------|--------|--------|------------------------------------|---|-------------|
| Air content (%) | ANOVA Model | 9 | 74.86 | 8.32 | 42.49 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 19.92 | 19.92 | 101.73 | < 0.0001 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 14.67 | 14.67 | 74.92 | < 0.0001 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 15.91 | 15.91 | 81.27 | < 0.0001 | |
| | AB | 1 | 9.34 | 9.34 | 47.7 | < 0.0001 | |
| | AC | 1 | 0.4906 | 0.4906 | 2.51 | 0.1224 | |
| | AD | 1 | 0.0269 | 0.0269 | 0.1376 | 0.7129 | |
| | CD | 1 | 4.2 | 4.2 | 21.48 | < 0.0001 | |
| | C ² | 1 | 23.72 | 23.72 | 121.15 | < 0.0001 | |
| | D ² | 1 | 20.14 | 20.14 | 102.88 | < 0.0001 | |
| | Residual | 35 | 6.85 | 0.1958 | | | |
| | Cor Total | 44 | 81.71 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 0.4424 | | | R² = 0.9162 | |
| | | Mean | 2.75 | | | R² Adjusted = 0.8946 | |
| | | CV % | 16.06 | | | R² Predicted = 0.8641 | |
| Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 11.10 | | | | | Adequate Precision= 26.7987 | | |

| | | | | | | | |
|---|-----------------------|-----------|----------|----------|------------------------------------|---|-------------|
| Retrait (µm/m) | ANOVA Model | 9 | 2.49E+07 | 2.77E+06 | 122.37 | < 0.0001 | significant |
| | A-Sable de dune | 1 | 3.60E+05 | 3.60E+05 | 15.91 | 0.0003 | |
| | B-Sable recyclé | 0 | 0 | | | | |
| | C-Fibre en PET | 1 | 2.12E+06 | 2.12E+06 | 93.69 | < 0.0001 | |
| | D-Longueur de fibre | 1 | 6387.58 | 6387.58 | 0.2822 | 0.5986 | |
| | AB | 1 | 17596.87 | 17596.87 | 0.7773 | 0.384 | |
| | AC | 1 | 106.77 | 106.77 | 0.0047 | 0.9456 | |
| | AD | 1 | 2.03E+05 | 2.03E+05 | 8.97 | 0.005 | |
| | CD | 1 | 1.75E+06 | 1.75E+06 | 77.39 | < 0.0001 | |
| | C ² | 1 | 87274.06 | 87274.06 | 3.86 | 0.0576 | |
| | D ² | 1 | 2.08E+06 | 2.08E+06 | 91.64 | < 0.0001 | |
| | Residual | 35 | 7.92E+05 | 22637.95 | | | |
| | Cor Total | 44 | 2.57E+07 | | | | |
| | Fit Statistics | Std. Dev. | 150.46 | | | R² = 0.9692 | |
| | | Mean | 639.22 | | | R² Adjusted = 0.9613 | |
| | | CV % | 23.54 | | | R² Predicted = 0.9515 | |
| Predicted Residual Error Sum of Squares (PRESS) = 1.246 E+06 | | | | | Adequate Precision= 36.1427 | | |



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method

Tahar Zerig^{a,b,*}, Assia Aidoud^{a,b}, Mouloud Belachia^{a,c}, Tarek Djedid^d, Messaoud Abbas^e

^a University 8 May 1945 Guelma, Department of Civil Engineering and Hydraulics, Guelma, Algeria

^b Laboratory LGCE, University 8 May 1945, Guelma, Algeria

^c Laboratory LMGMU, University 20 August 1955, Skikda, Algeria

^d Laboratory LEVRES, University of El Oued, Department of Hydraulics and Civil Engineering, El Oued, Algeria

^e LIAP Laboratory, University of El Oued, Faculty Of Exact Sciences, El Oued, Algeria

ARTICLE INFO

Keywords:

Eco-mortar
Dune sand
Recycled sand
Bire Polyethylene Terephthalate
Physical-mechanical characteristics
Response Surface Methodology

ABSTRACT

Today, economic and environmental interests have become imperative in construction works. Therefore, the use of substitute materials for natural aggregates or cement contributes to the preservation of natural resources and the reduction of carbon dioxide diffusion. The large quantity of dune sand available in the Algerian Sahara and the affordable cost of recycled aggregates and plastic waste encourage their use as a replacement for natural aggregates in the production of cementitious materials. The interaction of dune sand (DS) and recycled sand (RS) with the introduction of a polyethylene terephthalate (PET-F) fibre help to design a normative ecological material. The aim of the study was to explore and optimize the proportions of these materials to create an environmentally-friendly cementitious product. The strategy is based on the progressive substitution of dune sand by another originating from demolition waste at different rates: 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, and a gradual rate of PET-F fibres, 20 and 30 mm from 0% to 2% with a step of 0.5%. In this article, we study the effect of the new composites on the physico-mechanical performance of the designed eco-mortars through several tests (spreadability, fresh density, porosity, capillary and immersion absorption, compression strength, and flexural strength). In addition, we utilise Response Surface Methodology (RSM) to predict approximate parameters that influence the properties of new cementitious composites. The results obtained show the significant benefit of the following rates: 50% SD, 50% SR and (0.5%, 30 mm) PET-F fibre. Thus, the RSM model correlates well with the experimental data, which has undoubtedly led to an improvement in the physical-mechanical characteristics of the eco-mortar studied. Otherwise, the proposed model reaches a high pertinence, with a good desirability coefficient of 0.917.

1. Introduction

Protecting the environment and conserving natural resources have become major socio-economic issues. They are necessary to ensure continued growth and a better quality of life for all the peoples of the earth planet. Saharian regions are the largest hot desert on the planet. They are home to a vast number of as-yet untapped sand dunes. With the increasing demand for daily aggregates and in order to exploit the abundant waste in the environment, the world needs to valorize this waste to save energy and reduce carbon dioxide emissions. Previous studies have shown that dune sand has an almost purely siliceous mineralogical nature, with other durable minerals such as zircon, tourmaline and rutile [1–6]. While the waste from demolition works

contains various minerals such as quartz, limestone, alumina, ferric oxide [7].

Currently, most research focuses on producing mortar and concrete at lower costs to reduce the high consumption of construction materials. For these reasons, the exploitation of various materials has been studied by several authors [8–12], including golden sand (dune sand) located in the Algerian desert (in huge and very abandoned quantities), recycled concrete aggregates (RCA) and polyethylene terephthalate PET plastic packaging cables. These materials harm the environment in terms of form and content. However, demolished concrete and PET can cause environmental and economic constraints if not disposed of correctly [13,14]. Note that solid waste elimination costs rise, and landfill areas shrink considerably. Recycling materials would be the best choice for

* Corresponding author.

E-mail address: zerig.tahar@univ-guelma.dz (T. Zerig).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133160>

Received 3 July 2023; Received in revised form 9 August 2023; Accepted 26 August 2023

0950-0618/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.