

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Civil



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine: SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
Filière: GENIE CIVIL
Option: STRUCTURES

Thème:

**Valorisation de la poudre de verre dans des mortiers à base
des matériaux locaux**

Présenté par :

Mezaouri Sarra & Draï Kaouter

Devant le jury composé de :

Dr. Houmadi Youcef	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Kameche Zine El Abidine	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Aissa Mamoune Mohammed	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le laboratoire des matériaux de construction du département de génie civil du Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr.Kamech Zine El Abidine, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr.Aissa Mamoune et Mr.Houmadi Youcef pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des abréviations

PV : Poudre de verre.

E : Eau.

C : Ciment.

L : Liant.

LTPO : Laboratoire des travaux publics Ouest.

SiO₂ : La silice.

CaO : La chaux.

MgO : La marmesie.

Al₂O₃ : L'alumine.

Fe₂O₃ : L'oxyde de fer.

SO₃ : Les sulfates.

CL : Les chlorures.

CO₂ : L'Anhydrique carbonique.

H₂O : L'eau de combinaison.

C₃S : Le silicate tricalcique.

C₂S : Le silicate dicalcique.

C₃A : L'aluminate tricalcique.

C₄AF : L'aluminoférite tricalcique.

S₁ : Sable de mer.

S₂ : Sable concassé.

Mf₁ : Module de finesse du sable de mer.

Mf₂ : Module de finesse du sable concassé.

Mf : Module de finesse de sable combiné.

Cu : Le coefficient d'uniformité.

Cc : Le coefficient de courbure.

ESV : Equivalent de sable visuel.

ESP : Equivalent de sable à piston.

Mapp : Masse volumique apparente.

Mabs : Masse volumique absolue.

W : Le pourcentage d'eau.

C : Composition des mortiers.

T : Température.

HR : Humidité relative.

V ; Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

VL : Vitesse longitudinale.

VT : Vitesse transversale.

Rf : La résistance à la traction par flexion.

Rc : Résistance à la compression.

E : Module d'élasticité.

Ed : Module d'élasticité dynamique.

Ec : Module d'élasticité sécant.

BAP : Béton autoplaçant.

SP : Superplastifiant.

Sommaire

Remerciements.....	2
Liste des abréviations	3
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux	14
Résumé.....	15
Introduction générale	18
Chapitre I : Synthèse bibliographique	20
I.1.Introduction	20
I.2. Le Ciment et sa fabrication	21
I.2.1. Définition du ciment.....	21
I.2.2. Historique.....	21
I.2.3. Type de ciment.....	22
I.2.4. Fabrication du ciment.....	23
I.2.5. Consommation du ciment.....	24
I.2.6. Impact de l'industrie cimentaire sur l'environnement	24
I.2.6. Sources de CO2 dans l'industrie du ciment.....	25
I.2.7. L'impact de la pollution	26
I.3. Les déchets.....	26
I.3.2. Les déchets ménagers en Algérie	27
I.3.3. Le recyclage	28
I.3.4. Le recyclage dans le génie civil	28
I.3.5. Les bénéfices du recyclage	30
I.4. Le verre.....	30
I.4.1. Définition	30
I.4.2. Le verre en déchet.....	31
I.4.3. Etapes de recyclage du verre.....	31
I.4.4. La poudre de verre.....	32
I.4.5. Valorisation de poudre de verre	32
I.5. L'utilisation de la poudre du verre dans la formulation du béton	32
I.5.1. Propriétés à l'état frais.....	32
I.5.2. À l'état durci	32
Conclusion.....	35

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales	36
II.1. Introduction	36
II.2. Les matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers.....	37
II.2.1. Le ciment.....	37
II.2.2. Les granulats.....	41
II.2.3. Eau de gâchage.....	49
II.2.4. Poudre de verre.....	49
II.3. Formulation des mortiers.....	51
II.4. Mesures expérimentales	53
II.4.1. Essai sur mortier frais.....	53
II.4.2. Essai sur mortier durci	55
II.5. Mesures expérimentales	58
II.6. Conclusion.....	60
Chapitre III : Analyse et discussions des résultats.....	62
III.1. Introduction.....	62
III.2. Influence de la poudre de verre sur la résistance mécanique du mortier	63
III.2.1. Résistance à la flexion	63
III.2.2. Résistance en compression	65
III.2.3. Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau.....	67
III.3. Influence du rapport E/L sur la résistance mécanique du mortier.....	70
III.4. Évaluation de la résistance mécanique à l'aide de l'Ultrason	71
III.4.1. Mesures de la vitesse d'ondes ultrasoniques.....	72
III.4.2. Influence du rapport E/L sur la vitesse des ondes ultrasoniques.....	75
III.4.3. Module d'élasticité.....	76
III.5. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son.....	78
III.6. Évolution de la vitesse du son en fonction de module élastique	81
III.8. Comparaison entre les résistances à la compression calculées et mesurées	83
III.9. Mesure de la sorptivité capillaire.....	86
III.10. Relation entre la résistance à la compression et la surface spécifique Blaine ..	89
Conclusion générale.....	92
Annexes A.....	96
Annexe B.....	98
Annexe C.....	100

Table des matières

Annexe D.....	102
Annexe E.....	107
Annexe F.....	108
Annexe G.....	110
Annexe H.....	111
Annexe I.....	113

Liste des figures

Fig. I-1. <i>Matières premières de ciment.</i>	19
Fig. I-2. <i>Processus de fabrication de ciment.</i>	21
Fig. I-3. <i>Evolution du marché mondiale du ciment.</i>	22
Fig. I-4. <i>Pourcentages des déchets solides.</i>	25
Fig. I-5. <i>Vitre en verre.</i>	28
Fig. I-6. <i>Source du verre en déchet. assimilé.</i>	29
Fig. I-7. <i>Évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de bétons avec différents dosage en PV et avec $E/L= 0.55$.</i>	31
Fig. I-8. <i>Évolution de la résistance à la flexion des bétons à 28 jours avec différents dosage en PV et avec $E/L= 0.40$.</i>	32
Fig. I-9. <i>Courbes contrainte-déformation de bétons à base de différents dosages en poudre de verre</i>	32
	36
Fig. II.1. <i>Pycnomètre pour la mesure de la masse volumique absolue</i>	37
Fig. II-2. <i>Perméabilimètre de Blaine</i>	41
Fig. II-3. <i>Courbe granulométrique de sable de mer</i>	43
Fig. II-4. <i>Courbe granulométrique du sable concassé</i>	44
Fig. II-5. <i>Courbe granulométrique du sable combiné</i>	46
Fig. II-6. <i>Courbe de foisonnement du sable fin</i>	46
Fig. II-7. <i>Courbe de foisonnement du sable grossier</i>	46
Fig. II-8. <i>Courbe de foisonnement du sable combiné</i>	47
Fig. II-9. <i>Etapes suivies pour l'obtention de la poudre de verre</i>	48
Fig. II-10. <i>Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de poudre de verre</i>	
	50
Fig. II-11. <i>Malaxeur automatique</i>	
	51
Fig. II-12. <i>Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau</i>	

Fig. II-13. <i>Séchage des éprouvettes à l'air</i>	51
Fig. II-14. <i>Schéma descriptif de l'essai de maniabilité du mortier</i>	51
Fig. II-15. <i>Évolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés</i>	52
Fig. II-16. <i>Aéromètre pour mortier</i>	52
Fig. II-17. <i>Variation de l'air occlus des différents mortiers</i>	53
Fig. II-18. <i>Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette</i>	53
Fig. II-19. <i>Dispositif de compression pour mortier</i>	54
Fig. II-20. <i>Ultrason</i>	55
Fig. II-21. <i>Essai d'absorption capillaire</i>	56
Fig. II-22. <i>Mesures expérimentales effectuées dans cette étude.</i>	58
Fig. III-1. <i>Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.45$ et différents pourcentage de PV.</i>	61
Fig. III-2. <i>Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentage de PV.</i>	61
Fig. III-3. <i>Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.65$ et différents pourcentage en PV.</i>	62
Fig. III-4. <i>Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.45$ et différents pourcentage en PV.</i>	63
Fig. III-5. <i>Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentage en PV.</i>	63
Fig. III-6. <i>Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.65$ et différents pourcentage en PV.</i>	64
Fig. III-7. <i>Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier témoin avec $E/C=0.45$.</i>	66
Fig. III-8. <i>Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10% de PV et $E/C = 0.45$.</i>	66
Fig. III-9. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV à $E/C = 0.45$.</i>	66
Fig. III-10. <i>La résistance à la compression en fonction de résistance à la du mortier avec 30% de PV et $E/L= 0.45$.</i>	66

Fig. III-11. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier témoin avec $E/L = 0.55$.</i>	66
Fig. III-12. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10% de PV et $E/L = 0.55$.</i>	66
Fig. III-13. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV à $E/L = 0.55$</i>	67
Fig. III-14. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 30% de PV $E/L = 0.55$.</i>	67
Fig. III-15. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion Du mortier témoin avec $E/L = 0.65$.</i>	67
Fig. III-16. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10% de PV et $E/L = 0.65$.</i>	67
Fig. III-17. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV $E/L = 0.65$.</i>	67
Fig. III-18. <i>La résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 30% de PV $E/L = 0.65$.</i>	67
Fig. III-19. <i>Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du rapport E/L.</i>	69
Fig. III-20. <i>Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L.</i>	69
Fig. III-21. <i>Evolution de la vitesse longitudinale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L = 0.45$.</i>	70
Fig. III-22. <i>Evolution de la vitesse longitudinale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L = 0.55$.</i>	70
Fig. III-23. <i>Evolution de la vitesse longitudinale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L = 0.65$.</i>	71
Fig. III-24. <i>Evolution de la vitesse transversale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L = 0.45$.</i>	72
Fig. III-25. <i>Evolution de la vitesse transversale en fonction du temps des mortiers avec $E/L = 0.55$.</i>	72
Fig. III-26. <i>Evolution de la vitesse transversale en fonction du temps des mortiers avec $E/L = 0.65$.</i>	72
Fig. III-27. <i>Variation de la vitesse longitudinale en fonction du rapport E/L.</i>	73

Fig. III-28. <i>Variation de la vitesse longitudinale en fonction du rapport E/L.</i>	73
Fig. III-29. <i>Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport E/L = 0.45.</i>	75
Fig. III-30. <i>Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport E/L = 0.55.</i>	75
Fig. III-31. <i>Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport E/L = 0.65.</i>	75
Fig. III-32. <i>Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son</i>	76
Fig. III-33. <i>Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10 % de PV (avec E/L=0.45)</i>	76
Fig. III-34. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10% de PV et un rapport de E/L=0.45</i>	77
Fig. III-35. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 30% de PV et un rapport de E/L =0.45</i>	77
Fig. III-36. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin avec un rapport de E/L</i>	77
Fig. III-37. <i>Variation de la résistance, Compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin avec 10% de PV et un rapport de E/L=0.55</i>	77
Fig. III-38. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10% de PV et un rapport de E/L=0.55</i>	77
Fig. III-39. <i>Variation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 30% de PV et un rapport de E/L=0.55</i>	77
Fig. III-40. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin avec un rapport de E/L=0.65</i>	78
Fig. III-41. <i>Variation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du mortier avec 10% de PV et un rapport de E/L=0.65</i>	78
Fig. III-42. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10% de PV et un rapport de E/L=0.65</i>	78
Fig. III-43. <i>Variation de la résistance à la Compression en fonction de la vitesse du mortier avec 30% de PV et un rapport de E/L= 0.65</i>	78
Fig. III-44. <i>Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de E/L=0.45</i>	79

Fig. III-45. <i>Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.55$</i>	79
Fig. III-46. <i>Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.65$</i>	80
Fig. III-47. <i>Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$</i>	80
Fig. III-48. <i>Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport $E/L=0.55$</i>	81
Fig. III-49. <i>Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.65$</i>	81
Fig. III-50. <i>Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier témoin pour $E/L=0.45$</i>	82
Fig. III-51. <i>Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 10 % de PV pour $E/L=0.45$</i>	82
Fig. III-52. <i>Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 30 % de PV pour $E/L=0.45$</i>	82
Fig. III-53. <i>Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 30 % de PV pour $E/L=0.45$</i>	82
Fig. III-54. <i>Comparaison entre valeurs calculées Et mesurée Et mesurées du mortier témoin avec $Eau/Liant=0.55$.</i>	82
Fig. III-55. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier avec 10% de PV $Eau/Liant=0.55$.</i>	82
Fig. III-56. <i>Comparaison entre valeurs calculées Et mesurées du mortier avec 20% de PV Et $Eau/Liant=0.55$.</i>	83
Fig. III-57. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier avec 30% de PV et $Eau/Liant=0.55$.</i>	83
Fig. III-58. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier témoin avec $Eau/Liant=0.65$.</i>	83
Fig. III-59. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier avec 10% de PV $Eau/Liant=0.65$.</i>	83
Fig. III-60. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier avec 30% de PV et $Eau/Liant=0.65$.</i>	83
Fig. III-61. <i>Comparaison entre valeurs calculées et mesurées du mortier avec 30% de PV et $Eau/Liant=0.65$.</i>	83

Fig. III-62. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.45$.	84
Fig. III-63. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.55$.	85
Fig. III-64. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.65$.	85
Fig. III-65. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport $E/L = 0.45$.	86
Fig. III-66. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport $E/L = 0.55$.	86
Fig. III-67. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport $E/L = 0.65$.	87
Fig. III-68. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$.	88
Fig. III-69. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.55$.	88
Fig. III-70. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.65$.	88

Liste des tableaux

Tab. II-1. <i>Analyse chimique du ciment.</i>	35
Tab. II-2. <i>Composition minéralogique du ciment selon Bogue.</i>	35
Tab. II-3. <i>Caractéristiques physiques du ciment Portland CEM II/A 42,5.</i>	38
Tab. II- 4. <i>Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé.</i>	39
Tab. II-5. <i>Analyses chimiques du sable de mer [LTPO].</i>	39
Tab. II-6. <i>Caractéristiques physiques du sable de mer.</i>	40
Tab. II-7. <i>Analyse chimique du sable concassé [LTPO].</i>	42
Tab. II-8. <i>Caractéristiques physiques du sable concassé</i>	42
Tab. II-9. <i>Résultats de l'analyse granulométrique de sable combiné.</i>	44
Tab. II-10. <i>Caractéristiques physiques du sable combiné.</i>	45
Tab. II-11. <i>Composition chimique de l'eau utilisée.</i>	47
Tab. II-12. <i>Composition chimique de la poudre de verre.</i>	48
Tab. II-13. <i>Caractéristiques physiques de la poudre de verre.</i>	48
Tab. II-14. <i>Les différentes compositions des mortiers étudiés.</i>	49
Tab. II-15. <i>Éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale.</i>	57

Résumé

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs des bétons et des mortiers. Puisqu'il s'agit généralement de sous-produits industriels, leur prise en compte dans la formulation des matériaux cimentaires pour le respect du dosage minimum en ciment (substitution d'une quantité de ciment par ajout minéral) revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières) et écologique (réduction des émissions de CO₂ et de la consommation de ressources non renouvelables).

Cette étude est dans le but de valoriser un déchet inerte qui est "le verre sous forme de poudre" dans des mortiers à l'état frais et durci, dont l'intérêt majeur est donné aux propriétés mécaniques du matériau (résistance à la compression et à la traction). Alors, l'influence de différents dosages en poudre de verre (10, 20 et 30 %) a été étudiée dans des mortiers avec différents rapports E/C (0.45, 0.55 et 0.65). Un des objets principaux de ce travail est de comparer entre les résultats des résistances mécaniques obtenus par des essais destructifs et non destructifs tels que l'essai ultrasonique. Des essais complémentaires de la mesure de l'absorption capillaire et de l'air occlus, ont été aussi effectués. Des relations mathématiques sont donc élaborées, dans cet étude, entre les propriétés physiques et mécaniques déterminés à l'état frais et durci.

Mots clés : Poudre de Verre, Mortier Ordinaire, Résistances Mécaniques, Essai Ultrasonique.

Abstract

Mineral additions are more and more often used by producers of concrete and mortar. Since these are generally industrial by-products, their taking into account in the formulation of cementitious materials, for the respect of the minimum dosage in cement (substitution of a quantity of cement by mineral addition), is of particular economic interest (reduction of the cost of raw materials) and ecological interest (reduction of CO₂ emissions and consumption of non-renewable resources).

The purpose of this experimental study is to valorize an inert waste which is "glass in powder form" in mortars, at fresh and hardened states, whose major interest is given to the mechanical properties of the material (tensile and compressive strength). So, the influence of different glass powder dosages (10, 20 and 30 %) was studied in mortars with different W/C ratios (0.45, 0.55 and 0.65). One of the main objects of this research work is to compare the results of the mechanical strength obtained by using destructive and non-destructive tests such as the ultrasonic test. Additional tests for measuring the capillary absorption and occluded air were also carried out. Mathematical relations are therefore developed in this study between physical and mechanical properties determined at fresh and hardened state.

Keywords: *Glass Powder, Ordinary Mortar, Mechanical Resistance, Ultrasonic Test.*

ملخص

يتم استخدام الإضافات المعدنية أكثر فأكثر عادة من قبل منتجي الخرسانة و الملاط ، و بما أن هذه المنتجات ثانوية بصفة عامة فإن اعتبارها في صياغة المواد الإسمنتية للامثال للحد الأدنى من كمية الاسمنت (استبدال كمية من الاسمنت عن طريق إضافة المعادن) له أهمية خاصة في المجال الاقتصادي (تخفيض تكلفة المواد الخام) و المجال الايكولوجي (تخفيض انبعاث ثاني أكسيد الكربون و استهلاك الموارد الغير متجددة).

الغرض من هذه الدراسة هو تقييم النفايات الخاملة التي هي عبارة عن "مسحوق من الزجاج" في الملاطات في حالة طازجة و متصلبة ، التي تعطي اهتماما كبيرا للخواص الميكانيكية للمادة (مقاومة للضغط والشد).

لقد تمت دراسة تأثير كميات الزجاج في الملاط بثلاث نسب (10; 20 ; 30 %) من مسحوق الزجاج و كذلك ثلاث نسب (0.45; 0.55 ; 0.65) من الماء / الاسمنت. و من أهم الأهداف الرئيسية لهذا العمل هو مقارنة نتائج المقاومة الميكانيكية التي يتم الحصول عليها عن طريق تجارب مكسرة أو غير مكسرة مثل اختبار الموجات فوق الصوتية كما أجريت اختبارات أخرى مثل قياس الامتصاص الشعيري و الهواء المغطى.

و هكذا يتم تطوير العلاقات الرياضية في هذه الدراسة بين الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية المحددة في الحالة الطازجة الصلبة .

الكلمات الرئيسية : مسحوق الزجاج ، ملاط عادي ،المقاومة الميكانيكية ، اختبار بالموجات فوق الصوتية.

Introduction générale

Le ciment est le matériau le plus utilisé dans le monde pour la construction. Mais, la production de ciment nécessite une grande énergie qui conduit à la libération d'une quantité importante de CO₂. Ce dernier contribue à environ 65 % du réchauffement climatique. L'industrie du ciment seule contribue à environ 5 % à effet de serre des émissions de gaz à l'atmosphère de la terre. De nos jours, les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs des matériaux cimentaires. Cette utilisation des ajouts minéraux, qui peuvent substituer une quantité du ciment, a pour objectif de réduire la consommation énergétique nécessaire pour la fabrication du ciment, par une réduction des quantités de clinker, de l'émission du CO₂ et des gaz polluants, ainsi que de la poussière dans les cimenteries. Ces réductions se traduisent par un gain économique certain et une protection de l'environnement.

Par ailleurs, vu le développement de notre Pays dans le domaine industriel, cela conduit à une augmentation des déchets industriels. Alors, l'élimination des déchets est devenue un problème majeur dans les zones métropolitaines. Les quantités de déchets de verre ont augmenté ces dernières années en raison d'une industrialisation accrue et de l'amélioration rapide du niveau de vie. Malheureusement, la majorité des déchets de verre ne sont pas recyclés mais plutôt abandonnés et sont donc à l'origine de certains problèmes graves tels que le gaspillage des ressources naturelles et les problèmes environnementaux.

Pour ces raisons, ce travail de recherche a été menée afin d'étudier la possibilité d'utiliser les déchets de verre comme agrégats fins dans un matériau cimentaire pour la construction. Si la grande quantité de déchets générés est utilisée à la place des matériaux naturels dans la construction et l'industrie, il y aurait trois avantages: Une réduction de la pollution causée par la fabrication du ciment, Une conservation des ressources naturelles nécessaires pour cette industrie du ciment et une élimination des déchets et libérer des terrains précieux pour d'autres usages.

Cette étude est pour but de valoriser un déchet ménager qui est le verre, sous forme de poudre, additionnée par substitution d'une quantité du ciment dans des mortiers ordinaires, dont l'objectif principal est d'évaluer expérimentalement l'influence de différents dosages en poudre de verre (10, 20 et 30 %) sur le comportement physique et mécanique des mortiers ordinaires à base de différents rapport Eau/Liant (0.45, 0.55 et 0.65). Notre travail de recherche été aussi une occasion pour comparer les résultats mécaniques obtenus par deux méthodes différentes: à l'aide des essais destructifs et non destructifs. Pour ces derniers, des mesures de la vitesse de la propagation d'ondes ultrasoniques ont été effectuées à l'aide d'un dispositif Ultrason.

Dans un premier chapitre, une synthèse bibliographique est présentée, dans laquelle nous avons abordé dans une première partie, le sujet de l'industrie cimentaire et sa nocivité sur l'environnement, et dans une deuxième partie, nous avons donné l'intérêt à la valorisation de la poudre de verre comme substituant de ciment dans des matériaux

cimentaires, dont des travaux antérieurs réalisés sur le comportement mécanique des bétons, à base de la poudre de verre, sont présentés à la fin de ce premier chapitre.

Par la suite, le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à une description dans les détails et à une caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers objet de cette étude. Nous allons aussi présenter, dans cette partie, les procédures relatives à la préparation et la confection des mortiers testés, ainsi qu'une description des méthodes expérimentales préconisées. Les essais expérimentaux réalisés au cours de notre travail de recherche sont relatifs à l'étude des propriétés des mortiers ordinaires, dont certains modes opératoires ont été détaillés dans ce chapitre.

Un ensemble de douze formulations de mortiers ordinaires a été préparé avec des matériaux locaux avec une même composition du sable (sable combiné), mais avec des rapports E/L différents (0.45, 0.55 et 0.65), et des dosages (pourcentages) différents en poudre de verre (0, 10, 20 et 30 %), pour la substitution partielle du ciment. Alors, après une caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers étudiés, le début des investigations a été sur mortier à l'état frais par des essais de mesure de maniabilité et de l'air occlus. Pour la caractérisation mécanique à l'état durci des mortiers étudiés et à des différents âges, deux méthodes destructives et non destructives sont présentées dans ce chapitre. Les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

Dans la troisième partie de ce document, les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers étudiés à l'état durci (résistance à la flexion et à la compression ainsi que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (en sens longitudinal et transversal) et l'absorption capillaire du matériau), sont présentés.

Une analyse et des discussions des résultats obtenus, suivies d'une comparaison entre les différentes méthodes de mesures, seront également présentées dans ce chapitre. La vitesse des ondes ultrasoniques mesurées sur des éprouvettes du mortier de différents âges sont aussi présentées en fonction de la résistance mécanique du matériau. Par ailleurs, nous avons donné des relations dans ce chapitre entre les résultats des propriétés physiques et mécaniques, à l'état frais et durci, telles que l'air occlus, la résistance à la compression, le module d'élasticité dynamique, l'absorption capillaire et même la vitesse d'ondes ultrasoniques). Cependant, des équations mathématiques sont élaborées dans ce chapitre, reliant les différents paramètres mesurés à l'état frais et durci pour les mortiers étudiés à des âges différents.

Finalement, à partir de cette étude expérimentale pour une valorisation de la poudre de verre comme ajout additionné par substitution partielle du ciment dans des différents mortiers ordinaires, des conclusions générales sont présentés à la fin de ce document.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1.Introduction

L'industrie de ciment occupe une place importante dans le développement économique de l'Algérie comme pour tous les pays dans le monde, car le ciment est considéré comme un produit stratégique puisqu'il est à l'amont de toute activité de construction et de réalisation d'infrastructures.

Par contre, du point de vue environnemental, la fabrication d'une tonne de ciment libère près d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère. Car, lors de la cuisson des matières premières, plus de 60% des émissions de CO₂ sont produites durant la phase de « décarbonatation ». De nos jours, la production de ciment est responsable d'environ 5% des émissions de CO₂ de la planète.

Vu le développement de notre pays dans le domaine industriel, qui conduit bien-sûr à une augmentation des déchets industriels, dans ce chapitre, nous donnons l'intérêt à la substitution d'un pourcentage du ciment par un déchet inerte qui est le verre sous forme de poudre. Alors, nous avons abordé le sujet de l'industrie cimentaire et sa nocivité sur l'environnement en premier lieu, et dans une deuxième partie, nous avons donné l'intérêt à la valorisation de la poudre de verre comme substituant de ciment dans des matériaux cimentaires, dont des travaux antérieurs réalisés sur le comportement mécanique des bétons, à base de la poudre de verre, sont présentés dans ce premier chapitre.

I.2. Le Ciment et sa fabrication

I.2.1. Définition du ciment

Le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. Mélangée à de l'eau, cette poudre forme une pâte qui se fige et durcit, même sous l'eau. Selon la composition et la finesse de la poudre, les propriétés du ciment ne sont pas les mêmes [1].



Fig. I-1. *Matières premières de ciment.*

Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et du gravier [2]. Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. Il s'agit d'un matériau de construction de haute qualité, économique, utilisé dans les projets de construction du monde entier. Le ciment est obtenu par broyage et cuisson à 1450°C, d'un mélange de calcaire et d'argile. Appelé clinker, ce matériau granulaire est pour l'essentiel une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer [1].

I.2.2. Historique

Les ciments auraient d'abord été inventés par les égyptiens, puis améliorés par les civilisations suivantes par l'utilisation de la chaux. Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau pour cela, ils mélangèrent de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles (région de Naples - Italie). C'est de là qu'est venu le terme bien connu « pouzzolanique » qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux.

L'association des caractéristiques de ces matériaux avec une technologie très avancée, a permis à l'empire romain de construire des structures monumentales d'une durabilité exceptionnelle, inhabituelles pour cette période de l'histoire. Le Panthéon avec sa coupole de 41 m de diamètre et le Colysée à Rome, ainsi que le pont du Gard en sont des exemples marquants. Mais avec la chute de l'empire romain, les secrets de fabrication de ce matériau ont disparus. En 1756, l'anglais SMEAT, lors de la construction du phare d'Ecdysone, mélangea des chaux hydrauliques et des pouzzolanes, il obtint ainsi le premier liant artificiel avec lequel il prépara un mortier aussi dur que la pierre de Portland.

Le ciment ne prend son acception contemporaine qu'au XIX^{ème} siècle avec l'invention du français Louis Joseph VICAT, qui donna pour la première fois des indications précises sur les proportions de calcaire et d'argile pour constituer un mélange permettant de fabriquer, par cuisson, un ciment hydraulique. Ses travaux ont été publiés sans déposer de brevet [3]. En 1824 le britannique Joseph ASPDIN déposa un brevet pour un produit semblable à celui décrit par Louis Joseph VICAT. Une chaux hydraulique à prise rapide qu'il nomma ciment Portland, parce qu'une fois pris, il avait la couleur de la pierre extraite de la presqu'île de Portland sur la Manche. Mais les principes de fabrication des ciments liants (Ciment Portland) comme par exemple la cuisson à la température de fusion pâteuse 1450°C qui permet d'obtenir le clinker, ne fut découverte qu'en 1840 par Louis Joseph VICAT (Société). L'industrialisation du ciment moderne, dit ciment Portland, et sa fabrication donne la possibilité d'avoir un matériau économique avec une résistance à la compression donnant naissance à une architecture de béton coffré puis de béton armé. La première usine a été créée par Dupont et a démarré en 1846 à Boulogne sur mer (France). Depuis, les procédés de fabrication se perfectionnent sans cesse ; en 1870, pour produire une tonne de clinker (Constituant de base du ciment) il fallait 40 heures de temps, actuellement il en faut 3 minutes.

Le processus de fabrication du ciment est passé par plusieurs étapes pour parvenir à l'état de développement actuel. Ce dernier n'a pu se faire que grâce à l'apparition de matériels nouveaux, four rotatif (la technologie des fours rotatifs a vu le jour en 1897) et broyeur à boulets en particulier.

1.2.3. Type de ciment

Les ciments courants doivent être conformes aux spécifications de la norme NF EN 197-1. Ciments – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, qui définit principalement les différents types de ciment, les constituants, les classes de résistance et les valeurs limites spécifiées. Les ciments courants sont subdivisés :

- En cinq types selon leur composition :
 - CEM I ciment Portland,
 - CEM II ciment Portland composé,
 - CEM III ciment de haut fourneau,
 - CEM IV ciment pouzzolanique,

- Selon leur classe de résistance à la compression à 28 jours, mesurée sur des mortiers normalisés :
 - 32,5 MPa,
 - 42,5 MPa,
 - 52,5 MPa.
- Selon la couleur : gris ou blanc.

Le ciment blanc est disponible en types CEM I et CEM II. Sa blancheur est due à la réduction maximale des minéraux colorants notamment l'oxyde de fer, dans les matières premières utilisées et à un processus de fabrication spécifique.
- Caractéristiques complémentaires des ciments :
 - PM: Prise mer NFP 15-317 : Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
 - ES: Eaux sulfatées NF P 15-319 : Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à hautes teneurs en sulfates.
 - CP: Pour la précontrainte NF P 15-318 : Liants hydrauliques – Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint [4].

I.2.4. Fabrication du ciment

On comptabilise au total les étapes qui peuvent intervenir dans le processus de fabrication du ciment. Alors, à partir de la carrière, le calcaire cimentier est abattu à l'explosif et acheminé par dumper vers le hall de concassage [6].

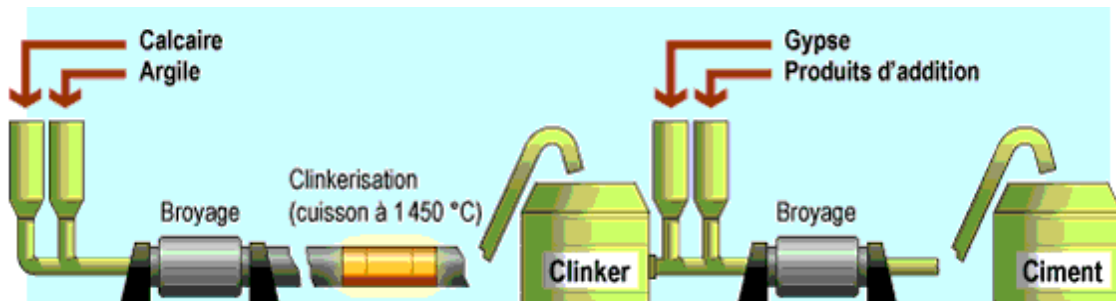


Fig. I-2. Processus de fabrication de ciment [5].

▪ *Le concassage*

Les matériaux sont réduits par le concasseur à une taille maximum de 80 mm. La roche est ensuite échantillonnée en continu, pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine, silice) et arriver ainsi à la composition chimique idéale. Le mélange est ensuite stocké dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement.

▪ *Le broyage et le séchage*

Les matières premières sont ensuite séchées et broyées très finement. On obtient la farine. Celle-ci sera plus tard introduite dans le four sous forme pulvérulente ou préalablement transformée en granulas. Pour la préchauffage et la cuisson, avant l'introduction dans le four, la farine est chauffée à environ 800°C dans un préchauffeur à

grille ou à cyclones. La cuisson se fait dans un four rotatif où la température de la flamme avoisine 1450°C. À la sortie du four, la matière appelée clinker passe dans un refroidisseur [6].

- **Le stockage du clinker**

Le clinker refroidi est ensuite stocké sous un hall couvert ou dans des silos. Le clinker est broyé très finement dans un broyeur à boulets avec d'autres ajouts : cendres de centrales thermiques, laitier de haut-fourneau, gypse, dont les pourcentages déterminent les différentes qualités de ciment.

1.2.5. Consommation du ciment

Le ciment est considéré comme un produit stratégique puisqu'il est à l'amont de toute activité de construction et de réalisation d'infrastructures. Son industrie qui occupe une place importante dans le développement économique mondiale ne cesse d'augmenter. Par contre Du point de vu environnemental, la fabrication d'une tonne de ciment libère près d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère, que plus de 60 % des émissions de CO₂ sont produites durant la phase de « décarbonatation » et que la production de ciment est responsable d'environ 5 % des émissions de CO₂ de la planète.

ÉVOLUTION DU MARCHÉ MONDIAL DU CIMENT

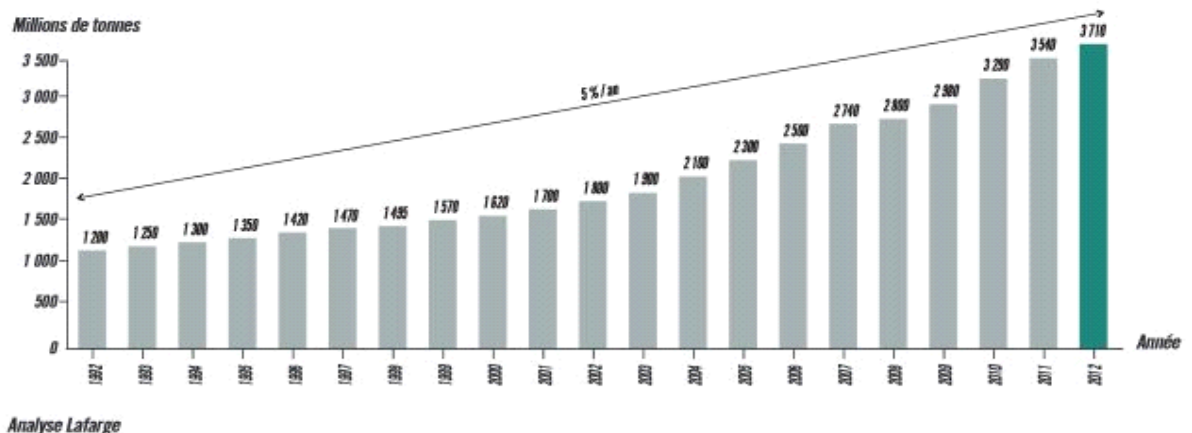


Fig. I-3. Evolution du marché mondiale du ciment [7].

1.2.6. Impact de l'industrie cimentaire sur l'environnement

- **Rejets polluants**

Dans le four, la température atteint plus de 1400°C, ce qui conduit à l'émission d'une importante quantité d'oxydes d'azote, ainsi que d'autres polluants, tel que le dioxyde de soufre et Les poussières. Comme lors de toute combustion, il se forme aussi, dans le four à ciment, du dioxyde de carbone (CO₂). Ainsi donc et en terme de volume les

principaux polluants issus de la fabrication du ciment sont : le CO₂, l'oxyde d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂) et les poussières.

La fabrication du ciment est aussi responsable d'émissions de métaux lourds dans l'air. Les polluants organiques persistants sont également inventoriés: H.A.P (hydrocarbures aromatiques polycycliques) leurs émissions sont liées au phénomène de combustion, les dioxines et les furanes [8].

D'après le dictionnaire du vocabulaire normalisé de l'environnement de l'AFNOR, un agent polluant est un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions, développe des impacts négatifs sur tout ou une partie d'un écosystème ou de l'environnement en général.

▪ ***Emission de gaz***

La combustion des combustibles engendre des émissions de gaz surtout constituées par le dioxyde de carbone (CO₂). Les émissions de l'oxyde d'azote (NO₂) sont attribuables à la combustion incomplète des combustibles fossiles. L'utilisation de ces derniers dans le processus contribue peu aux émissions globales des composés organiques volatils (C.O.V), les dioxines et les furanes.

▪ ***Emissions de CO₂***

L'importance attribuée au CO₂ provient de l'accroissement rapide de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère par suite d'une augmentation de la consommation d'énergie fossiles dans le monde et d'une diminution importante des couverts forestiers. On estime que la teneur moyenne en CO₂ de l'atmosphère planétaire est passée de 275 parties par million en volume (ppmv) à l'époque pré-industrielle à près de 360 ppmv en 1992 [8]. L'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère dans les proportions que nous connaissons ne poserait probablement pas de problème à l'homme, s'il n'y avait pas le phénomène de l'accroissement de l'effet de serre. Etant un gaz non toxique il convient de dire que le CO₂ est l'un des principaux gaz à effet de serre, sa contribution à l'accentuation de celui-ci fait de lui le responsable du réchauffement de la planète et du dérèglement climatique.

1.2.6. Sources de CO₂ dans l'industrie du ciment

La production du ciment génère par nature de l'oxyde de carbone, lors de la cuisson de la matière à très haute température dans le four. Les cimentiers sont donc de grands producteurs de CO₂, produit par la réaction de calcination du CaCO₃ et la combustion.

La transformation du calcaire en clinker, processus basé sur une réaction physicochimique qui commence avec la décomposition du carbonate de calcium (CaCO₃) en chaux (oxyde de calcium CaO) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique (CO₂) à environ 900° C (Décarbonatation).

Le CO₂, sous produit de cette réaction, est appelé le CO₂ de procédé, il représente environ 60 % des émissions, la quantité de CO₂ émise lors de cette phase s'élève à 525 Kg par tonne de clinker [9]. Les combustibles (combustibles fossiles et de substitution)

qui alimentent le four de la cimenterie à la température de 1500° C produisent environ 40 % des émissions de CO₂ appelé CO₂ énergétique, en fonction du procédé utilisé, 300 à 500 Kg de CO₂ sont émis lors de la production d'une Tonne de clinker [10].

Donc de ce qui précède, on peut déduire que théoriquement pour produire une tonne de clinker on émet environ une tonne d'oxyde de carbone dans l'atmosphère dont plus de la moitié de cette émission provient de la décarbonatation du calcaire. Voilà pourquoi la réduction des émissions de dioxyde de carbone est le plus grand défi écologique que l'industrie doit relever.

1.2.7. L'impact de la pollution

La pollution est définie par l'organisation mondiale de la santé (OMS) comme étant la présence dans l'atmosphère de substances étrangères à la composition normale de cette atmosphère et à des concentrations suffisamment élevées pour entraîner un impact sur l'homme, les animaux, les végétaux, les matériaux ou l'environnement d'une manière générale.

▪ ***Sur la santé***

Ces polluants peuvent provoquer des maladies respiratoires telles que l'asthme, les bronchites, allant jusqu'au cancer des poumons.

▪ ***Sur la végétation***

Les poussières déposés sur les plantes les empêchent de respirer et peuvent leur causer leur mort progressive [8].

1.3. Les déchets

La production des déchets ne fait qu'augmenter en Algérie comme partout dans le monde. Les Algériens jettent chaque année 11 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés (DMA). Seulement 10 % de cette énorme quantité sont recyclés. Les transformations socioéconomiques et démographiques qu'a connues le pays durant ces trente dernières années, ont été accompagnées par des modifications notables au niveau des quantités et de la qualité des déchets solides produits [11].

La récupération et le recyclage des déchets sont une activité importante de l'économie et une véritable source d'énergie pour beaucoup de pays. Or, en Algérie, ce domaine reste très peu exploité [12].

1.3.1. Les différents types des déchets

Selon la loi 01-19 (qui définit le classement des déchets en Algérie), les déchets sont classifiés comme suit :

- Les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux;
- Les déchets ménagers et assimilés;
- Les déchets inertes [13].

I.3.2. Les déchets ménagers en Algérie

La figure ci-dessous (cf. **Fig. I-4**) indique des différents déchets solides produites en Algérie en pourcentage.

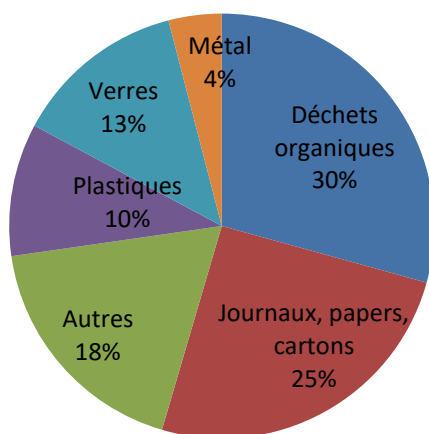


Fig. I-4. Pourcentages des déchets solides [14].

Dans la nature, la décomposition et la dissolution des déchets peut prendre une durée qui varie entre quelques mois et des centaines d'années. Le tableau ci-dessous (**Tab. I-1**) indique la durée de vie de différents déchets de natures différentes.

Tab. I-1. Durée de vie de quelques déchets [15].

Déchets	Temps de décomposition
Déchets végétaux	Quelques mois
Pelures de fruits	3 à 6 mois
Mouchoirs et serviettes en papier	3 mois
Papier journal	3 à 12 mois
Mégot de cigarette	2 ans
Chewing-gum	5 ans
Boîte de conserve	10 à 100 ans
Bouteille plastique	100 à 1000 ans
Canette en aluminium	200 à 500 ans
Sac plastique	400 ans
Polystyrène	1000 ans
Verre	4000 ans

I.3.3. Le recyclage

Le recyclage consiste à traiter tous types de déchets afin de les réintroduire sur le marché. C'est une opération qui permet de transformer un déchet en matière première prête à l'emploi.

Pour pouvoir être recyclé, un matériau doit être collecté, trié puis stocké en bon état dans un conteneur approprié : le tri sélectif contribue à améliorer le processus. Alors, un détritrus doit d'abord être collecté et trié, avant de subir un traitement de recyclage ou d'incinération.

À la maison, au bureau, dans les transports, dans son jardin, le recyclage permet d'économiser de l'argent.

I.3.4. Le recyclage dans le génie civil

Divers types de matériaux recyclables sont actuellement utilisés dans des applications de génie civil. Ceux-ci comprennent les pneus déchiquetés, les pneus usés, les cendres volantes et minérales, les scories de hauts fourneaux, les scories d'acier, les poussières de fours à ciment, les fumées de silice, le verre concassé et les cendres de balles de riz.

La réutilisation de ces matériaux recyclables est particulièrement bénéfique dans les applications de génie civil qui nécessitent de grands volumes de matériaux. Lorsque ces déchets sont utilisés à la place d'autres matériaux conventionnels, les ressources naturelles et l'énergie sont préservées et l'élimination des déchets coûteuse et/ou potentiellement dangereuse est évitée. Des matériaux recyclables peuvent être utilisés dans diverses applications de génie civil axées sur le développement durable [16].

➤ Les déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil

▪ *Les laitiers*

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de « laitier refroidi à l'air ». Ce dernier est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications [17].

▪ *Laitier d'acier*

Une fois l'acier écoulé en partie basse du convertisseur, le laitier d'aciérie de conversion liquide, qui surnage sur le dessus, est déversé dans un cuvier. Après un refroidissement lent et progressif à l'air puis à l'eau, on obtient une roche artificielle qui peut être concassée et criblée pour produire des granulats.

En travaux publics, le laitier d'aciérie de conversion est utilisé principalement pour les travaux de terrassement (remblais, merlons de protection phonique, ...), pour la fabrication de graves non traitées pour la réalisation de couches de forme, ou encore comme enrochement pour la construction de digues [18].

- ***Mâchefer***

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton [17].

- ***Scories***

Ces résidus constituent environ 2,5 % de la production totale de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers.

- ***Cendres volantes***

La cendre volante est un résidu de combustion qui se mélange aux particules fines et aux gaz formant la fumée. Dans un contexte industriel, la cendre volante vient principalement de la combustion du charbon [17].

- ***Déchets divers***

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales: les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre.

Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

- ***Pneus usagers***

Les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait [17].

- ***Résidus d'incinérateurs***

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment [17].

- **Déchets de démolition**

Les déchets de démolition sont l'ensemble des déchets banals, inertes et peut être dangereux, générés lors des phases de démolition d'ouvrages existants.

- **Sables de fonderies**

Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques.

I.3.5. Les bénéfices du recyclage

- Réduit la production d'émissions de gaz à effet de serre du ciment et d'autres polluants.
- Conserve l'espace d'enfouissement, réduit le besoin de nouvelles décharges et leurs associés.
- Diminution de la demande sur les nouvelles ressources.
- Réduit le coût du transport et de la production.
- Permet l'utilisation des déchets qui seraient autrement perdus dans les sites d'enfouissement.
- Crée des opportunités d'emploi et des opportunités économiques dans les industries de recyclage.

I.4. Le verre

I.4.1. Définition

Matériau solide non cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse ;dur, fragile (cassant) et transparent, à base de silice et de fondants.



Fig. I-5. Vitre en verre [20].

I.4.2. Le verre en déchet

Le verre récupéré est constitué de :

- Verre industriel provenant des professionnels (embouteilleurs, négociants en vin, restaurateurs, miroiteries,...),
- Verre issu des chantiers de destruction du bâtiment,
- Verre des automobiles en provenance des garages et des véhicules hors d'usage,
- Verre ménager qui représente 13 % du poids des ordures ménagères [21].

Exemples de déchets de verre :

- Verre creux : bouteilles, bocaux, gobelets, pots...
- Verre plat : verre trempé, vitrages, glaces...
- Laine et le fil de verre
- Verre technique : lunettes, ampoules, écrans cathodiques...
- Verre blanc et coloré.



Fig. I.6. *Source du verre en déchet assimilé.*

I.4.3. Etapes de recyclage du verre

Lorsque le verre est recyclé, il est trié une première fois par le consommateur. Mais, malgré toutes les bonnes intentions du citoyen, il faut de nouveau trier le verre collecté. En effet, pas tous les déchets de type « verre » sont recyclables. Les éléments métalliques sont retirés par tri mécanique et un tri optique permet (grâce à un rayon infrarouge) d'éliminer les éléments non transparents comme la céramique, qui n'est pas recyclable. Un souffleur retire les éléments trop légers : bouchons et étiquettes

Le verre est ensuite broyé. Contrairement à d'autres pays, en France, la collecte se fait sans distinction de couleur, de sorte qu'avec le verre recyclé, on ne peut faire que du verre coloré [22].

I.4.4. La poudre de verre

Le verre après avoir été collecté, trié, débarrassé de ses impuretés, il devient du calcin (l'ajout de sable + carbonate de soude), ce dernier est acheminé vers les usines après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates.

I.4.5. Valorisation de poudre de verre

Cette poudre fine (la poudre de verre) est un matériau pouzzolanique qui peut remplacer une fraction du ciment portland dans le béton [Taha et al., 2008; Shayan et al., 2004; Shoa et al., 2000]. La poudre de verre est un matériau essentiellement siliceux avec plus 70% de SiO_2 qui est finement divisé. Elle ne possède pas des propriétés hydrauliques, mais elle contient des constituants (silice, alumine) capables à température ordinaire de fixer l'hydroxyde de calcium pour donner naissance à des composés stables ayant des propriétés hydrauliques.

I.5. L'utilisation de la poudre du verre dans la formulation du béton

I.5.1. Propriétés à l'état frais

L'effet de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. Zidol (2009) a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un BAP ayant un rapport E/C = 0,4, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la viscosité plastique de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre [Zidol, 2009]. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de SP requis pour un étalement donné. Cependant, pour les besoins rhéologiques des BAP, une finesse supérieure à celle du ciment peut être appréciable, notamment pour le maintien de la stabilité. L'utilisation d'un agent de viscosité peut être négligée si la matrice contient un plus grand nombre de particules pour un volume donné.

I.5.2. À l'état durci

- ***Résistance à la compression***

Les études effectuées par plusieurs chercheurs sur le béton ordinaire [24, 25, 27, 28, 29] montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre dans le béton comme substituant du ciment.

Des études antérieures montrent que la poudre de verre n'a aucune influence sur la résistance mécanique à l'âge jeune du béton, tout comme les cendres volantes. La

résistance en compression à 28 jours peut être même plus faible par rapport à la résistance du matériau témoin. L'étude effectuée par [-Zidol, A. (2009)][24] , sur des bétons formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m³ et un rapport E/L de 0,40 (cf. **Fig. I-7**), indique qu'entre 56 et 90 jours, les résistances des bétons avec poudre de verre sont plus supérieures que celles obtenues avec le béton témoin (sans PV). En effet, les résultats montrent qu'entre 28 et 90 jours, l'incorporation de 20 et 30 % de PV confèrent au béton un taux de développement en résistances à la compression de 12 et 18 % respectivement, alors que pour le témoin, ce même taux est de 9 % seulement.

Shayan et Xu (2006) [29] ont étudié la performance de la poudre de verre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. Les bétons étudiés par ces chercheurs, avec un dosage de 380 kg/m³, sont formulés pour atteindre une résistance à la compression de 40 MPa à 28 jours, dont le remplacement partiel du ciment était de 10, 20 et 30 % de la poudre de verre. Alors, pour le béton avec 20 % de PV, la résistance visée à 28 jours est atteinte. Cependant avec 30 % de PV, ce n'est qu'à partir de 90 jours que la résistance a pu atteindre 45 MPa.

La figure ci-dessous (cf. **Fig. I-7**) montre l'influence de dosage en poudre de verre sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge du béton [24]. Cela concerne l'incorporation de la poudre de verre avec deux finesses de mouture différentes: 375 m²/kg et 436 m²/kg. Il a été démontré que la résistance en compression des bétons binaires étudiés, avec un rapport E/C de 0.55 et avec une incorporation de 20 et 30 % de poudre de verre, est inférieure de celle du béton témoin entre 1 et 28 jours. Mais, au-delà de 28 jours, l'évolution de la résistance en compression du béton avec de PV devient plus importante que celle du béton témoin. Elle représente respectivement 80 et 87 % de celle de témoin. Quant à 90 jours, la résistance varie de 94 à 103 % par rapport à celle du témoin.

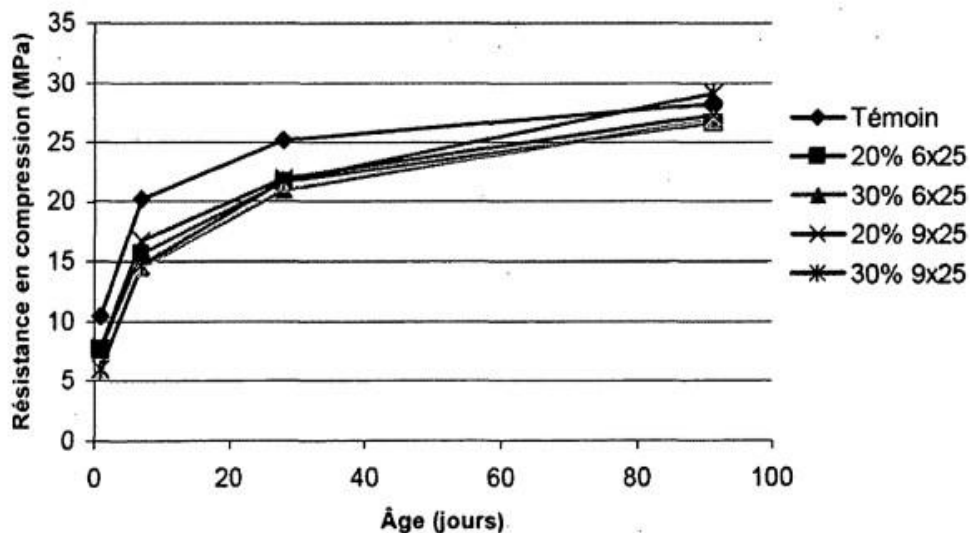


Fig. I-7. Évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de bétons avec différents dosage en PV et avec E/C= 0.55 [24].

- **Résistance à la flexion**

Les résistances en flexion des bétons conventionnels formulés avec un rapport E/L de 0,55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre sont similaires à celle du témoin à 28 jours [Zidol, 2009][24]. La **fig. I-8**. Présente les valeurs de la résistance en flexion pour des bétons formulés avec un rapport E/L de 0,40 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre. Les résistances en flexion pour les bétons contenant de la poudre de verre sont inférieures d'au moins 0,60 MPa à celle du témoin à 28 jours [Zidol, 2009].

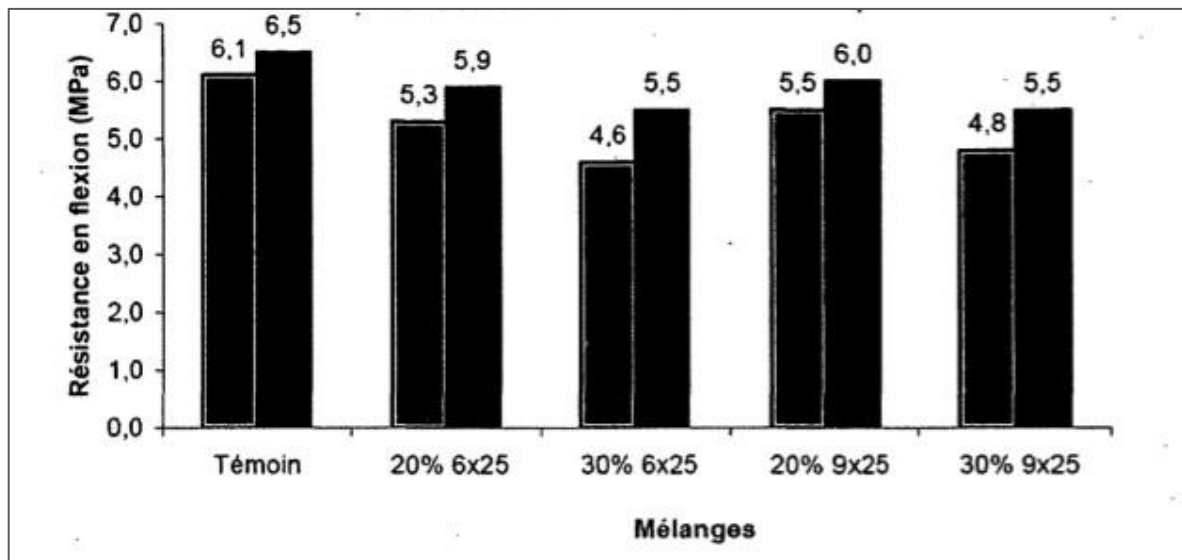


Fig. I-8. Évolution de la résistance à la flexion des bétons à 28 jours avec différents dosage en PV et avec E/C= 0.40 [24].

- **Module d'élasticité**

[Ishani Singal, 2016][30] a étudié l'influence de la poudre de verre comme un substituant de ciment dans les bétons en différents pourcentages (5, 10, 15 et 20 %).

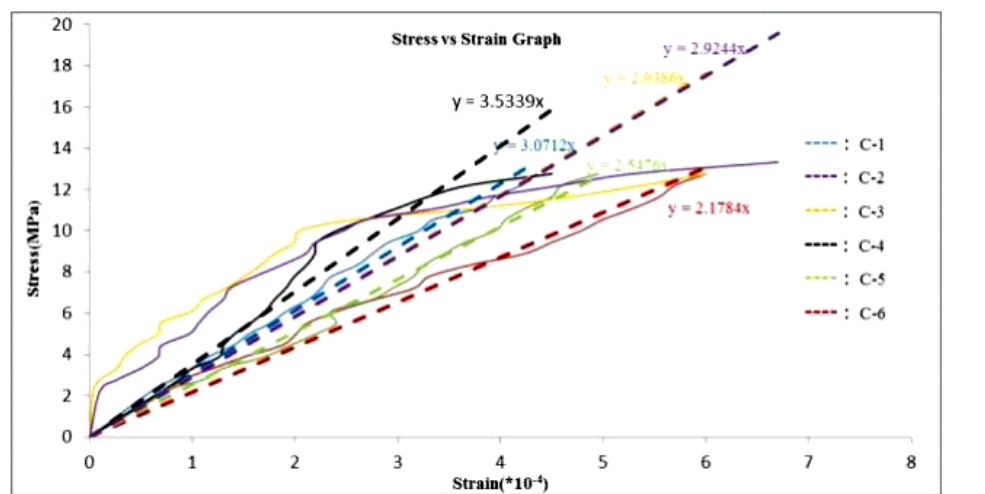


Fig. I-9. Courbes contrainte-déformation de bétons à base de différents dosages en poudre de verre[30].

Tab. I.2. *Modules élastiques des bétons avec différents dosage en PV [30].*

Les bétons	Pourcentage de verre	E (N/mm ²)
C1	100 % OPC	30712
C2	0 %	29244
C3	5 %	29386
C4	10 %	35339
C5	15 %	25476
C6	20 %	21784

Conclusion

Le verre est un déchet industriel très important à recycler et son utilisation dans les matériaux cimentaires demeure un thème de recherche de très grand intérêt pour quatre principales raisons :

- Pour le profit de la source de verre recyclé qui augmente par des millions de tonnes, chaque année dans le monde entière. étant un matériau très durable et recyclable, il est nécessaire de profiter de cette ressource par rapport à l'environnement.
- Etant un matériau artificiel, la composition chimique de verre est stable et bien définie. Ceci permet de prévenir toutes réactions chimiques d'une part et de pouvoir modifier ou traiter le verre d'autre part.
- L'absorption d'eau dans le matériau "verre" est négligeable voire nulle. À l'inverse d'autres matériaux naturels comme le gravier ou le sable, qui absorbent plus ou moins une quantité d'eau initiale dépendante de leur nature et leur origine.
- Enfin, sa résistance mécanique abrasive et sa dureté par rapport à celle des granulats naturels (granulats calcaires par exemple), permet de l'adapter pour une utilisation comme granulats dans le béton ou même de l'utiliser sous forme de poudre comme substituant d'une quantité de ciment pour la fabrication des matériaux de construction.

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1. Introduction

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un mortier joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures, les propriétés essentielles du mortier sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, Ce chapitre est dans le but de décrire dans les détails et de caractériser les matériaux utilisés pour la préparation des mortiers objet de cette étude. Ainsi que nous allons présenter, dans cette partie, les procédures relatives à la préparation et la confection des mortiers testés, ainsi qu'une description des méthodes expérimentales préconisées. Les essais expérimentaux réalisés au cours de notre travail de recherche sont relatifs à l'étude des propriétés des mortiers ordinaires, dont certains modes opératoires ont été détaillés dans ce chapitre.

Pour notre étude expérimentale, nous avons formulé douze mortiers ordinaires avec des matériaux de même nature (même composition du sable), mais avec des rapports E/L différents et un dosage (pourcentage) différent en poudre de verre, pour la substitution du ciment.

Après une caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers étudiés, le début des investigations a été sur mortier à l'état frais par des essais de mesure de maniabilité et de l'air occlus, puis sur des mortiers à l'état durci. Pour la caractérisation mécanique à l'état durci des mortiers étudiés et à des différents âges, des méthodes destructives et non destructives ont été utilisées. Les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

II.2. Les matériaux utilisés pour la fabrication des mortiers

II.2.1. Le ciment

II.2.1.1. Composition chimique et minéralogique du ciment

Le ciment, utilisé dans la confection de nos éprouvettes des mortiers ordinaires, provient de la cimenterie de Beni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment composé (CEM II/A) est le plus utilisé dans le domaine de la construction dans toute la région Nord-Ouest Algérien. Les compositions chimiques et minéralogiques (composition de Bogue) de ce ciment sont présentées dans le **Tab. II-1** et **Tab. II-2**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO).

Tab. II-1. *Analyse chimique du ciment [LTPO].*

<i>Composants</i>	<i>Quantité (%)</i>
SiO ₂	28.14
Al ₂ O ₃	5.14
Fe ₂ O ₃	4.215
CaO	56.62
MgO	1.05
SO ₃	2.00
CaO libre	0.69
Perte au feu	1.38
Chlorures	0.03
Insolubles	9.59

Suivant la méthode de Bogue la composition minéralogique a été calculée et donné dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-2**).

Tab. II-2. *Composition minéralogique du ciment selon Bogue.*

<i>Composants</i>	<i>Quantité (%)</i>
C ₃ S	51
C ₂ S	31.20
C ₃ A	6.70
C ₄ AF	11.10

Donc le ciment utilisé dans cette étude, se caractérise par une très forte teneur en silice et au contraire une très faible teneur en C_3A . Ces deux composants influencent clairement sur le temps de début et fin de prise.

II.2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment

Plusieurs essais ont été utilisés pour la détermination des caractéristiques physiques du ciment utilisé dans cette étude. Ces essais ont été conduits au laboratoire de génie civil au Centre Universitaire de Ain-Temouchent :

- ***La masse volumique absolue du ciment selon la norme NF P 18-558***

Elle est déterminée à l'aide d'un pycnomètre en utilisant du toluène, à une température de $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Le mode opératoire de l'essai est comme suit:

- On pèse le pycnomètre vide, on le remplit de toluène jusqu'au trait repère, soit une masse M_1 ;
- On pèse 50 g de ciment, soit une masse M_2 ;
- On introduit 50 g de ciment (M_2) dans le toluène après avoir vidé le pycnomètre à moitié
- On élimine l'air et on remplit le pycnomètre de toluène au trait repère et on le pèse, soit la masse M_3 ;

Alors, la masse du toluène déplacé correspond au volume du corps :

Volume du toluène déplacé : $V = 3.32 \text{ cm}^3$

La masse spécifique de l'échantillon : $M_2 = 10 \text{ g}$.

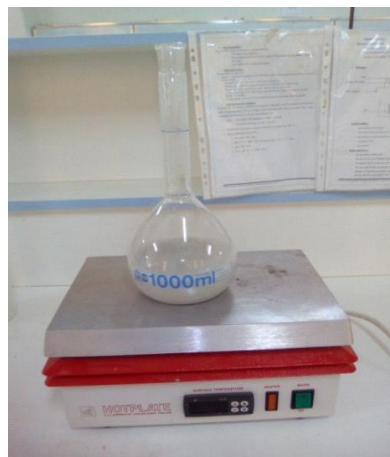


Fig. II.1. *Pycnomètre pour la mesure de la masse volumique absolue.*

- La masse volumique apparente lâche est déterminée par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de ciment avec aucun tassement.

- La masse volumique apparente compacte est déterminée par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de ciment avec un tassement de 25 coups par 3 couches.

Les résultats de la masse volumique apparente (lâche et compacte) et absolue, sont récapitulés dans le **Tab. II-3**.

- ***La finesse de mouture (surface spécifique Blaine) du ciment selon la norme NF P 15 442***

Elle a été déterminée par la méthode de perméabilimètre de Blaine. Alors, le mode opératoire de cette méthode est comme suit:

- On prend une cellule de perméabilimètre et on le remplit avec du ciment, après avoir mis une rondelle de papier filtre adapté au diamètre de la cellule, puis on met un autre filtre au dessus de la couche de ciment de façon à laisser passer l'air à travers le ciment puis on ferme la cellule avec un piston.
- Après avoir bien tassé le ciment, on enlève le piston lentement en effectuant de légères rotations lentes et alternatives puis on le place dans l'appareil.
- On fait monter le liquide du manomètre vers un point supérieur à l'aide de la poire aspirant, et alors on ferme le robinet et on commence à chronométrer le temps de passage du liquide vers le point le plus bas.
- On étale de la vaseline sur les parois de la cellule, dans le but d'avoir une bonne étanchéité de l'ensemble.
- On refait le chronométrage trois fois de suite pour avoir un résultat juste.

Le résultat obtenu de la surface spécifique Blaine du ciment est indiqué ci-dessous dans le **Tab. II-3**.



Fig. II-2. *Perméabilimètre de Blaine.*

• **Consistance de la pâte de ciment selon la norme NF EN 196-3**

La consistance normalisée de la pâte de ciment a pour objectif de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée à l'aide de l'appareil Vicat, muni d'une sonde (une tige) conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3. Le résultat obtenu de la consistance du ciment utilisé est présenté dans le Tab. II-3.

➤ **Temps de prise du ciment selon la norme NF EN 196-3**

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat muni d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3, qui permet de suivre l'évolution de la structuration de la pâte de ciment et notamment le moment de sa prise, comprise entre deux échéances :

- Le temps de début de prise (à 5 min près) : c'est le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel la distance entre l'aiguille et la plaque est de 5 mm.
- Le temps de fin de prise (à 15 min près) : C'est le temps mesuré depuis l'instant zéro, au bout duquel l'aiguille ne pénètre pour la première fois que de 0,5 mm dans l'éprouvette.

Tab. II-3. Caractéristiques physiques du ciment Portland CEM II/A 42,5.

		Ciment CEM II/A 42.5
Ciment Anhydre	Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.011
	Masse volumique apparente lâche (g/cm ³)	1.054
	Masse volumique apparente compacte (g/cm ³)	1.570
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	2717
Pâte du Ciment	Consistance (%)	28
	Début de prise (heure)	2 H 45 min
	Fin de prise (heure)	6 H 00 min

Les masses volumiques (apparente et absolue) des ciments utilisés, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992) [N.A. 92], compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

La consistance obtenue est conforme à la norme NF EN 196-3 ou les valeurs sont généralement compris entre 26 et 33 %. De même, un temps de prise minimal de 60 minutes est prescrit par la norme NF P 15-301 pour les ciments de classe 42,5.

Les résistances à la compression et à la flexion du ciment utilisé, à l'âge de 7 jours et de 28 jours, sont illustrées dans le **Tab. II-4**.

Tab. II- 4. Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé.

Âge (jours)	7	28
Résistance à la flexion (MPa)	3.63	6.750
Résistance à la compression (MPa)	38.74	46.48

Les résultats de la résistance mécanique obtenues à 7 jours et à 28 jours, pour le ciment CEM II 42.5, sont importantes, dont la valeur de la compression à 28 jours est largement supérieure à 42.5 N/mm² qui est la résistance limite de ce choix, ceci est dû au pourcentage des hydrates qui est plus important par rapport à d'autres types de ciment tel que le ciment CEM I 42.5. Ce type de ciment conduit donc à moins de porosité libre dans la pâte durcie [31].

II.2.2. Les granulats

II.2.2.1. Sable de mer (roulé)

Le sable est un constituant principal qui joue un rôle important dans la qualité du béton ou du mortier. Dans tous les domaines de construction, les sables roulés sont préférables, car ils donnent des meilleurs résultats de point de vue de la maniabilité.

La propreté de ce dernier est vérifiée par l'essai d'équivalent de sable selon la norme NF P 18 598, ainsi que son module de finesse est vérifié selon la norme NF P 18 560.

Dans ce travail de recherche, le sable utilisé pour la fabrication de nos mortiers ordinaires est un sable de mer (sable fin roulé (0-1 mm)) qui provient de la sablière de Terga (Wilaya de Ain-Temouchent). Ce choix a été déterminé, non seulement pour des raisons de maniabilité, mais aussi par le fait que ce sable est le plus utilisé dans la région nord ouest Algérien pour la fabrication des mortiers ordinaires.

a) Caractéristiques chimiques du sable de mer

L'analyse chimique a été réalisée au laboratoire des travaux publics de la région Ouest (LTPO) et les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-5**).

Tab. II-5. Analyses chimiques du sable de mer [LTPO].

<i>Caractéristiques</i>	<i>Teneurs (%)</i>
SiO ₂	55.43
CaO	25.56
Fe ₂ O ₃	0.61
Al ₂ O ₃	0.07
SO ₃	0.00
CaCO ₃	42.05
CO ₂	18.50

D'après ces résultats, on remarque un pourcentage important de la silice (55,43 %), ce qui nous permet de dire que ce sable est de nature siliceuse.

b) Caractéristiques physiques du sable de mer

Pour caractérisation physique de notre sable, nous avons effectué plusieurs essais dans le laboratoire.

- **Analyse granulométrique de sable selon la norme NF P 18 560**

Cet essai consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat, dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 5 mm.

Dans cette analyse granulométrique nous avons défini : les pourcentages de tamisât (%), le coefficient d'uniformité (C_u), le coefficient de courbure (C_c), ainsi que le module de finesse (M_f) des sables utilisés pour la fabrication de nos mortiers.

- **Détermination de l'équivalent de sable selon la norme NF P 18 598**

Le but de cet essai est de mesurer la propreté du sable utilisé pour la fabrication du matériau cimentaire envisagé. Selon les textes normatifs, les sables qui ont un équivalent de sable visuel (ESV) compris entre 75 et 85 ou (un équivalent de sable à piston compris entre 70 et 80) sont parfaitement pour la fabrication des bétons ou mortier.

Les résultats obtenus de cette caractérisation physique de ce sable de mer (0-1 mm) sont récapitulés dans le **Tab. II-6**.

Tab. II-6. *Caractéristiques physiques du sable de mer.*

	Sable de mer (0-1 mm)
Masse volumique apparente lâche (kg/m^3)	1470
Masse volumique apparente compacte (kg/m^3)	1665
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2610
Equivalent de sable visuel (%)	94
Equivalent de sable à piston (%)	91
Module de finesse	0.83
Teneur en fines (%)	3
Coefficient d'uniformité C_u	3.5
Coefficient de courbure C_c	1.03

La courbe d'analyse granulométrique de ce sable de mer est illustrée sur la **Fig. II-3** D'après les résultats obtenus (indiqués dans le **Tab. II-6**) la masse volumique apparente lâche du sable est incluse dans l'intervalle théorique (de 1,4 à 1.6). Mais les valeurs obtenues de l'équivalent de sable (visuel et à piston) montrent que ce sable fin est très propre et avec une teneur en fines très faible.

Les valeurs calculées des coefficients de courbure et d'uniformité (C_c et C_u) permettent aussi de dire que c'est un sable avec une granulométrie non uniforme.

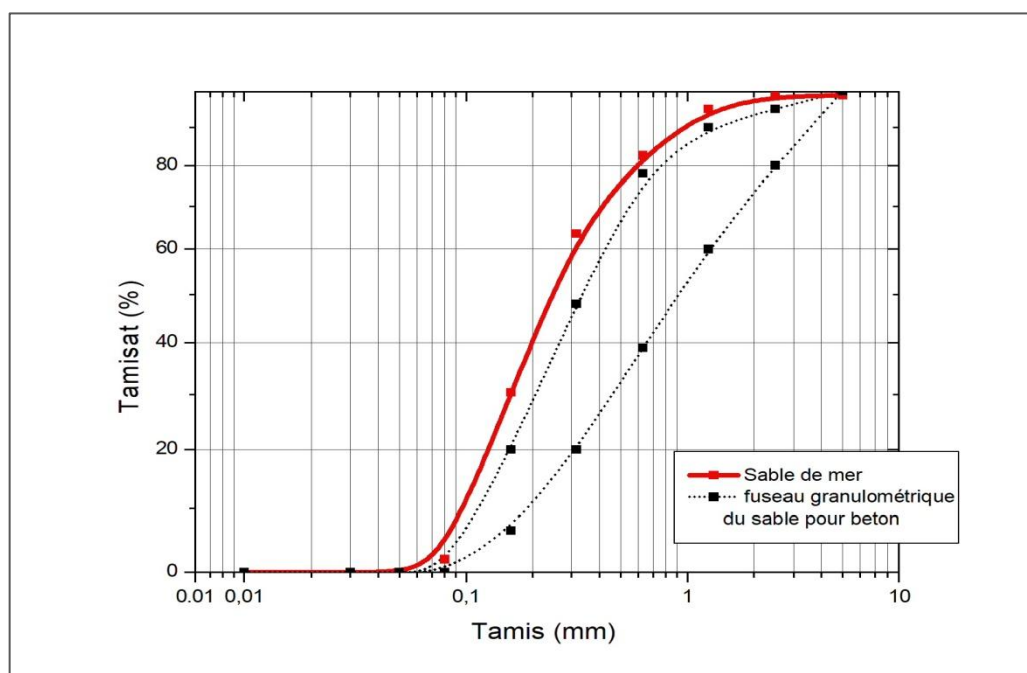


Fig. II-3. Courbe granulométrique de sable de mer (0-1 mm).

La Fig. II-3 montre que la courbe granulométrique de sable fin ne s'insère pas dans le fuseau idéal pour un bon mortier. L'étude de la granulométrie indique aussi que ce sable a un module de finesse très faible ($Mf = 0.83$) par rapport à l'intervalle donné pour un bon module de finesse (entre 2.2 et 2.7).

Afin d'avoir un bon sable pour la confection de nos mortiers, et avec une courbe granulométrique qui s'insère parfaitement dans le fuseau idéal pour un bon mortier de construction, et aussi pour avoir un module de finesse adéquat, nous avons procédé à une correction de la granulométrie en combinant 40 % de sable fin (0-1 mm) avec 60 % de sable de carrière (un sable grossier 0-4 mm). Ces pourcentages sont vérifiés à l'aide de la méthode d'Abrams qui donne la relation suivante pour le calcul de module de finesse à partir de la finesse de deux sables différents :

$$\text{Sable } (S_1) = \frac{Mf_2 - Mf}{Mf_2 - Mf_1}$$

$$\text{Sable } (S_2) = \frac{Mf - Mf_1}{Mf_2 - Mf_1}$$

II.2.2.2. Sable concassé (grossier)

a) Caractéristiques chimiques du sable concassé

Le sable étudié dans cette partie est sable grossier (0-4 mm) de nature calcaire, issu de concassage d'un calcaire dur, dont la carrière se situ de sidi-Ali Benyoub dans wilaya de Sidi Bel-Abbès.

L'analyse chimique de ce sable Concassé est donnée ci-dessous dans le **Tab. II-7**.

Tab. II-7. *Analyse chimique du sable concassé [LTPO].*

<i>Caractéristiques</i>	<i>Teneurs en (%)</i>
SiO ₂	17.06
CaO	46.33
Fe ₂ O ₃	0.61
Al ₂ O ₃	0.38
SO ₃	0.00
CaCO ₃	79.43
CO ₂	34.95

Le tableau montre que c'est un sable de nature calcaire avec une forte teneur en carbonates de calcium CaCO₃ de 79.43 %.

b) Caractéristiques physiques du sable concassé

Dans cette partie, nous avons déterminé les mêmes caractéristiques physiques données ci-dessus pour le sable fin. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tab. II-8**.

Tab. II-8. *Caractéristiques physiques du sable concassé.*

	<i>Sable grossier (0-4 mm)</i>
Masse volumique apparente lâche (kg/m ³)	1450
Masse volumique apparente compacte (kg/m ³)	1696
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2680
Equivalent de sable visuel (%)	64
Equivalent de sable à piston (%)	60
Module de finesse	3.55
Teneur en fines (%)	11
Coefficient d'uniformité <i>C_u</i>	5
Coefficient de courbure <i>C_c</i>	0.648

Contrairement au sable fin, on peut constater à partir des résultats de l'équivalent de sable présentés dans le **Tab. II-8**, que ce sable grossier (concassé) est un sable

relativement fin par rapport au sable fin. De plus, Le module de finesse obtenu ($M_f = 3,6$) est très fort par rapport à l'intervalle donné pour un bon module de finesse.

Par ailleurs, les valeurs des coefficients d'uniformité et de courbure (C_u et C_c), obtenus à partir de l'analyse granulométrique (cf. **Fig. II-4**), nous permet de dire que le sable concassé est avec une granulométrie non uniforme. Il est claire à partir de la **Fig. II-4** que la courbe granulométrique de ce sable (0-4 mm) ne s'insère toujours pas dans le fuseau idéal, comme c'est le cas pour le sable fin présenté ci-dessus.

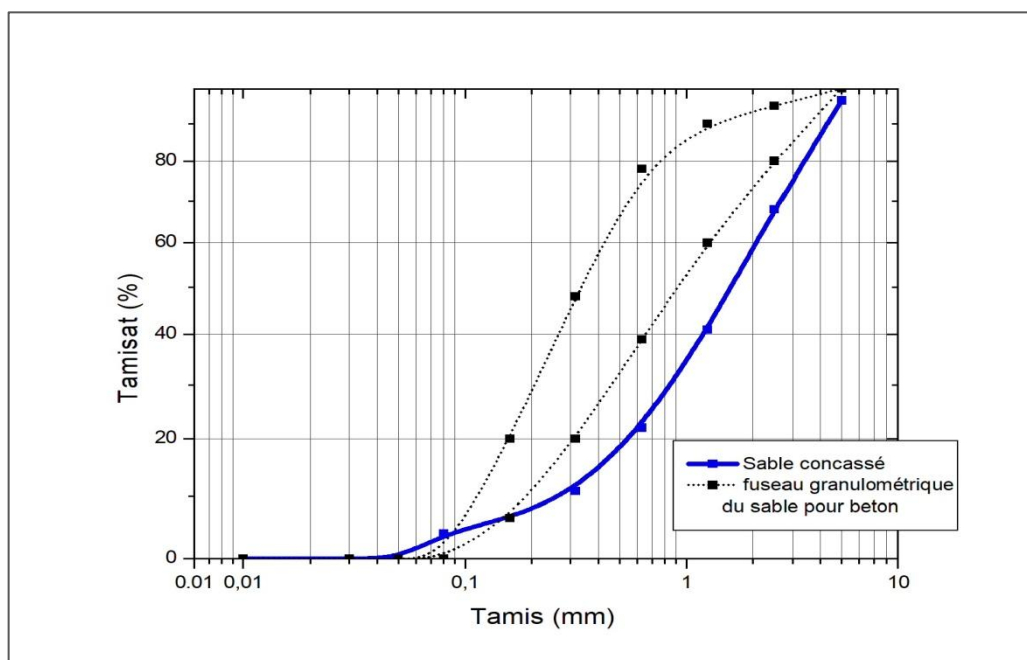


Fig. II-4. Courbe granulométrique du sable concassé (0-4 mm).

c) caractéristiques physiques du sable combiné

Les résultats obtenus de la granulométrie (voir la **Fig. II-5**) montrent que la courbe granulométrique du sable combiné s'insère presque parfaitement dans le fuseau idéal pour un bon mortier ordinaire pour la construction.

Des travaux antérieurs [32] ont donné le même résultat (l'insertion dans le fuseau idéal) en respectant les mêmes pourcentages indiqués ci-dessus. Le **Tab. II-9** et la **Fig. II-5** présentent les résultats en détails d'une analyse granulométrique du sable combiné (40% de sable fin (0-1 mm) avec 60% de sable grossier (0-4 mm)).

Tab. II-9. Résultats de l'analyse granulométrique de sable combiné.

Tamis (mm)	Tamisât (%)		
	Sable concassé (0-4) mm	Sable de mer (0-1) mm	Sable Combiné (60% S.G + 40% S.F.)
6.3	0	0	0
5.0	96.49	99.7	98
2.5	67.98	98.8	80
1.25	40.98	98	64
0.63	21.99	96.6	52
0.315	10.91	93.5	44
0.16	6.49	30.4	16
0.08	3.95	1.98	3

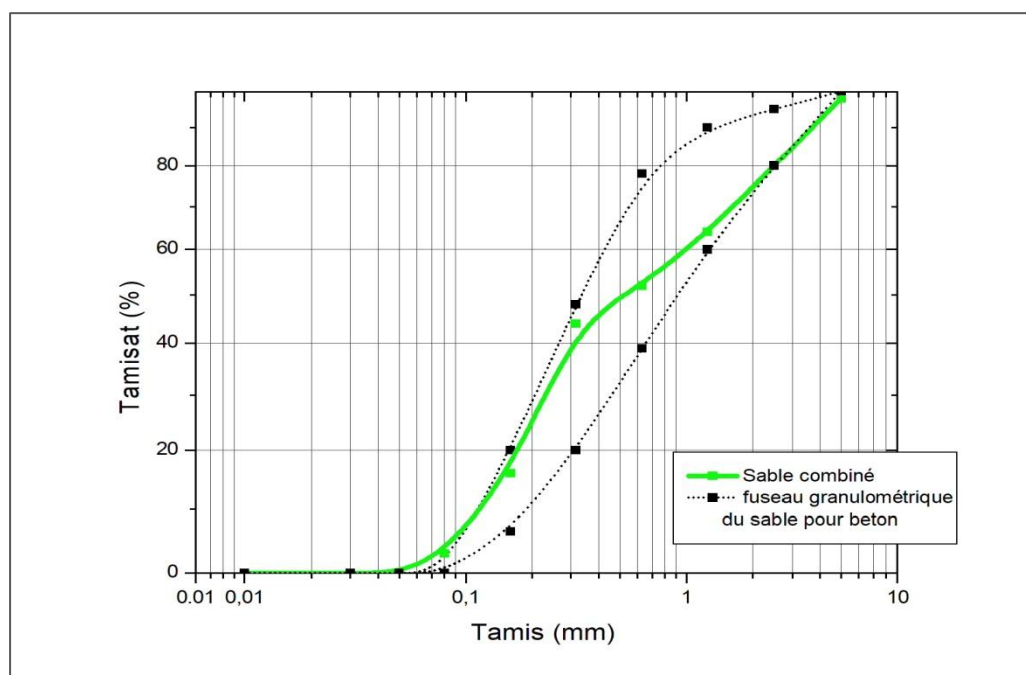


Fig. II-5. Courbe granulométrique du sable combiné.

➤ **Équivalent de sable, masses volumiques et module de finesse du sable combiné**

Plus de détails ainsi que des modes opératoires, selon les textes normatifs, sont donnés en **Annexes F, C, et E** concernant ces essais. En effet, nous rappelons que les premières mesures des coefficients de l'équivalent de sable (selon la norme NF P 18 598), visuel et à piston, donnent respectivement des valeurs de 94 et 91 % pour le sable fin (0-1 mm). Ainsi, que pour le sable grossier (0-4 mm), ces valeurs égalent à 60 et 64 % respectivement. Cependant, la combinaison entre 40 % de sable fin avec 60 % de sable

grossier, a permis d'avoir des équivalents de sable, visuel et à piston, qui égalent à 77 et 74 % respectivement. Cette combinaison entre les deux sable a donc permit de réguler la propreté du sable (sable propre : $70 \leq ES < 80$) pour la confection d'un bon mortier ordinaire.

Les résultats des masses volumiques apparentes, lâches et compactes, du sable combiné ont aussi données les valeurs de 1459 et 1678 kg/m³ respectivement.

La combinaison des deux sables, choisie dans cette étude, a aussi permit d'avoir un module de finesse qui est égal à 2.46. Cette valeur a été vérifiée par la formule d'Abrams indiqué ci-dessus. Notons qu'un module de finesse doit être $2.2 < Mf < 2.8$ pour un sable optimale.

Les caractéristiques physiques du sable combiné, utilisé dans cette étude pour la fabrication de nos mortiers, sont reportées dans le **Tab. II-10**.

Tab. II-10. *Caractéristiques physiques du sable combiné.*

	Sable combiné (60% S. concassé + 40% S. de mer)
Masse volumique apparente lâche (kg/m ³)	1459
Masse volumique apparente compacte (kg/m ³)	1678
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2555
Equivalent de sable visuel (%)	77
Equivalent de sable à piston (%)	74
Module de finesse	2,46
Teneur en fines (%)	7,4
Coefficient d'uniformité <i>Cu</i>	5.26
Coefficient de courbure <i>Cc</i>	0.84

➤ **Foisonnement du sable selon la norme NF P 18 597**

Le foisonnement du sable représente aussi une partie importante dans ce chapitre pour la détermination des caractéristiques physiques des sables utilisés pour la préparation des mortiers étudiés. Le but de cet essai est de déterminer la variation de la masse volumique apparente en fonction de l'accroissement progressif de sa teneur en eau. Il est donc possible de tracer la courbe de la masse volumique apparente (en kg/m³) en fonction de la teneur en eau correspondante (en %).

Ci-dessous, les résultats de foisonnement sont illustrés sur les **Figs. II-6, II-7 et II-8** pour le sable fin (0-1 mm), le sable concassé (0-4 mm) et le sable combiné respectivement. Les valeurs indiquées sur ces figures correspondent à la moyenne arithmétique de trois mesures obtenues à partir de trois essais effectués pour chaque teneur en eau différente.

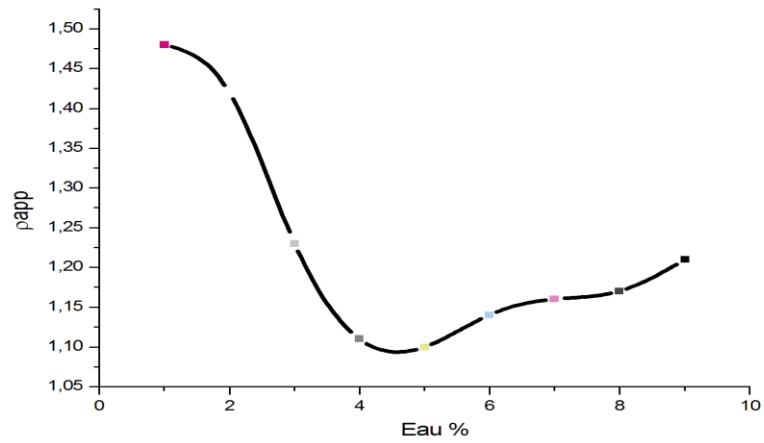


Fig. II-6. Courbe de foisonnement du sable fin (0-1 mm).

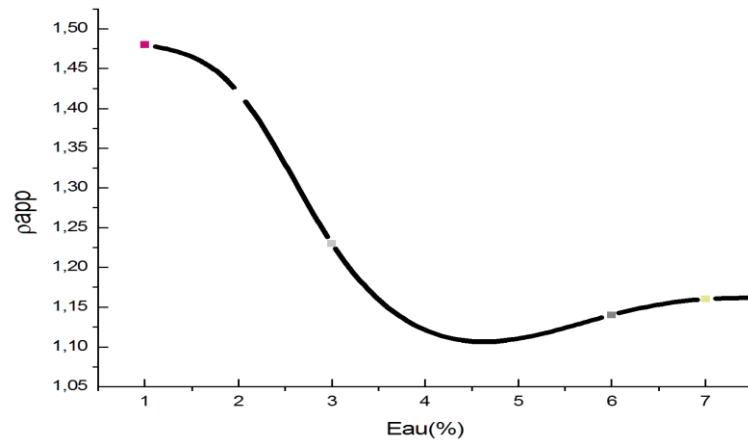


Fig. II-7. Courbe de foisonnement du sable grossier (0-4) mm

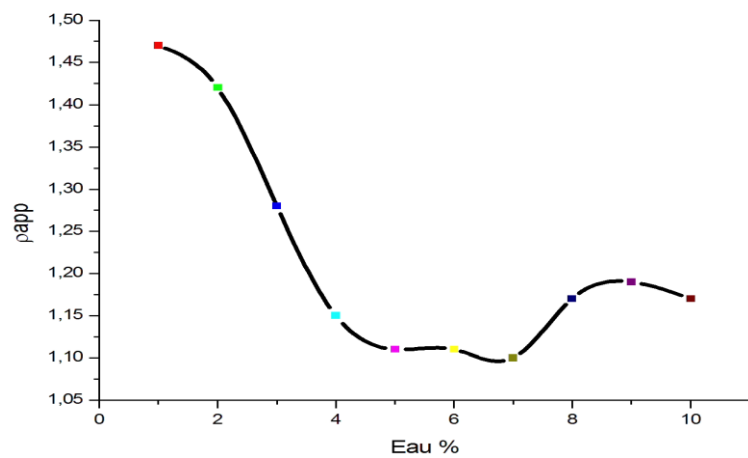


Fig. II-8. Courbe de foisonnement du sable combiné (40 % de S. fin + 60 % de S. grossier)

II.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour les mélanges de mortiers est une eau potable, exempte d'impuretés, maintenue à une température constante, issue du robinet de laboratoire du département de génie civil de centre universitaire d'Ain-Temouchent.

L'analyse chimique a été effectuée au LTPO et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau ci-dessous.

Tab. II-11. *Composition chimique de l'eau utilisée.*

<i>Composant</i>	<i>Quantité (mg/L)</i>
Minéralisation	504.1
Turbidité	0.34
PH	7.1
Calcium	29.75
Magnésium	21.51
Bicarbonate	122
Chlorure	177.3
Sulfate	24.04
Nitrate	3.34
Fer	0.0
Ammonium	0.01

II.2.4. Poudre de verre

La poudre de verre utilisée dans cette étude a été obtenue à partir de plus de 20 Kg de déchet et ce, après nettoyage, concassage, broyage et tamisage à 0.080 mm.



Fig. II-9. *Etapas suivies pour l'obtention de la poudre de verre.*

a) Caractéristiques chimiques de la poudre de verre étudié

La composition chimique de la poudre de verre a été déterminée par une analyse effectuée au LTPO et les résultats sont donc présentés dans le tableau **Tab. II-12**.

Tab. II-12. *Composition chimique de la poudre de verre.*

Propriétés	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	BaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	SiO ₂
Poudre de verre (%)	1.86	0.45	11.40	0.06	0.01	0.064	0.034	0.270	86.45

Les caractéristiques physiques de la poudre de verre sont récapitulées ci-dessous sur le **Tab. II-13**.

Tab. II-13. *Caractéristiques physiques de la poudre de verre.*

Masse volumique apparente lâche	988.0 (kg/m ³)
Masse volumique absolue	2469 (kg/m ³)
Surface spécifique de Blaine	3310 (cm ² /g)

D'après les résultats obtenus, on constate que notre échantillon de verre en poudre a une importante surface spécifique, ce qui signifie que la poudre de verre constitue un ensemble de grains solides de petit calibre, qui peut être inférieur au calibre des grains du ciment. La finesse de mouture obtenue est assez grande que celle de notre ciment, et donc, plus le dosage en poudre de verre est important dans notre mortier, plus la surface spécifique du liant (ciment + PV) augmente.

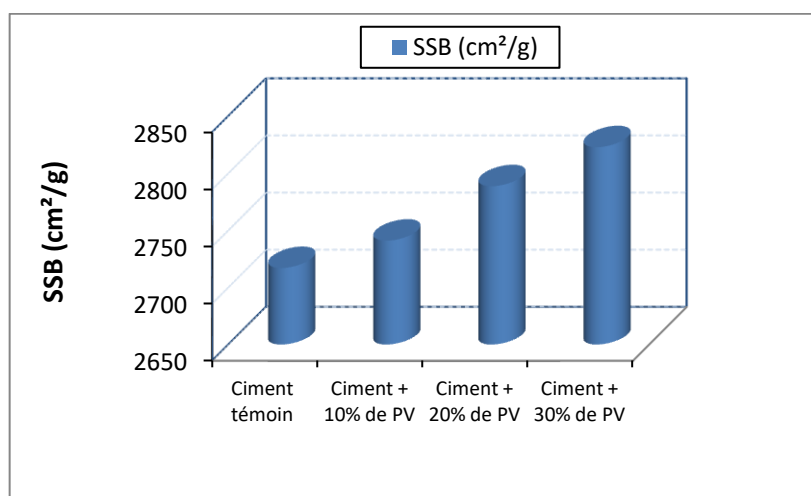


Fig. II-10. *Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de poudre de verre*

Les résultats de la fig. II-10 présente l'effet de la poudre de verre sur la surface spécifique des ciments préparés.

On remarque, que toutes les formulations présentent une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation de pourcentage de poudre de verre par rapport au ciment témoin.

Donc on peut dire que la poudre de verre augmente la surface spécifique du ciment.

II.3. Formulation des mortiers

La composition du mortier est définie par la norme **EN 196-1 (8)**. Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable normalisé et d'une demi-partie d'eau (le rapport eau / ciment = 0.50).

Chaque gâchée, pour trois éprouvettes, d'essai doit comporter 450 ± 2 g de ciment, 1350 ± 5 g de sable et 225 ± 1 g d'eau (le rapport eau/ciment est de 0.5).

Afin de répondre à notre objectif, 12 séries de mortiers ont été confectionnées en faisant varier le dosage en poudre de verre (PV = 0, 10, 20 et 30 %), comme substituant du ciment dans les mortiers étudiés, ainsi que le rapport E/L qui varie de 0.45, 0.55 et 0.65.

Les compositions des différents mortiers étudiés sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf. **Tab. II-14**).

Tab. II-14. Les différentes compositions des mortiers étudiés.

<i>Composition</i>	<i>E/L</i>	<i>Ciment (g)</i>	<i>PV (g)</i>	<i>Sable de mer (g)</i>	<i>Sable concassé (g)</i>
M01	0.45	450	0	540	810
M02	0.45	405	45	540	810
M03	0.45	360	90	540	810
M04	0.45	315	135	540	810
M05	0.55	450	0	540	810
M06	0.55	405	45	540	810
M07	0.55	360	90	540	810
M08	0.55	315	135	540	810
M09	0.65	450	0	540	810
M10	0.65	405	45	540	810
M11	0.65	360	90	540	810
M12	0.65	315	135	540	810

- **Préparation des éprouvettes**

Les différents mortiers testés dans ce travail de recherche sont élaborés conformément aux compositions données dans le tableau **Tab. II-14**. La confection de tous les mortiers a été effectuée dans une température ambiante de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$).

Le mode de préparation des gâchées a été uniformisé pour tous les types de mortiers préparés. En effet, après avoir pesé les quantités du sable (combiné) et du ciment, les composants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant : (eau + ciment) et on commence le malaxage de ces deux constituants pendant 30 secondes avec une vitesse lente. Ensuite, et sans l'interruption de malaxage, le sable est introduit régulièrement (automatiquement (cf. **Fig. II-11**)) pendant les 30 secondes suivantes. Une fois le



Fig. II-11. Malaxeur automatique

sable est introduit, on donne une vitesse rapide au malaxage pendant 30 secondes. Le malaxage est interrompu par la suite pour racler les parois pendant 15 secondes afin d'homogénéiser le mortier. Ce temps d'arrêt de malaxage est au total de 1 minute et 30 secondes. Ensuite, on reprend le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Pour la confection de nos mortiers, nous avons utilisé des moules métalliques normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4 x 4) cm et d'une longueur de 16 cm.

Pour le remplissage de moule (en trois couches), ce moule métallique doit être fixé à la table à choc permettant d'appliquer 60 chocs au moule, en le faisant chuter d'une hauteur constante à chaque fois pendant 60 secondes. La fréquence de la table à choc est donc d'une chute par seconde.

Une fois les moules sont bien remplis à l'aide de la table à choc et le mortier est bien arasé, nous les avons recouvert avec de papier film. La conservation de ces moules a été effectuée à une température d'environ 20°C et le démoulage a été effectué après 24 h de conservation. Une fois les éprouvettes sont démoulées, nous les avons conservés dans de l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$



Fig. II-12. Conservation des éprouvettes dans un bac d'eau.



Fig. II-13. Séchage des éprouvettes à l'air libre pendant 24 h avant l'essai.

II.4. Mesures expérimentales

II.4.1. Essai sur mortier frais

II.4.1.1. Essai de maniabilité

L'essai de maniabilité, défini par les normes NF P 18 452 et NF P 15 437(9), est actuellement en usage dans le monde entier; Il permet d'apprécier la fluidité d'un mortier en fonction du temps nécessaire pour qu'un mortier s'écoule et atteigne un repère gravé sur la face intérieure du moule sous vibration. La figure ci-dessous (Fig. II-14) donne une idée sur cet essai de maniabilité du mortier.

À partir de cet essai (cf. Fig. II-14), il est possible de déterminer la classe d'ouvrabilité des différents mortiers. Le tableau indiquant ces différentes classes est donné dans l'*Annexe H*.

Les résultats obtenus de la maniabilité des différentes formulations étudiés sont présentés dans la Fig. II-15.

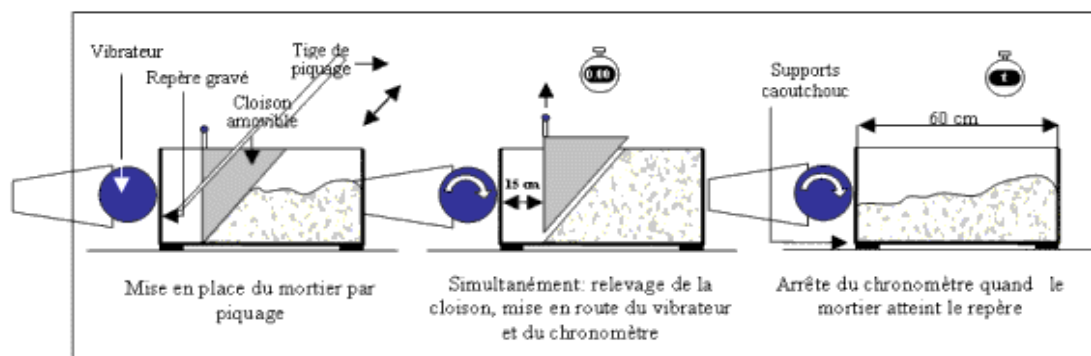


Fig. II-14. Schéma descriptif de l'essai de maniabilité du mortier.

À partir des temps de maniabilité mesurés, l'ouvrabilité du mortier témoin (sans poudre de verre) et pour les différents rapports E/L (0.45, 0.55 et 0.65) est classée très fluide. Cette même classe correspond aussi aux mortiers avec un dosage en PV de 10 et 20 %

mais seulement pour les formulations avec un E/L de 0.55 et 0.65. Par contre les mortiers avec un rapport E/L égal à 0.45 et qui contiennent de la poudre de verre sont très plastique. Ce même résultats (classe: très plastique) est aussi obtenu dans le cas des mortiers avec un dosage en verre de 30 % pour les formulations avec un rapport E/L égal à 0.45 et 0.55.

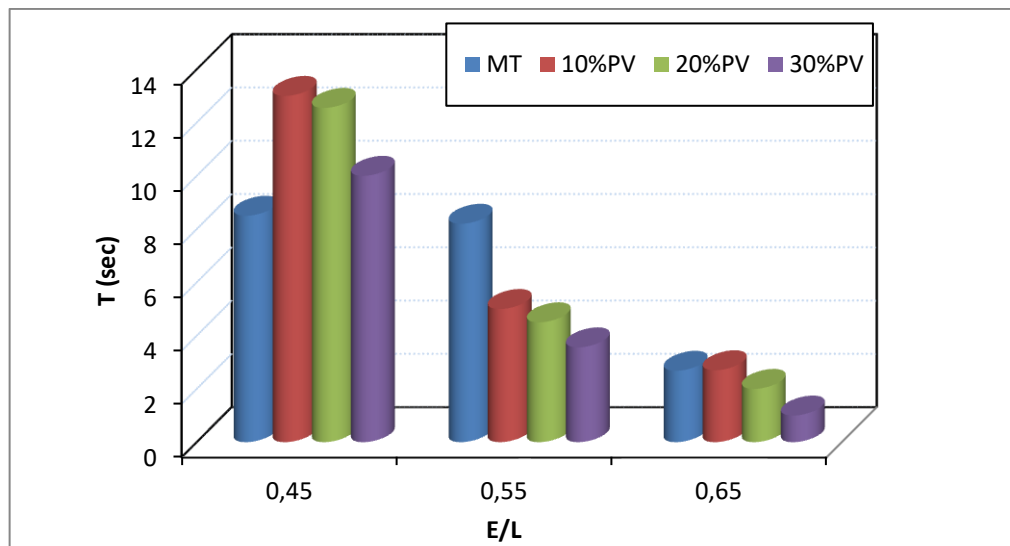


Fig. II-15. *Évolution de la maniabilité des différents mortiers étudiés.*

Alors, on peut constater, à partir de ces résultats, que la maniabilité d'un mortier à base de la poudre de verre peut être plus influencée par le rapport E/L que par le dosage en PV, ce qui nous laisse penser que la poudre de verre est un matériau qui n'absorbe pas l'eau.

II.4.1.2. Mesure de l'air occlus

L'essai de l'air occlus a été effectuée selon la norme (NF P18-353) au moyen d'un aéromètre de mortiers.

En effet, les aéromètres permettent de déterminer l'air occlus dans le matériau cimentaire à l'état frais (lors de la fabrication).

Leur fonctionnement repose sur la loi de Boyle Mariotte relative à la compressibilité des gaz.

Dans notre travail de recherche, l'aéromètre nous permet de suivre l'effet de dosage en poudre de verre sur la quantité d'air introduite dans les mortiers étudiés lors de processus de fabrication.

La **Fig. II-17** présente l'évolution de l'air occlus du mortier en fonction de sa teneur en poudre de verre (en pourcentage). Nous rappelons que chaque résultat présenté dans cette figure correspond à la moyenne arithmétique de trois mesures obtenues par trois essais



Fig. II-16. *Aéromètre pour mortier*

de l'air occlus effectués pour chaque formulation du mortier.

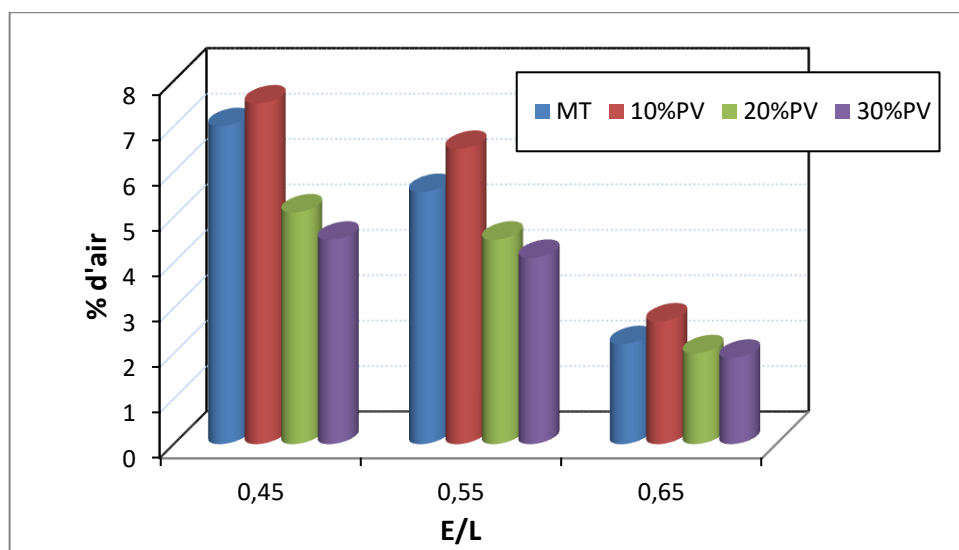


Fig. II-17. Variation de l'air occlus des différents mortiers.

La Fig. II-17 montre que l'air occlus diminue avec le dosage en poudre de verre. Il atteint sa valeur minimale de 2.2 % avec un mortier de E/L = 0.65. Les particules fines de la poudre de verre remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier réduisant ainsi l'air emprisonné dans ces vides.

II.4.2. Essai sur mortier durci

II.4.2.1. Essais destructifs

- *Essais de flexion*

Pour la détermination de la résistance à la flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi-portée au moyen du dispositif de flexion normalisé (flexion à trois points). Il s'agit dans cet essai d'appliquer une charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et de l'augmenter avec une vitesse constante jusqu'à rupture. Un schéma indiquant le principe de cet essai est donné ci dessous

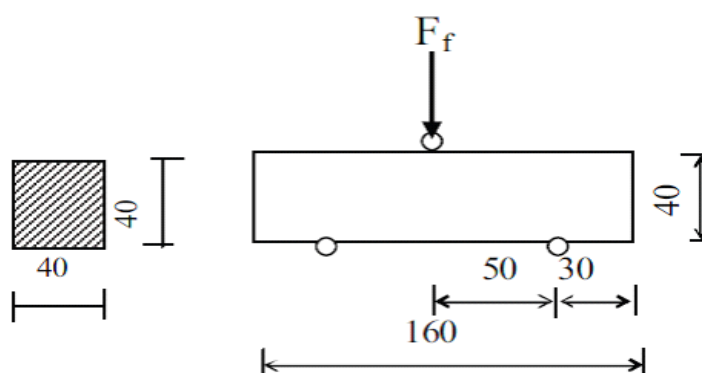


Fig. II-18. Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette (4 x 4 x 16) cm.

- **Essais de compression**

Cet essai consiste à centrer chaque demi-prisme (obtenu suite à l'essai de la flexion) latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement, de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm (cf. **Fig. II-19**). L'application de la charge de compression doit être avec une vitesse constante jusqu'à la rupture.



Fig. II-19. *Dispositif de compression pour mortier.*

II.4.2.2. Essais non destructifs

- **Essai d'auscultation sonique**

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes soniques à travers un élément du matériau (en mortier dans notre cas). Cette vitesse d'ondes peut être déterminée dans les différents sens de l'élément testé (sens longitudinale ou transversale), les quelles ont d'autant plus élevée que le matériau est plus dense donc plus résistant.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance connue. L'appareil comprend un capteur mis en contact avec le matériau testé, un générateur d'onde, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes pour traverser le matériau (un milieu homogène, isotrope et élastique) entre les transducteurs (cf. **Fig. II-20**).

➤ **Paramètres influents la vitesse des ondes ultrasoniques dans un mortier**

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers un mortier résulte du temps mis par les ondes pour le traverser. Alors, pour une composition donnée de mortier, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications du matériau durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- Le type de ciment,

- Le dosage en ciment,
- La nature des granulats,
- La granulométrie,
- L'humidité du béton,
- La maturité du béton,
- Les adjuvants, ...etc.

➤ ***Les avantages de l'essai de propagation des ultrasons***

Selon CHUNG ET LAW (1983)[33] l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides, les détériorations dues au gel-dégel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. Alors, c'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du mortier. Ainsi que l'essai ultrasoniques, non seulement il est utilisé sur des éprouvettes au laboratoire, mai il peut être utilisée autant in-situ sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.

L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel-dégel.

Vue la taille des éprouvettes testées qui sont relativement petites, la méthode de mesure que nous avons utilisé dans notre travail de recherche est une méthode directe. Cette méthode peut être aussi utilisée in-situ sur des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester (voir **Fig. II-20**).

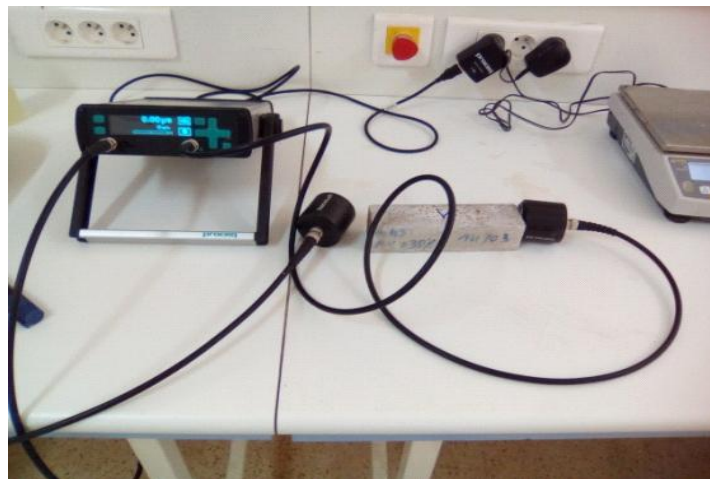


Fig. II-20. *Ultrason (Laboratoire de Génie Civil - Centre Universitaire d'Ain-Temouchent).*

- ***Absorption capillaire***

Dans ce travail de recherche, un essai complémentaire a été effectué déterminant l'absorption capillaire des mortiers étudiés. Ceci est dans le but d'étudier l'influence de la poudre de verre (comme substituant du ciment avec différents dosage) sur cette

propriété physique qui peut compléter notre étude de valorisation de verre sous forme de poudre dans les mortiers.

Le principe de cet essai est de quantifier la masse d'eau absorbée par les mortiers avec différents rapport E/L et avec différents dosages en PV au cours du temps. Cet essai a été effectué sur des échantillons prismatiques à l'âge de 60 jours.

À l'issue de cette période de cure, les échantillons sont prélevés puis séchés pendant 24h dans une étuve à 85 °C. Les éprouvettes sont laissés refroidir par la suite dans un dessiccateur pendant 24h pour une stabilisation thermique. Afin d'éviter tout échange hydrique latéral des échantillons pendant l'essai, cinq faces de chaque éprouvette ont été recouvertes avec de deux couches de la résine époxy laissant une seule face de (4 x 4) cm² sans de la résine (non recouverte).

L'essai d'absorption capillaire est lancé après cette dernière précaution. Pour cela, les éprouvettes testées sont initialement pesées (soit M_0 en g), puis elles sont verticalement supportées sur un bac en verre rempli d'eau distillée dont la surface non recouverte des échantillons sont immergées dans l'eau sur une hauteur de 5 mm (cf. **Fig. II-21**). Aux échéances données et après avoir épongé chaque échantillon, l'évolution de la masse est suivie par pesée (M_i) après 5, 10, 15, 30 et 60 min de l'immersion dans de l'eau.

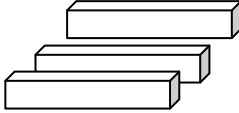
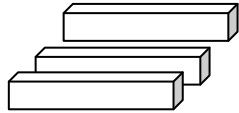
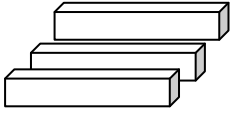


Fig. II-21. *Essai d'absorption capillaire.*

II.5. Mesures expérimentales

Le **Tab. II-15** décrit, pour chaque type des essais effectués, le nombre des éprouvettes préparés en mortier que nous avons testés dans cette étude expérimentale à des différents âges

Tab. II-15. Éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale.

<i>Type d'essai</i>	<i>Éprouvettes préparées</i>	<i>Nombre des éprouvettes testés</i>
<p align="center"><u>Essai Ultrason</u></p>	 <p align="center">3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois rapports E/L différents et pour quatre dosages en PV différents, l'essai Ultrason a été effectué pour quatre âges différents aussi (7, 14 28 et 60 jours)</p> <p>N = 3 (ép) x 3 (E/L) x 4 (%PV) x 4 (âges) = 144</p>	<p align="center">144</p>
<p align="center"><u>Essai de flexion</u></p>	 <p align="center">3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois rapports E/L différents et pour quatre dosages en PV différents, l'essai de flexion a été effectué pour quatre âges différents aussi (7, 14 28 et 60 jours)</p> <p>N = 3 (ép) x 3 (E/L) x 4 (%PV) x 4 (âges) = 144 ép</p>	<p align="center">144</p>
<p align="center"><u>Essai d'absorption capillaire</u></p>	 <p align="center">3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois différents rapports E/L et pour quatre dosages en PV différents, l'essai d'absorption capillaire a été effectué sur des éprouvettes de 60 jours.</p> <p>N = 3 (ép) x 3 (E/L) x 4 (%PV) x 1 (âge) = 36 ép</p>	<p align="center">36</p>

Les différentes mortiers fabriquées pour la réalisation de ce travail expérimental, ont été soumises à plusieurs campagnes d'essais, conformément à l'organigramme donné sur la **Fig. II-22**.

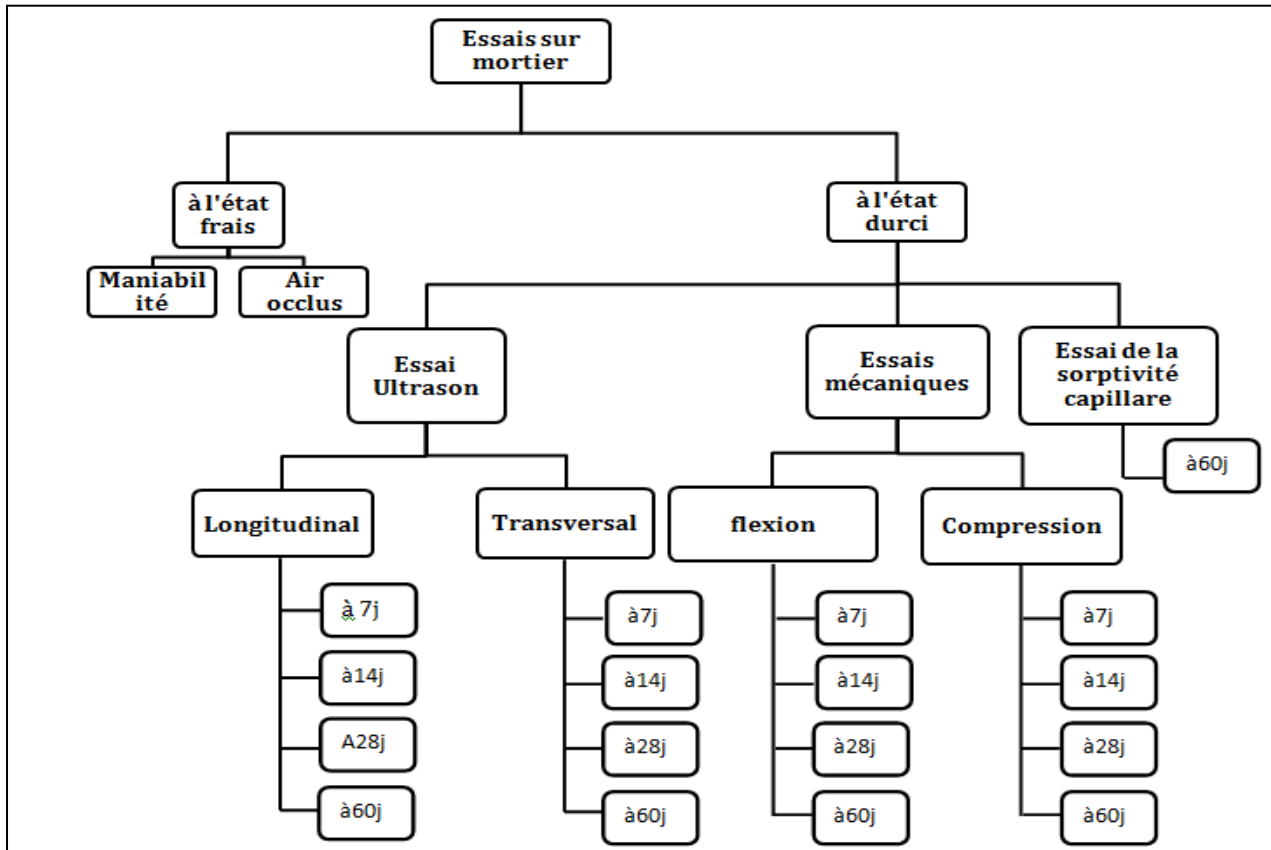


Fig. II-22. Mesures expérimentales effectuées dans cette étude.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une caractérisation des différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie ainsi que des dispositifs expérimentaux et des modes opératoire. Les premiers résultats de la maniabilité et de l'air occlus montrent que la poudre de verre peut influencer sur ces deux paramètres physiques à l'état frais. Nous avons constaté que la poudre de verre n'est pas un matériau absorbant de l'eau, car la maniabilité du mortier était plus influencée par le rapport E/L que par le dosage en PV. Par ailleurs, la finesse de la poudre de verre a permis de minimiser l'air occlus dans le mortier à l'état frais. Finalement, les méthodes expérimentales (dispositifs) choisies dans ce chapitre sont de très grand intérêt et peuvent être fiable pour effectuer une

étude pour la valorisation de la poudre de verre dans les mortiers, telles que la méthode de la propagation des ondes ultrasoniques.

Chapitre III : Analyse et discussions des résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les mortiers étudiés à l'état durci (résistance à la flexion et à la compression ainsi que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (en sens longitudinal et transversal) et l'absorption capillaire du matériau), conformément aux modes opératoires mentionnés dans le chapitre II.

Une analyse et des discussions des résultats obtenus, suivies d'une comparaison entre les différentes méthodes de mesures, seront également présentées dans ce chapitre. La vitesse des ondes ultrasoniques mesurées sur des éprouvettes du mortier de différents âges sont aussi présentées en fonction de la résistance mécanique du matériau. Par ailleurs, des corrélations sont effectuées dans ce chapitre entre les résultats des propriétés physiques à l'état frais et durci (air occlus et absorption capillaire), et les résultats des propriétés mécanique tels que la résistance à la compression du matériau durci. Par conséquent, des équations mathématiques sont élaborées dans ce chapitre, reliant les différents paramètres mesurés à l'état frais et durci à des âges différents.

III.2. Influence de la poudre de verre sur la résistance mécanique du mortier

III.2.1. Résistance à la flexion

Les deux paramètres qui caractérisent le comportement en flexion des matrices cimentaires sont la première fissure et la résistance ultime en flexion [34].

Ces paramètres sont très importants et utiles pour des structures cimentaires sans renforcement. Dans cette partie, nous allons examiner le comportement à la flexion des différents mortiers étudiés (avec différents rapport E/L) et en présence de la poudre de verre avec différents dosages, en mesurant la résistance ultime en flexion.

Les résultats présentés ci-dessous sur les **Figs. III-1, III-2 et III-3**, correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs de résistance, obtenues par trois mesures effectuées à chaque âge différent (à 7, 14, 28 et 60 jours) du mortier.

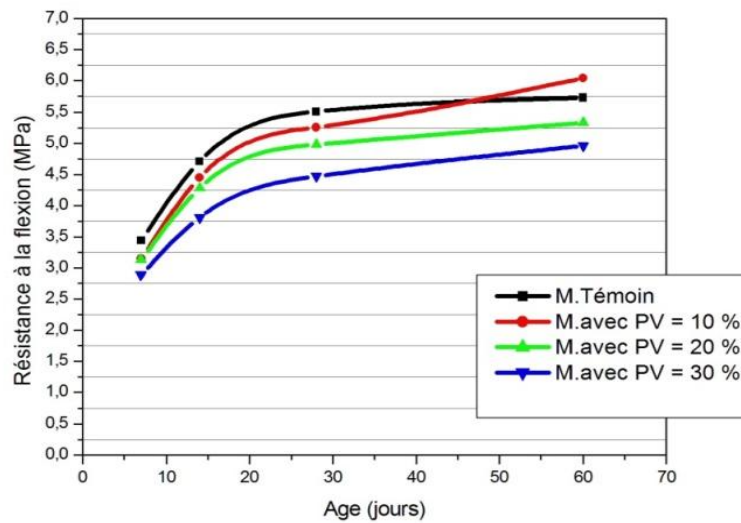


Fig. III-1. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.45$ et différents pourcentage en PV.

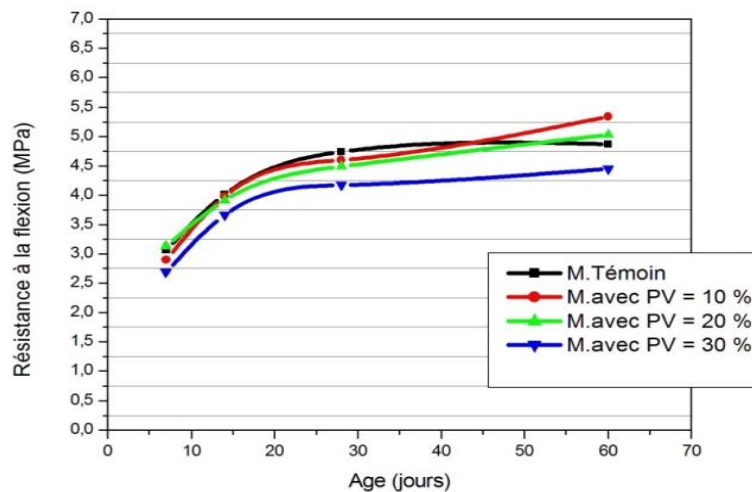


Fig. III-2. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentage en PV.

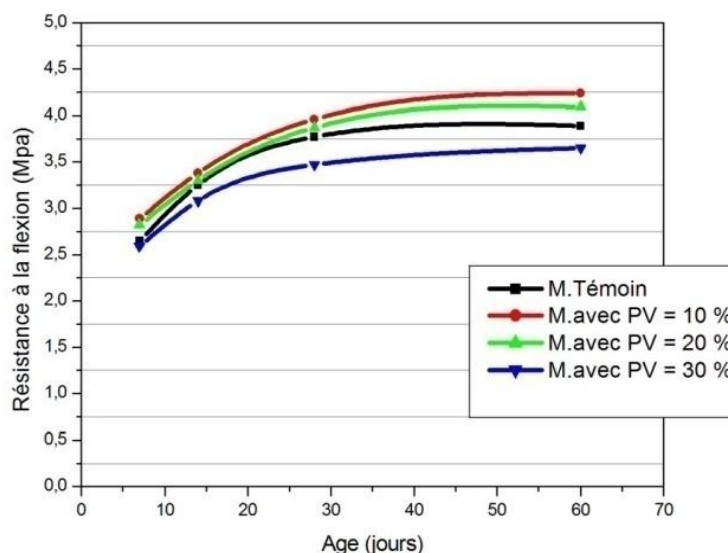


Fig. III-3. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers avec $E/L=0.45$ et différents pourcentage en PV.

D'après, les résultats illustrés sur les **Figs. III-1, III-2 et III-3**, nous avons remarqué une augmentation de la résistance à la flexion en fonction de l'âge du matériau. Ce même résultat est enregistré pour tous les mortiers testés (avec différents rapports E/L et pour les différents dosages en PV (0, 10, 20 et 30 %). À l'âge de 28 jours, les résistances à la traction par flexion des mortiers témoins sont 5.5, 4.7 et 3.8 MPa, respectivement pour les mortiers avec des rapports E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65.

Au jeune âge (à moins de 28 jours), cette évolution de la résistance à la flexion des mortiers contenant de la poudre de verre (10, 20 et 30 % de PV) peut être moins importante que celle du mortier témoin (sans PV). Ceci est plus remarqué dans le cas des mortiers avec un rapport de E/L égal à 0.45 et 0.55. Par ailleurs, au-delà de 28 jours et jusqu'à 60 jours les résultats obtenus montrent un effet inverse: l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers témoins est plus importante que celle des mortiers qui contiennent de la poudre de verre. Ces résultats nous laissent penser que la poudre de verre a un effet sur la résistance mécanique du matériau à long terme. Les mortier avec un rapport E/L égal à 0.65 représentent une exception de ces constatations indiquées ci-dessus à cause de son rapport E/L élevé (teneur importante en eau et donc porosité élevée) conduisant à une résistance plus faible. Les mortier avec un dosage en PV égal à 30 % donnent des résultats de résistance les plus faibles par rapport au autres mortiers. Car la substitution d'une grande quantité du ciment peut conduire à moins de liaisons chimiques et à une hydratation incomplète du matériau.

Ces premiers résultats de la résistance à la flexion des mortiers avec différents dosage en PV indique que les mortiers à base du 10 % de PV, et pour les différents rapports de E/L , représentent toujours les meilleurs valeurs de résistance en flexion à l'âge de 60 jours par rapport aux mortiers témoins (sans PV). Le taux d'augmentation en résistance de ces mortiers avec 10 % de PV est estimé respectivement pour les mélanges avec E/L égal à 0.45, 0.55 et 0.65 par 5.4, 9.6 et 9 % par rapport aux mortiers témoins.

III.2.2. Résistance en compression

La résistance en compression est une donnée importante pour la conception d'un matériau cimentaire. Les autres propriétés mécaniques, comme la résistance à la traction et à l'effort tranchant, le module d'Young, la relation contrainte déformation, sont reliées diversement à la résistance en compression. Les résultats sur la résistance à la compression sont également employer pour qualifier et quantifier l'efficacité des additions minérales remplacées du ciment dans un système cimentaires [35].

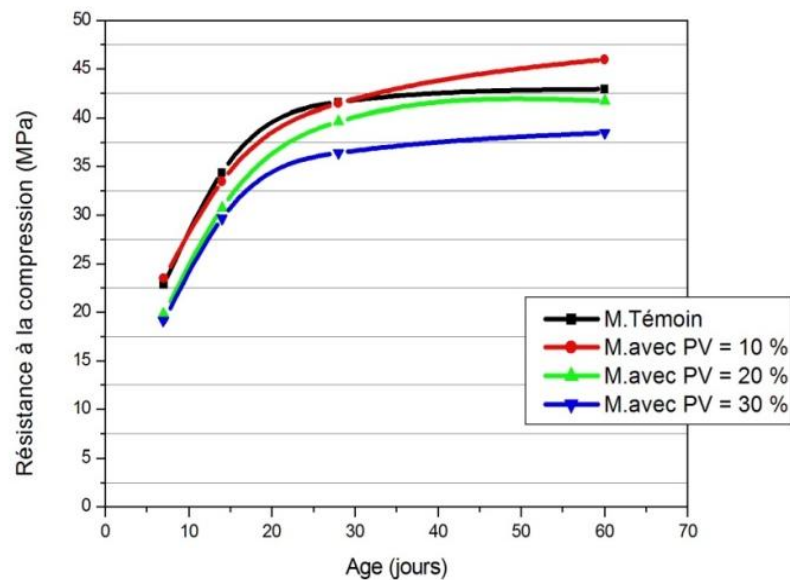


Fig. III-4. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.45$ et différents pourcentage en PV.

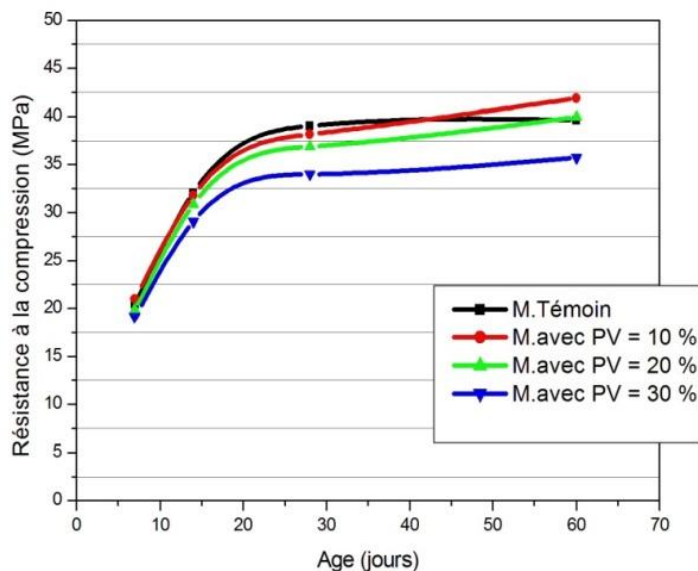


Fig. III-5. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.55$ et différents pourcentage en PV.

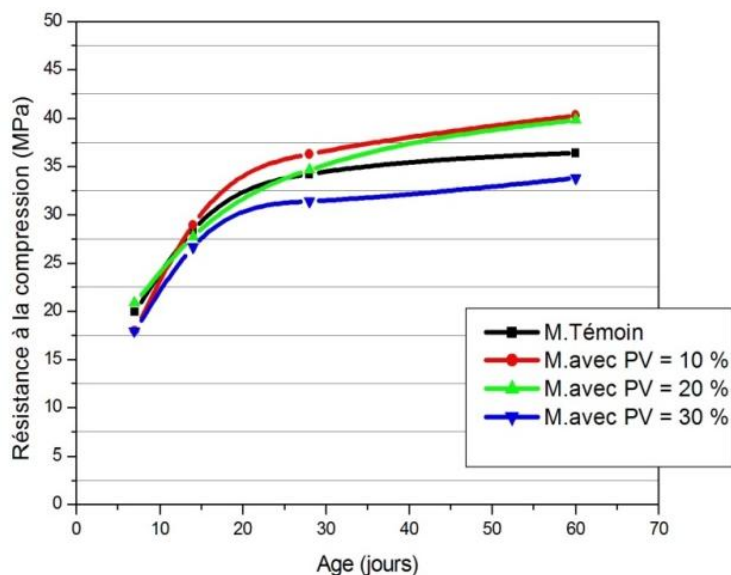


Fig. III-6. Evolution de la résistance à la compression des mortiers avec $E/L=0.65$ et différents pourcentage en PV.

Les figures présentées ci-dessus (cf. **Figs. III-4, III-5 et III-6**) montrent l'évolution de la résistance en compression des différents mortiers étudiés en fonction de leurs âges. Nous rappelons que les valeurs illustrées sur ces figures correspondent à la moyenne arithmétique de six valeurs de résistance à la compression mesurées sur les six demi-éprouvettes obtenues après l'essai de la flexion à trois points (voir les **Figs II-17 et II-18**).

Les **Figs. III-4, III-5 et III-6**, montrent que la résistance en compression augmente en fonction de l'âge du matériau (à 7, 14, 28 et 60 jours). Cela est remarquable pour tous les mortiers étudiés avec les différents dosages en PV (0, 10, 20 et 30 %). Nous remarquons aussi que cette évolution a la même allure, pour tous mortiers testés avec différents rapports E/L. Car la confection des nos mortiers a été effectuée de la même manière et avec les même matériaux granulaire.

Notons qu'à l'âge de 28 jours, les résistances en compression des mortiers témoins (sans PV) sont 41.5, 39.1 et 35.2 MPa respectivement pour les mortiers avec des rapports E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65.

On remarque aussi, à partir des résultats indiqués sur les **Figs. III-4, III-5 et III-6** que la résistance des mortiers à base de poudre de verre, est relativement inférieure par rapport à celle des mortiers témoins au jeune âge, principalement pour quand le rapport E/L est égal à 0.45 et 0.55.

Au delà de 28 jours, l'évolution de la résistance en compression (pente de la courbe), pour tous les mortiers contenant de la poudre de verre, est plus importante par rapport à celle du mortier témoin (sans PV). Cela est plus remarquable quand le rapport E/L est plus important. Ceci peut être expliqué par la quantité de liant (ciment + poudre) qui est mieux hydraté quand la quantité d'eau est plus importante (E/L élevée). Alors, une

quantité du liant, qui peut rester toujours anhydre dans le cas du mortier avec E/L égal 0.45, conduit à un retardement dans cette évolution de la résistance à l'âge de 60 jours (à long terme généralement), par rapport aux mortiers dont lesquels l'hydratation du liant est considérée quasi complète (avec E/L égaux à 0.55 et 0.65).

En outre, et similairement aux résultats de la résistance à la flexion, les mortiers préparés avec un dosage en PV égal à 10 %, représentent toujours les meilleurs résultats de la résistance en compression, tel qu'il est le rapport E/L. Donc, un surdosage en poudre de verre (30 % par exemple) conduit à une diminution dans la résistance mécanique par le fait que les liaisons chimiques du gel C-S-H peuvent être minimisées avec une quantité moindre en ciment et par conséquent une résistance mécanique plus faible est enregistrée à court et à long terme. Les résultats obtenus montrent aussi que les mortiers avec un rapport E/L égal à 0.65 donnent toujours des résistances à la compression les plus faibles par rapport aux autres. Ceci est expliqué par le fait qu'un rapport E/L important conduit à une porosité ouverte du matériau élevée et, par conséquent, à une faible résistance mécanique.

À l'âge de 60 jours, les taux d'augmentation en résistance à la compression des mortiers qui contiennent 10 % de PV sont 7.1, 5.7 et 10.5 % respectivement pour les mélanges avec E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65.

D'après ces résultats mécaniques à la flexion et à la compression, nous constatons que:

- La poudre de verre améliore la résistance du mortier à long terme. Cela veut dire que cet ajout a un effet pouzzolanique dans les matériaux cimentaires (ici des mortiers ordinaires).
- Les résistances mécaniques des mortiers ordinaires sont plus importantes avec une substitution de 10 % ciment par la poudre de verre par rapport à celles des mortiers témoins (sans PV). Ainsi qu'un surdosage en PV (30 % par exemple) conduit à une diminution en résistance mécanique. Les mortiers avec 20 % en PV donnent des résistances mécaniques presque identiques à celles du matériau témoin, principalement à court terme.

III.2.3. Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau

Dans le but de comparer les résistances à la compression et à la traction par flexion des mortiers étudiés, et de vérifier les évolutions des deux résistances, les Figures ci-dessous (de la **Fig. III-7** jusqu'à la **Fig. III-18**), présentent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la résistance en flexion de tous les mortiers, objet de cette étude, avec des rapports E/L et des dosages en PV différents.

Nous pouvons constater, à partir de ces résultats obtenus (cf. de la **Fig. III-7** jusqu'à la **Fig. III-18**), que la résistance à la compression augmente avec la résistance à la traction par flexion au cours du temps (en fonction de l'âge du matériau) pour l'ensemble des mortiers testés.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.45

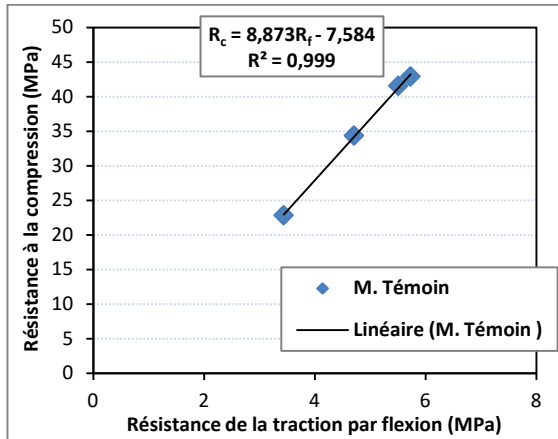


Fig. III-7. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier témoin avec E/C = 0.45.

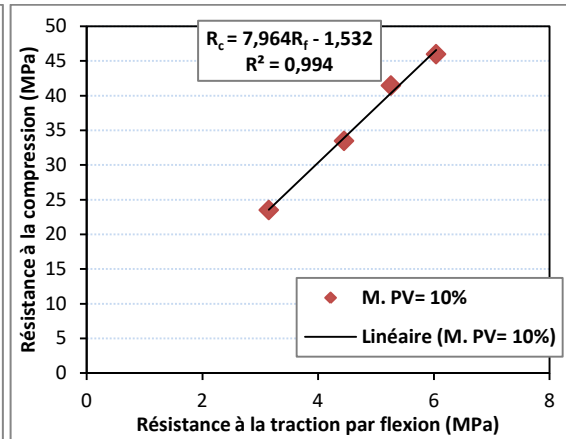


Fig. III-8. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10 % de PV et E/C = 0.45.

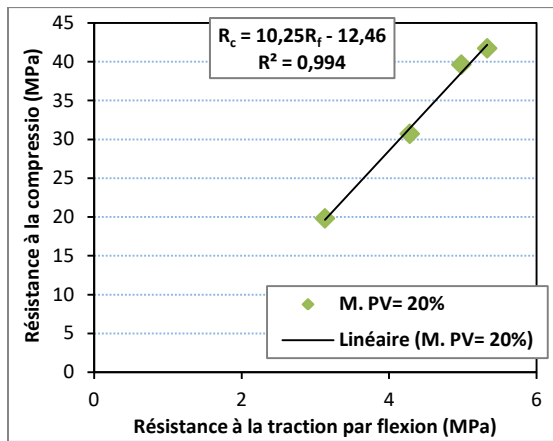


Fig. III-9. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV et E/C = 0.45.

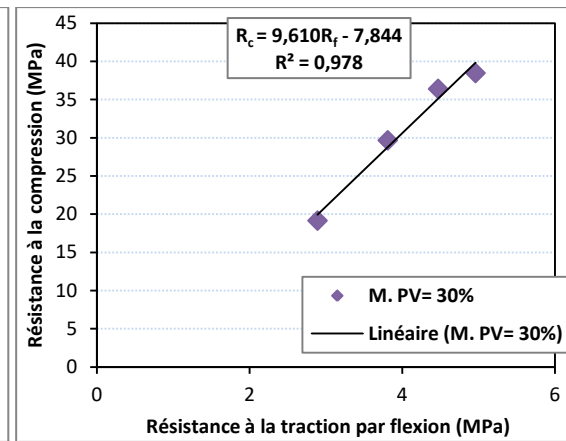


Fig. III-10. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 30 % de PV et E/C = 0.45.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.55

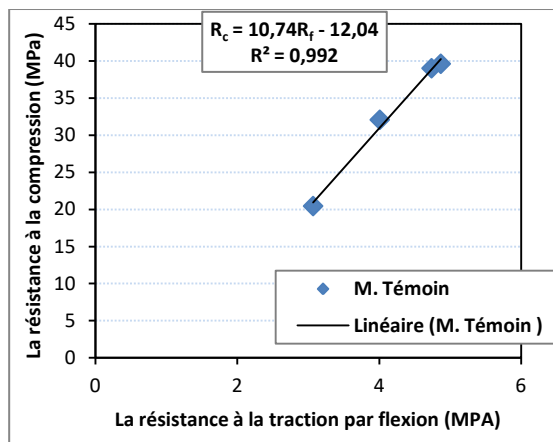


Fig. III-11. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier témoin avec E/C = 0.55.

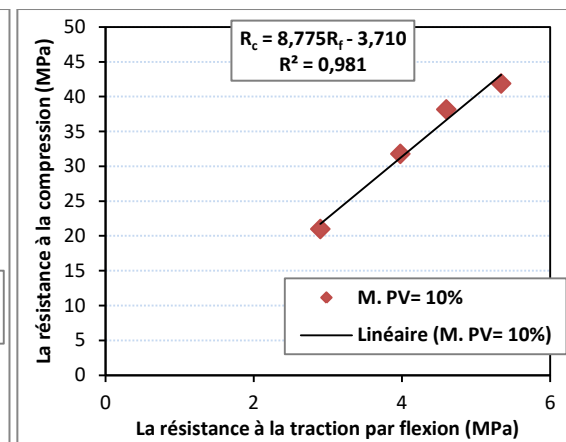


Fig. III-12. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10 % de PV et E/C = 0.55.

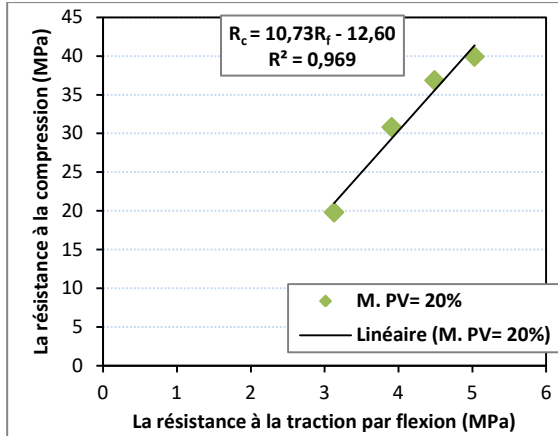


Fig. III-13. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV et $E/C = 0.55$.

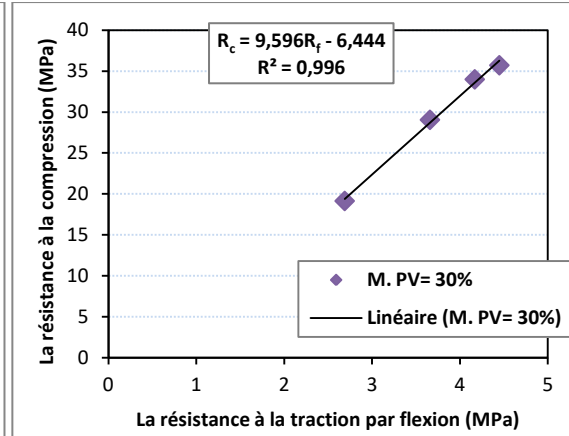


Fig. III-14. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 30 % de PV et $E/C = 0.55$.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.65

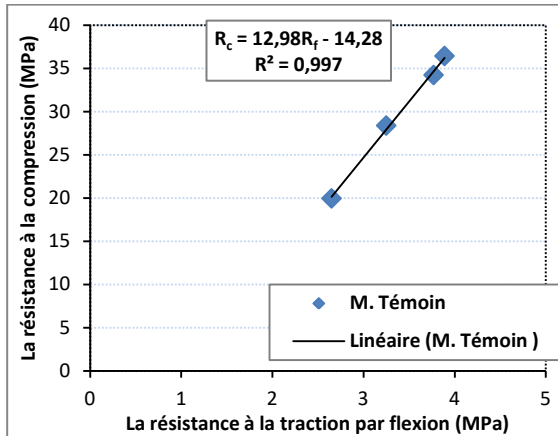


Fig. III-15. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier témoin avec $E/C = 0.65$.

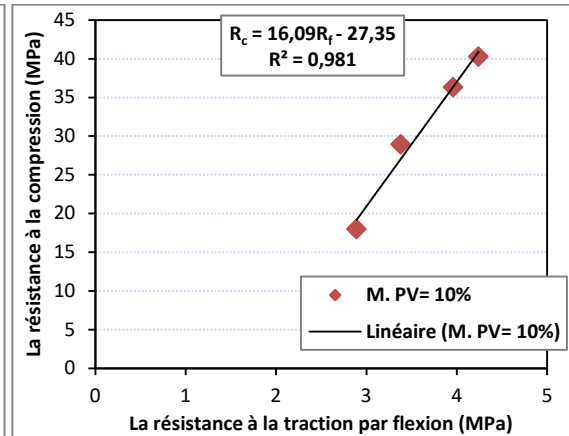


Fig. III-16. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 10 % de PV et $E/C = 0.65$.

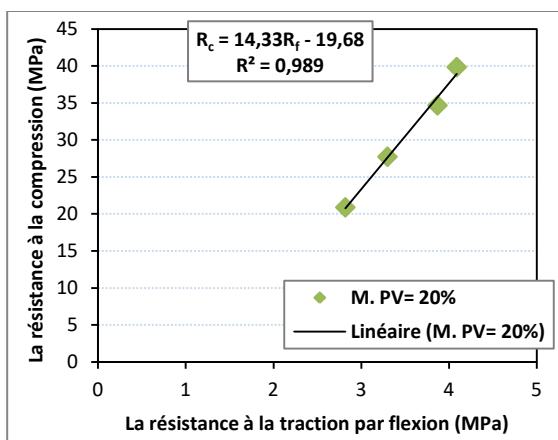


Fig. III-17. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 20% de PV et $E/C = 0.65$.

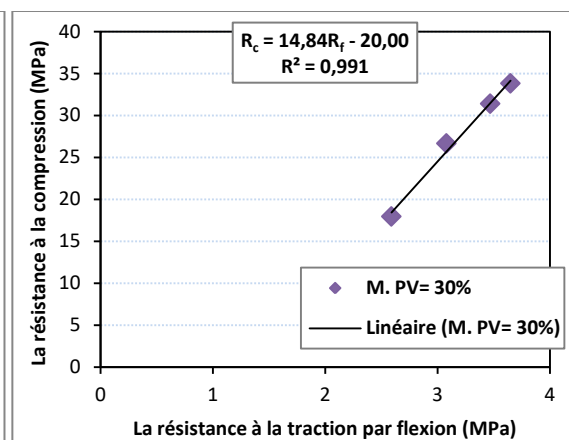


Fig. III-18. Résistance à la compression en fonction de la résistance à la flexion du mortier avec 30 % de PV et $E/C = 0.65$.

Les résultats obtenus montrent clairement que cette évolution, entre les deux résistances (à la flexion et à la compression) des différents mortiers, peut être estimée correctement par des fonctions linéaires, dont les équations sont données sur les figures ci-dessus (cf. de la **Fig. III-7** jusqu'à la **Fig. III-18**) sous forme $R_c = a (R_t) + c$.

À partir des équations illustrées sur les figures, on peut constater que le coefficient "a" augmente quand le rapport E/L est plus important. Alors, plus le rapport E/L est important (la teneur en eau du matériau est plus importante et donc avec une porosité plus élevée), plus la pente de la droite, obtenue de cette évolution entre les deux résistances, est plus importante. Pour les mortiers témoins par exemple, si la résistance à la compression du mortier avec un rapport E/L égal à 0.45 est d'environ 8 fois sa résistance à la flexion (cf. **Fig. III-7**), pour un mortier avec un rapport E/L égal à 0.55, ce rapport entre les deux résistances (R_c et R_t) est au alentour de 10 fois (cf. **Fig. III-11**), comme il est d'environ 12 fois dans le cas de mortier avec un rapport E/L égal à 0.65 (cf. **Fig. III-7**).

Alors, pourtant que la substitution d'un pourcentage du ciment par la poudre de verre influe sur la résistance mécanique du matériau, nous pouvons dire finalement que l'influence du rapport E/L est plus significative sur l'évolution de la résistance (à la flexion et à la traction) que l'influence de dosage en PV.

III.3. Influence du rapport E/L sur la résistance mécanique du mortier

L'influence majeure du rapport E/L sur la résistance du matériau cimentaire a été confirmée par plusieurs chercheurs [36]. La résistance du mortier est représentée par la valeur limite de résistance de l'éprouvette en essai de compression. Cette résistance évolue grâce à la réaction d'hydratation entre le liant (ciment + addition) et l'eau. Il est donc bien entendu que la résistance du mortier dépend directement du rapport eau/liant.

À partir des résultats obtenus, nous avons pu construire des histogrammes présentant l'évolution de la résistance à la traction par flexion et à la compression en fonction de rapport E/L des différentes formulations des mortiers étudiés. Ces histogrammes sont présentés ci-dessous dans les **Figs. III-19** et **III-20**.

Selon les résultats indiqués en histogrammes, pour les quatre différents dosages en poudre de verre (0, 10, 20 et 30 % de PV), la résistance à la flexion et à la compression à 28 jours semble atteindre la valeur maximale dans le cas d'un rapport E/L égal à 0.45. Ceci correspond à la conclusion suivante : il existe une quantité limite d'eau qui assure à la fois une consistance normalisée de la pâte et une bonne condition d'hydratation. Pour les mortiers avec un rapport E/L égal à 0.65, (ce qui correspond à la teneur maximale en eau), les résistances, à la flexion et à la compression, diminuent dans le cas de différents dosages en PV. Ce rapport E/L relativement important (0.65), conduit à une porosité élevée et par conséquent à une compacité plus faible. Cette dernière par laquelle la résistance mécanique du matériau cimentaire est gouvernée.

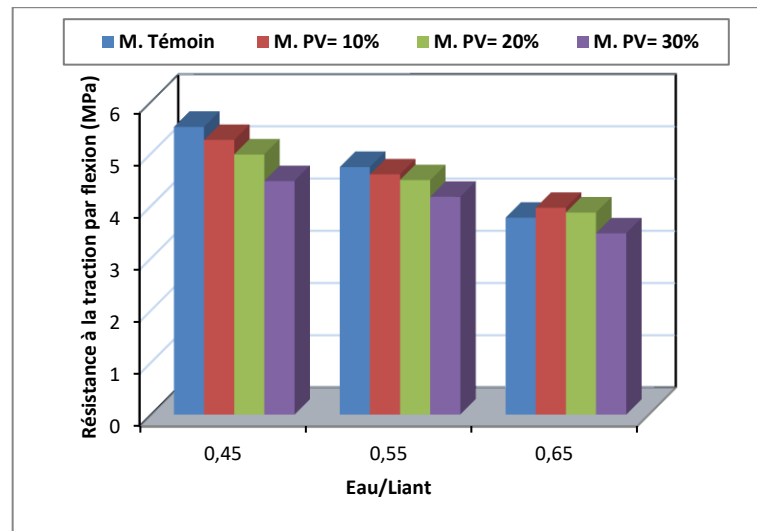


Fig. III-19. Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction du rapport E/L.

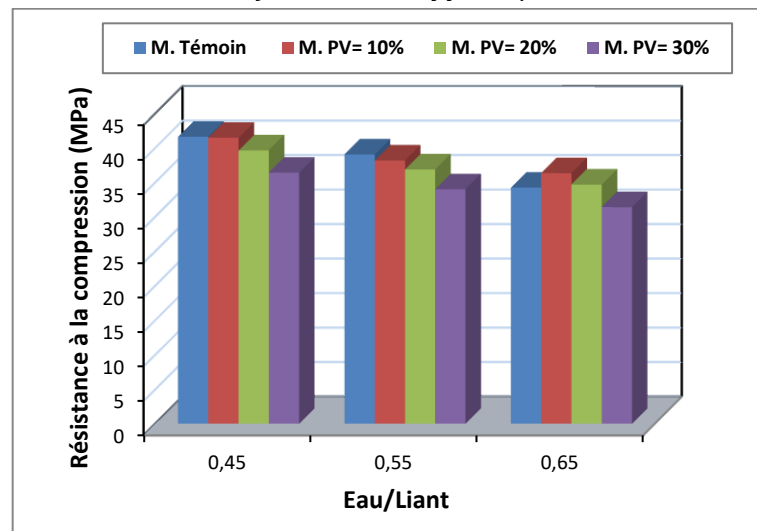


Fig. III-20. Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L.

La résistance décroît avec le dosage pondéral de l'eau ; c'est pourquoi le facteur E/L est déterminant pour la résistance du mortier, c'est-à-dire plus le rapport E/L diminue plus le matériau est compacte et donc la résistance à la flexion et à la compression est plus importante.

III.4. Évaluation de la résistance mécanique à l'aide de l'Ultrason

Dans cette partie d'étude, l'essai de mesure de la propagation des ondes ultrasonique a été effectué pour la détermination des caractéristiques mécaniques des mortiers étudiés, principalement la résistance en compression calculée à partir du module d'élasticité. Ce dernier est estimé à partir des mesures de la vitesse du son dans les sens longitudinal et transversal de chaque éprouvette du mortier testées.

III.4.1. Mesures de la vitesse d'ondes ultrasoniques

Les valeurs présentées dans cette partie, sur les figures ci-dessous, correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs obtenues par trois mesures de la vitesse du son dans le sens longitudinal et transversal de l'éprouvette du mortier pour chaque âge du différents (à 7, 14, 28 et 60 jours. Notons que ces mesures de la vitesse du son (essai non destructif) ont été effectuées sur toutes les éprouvettes du mortier de $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, avant chaque essai de flexion.

III.4.1.1. Vitesse du son mesurée dans le sens longitudinal

Pour les différents mortiers étudiés, et aux différents âges du matériau, les **Figs. III-21**, **III-22** et **III-23** présentent les variations de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques mesurée dans le sens longitudinal.

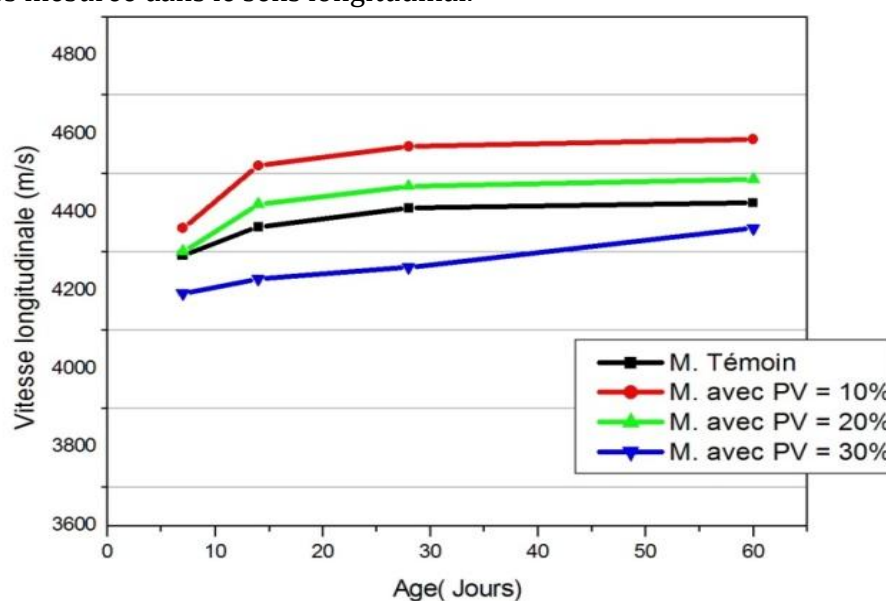


Fig. III-21. Evolution de la vitesse longitudinale en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$.

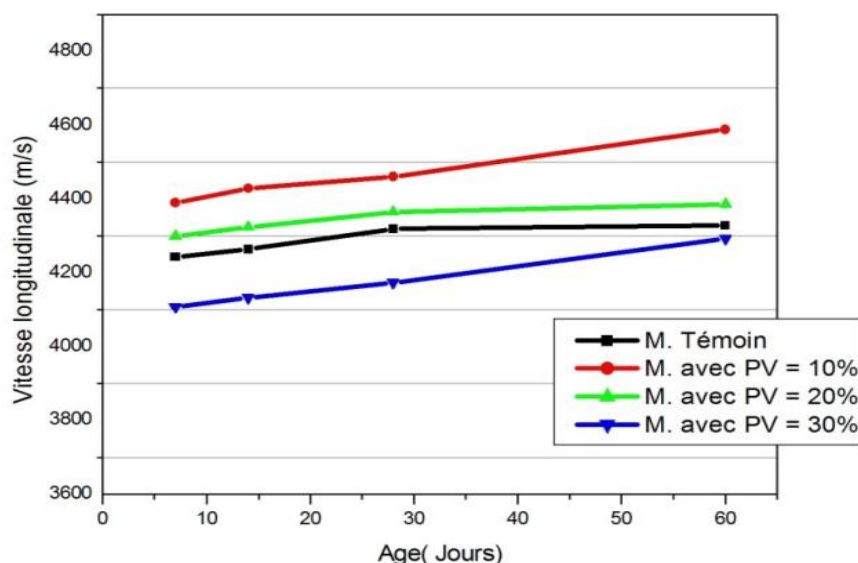


Fig. III-22. Evolution de la vitesse longitudinale en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport $E/L=0.55$.

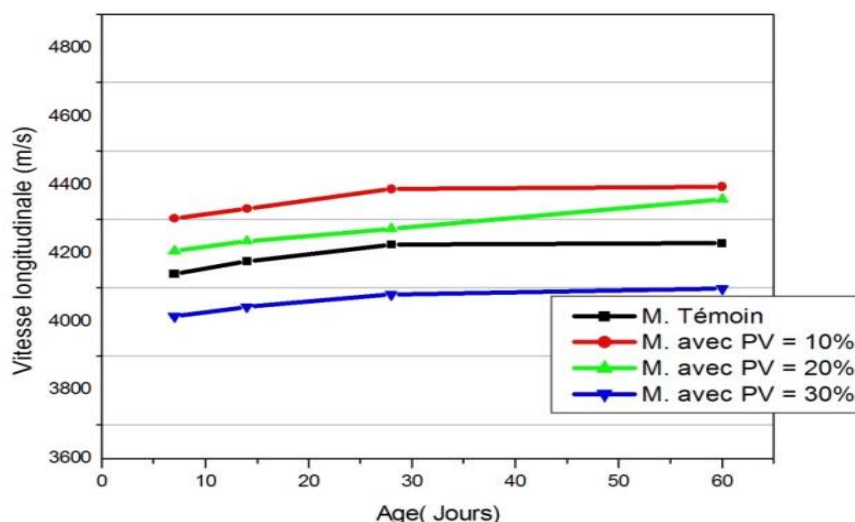


Fig. III-23. Evolution de la vitesse longitudinale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L=0.65$.

Les résultats indiqués sur les **Figs. III-21, III-22 et III-23**, montrent que la vitesse du son est influencée par le rapport E/L , le dosage en poudre de verre ainsi que par l'âge du matériau. La vitesse de la propagation des ondes dans le sens longitudinal augmente en fonction de l'âge du matériau. Cette augmentation devient plus importante à l'âge de 60 jours à cause d'un effet pouzzolanique du la poudre de verre qui peut rendre le mortier plus compacte à long terme. Pour tous les différents rapports de E/L , une augmentation de la vitesse du son à travers les mortiers à base de 10 et 20 % de PV est enregistrée par rapport aux mortiers témoins (sans PV). Par contre, nous avons enregistré pour les différents âges étudiés, une vitesse du son dans le sens longitudinal plus faible, dans le cas des mortiers à base de 30 % de PV.

III.4.1.2. Vitesse du son mesurée dans le sens transversal

Les **Figs. III-24, III-25 et III-26** présentent aussi les variations de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, mesurée dans le sens transversal de l'éprouvette du mortier, à des âges différents.

Les résultats obtenus dans le cas de la vitesse mesurée dans le sens transversal de l'éprouvette sont en concordance avec ceux obtenus dans le cas des mesures effectuées dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Cela confirme d'abord la fiabilité de dispositif "ultrason" utilisé dans cette campagne de mesures, ainsi que la bonne confection la préparation méticuleuse de nos éprouvettes du mortier.

De plus, les résultats montrent que la vitesse des ondes ultrasoniques, à travers le matériau dans les deux sens (longitudinal et transversal), est toujours plus supérieur dans le cas des mortiers avec un dosage de 10 % de PV par rapport aux autres mortiers, ce qui correspond à des résistances plus meilleures dans le cas de ces mortiers. De même, les mortiers avec 30 % de PV donnent toujours les vitesses les plus faibles correspondant aux résistances plus faibles, mesurées dans la partie précédente à l'aide d'une presse hydraulique (essai destructif).

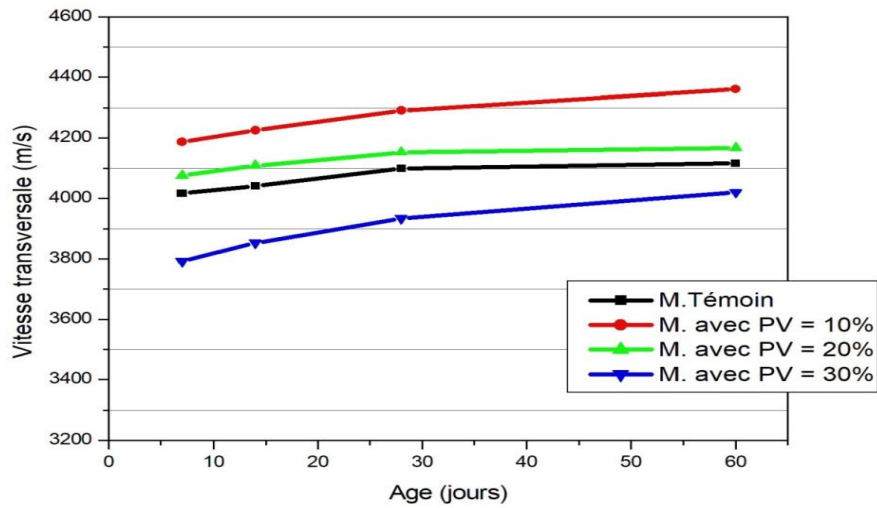


Fig. III-24. Evolution de la vitesse transversale en fonction du l'âge des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$.

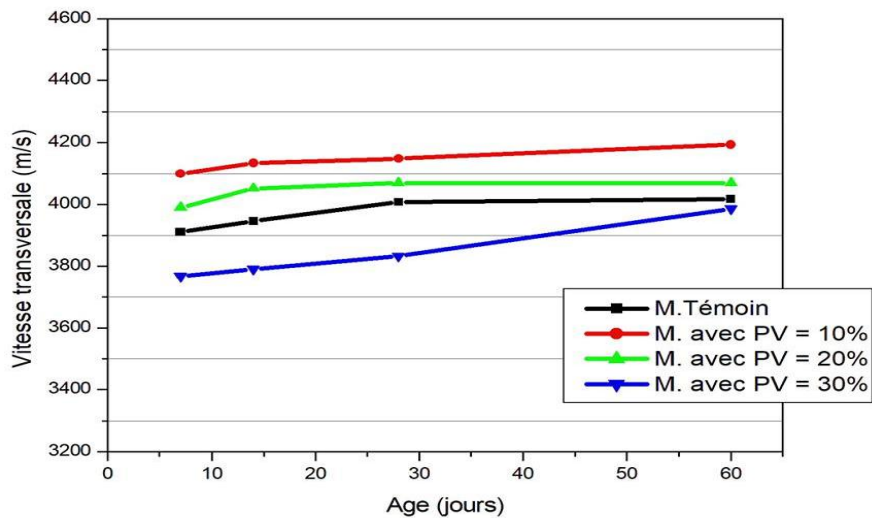


Fig. III-25. Evolution de la vitesse transversale en fonction du temps des mortiers avec $E/L=0.55$.

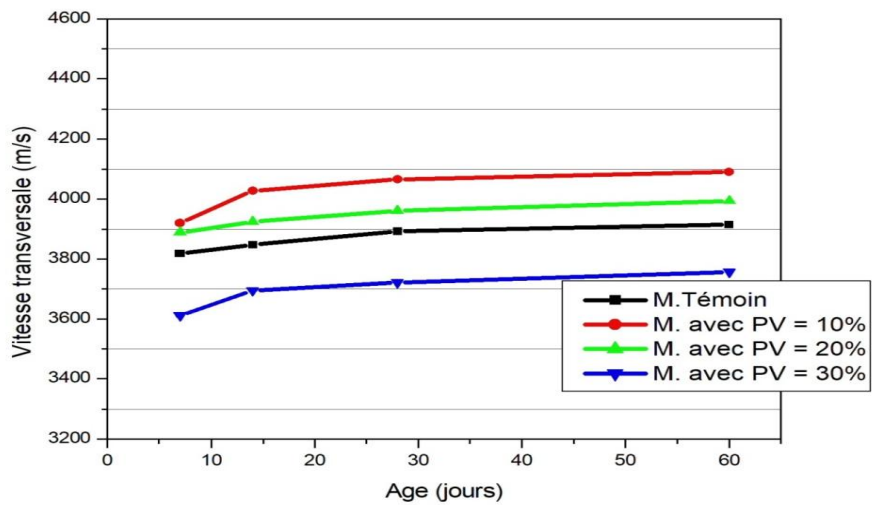


Fig. III-26. Evolution de la vitesse transversale en fonction du temps des mortiers avec $E/L=0.65$.

III.4.2. Influence du rapport E/L sur la vitesse des ondes ultrasoniques

Les Figs. III-27 et III-28 ci-dessous, représentent respectivement la variation de la vitesse longitudinale et transversale mesurées sur des éprouvettes de différents mortiers à l'âge de 28 jours en fonction de leurs rapports E/L.

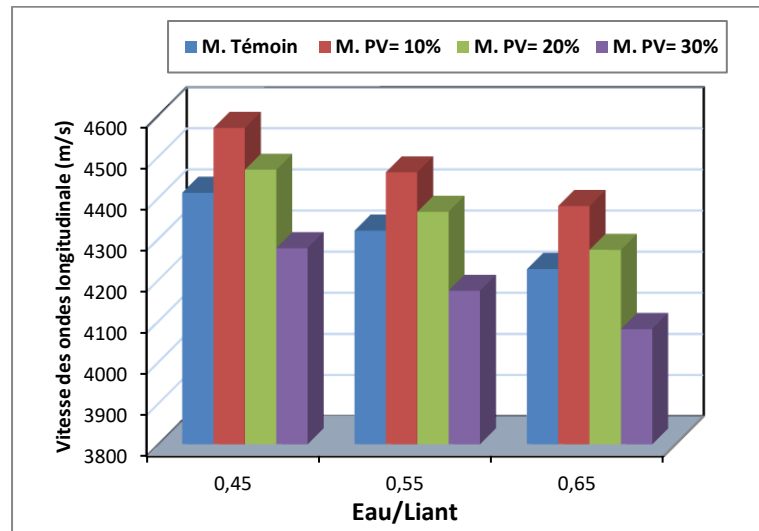


Fig. III-27. Variation de la vitesse longitudinale en fonction du rapport E/L.

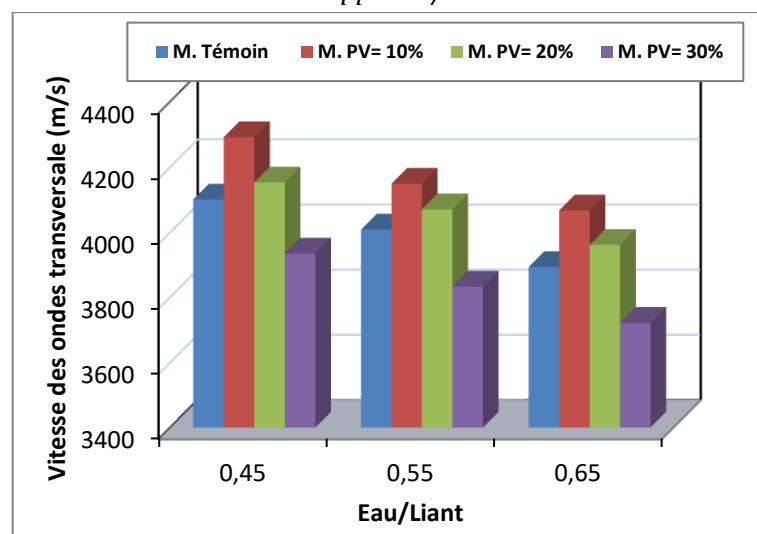


Fig. III-28. Variation de la vitesse longitudinale en fonction du rapport E/L.

On remarque que, pour toutes les formulations des mortiers, la vitesse de propagation des ondes longitudinale et transversale atteint sa valeur maximal lorsque le rapport E/L est égal à 0.45. Par contre, elle atteindrent la valeur minimal lorsque le rapport E/L est égal à 0.65. Donc, on peut conclure que plus le rapport E/L augmente plus la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques diminue. Ce résultat est en concordance avec les résultats trouvés par Kaplan dans son travail de recherche, et qui a démontré que lorsque le rapport E/L augmente, la valeur de la propagation des ondes ultrasoniques correspondante diminue.

III.4.3. Module d'élasticité

Il existe plusieurs modèles empiriques pour estimer les valeurs de module d'élasticité :

- **Calculé selon les règles BAEL91**

Le module d'élasticité E_c est calculé selon la formule suivante donnée:

$$3700 \sqrt[3]{R_c}$$

Où: R_c est la résistance en compression du matériau.

- **Calculé selon la vitesse du son**

L'essai de mesure par onde ultrasonique permet de donner une vitesse de propagation, cette vitesse a une relation théoriquement avec l'élasticité des bétons exprimée par le module d'élasticité dynamique selon la relation suivante :

$$E_d = \rho V^2 \cdot \left[\frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right]$$

Avec :

V : la vitesse des ondes ultrasoniques (km/s).

ρ : La masse volumique du mortier (t/m^3).

ρ peut être estimée selon l'équation suivante : $\rho \cdot V = 1.67 + 0.155 \cdot V$

Le coefficient de poisson (ν) : est le rapport entre la déformation transversale et longitudinale en valeurs relative. Sa valeur varie, de 0,15 à 0,30. Pour nos mortiers ordinaires, on le prend souvent égal à 0.20.

- **Selon la SIA 162/1**

Le module d'élasticité peut être donné en fonction de la constante K :

$$E_c = kV^2$$

E_c (GPa) : module d'élasticité sécant.

V (Km/s) : vitesse du son dans le béton ou mortier.

K :

- ✓ $k = 1.68$ pour $t \geq 180$ jours ;
- ✓ $k = t^{0.1}$ pour $t \leq 180$ jours ;

t : Âge du béton ou mortier en jours.

On a essayé de calculer le module d'élasticité avec les formules précédentes pour faire une comparaison entre le module d'élasticité de BAEL et les autres modules.

Les valeurs de module d'élasticité à l'âge de 28 jours sont calculés de différentes façons (selon les méthode indiquées ci-dessus) et sont présentées sur les **Figs. III-29, III-30 et III-31** ci-dessous:

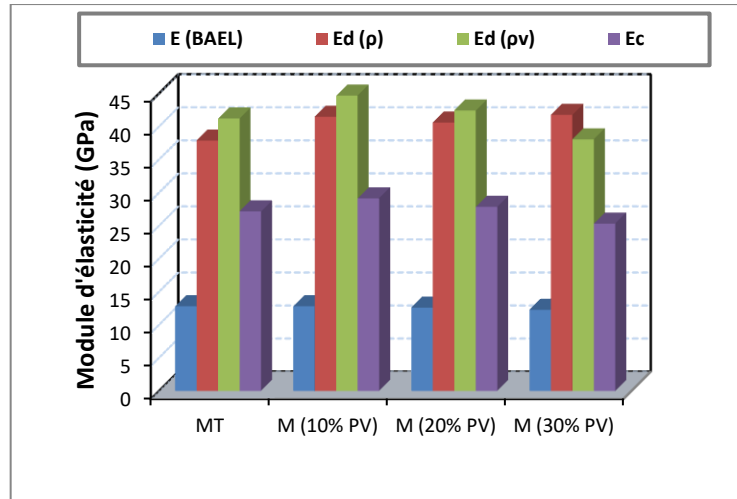


Fig. III-29. Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport $E/L = 0.45$.

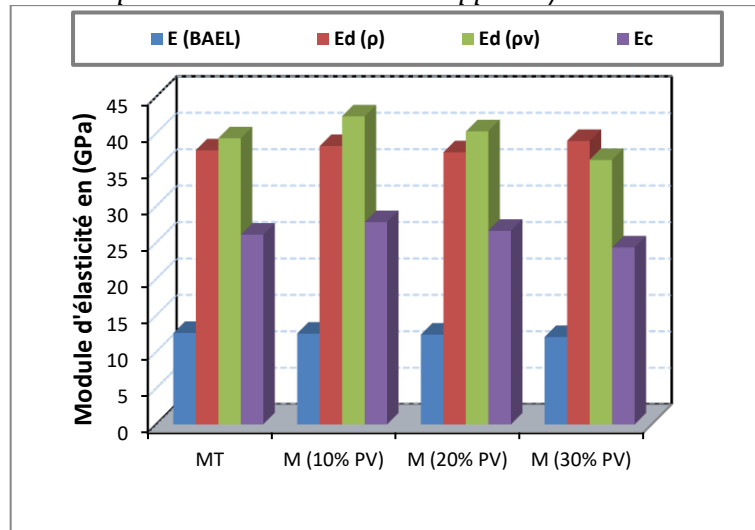


Fig. III-30. Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport $E/L = 0.55$.

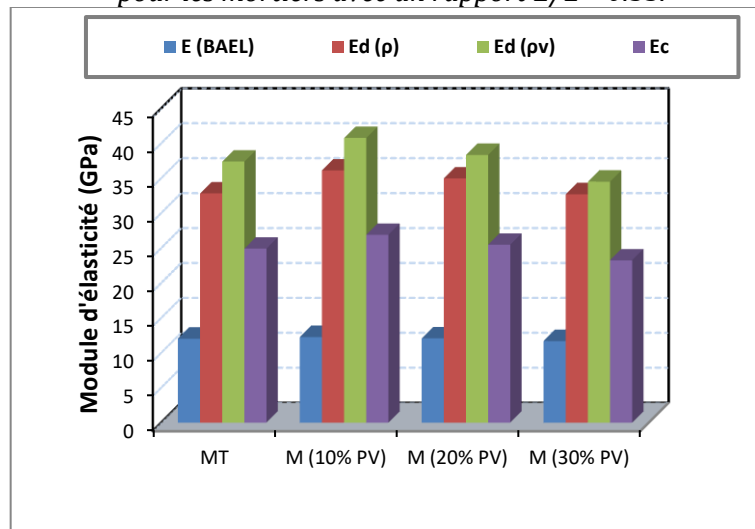


Fig. III-31. Module d'élasticité calculé par différentes méthodes pour les mortiers avec un rapport $E/L = 0.65$.

D'après les histogrammes ci-dessus, nous on remarque qu'il y a une très grandes différences entre les valeurs de module d'élasticité obtenus par les différentes méthodes décrites ci-dessus (de BAEL, à partir de la vitesse des ondes ultrasoniques et les valeurs de module d'élasticité sécant). Ceci est remarquable pour tous les mortiers de différents rapport E/L. La méthode, en se basant sur la vitesse des ondes ultrasoniques, semble la plus appropriée pour le calcul de module élastique, car on remarque moins de variation entre les histogrammes correspondant à cette méthode entre les trois séries d'échantillon de rapport E/L différents.

Les modules d'élasticité des mortiers avec 10 % de PV représente la valeur la plus élevée par rapport aux autres mortiers. Ceci confirme encore une fois les résistances à la compression obtenues avec ces mortiers (de 10 % de PV) mesurées pas une méthode destructive. Une décroissance claire de module d'élasticité est observée en fonction du rapport E/L; Plus le rapport E/L augmente, plus le module élastique diminue. Les mortiers avec un dosage supérieur en PV (30 %), représentent toujours les valeurs les plus faibles de module d'élasticité. cela est en concordance aussi avec les résultats de résistance obtenus plus haut par la méthode destructive.

III.5. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son

Dans le but de donner une relation entre la résistance mécanique à la compression, obtenus précédemment à l'aide d'une presse hydraulique (méthode destructive), et la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, les figures ci-dessous (de la **Fig. III-32** jusqu'à la **Fig. III-43**) présentent l'évolution de la résistance en compression à 28 jours en fonction de la vitesse mesurée dans le sens longitudinal de l'éprouvette, pour tous les mortiers étudiés. Nous pensons que à cause de la taille de l'éprouvette du mortier, qui est relativement petite, il a eu moins d'erreurs lors des mesures de la vitesse dans le sens longitudinal (de 16 cm) que lors de la mesure dans le sens transversal (de 4 cm).

- **Pour les mortiers avec E/L égal à 0.45**

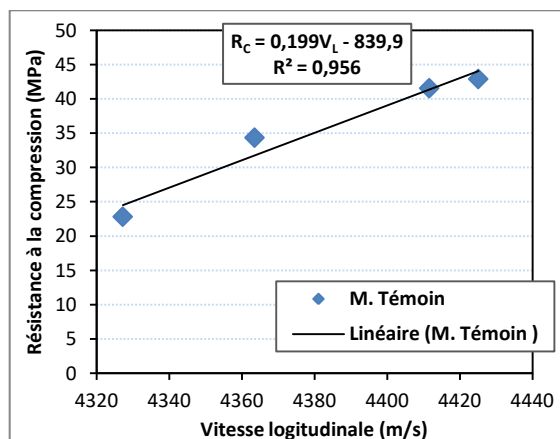


Fig. III-32. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin (avec E/L=0.45).

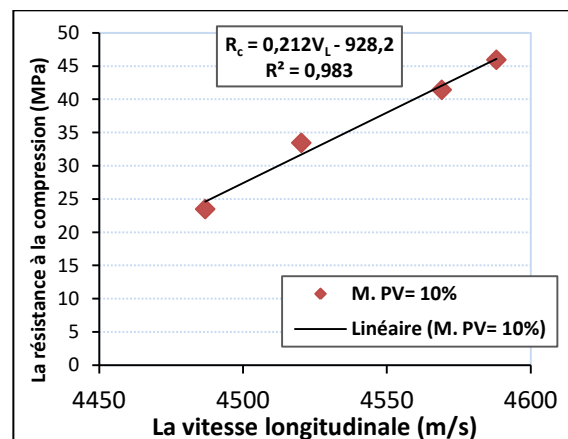


Fig. III-33. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10 % de PV et E/L=0.45.

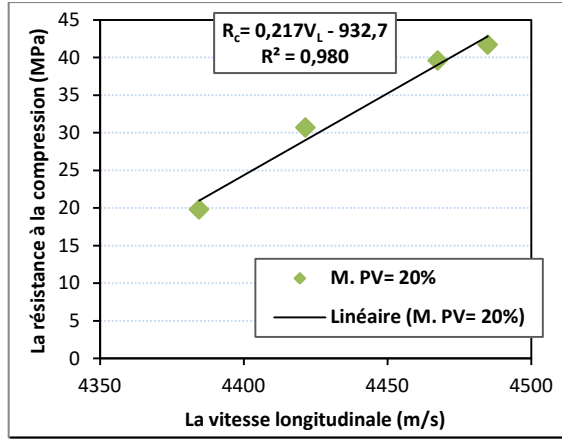


Fig. III-34. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 20% de PV et E/L=0.45.

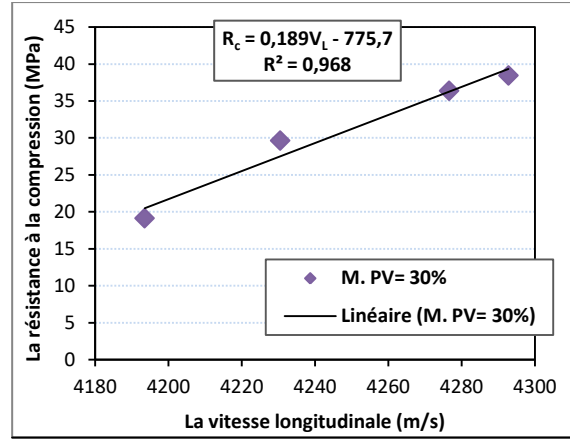


Fig. III-35. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 30% de PV et E/L=0.45.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.55

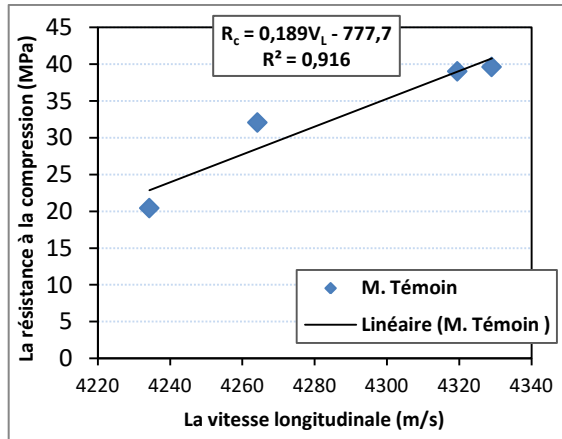


Fig. III-36. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin (avec E/L=0.55).

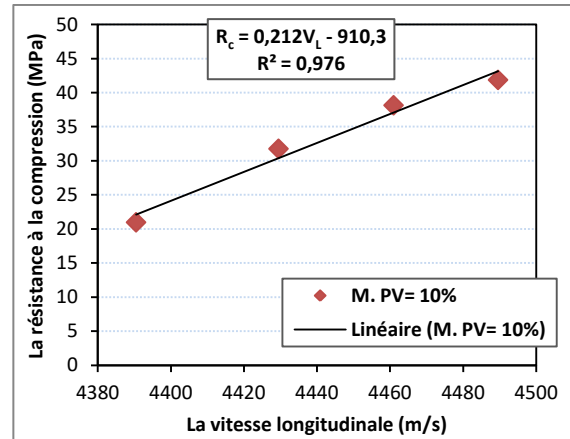


Fig. III-37. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10% de PV et E/L=0.55.

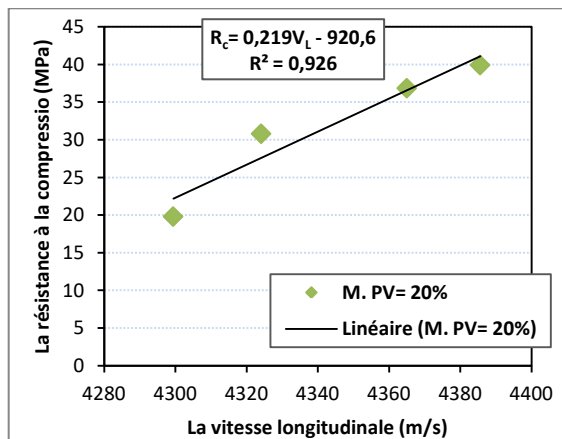


Fig. III-38. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 20% de PV et E/L=0.55.

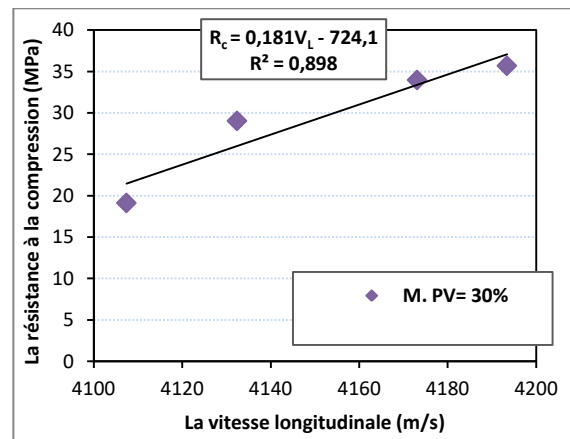


Fig. III-39. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 30% de PV et E/L=0.55.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.65

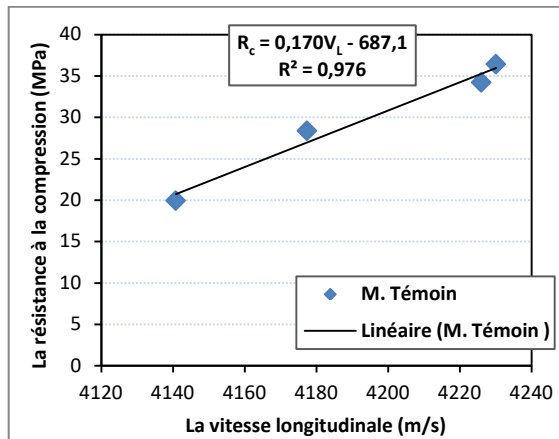


Fig. III-40. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier témoin (avec E/L=0.65).

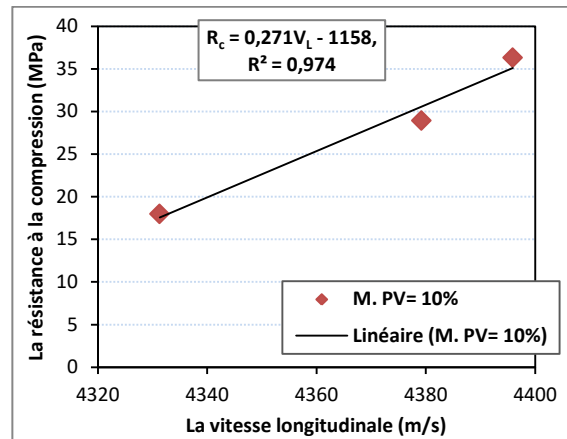


Fig. III-41. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 10 % de PV et E/L=0.65.

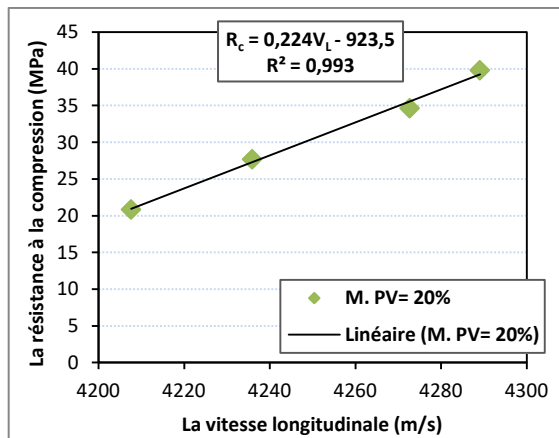


Fig. III-42. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 20% de PV et E/L=0.65.

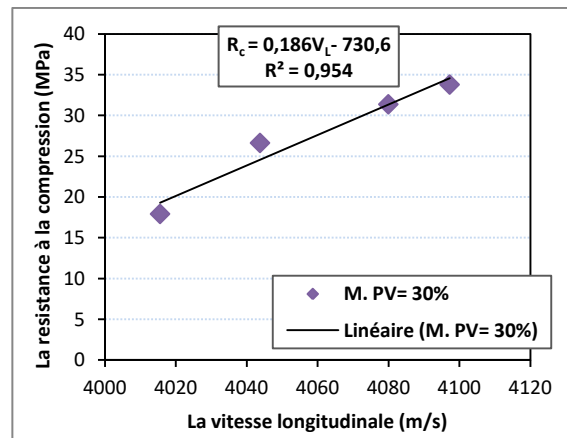


Fig. III-43. Évolution de la résistance à la compression en fonction de la vitesse du son du mortier avec 30 % de PV et E/L=0.65.

Les figures ci-dessus permettent de dire que il y'a une relation direct entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation longitudinale des ondes ultrasoniques, plus la vitesse augmente plus la résistance à la compression augmente aussi. Cette évolution de la vitesse du son peut être corrélée correctement à l'aide d'une équation linéaire en avec la résistance à la compression des mortiers étudiés.

Notons que l'ensemble des droites données sur les figures sont avec un coefficient de régression R^2 supérieur de 0.9. Des équations mathématiques ont pu être données pour chaque mortier testé. Il est donc possible de calculer d'autres résistances à la compression à partir de la vitesse du son mesurée pour d'autres âges du matériau et pour d'autre dosage en poudre de verre.

III.6. Évolution de la vitesse du son en fonction de module élastique

Les Figs. III-44, III-45 et III-46 présentent l'évolution de module d'élasticité dynamique pour les différents mortiers avec différents dosage en PV, en fonction de la vitesse du son dans le sens longitudinal mesurées à 28 jours.

D'après les figures ci-dessous, on remarque que la vitesse longitudinale augmente par l'augmentation de module d'élasticité. Autrement dit, plus le module d'élasticité est élevé, plus la vitesse du son augmente. Les résultats obtenus montrent aussi que la substitution de 10 % du ciment par la poudre de verre, représente la meilleurs valeur de module d'élasticité dynamique correspondant à la vitesse du son la plus élevée, par rapport aux autres bétons testés.

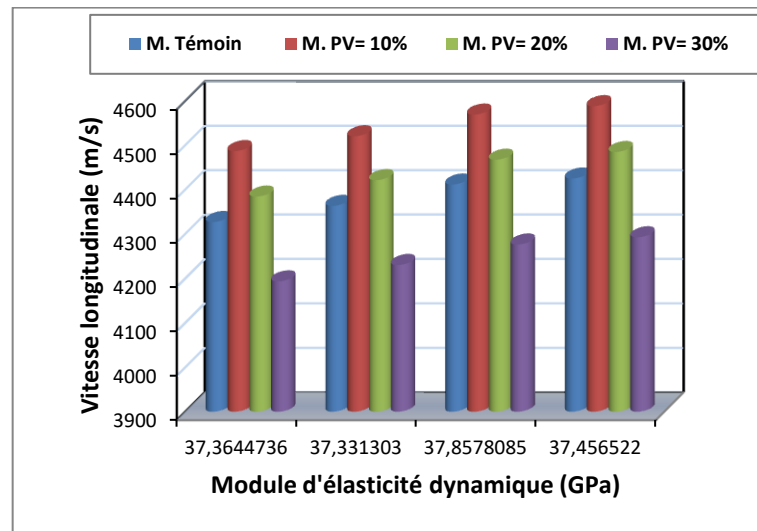


Fig. III-44. Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.45$.

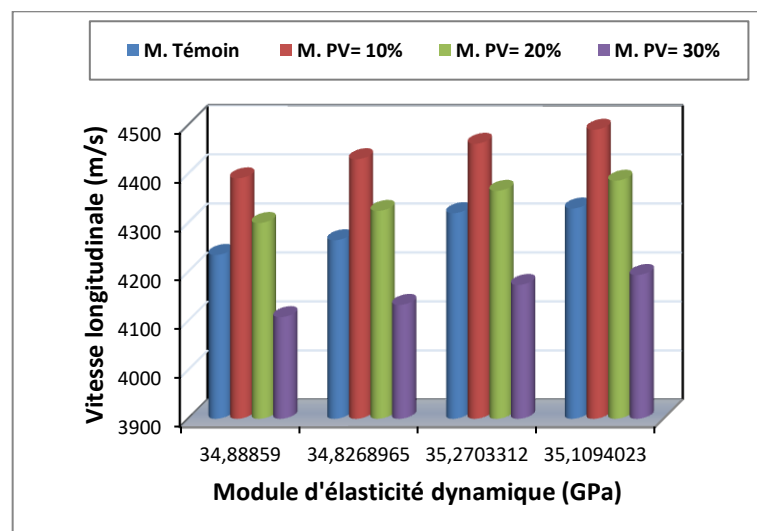


Fig. III-45. Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.55$.

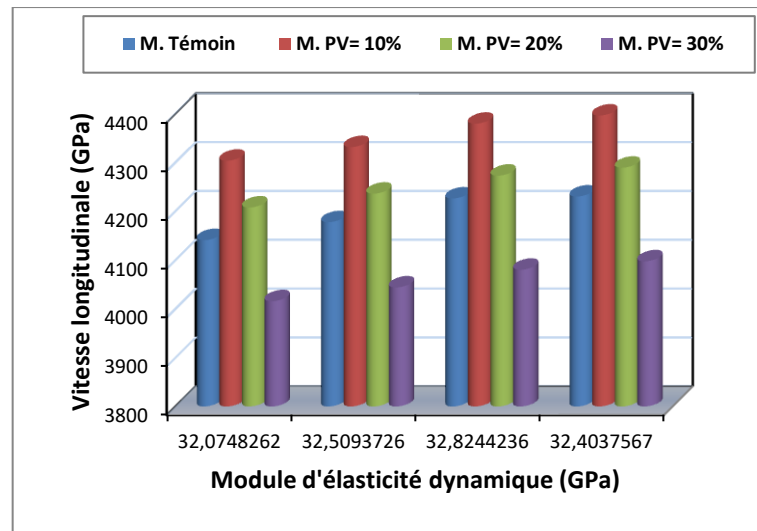


Fig. III-46. Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction du module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.65$.

III.7. Évolution de la résistance à la compression en fonction de module élastique

Dans cette partie, les résistances en compression mesurées précédemment à l'aide d'une méthode destructif (par écrasement d'éprouvettes) sont étudiées en fonction des modules d'élasticité dynamique obtenus pas une méthode non destructif (par des mesures de la vitesse des ondes ultrasoniques). Les **Figs. III-44, III-45 et III-46** présentent l'évolution de la résistance mécanique à la compression pour les différents mortiers avec différents dosage en PV et à l'âge de 28 jours, en fonction de module d'élasticité dynamique (estimés à l'aide de l'Ultrason).

D'après les histogrammes ci-dessous, on constate que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de module d'élasticité pour les différents mortiers étudié.

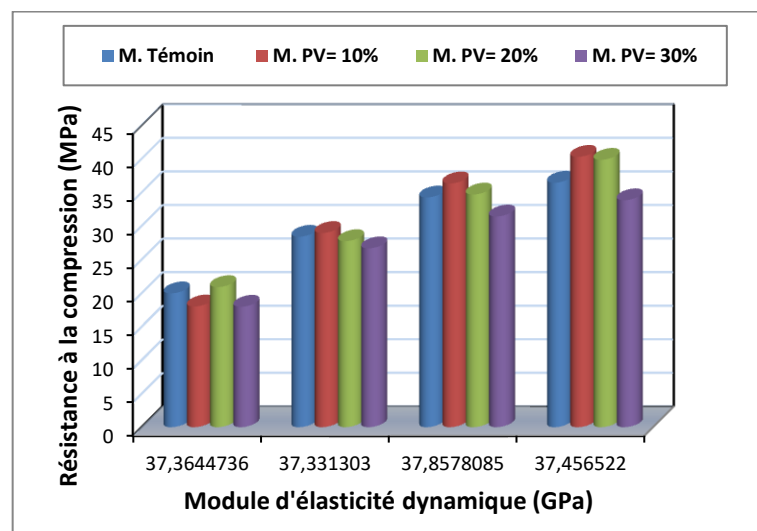


Fig. III-47. Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$.

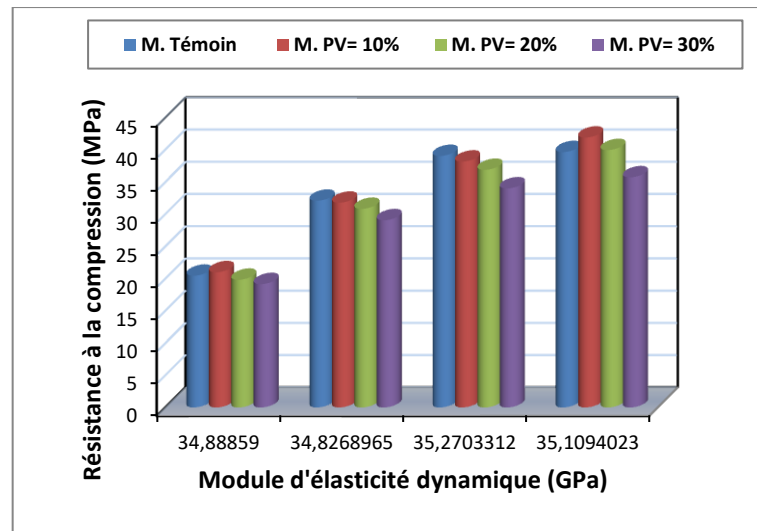


Fig. III-48. Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.55$.

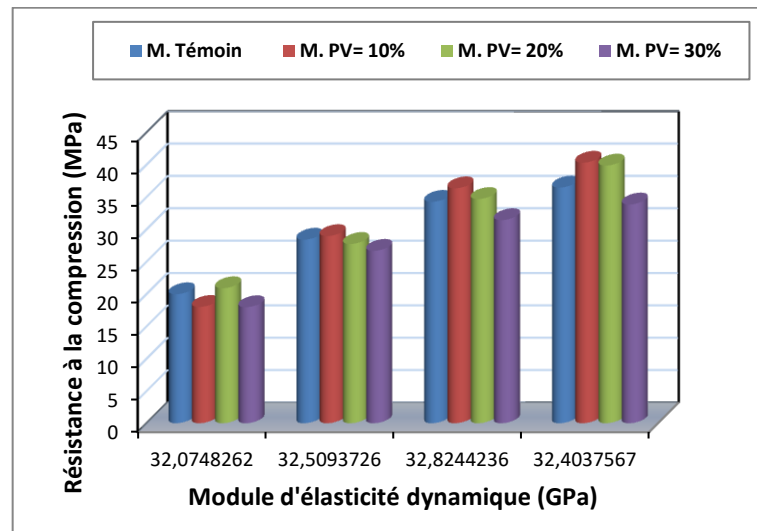


Fig. III-49. Variation de la résistance à la compression en fonction de module d'élasticité dynamique des mortiers avec un rapport de $E/L=0.65$.

III.8. Comparaison entre les résistances à la compression calculées et mesurées

Dans cette partie, les résistances à la compression, obtenues à l'aide d'un essai destructif, sont comparées avec les valeurs des résistances calculées à partir des mesures de vitesses des ondes ultrasoniques (essai non destructif).

Les figures ci-dessous (de la **Fig. III-50** jusqu'à la **Fig. III-61**) présentent l'évolution de la résistance en compression mesurées à l'âge de 28 jours en fonction des résistances en compression calculées à partir des vitesses du son mesurées sur des éprouvettes du mortiers de 28 jours.

Nous rappelons que les valeurs présentées sur ces figures correspondent à la moyenne arithmétique de trois mesures effectuées sur trois échantillons de chaque formulation des mortiers étudiés.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.45

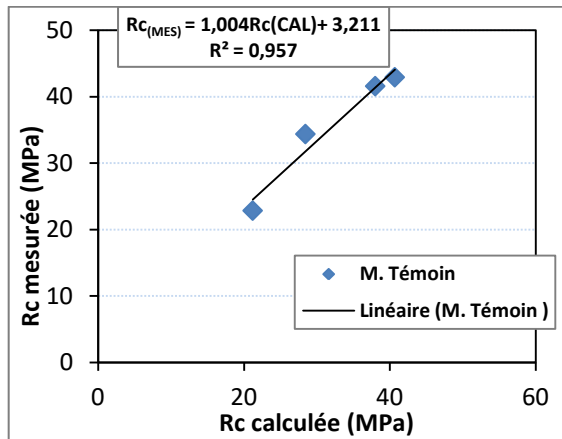


Fig. III-50. Comparaison entre les Résistances calculées et mesurées mortier témoin et E/L=0.45.

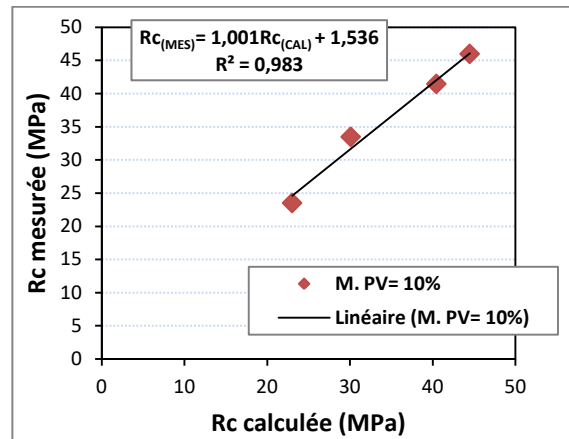


Fig. III-51. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 10 % de PV et E/L=0.45.

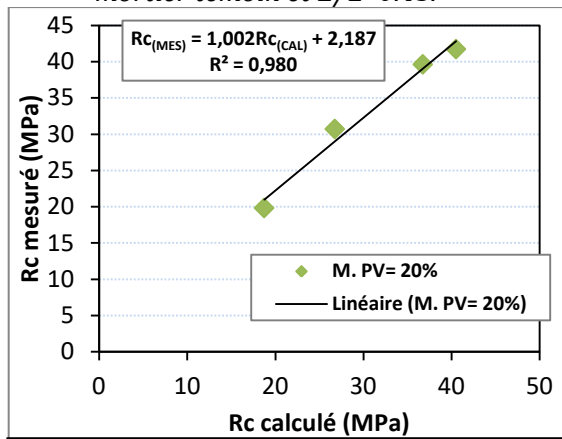


Fig. III-52. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 20% de PV et E/L=0.45.

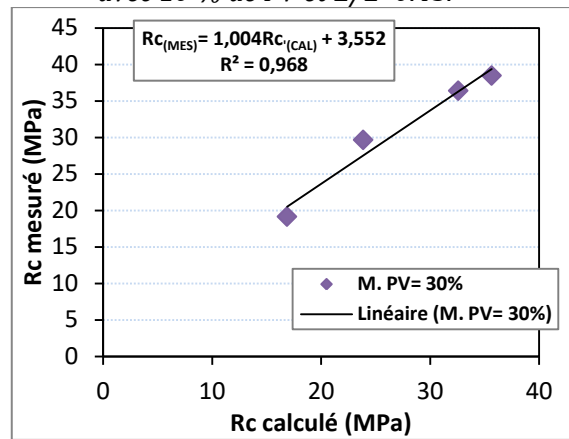


Fig. III-53. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 30 % de PV et E/L=0.45.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.55

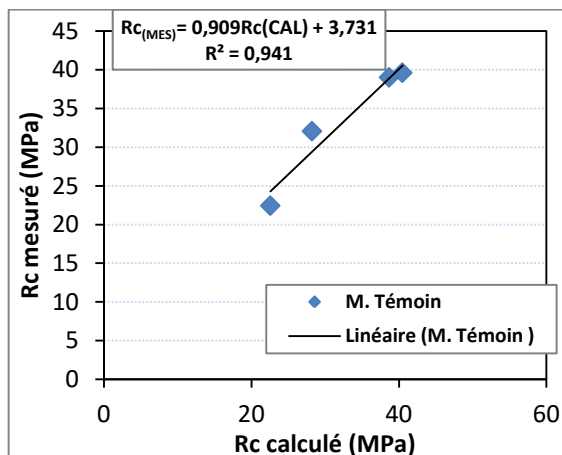


Fig. III-54. Comparaison entre les Résistances calculées et mesurées mortier témoin et E/L=0.55.

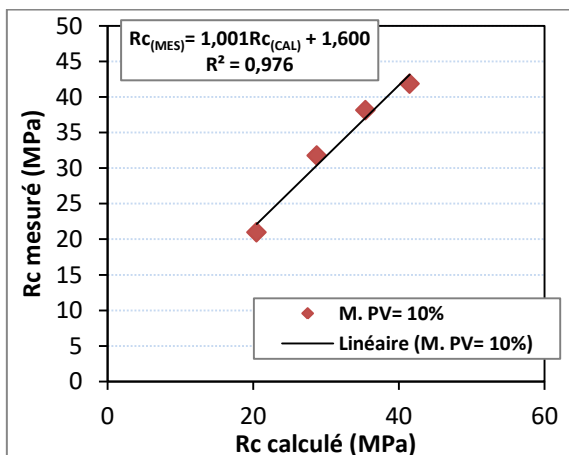


Fig. III-55. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 10 % de PV et E/L=0.55.

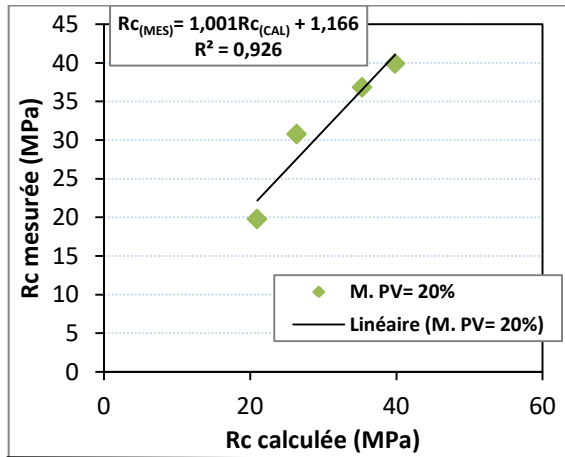


Fig. III-56. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 20% de PV et $E/L=0.55$.

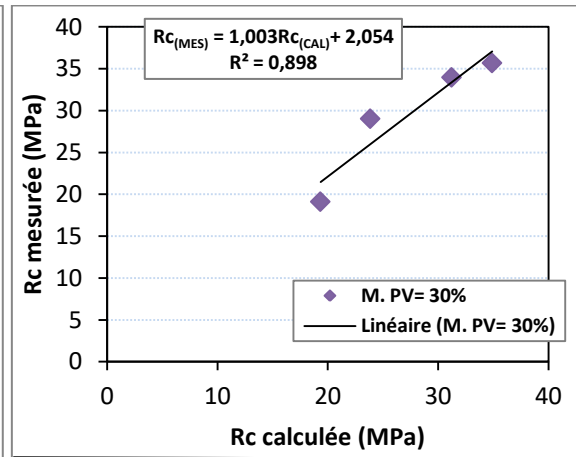


Fig. III-57. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 30 % de PV et $E/L=0.55$.

• Pour les mortiers avec E/L égal à 0.65

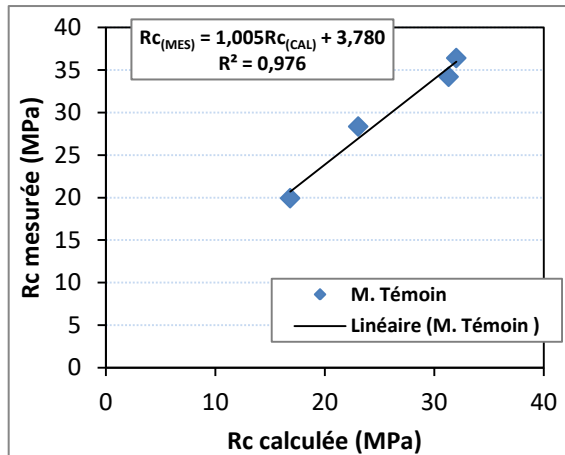


Fig. III-58. Comparaison entre les Résistances calculées et mesurées mortier témoin et $E/L=0.65$.

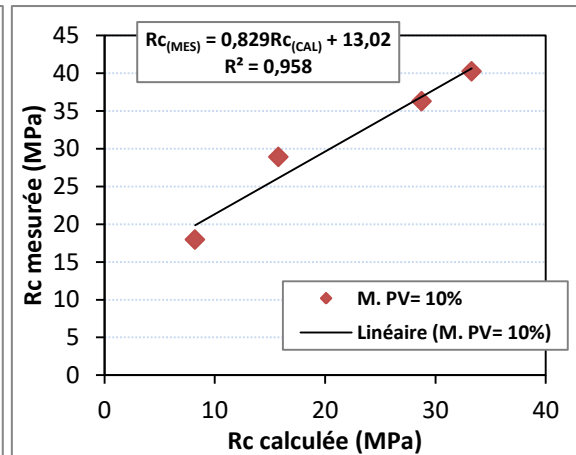


Fig. III-59. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 10 % de PV et $E/L=0.65$.

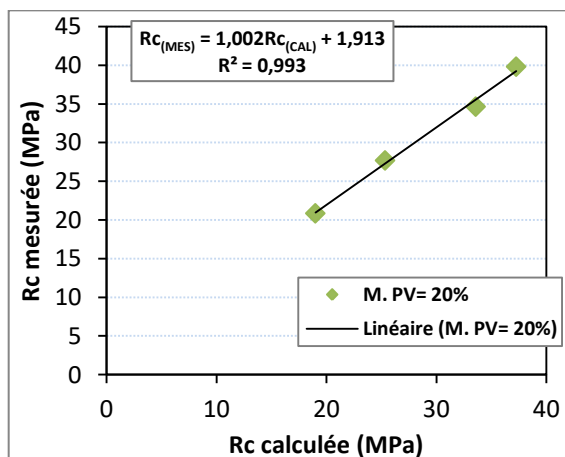


Fig. III-60. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 20% de PV et $E/L=0.65$.

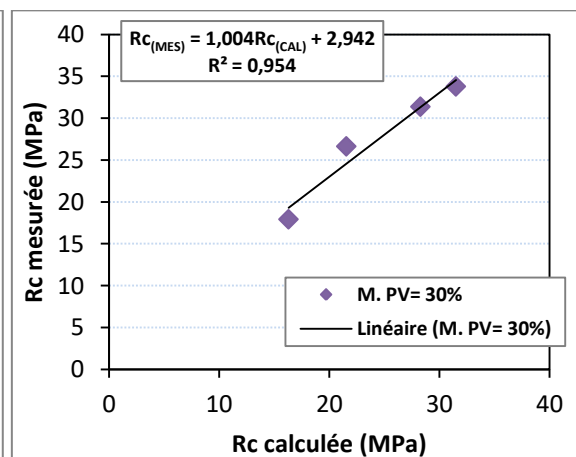


Fig. III-61. Comparaison entre les résistances calculées et mesurées du mortier avec 30 % de PV et $E/L=0.65$.

D'après les figures ci-dessus, l'évolution de la résistance à la compression calculée en fonction de celle mesurée peut être estimée correctement par une équation linéaire dont les équations mathématiques sont données sur les figures sous la forme suivante : $RC_{(MES)} = a \cdot RC_{(CAL)} + c$. Les droites obtenues sont généralement avec un coefficient de régression supérieur de 0,9 confirmant une bonne linéarité des résultats obtenus.

Les équations illustrées sur les figures ci-dessus, pour chaque mortier étudié, montrent que le coefficient "a" sur l'équation égal généralement à 1. Ce qui permet d'écrire l'équation sous la forme $RC_{(MES)} = RC_{(CAL)} + c$. Donc, on peut dire que la valeur de la résistance à la compression mesurée par un essai destructif est presque égale à la valeur de la résistance calculée à partir des mesures de la vitesse du son à l'aide de l'Ultrason. Ce dernier représente alors un dispositif très fiable et un outil garanti pour l'évaluation de la résistance en compression d'un mortier ordinaire.

III.9. Mesure de la sorptivité capillaire

L'absorption capillaire est la tendance du mortier à prendre de l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores grâce à la tension superficielle. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le mortier sec ou partiellement sec prene l'eau. Plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande.

Les Figs. III-62, III-63 et III-64 présentent l'évolution de la masse d'eau absorbée par les différents mortiers testés, avec différents dosage en PV, en fonction de la racine carrée du temps. Nous rappelons ici que les mesures de l'eau absorbée ont été enregistrées par pesées effectuées à 5, 10, 15, 30 et 60 minutes.

Notons que les valeurs illustrées sur ces figures ci-dessous, sont des moyennes arithmétique de trois valeurs, obtenus par des mesures effectuées sur trois éprouvettes de (4 x 4 x 16) cm³ de chaque mortier étudié à l'âge de 60 jours.

Les premiers résultats montrent que la quantité d'eau absorbée par les échantillons du mortier augmentent en fonction du temps.

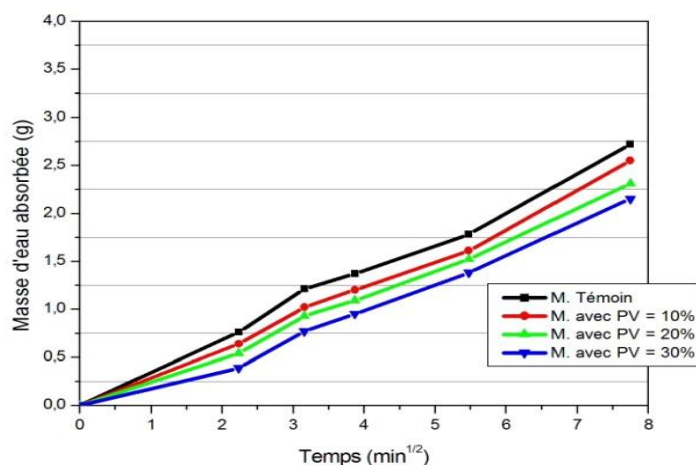


Fig. III-62. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.45$.

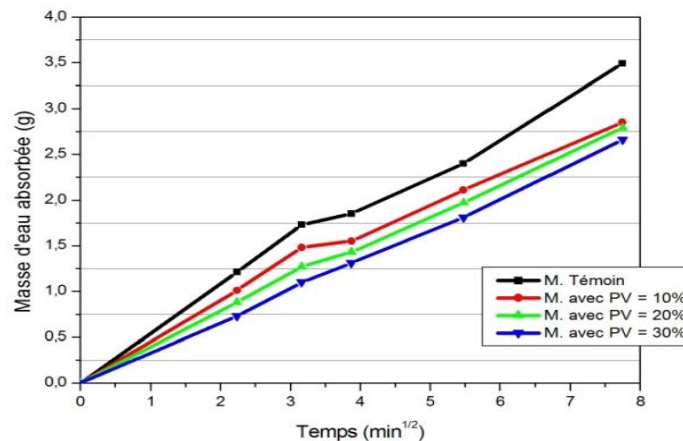


Fig. III-63. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.55$.

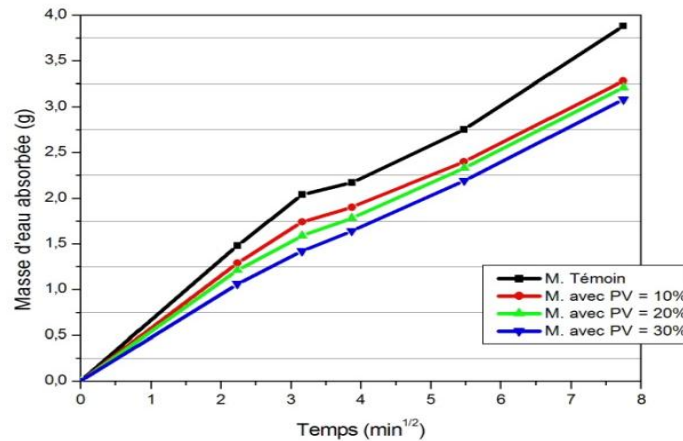


Fig. III-64. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des mortiers avec $E/L=0.65$.

On constate à partir de ces résultats, indiqués sur les **Figs. III-62, III-63 et III-64**, que l'absorption de mortier témoin est nettement supérieure à celle des mortiers qui contiennent un pourcentage de la poudre de verre. Les résultats montrent aussi que plus le dosage en PV est important dans le mortier, plus l'absorption du matériau est faible (empêchée). Alors, la masse d'eau absorbée diminue pour les mortiers avec des dosage en PV de 10 , 20 et 30 % par rapport aux mortier témoins (sans PV). Ceci est expliqué par la grande finesse de la poudre de verre (supérieure à celle du ciment), qui peut augmenter la compacité du mortier et donc de minimiser sa porosité capillaire.

L'absorption capillaire est essentiellement concernée par les pores capillaires, de ce fait, la courte durée de l'essai (60minutes) ne permet pas un remplissage des pores de gel qui ont un faible diamètre. La présence de la poudre de verre dans les mortiers favorise le ralentissement de la vitesse d'absorption d'eau.

Par ailleurs, les quantités d'eau absorbées par des mortiers avec un rapport E/L égal à 0.65 sont supérieures à celles absorbées par des mortiers avec un rapport E/L égal à 0.55 et 0.45. Car un mortier avec un rapport E/L important est déjà avec une porosité ouverte (accessible à l'eau) élevée. Ce qui conduit à une absorption certainement plus élevée. L'absorption d'eau des mortiers avec un E/L égal 0.65 atteint après 60 min, pour des dosages en PV égaux à 0, 10 , 20 et 30 % les valeurs de 3.88, 3.28, 3.21 et 3.08 g d'eau respectivement.

- **Détermination de coefficient de sorptivité capillaire**

Le coefficient de sorptivité caractérise la capacité d'absorption des quatre mortiers dans le temps. Plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faibles.

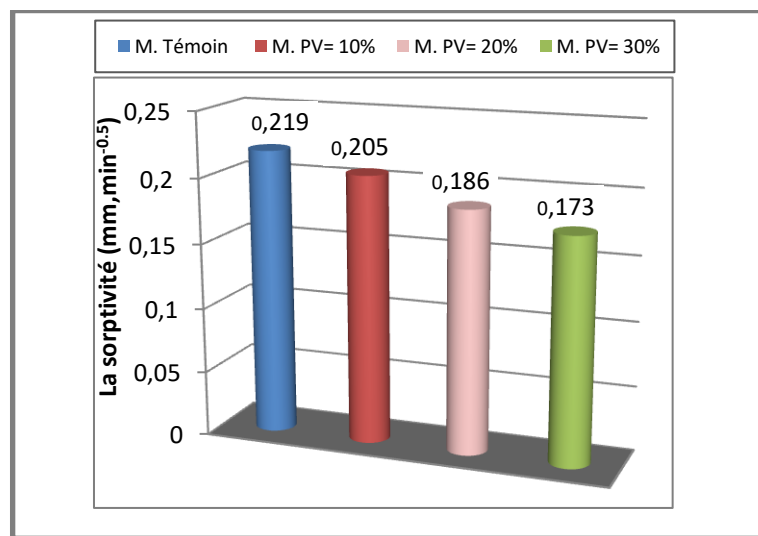


Fig. III-65. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport E/L = 0.45.

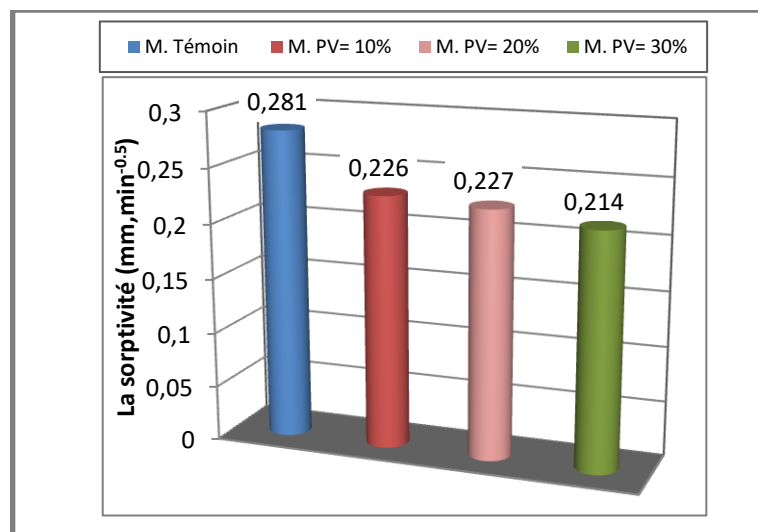


Fig. III-66. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport E/L = 0.55.

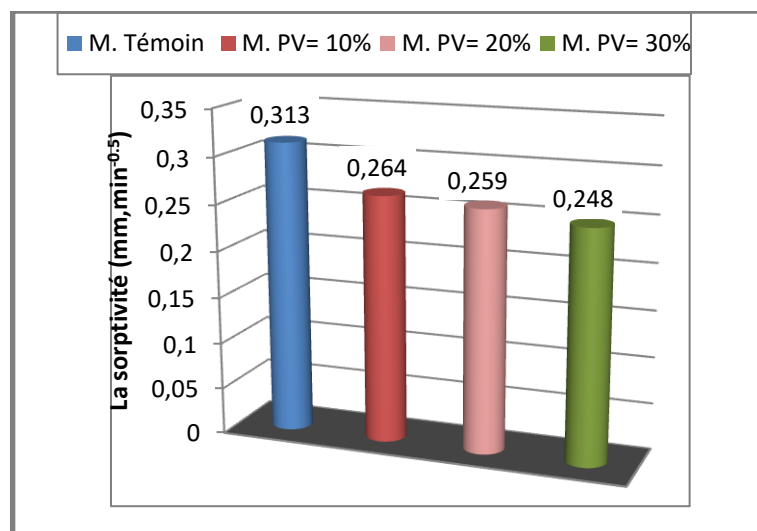


Fig. III-67. La sorptivité capillaire des mortiers avec différents dosage en PV et un rapport E/L = 0.65.

Les résultats présentés sur les **Figs. III-65, III-66 et III-67**, sont obtenus par application de l'équation ($i = Sw/\sqrt{t}$).

On distingue quatre histogrammes qui montrent l'évolution du coefficient d'absorption en hauteur sur la racine carrée du temps (à 60 minutes). Les mortiers témoins représentent les coefficients d'absorptions les plus élevés par des valeurs de 0.219, 0.281 et 0.313 mm/min^{0.5}, respectivement pour les mortiers avec des rapports E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65. L'absorption se poursuit dans les pores de plus en plus fins et de ce fait, la cinétique d'absorption des mortiers contenant de la poudre de verre est ralentie, ce qui explique la diminution des coefficients en parallèle avec l'augmentation du dosage en poudre de verre de 10, 20 à 30 %.

Ce comportement est attribué au fait que la poudre de verre résiduelle pourrait remplir les microfissures et les pores dans le mortier conduisant à la diminution des vides étant par ailleurs occupé avec de l'eau.

III.10. Relation entre la résistance à la compression et la surface spécifique Blaine

Dans cette partie nous avons essayé d'évaluer l'influence de la surface spécifique Blaine (SSB) du liant (ciment + poudre de verre), qui est une caractéristique physique du liant à son état anhydre, sur l'évolution de la résistance à la compression des différents mortiers étudiés à l'âge de 60 jours. Les résultats présentés sur les **Figs. III-68, III-69 et III-70** correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs obtenus par trois mesures de la SSB des liants testés (avec différents pourcentages de PV (0, 10, 20 et 30 %)). Chaque figure ci-dessous correspond à un rapport E/L différent (0.45, 0.55 et 0.65).

Les résultats illustrés sur les figures ci-dessous, montrent que le liant avec 10 % de la poudre de verre indique toujours les meilleures valeurs de résistance à la compression. Une augmentation claire de la résistance de ces mortiers (avec 10 % de PV) est observée par rapport au mortiers témoins (sans PV). Cela est traduit par la finesse de liant qui

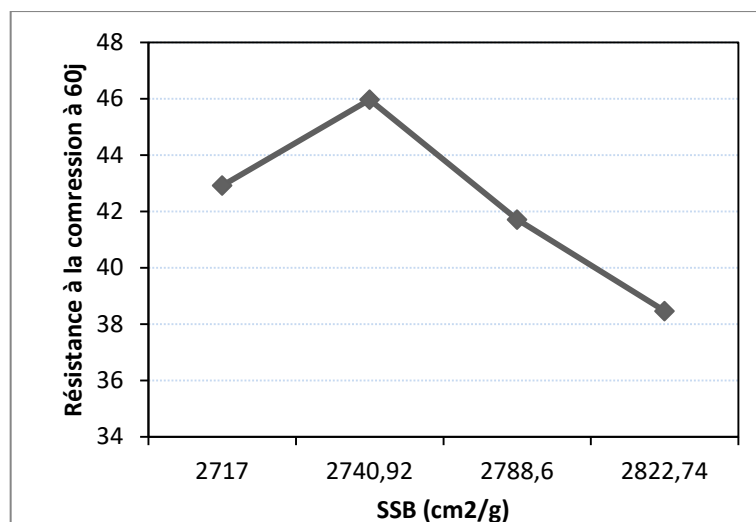


Fig. III-68. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.45$

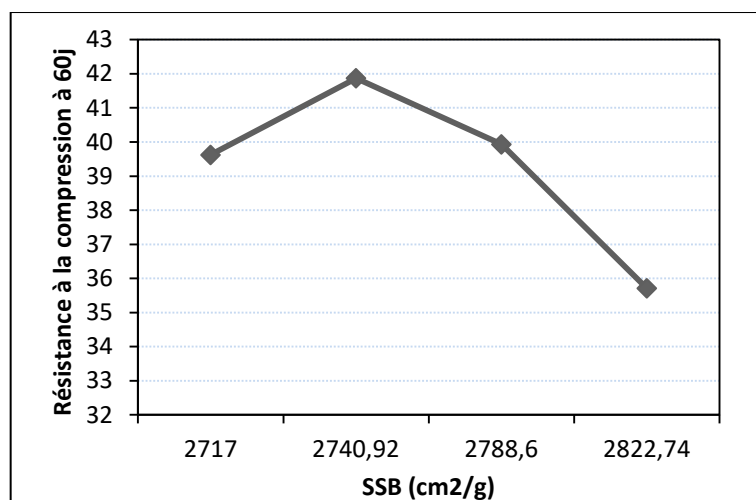


Fig. III-69. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.55$

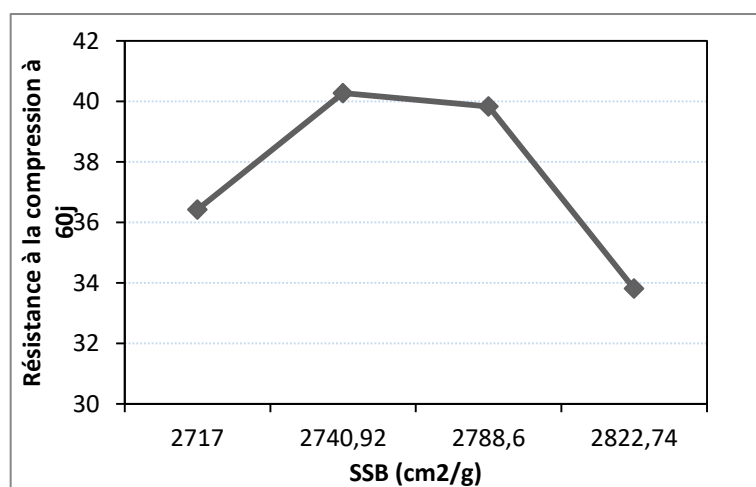


Fig. III-70. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la SSB des mortiers avec un rapport $E/L=0.65$

augmente avec la substitution de 10 % du ciment par la poudre de verre qui a une finesse plus grande que celle du ciment. Par contre, au-delà d'un dosage de 10 % on remarque une chute de la résistance à la compression, malgré une augmentation dans le dosage en poudre de verre (20 et 30 %) dans les mortiers. Car une substitution plus importante du ciment par la poudre de verre conduit à avoir moins de liaison chimique cimentaire avec une quantité moindre en ciment. Cette quantité plus faible du ciment est la cause de réactions pouzzolaniques plus faibles dans le matériau malgré une compacité élevée. Alors, les résultats montrent qu'un dosage de 10 % en poudre de verre représente un seuil important pour la résistance mécanique d'un mortier ordinaire.

Conclusion générale

L'étude expérimentale réalisée a permis de mettre en évidence une valorisation d'un déchet ménager qui est le verre qui peuvent être un ajout minéral sous forme de poudre additionné par substitution partielle du ciment dans les matériaux cimentaires de construction. Alors, dès le début de ce travail de recherche, notre objectif principale est d'étudier l'influence de la poudre de verre, obtenue par un broyage des déchets en verre, sur les comportements physique et mécanique des mortiers ordinaires à base des matériaux locaux (ciment et sable). Pour mieux comprendre le comportement physiques et mécaniques des mortiers étudiés, plusieurs formulations de mortiers avec différents rapport E/L et différents taux de PV sont testés. Un essai non destructif a été aussi utilisé pour compléter la caractérisation mécanique de ces mortiers. À partir de cette étude expérimentale, nous avons pu tirer les conclusions suivantes:

- L'étude des propriétés physiques des mortiers à l'état frais nous a permis de conclure que la quantité d'air occlus diminue sensiblement pour les mortiers contenant de la poudre de verre. Cette diminution se traduit par une augmentation de la compacité de ces mortiers traduisant une faible porosité du matériau avec PV. À cause de sa finesse élevée par rapport à celle du ciment, la poudre de verre occupe l'espace vide (les pores) dans le matériau.
- D'autre part, la poudre de verre affecte aussi les propriétés rhéologiques des mortiers principalement la maniabilité. Avec une substitution de 20 à 30 % du ciment par la poudre de verre, la maniabilité d'un mortier ordinaire peut passer de la classe "fluide" et "très fluide" (sans PV) à la classe "très plastique" et "plastique". Ces propriétés physiques et rhéologiques (air occlus et maniabilité) déterminées à l'état frais sont aussi influencées par le rapport E/L. Quand le rapport E/L diminue, la quantité d'air occlus augmente et la maniabilité diminue.
- les résultats obtenus ont montrés aussi que le rapport la résistance mécanique du mortier est influencé significativement par le rapport E/L. Les résistances à la flexion et à la compression, augmentent quand le rapport E/L diminue. Avec l'ajout de la poudre de verre, les mortiers avec un pourcentage de PV égal à 10% donnent des résultats de la résistance mécanique les plus élevées. Cela a été plus remarqué à l'âge de 60 jours (à long terme). La taille des petites particules de poudre de verre est avantageuse pour s'infiltrer et boucher les pores capillaires dans le mortier, rendant les pores plus petits et moins nombreux et le mortier plus dense. La poudre de verre est un matériau réactif et non inerte, et donc elle a une activité pouzzolanique élevée qui affecte la résistance mécanique du matériau à long terme. À court terme l'évolution de la résistance mécanique (à la flexion et à la compression) des mortiers avec PV sont presque identiques de celles obtenus pour les mortiers témoin (sans PV).
- Les mortiers avec un pourcentage en PV égal à 30 % représente toujours les valeurs les plus faibles en résistance mécanique par rapport aux autres mortiers. Car, quand

le matériau avec un surdosage en poudre de verre, il est donc avec une faible teneur en ciment et donc moins d'hydrates seront produites dans le mortier durci rendant sa résistance mécanique plus faible.

- La vitesse de la propagation d'ondes ultrasoniques à travers le mortier est plus élevée pour des mortiers avec une compacité plus importante. Cette dernière qui agit directement sur sa résistance mécanique. Alors, les résultats obtenus à l'aide d'une compagne d'essais non destructif (en utilisant l'Ultrason), montrent que plus la vitesse du son augmente, plus le mortier est résistant à la traction comme à la compression. Les vitesses des ondes ultrasoniques, mesurées dans cette étude, correspondent aux résultats de la résistance mécanique mesurée à l'aide d'une presse hydraulique (essai destructif). Alors, nous avons conclu que l'utilisation de l'Ultrason (essai non destructif) est très fiable pour la détermination de module élastique du matériau et par conséquent de déduire sa résistance à la compression.
- Il est possible d'estimer correctement la résistance à la compression du mortier avec poudre de verre à l'aide d'une fonction mathématique linéaire à partir des mesures de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques.
- L'augmentation du dosage de la poudre de verre dans les mortiers entraîne une diminution de leurs coefficients d'absorption capillaire d'eau. Ce comportement est attribué du fait que la poudre de verre résiduelle pourrait remplir les microfissures et les pores dans le mortier conduisant à la diminution des vides étant par ailleurs occupé avec de l'eau.
- Finalement, la substitution partielle du ciment par la poudre de verre dans des mortiers ordinaires offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser l'énergie nécessaire pour l'industrie du ciment. Elle offre une bonne solution au problème des émissions de gaz carbonique, produite par cette industrie, pour une préservation de l'environnement et une protection contre la pollution.

Références bibliographiques

- [1] <http://www.vicat.fr/Activites/Ciment/Qu-est-ce-que-le-ciment>.
- [2] www.ens-prof.ac-dijon.fr.
- [3] GUILLAUME FRANQUEVILLE (Lafarge) : *La Technologie du Béton, chapitre 2 Les ciments, Degussa Construction chemicals 2006.*
- [4] www.infociments.fr.
- [5] <http://www.prc.cnrs.fr/spip.php?article92>.
- [6] http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/Les_etapes_de_la_fabrication_du_ciment_.
- [7] <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html>.
- [8] m.Omrane¹, M.Mouli¹, S.Benosman², Y. Senhadji³ « Comportement des matériaux polymères ».
- [9] 12 PATRIK ROUSSEAU – TIBERIU APOSTOL, *Valeur environnementale de l'énergie collection des sciences appliquées de l'I.N.S.A de Lyon , 2000 presse polytechnique et universitaire romandes 172 p.*
- [10] 15 *La production de ciment : « Guide pour l'estimation des gaz à effet de serre ».*
Division des gaz à effet de serre – Environnement CANADA Mars 2004 (Dans le cadre du plan d'action 2000 du gouvernement du CANADA sur le changement climatique).].
- [11] (COMPENDIUM NATIONAL SUR LES STATISTIQUES DE L'ENVIRONNEMENT» document publié par l'Office National des Statistiques, sis 8 & 10 Rue des Moussebiline - ALGER -).
- [12] Amel Bouakba dans la tribune le 18-06-2008.
- [13] « Décret exécutif n° 06-104 du 29 Moharram 1427 correspondant au 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. »
- [14] r20med.regions20.org].
- [15] www.siedmto.fr.
- [16] www.hindawi.com.
- [17] Serifou M., *Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation, Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny et l'Université de Bordeaux 1, Décembre 2013.*
- [18] <http://www.ctpl.info/presentation/les-laitiers-siderurgiques/>.
- [19] <http://www.voirvert.ca>.
- [20] www.depannage-vitre.fr/verre-feuille/.
- [21] <http://www.dechets.picardie.fr>.
- [22] <https://www.consoglobe.com/recycler-verre-4321-cg>.
- [23] SHEKHAWAT, B. S& AGGARWAL, D. V.2014.

Références bibliographiques

- [24] Zidol, A. (2009) « *Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke* ».
- [25] Aladdine, F. (2009). *Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé. ProQuest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).*
- [26] Taha, B. et Nounu, G. (2008a). *Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. Construction and Building Materials,*
- [27] Abdalla, A. H. (2012). *Optimisation et Performance des Betons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. ProQuest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).*
- [28] Schwarz, N. et Neithalath, N. (2008). *Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement and Concrete Research.*
- [29] Shayan, A. et Xu, A. (2006). *Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. Cement and Concrete Research,*
- [30] Ishani Singal , Rohan Roy, Shruti Singh «(2016) *Analyzing the Viability of Replacing Sand with Glass Powder in Concrete using Fly Ash, Department of Civil Engineering Manipal Institute of Technology, Manipal, 576104, Karnataka, India.*
- [31] <https://scribs.dz/>.
- [32] B. Belbachir^{1,2}, A.S. « *Comportement des mortiers composites à bases des SCMs dans les milieux acides* » .
- [33] SH Chung, CK Law «*Structure and extinction of convective diffusion flames with general Lewis numbers 1983/1/1*».
- [34] Elayesh, 2009. *Performance of Laterite Aggregate Concrete. Université Technologie Malaysia, 2009*
- [35] Feldman, R.F. and Huang, C.Y. (1985) *Properties of Portland Cement-Silica Fume Pastes Porosity and Surface Properties. Cement and Concrete Research, 15, 765-774.*
[http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90141-3](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(85)90141-3).
- [36] Chaussadent, 2001. *Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciment durcies*

Annexes A



Centre universitaire d'Ain temouchent

Institut des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil



FICHE DE MANIPULATION

CONSISTANCE ET TEMPS DE PRISE DU CIMENT

➤ Principe de l'essai:

L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler).

Le temps de début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat ($S = 1 \text{ mm}^2$, masse = 300 g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment à consistance normalisée.

En effet, pour chaque liant utilisé, il y'a une teneur en eau nécessaire qui donne à la pâte une consistance dite 'normale'.

La détermination de cette teneur en eau est en fait un préalable à la mesure de la prise.

L'appareil de Vicat est utilisé à la fois pour la détermination de la consistance normale ainsi qu'à la mesure du temps de début de prise.

➤ Essai de consistance (EN 196-3) :

❖ Matériel utilisé :

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, L'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,
- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn),
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français).
L'appareil est composé d'un moule tronconique ($h=40 \text{ mm}$ $d_1= 70 \text{ mm}$ et $d_2= 80 \text{ mm}$) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10 \text{ mm}$,
- Balance précise à 0,1 g près,
- Chronomètre précise à 0,1 s près

❖ Mode opératoire :

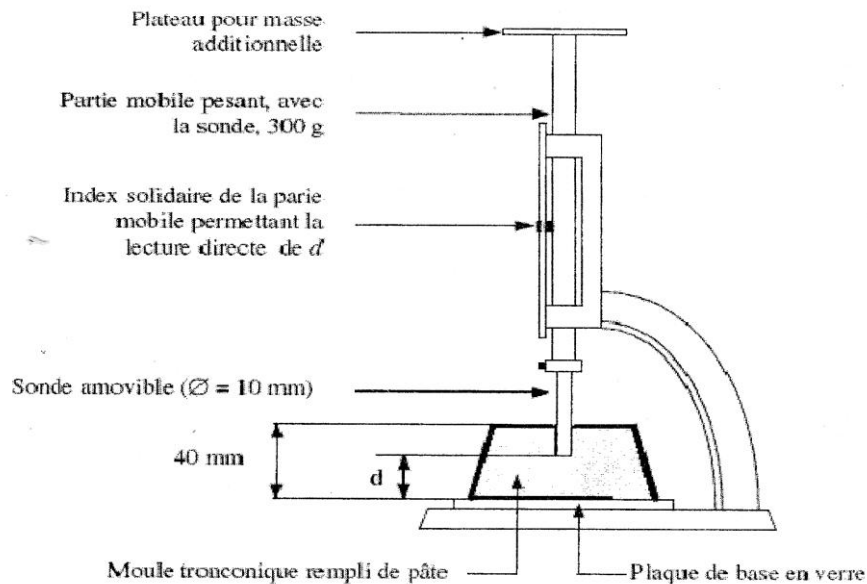
On procède par tâtonnements :

- préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport $E/C=0,26$. verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,
- mettre le malaxeur en marche (voir le tableau qui suit pour la marche à suivre) et déclencher le chronomètre

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre enroute	Raclage de la cuve	Mettre enroute
Durée des opérations		5 à 10 s	90 s	15 s	90 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente

- la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-

vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.



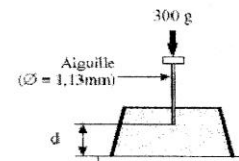
- la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- la pâte sera à consistance normale si $d = 6\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$:
 si $d > 7\text{ mm}$: il n'y a pas assez d'eau,
 si $d < 5\text{ mm}$: il y a trop d'eau.

Dans les 2 cas, jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle W.

➤ **Essai de prise (EN 196-3) :**

❖ **Matériel utilisé :**

C'est le même appareil qui est utilisé (dans les mêmes conditions) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon, le diamètre est beaucoup plus petit ($\Phi = 1.13\text{ mm}$).



❖ **Mode opératoire :**

Une fois la pâte à consistance normale obtenu, on procède au changement de la sonde de Vicat par l'aiguille de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

- recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ($\sim 10\text{-}15\text{ mn}$) jusqu'à ce que $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$.

- cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.

Il est recommandé de reporter les résultats obtenus sur un graphique (minimum 3 points) en vue de déterminer le temps de début de prise avec précision.

Annexe B

LEFFEBVRE Olivier
MORTIER Claude

DOCUMENT ELEVE

LABORATOIRE

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE
(NF P)

MODE OPERATOIRE

But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la **masse volumique absolue** d'un corps (sable, gravier, ...). c'est à dire en t (tonne), de ce corps pour 1 m³ de volume, mais uniquement la masse des différents grains constituant le granulats, c'est à dire que l'on ne tient absolument pas compte des vides qui peuvent être situés entre les grains. Cette masse volumique absolue est appelée ρ_s (rau).

Définition :

La **masse volumique absolue** est donc la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m³, en kg/m³ ou en g/cm³. (rappel 1 t/m³ = 1 g/cm³). Cette masse volumique n'intègre que les grains de l'agrégat, donc les vides compris entre ces grains.
La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant la densité n'a pas d'unité.

Principe de l'essai :

En partant d'une masse d'agrégat et en le plongeant dans un volume d'eau, on obtiendra la masse volumique absolue de ce dernier par la division de cette masse par la différence des volumes.

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad \text{en t / m}^3$$

Avec : ρ_s = masse volumique absolue

- M = masse du matériau étudié (en t, kg, g)
- V1 = volume dans l'éprouvette avant introduction de la masse d'agrégat
- V2 = volume dans l'éprouvette après introduction de la masse d'agrégat

Matériels utilisés :

Le matériel est très limité, et se compose de :
- une éprouvette graduée (environ 500 cm³)

Conduite de l'essai :

Il faudra procéder comme suit :

- (1). Remplir une éprouvette avec un volume d'eau V_1 et en noter sa valeur
- (2). Peser un échantillon sec de granulats (environ 300 g)
- (3). Introduire l'échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air
- (4). Repérer la valeur du nouveau volume et la noter
- (5). Effectuer les calculs

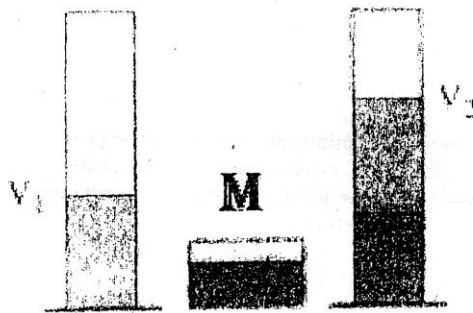


Tableau type :

V_1	M	V_2	ρ_s

Avec : ρ_s = masse volumique absolue

M = masse du matériau étudié (en t, kg, g)

V_1 = volume dans l'éprouvette avant introduction de la masse d'agrégat

V_2 = volume dans l'éprouvette après introduction de la masse d'agrégat

méthode de pycnométrie :

pycnométrie est une sorte de fiole jaugée de 100 cm³. Il permet de mesurer des volumes avec une grande précision.
Je remplis le pycnomètre jusqu'au trait de jauge : Je mesure la masse M_1 de l'ensemble. Je mesure la masse M_2 d'une certaine quantité de granulats (environ 50g) J'introduis cette masse M_2 dans le pycnomètre de d'eau. Je complète avec de l'eau jusqu'au trait de jauge en agitant avec une baguette de verre pour supprimer les bulles d'air. Je mesure la masse M_3 de l'ensemble. On doit la masse volumique absolue ρ_{abs} de la

Annexe C

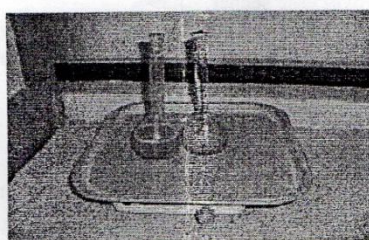
Centre universitaire Ain Témouchent

Institut de la Technologie

Département de Génie de l'Eau et de l'Environnement



T.P N :02 Détermination de la masse volumique des particules solides des sols (NF P94-054)



1. But de l'essai :

Le but de l'essai est la détermination de la masse volumique des grains solides des sols à l'aide du pycnomètre à l'eau.

2. Principe de l'essai :

La masse des grains solides est mesurée par pesage. Le volume des grains solides est déterminé par pesage au pycnomètre.

3. Matériels :

- Etuve de dessiccation
- Balance
- Pycnomètre
- Eau distillée
- Une source de chaleur
- Un thermomètre

4. Mode opératoire :

- Prendre un pycnomètre vide et s'assurer qu'il est sec.
- Peser le pycnomètre vide : **masse m₁**.
- Prendre environ 25 grammes d'un sol préalablement séché.
- Verser cette quantité du sol dans le pycnomètre.
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant l'échantillon de sol) : **masse m₂**.
- Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée et placer le tout sur la plaque chauffante et laisser chauffer (pour dégager les bulles d'air).



- Arrêter le chauffage quand l'eau est portée à ébullition.
- Laisser refroidir.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm³ (On veillera à verser l'eau doucement sur les parois pour ne pas recharger l'eau avec de l'air).
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant le sol et l'eau jusqu'à la graduation 250 cm³) : **masse m₃**.
- Vider le pycnomètre, le nettoyer et le sécher.
- Remplir le pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm³.
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant de l'eau jusqu'à la graduation 250 cm³) : **masse m₄**.

5. Calcul :

La masse volumique des grains solides du sol est donnée directement par la formule :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 + m_2}$$

Note : La valeur de la masse volumique des particules solides est la moyenne arithmétique de deux mesures effectuées sur deux prises d'essai provenant sur le même échantillon

Annexe D

Finesse de Mouture.

La notion de finesse de mouture est liée à la notion de "surface spécifique" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité.

Exemple : Ssp. ciment = $3200 \text{ cm}^2/\text{g}$

Cette aire est d'autant plus grande que les grains sont plus petits, donc que la finesse de mouture est grande.

Il est connu, par ailleurs, que la vitesse d'écoulement d'un fluide à travers un corps granulaire est d'autant plus faible que les grains qui composent ce corps sont plus fins : cette vitesse décroît donc quand la finesse de mouture augmente.

Surface spécifique et vitesse d'écoulement sont liés à un même facteur la finesse de mouture.

On a cherché une relation entre ces trois grandeurs. Il est possible de déterminer la surface spécifique d'un corps granulaire en mesurant la vitesse d'écoulement de l'air à travers ce corps; et cette surface massique caractérise la finesse de mouture.

Principe.

Faire passer, dans des conditions bien définies, une certaine quantité de ciment (par exemple); mesurer le temps de passage, et en déduire la surface spécifique par application d'une formule empirique.

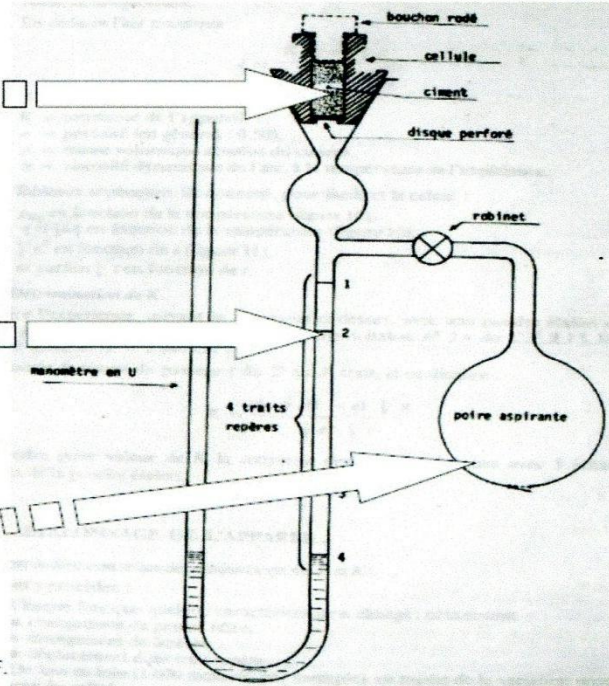
Matériel utilisé.

C'est le perméabilimètre BLAINE.

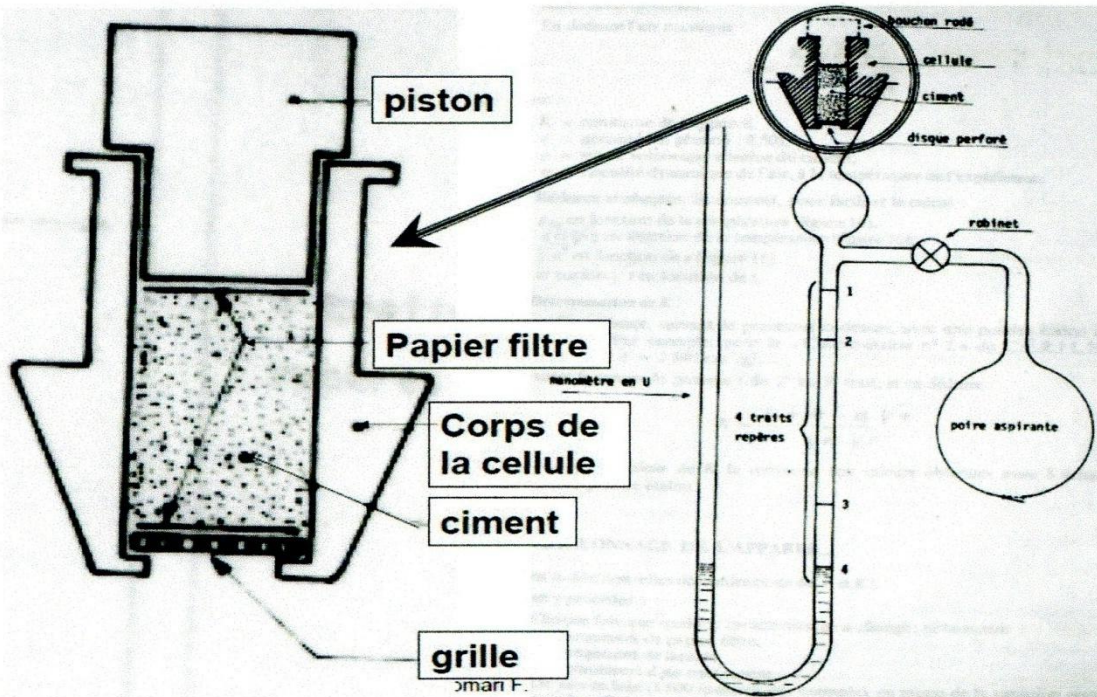
Le ciment est placé dans une cellule, dont le volume est limité par un piston (piston qu'on enlève lors de l'essai).

Cette cellule est placée dans l'ajutage conique d'un tube en verre formant manomètre en U; ce tube comporte 4 traits repères.

Le liquide de ce manomètre en U peut être inspiré par une poire munie d'une soupape, à l'extrémité d'un tube comportant un robinet.

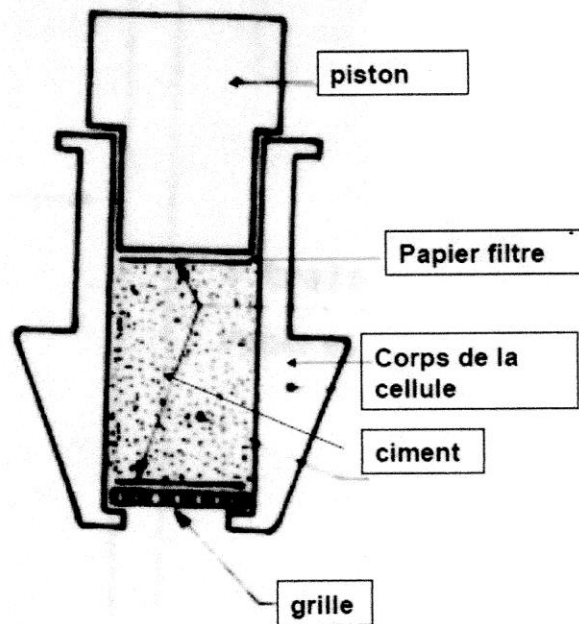


Ghomari F.



Ghomari F.

Cellule : tube métallique, dont le volume est limité par :
à la partie inférieure : une grille (trous diam. 1 mm),
à la partie supérieure : un piston. Il faut placer deux rondelles de papier filtre, pour éviter toute perte de ciment. La vitesse d'écoulement de l'air à travers le ciment dépend du tassement de ce ciment dans la cellule, donc de la quantité de ciment qu'on y introduit. Cet état de tassement est caractérisé par sa porosité n .



La masse du ciment est déterminée par :

$$m = m_{v \text{ abs}} \times V_{\text{abs}}$$

$$m = m_{v \text{ abs}} \times (V_{\text{app}} - V_{\text{vides}})$$

Le volume apparent est le volume V de la cellule, et $V_{\text{vides}} = n \cdot V_{\text{app}}$

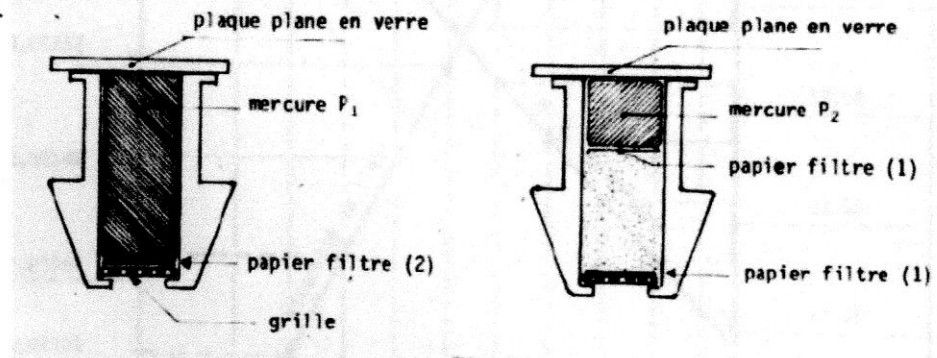
$$m = m_{v \text{ abs}} (V - n \times V)$$

$$m = m_{v \text{ abs}} \times V \times (1-n)$$

On opère généralement à porosité constante, avec $n = 0,5$.

Il faut donc déterminer la masse volumique absolue du ciment (volumétre de Le Châtelier) et le volume de la cellule (détermination directe).

Pour la détermination du volume de la cellule on emploie le mercure.



1. Placer la grille + 2 rondelles de papier filtre, remplir de mercure et le peser : P_1
2. Sur grille = une rondelle, placer un peu plus de ciment que ce que correspondrait à $n = 0,5$ (ainsi le mercure ne tassera pas le ciment : 2,8 à 3,0 g),
3. placer une 2^{eme} rondelle de papier filtre; enfoncer complètement le piston, puis le retirer,
4. remplir de mercure. Peser ce mercure : P_2 .

Le volume V de la cellule est celui occupé par le ciment :

$$V = P_1 - P_2 / m_{vHg}$$

m_{vHg} : masse volumique du mercure à la température de l'expérience.

Mode opératoire.

1. Placer grille + papier filtre + ciment (quantité calculée) + papier filtre,
2. Tasser et ôter le piston,
3. Vérifier le niveau du liquide : il doit arriver au trait inférieur (4); si nécessaire, parfaire ce niveau,
4. Placer la cellule sur l'ajutage. La jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline). S'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur (1), si on ferme le robinet, le niveau doit rester constant).

5. L'étanchéité étant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur (1), et fermer le robinet.
6. L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse : chronométrer le temps que met le liquide à passer du 2^e trait au 3^e trait; soit t (en secondes) la moyenne des temps résultant de 3 mesures consécutives.
7. Noter la température,
8. En déduire la surface spécifique :

$$S_{sp} = K \cdot \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t} / m_{v\ abs} \cdot (1-n) \cdot \sqrt{\eta}$$

avec :


K : constante de l'appareil,

n : porosité (en général : 0,50),


$m_{v\ abs}$: masse volumique absolue du ciment,

η : viscosité dynamique de l'air, à la température de l'essai.

Annexe E



Centre Universitaire Ain Témouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil



TP N°1

Analyse granulométrique par voie sèche (NF P94-056)

But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Mode opératoire

- 1- Préparer les tamis ($\Phi 200\text{mm}$) d'ouvertures suivantes (en mm) : 0,63 – 0,25 – 1 – 2 – 4 et en ($\Phi 30,5\text{mm}$) : 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5
- 2- Peser ces tamis vides.
- 3- Dresser la colonne des tamis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. Le fond étanche et le couvercle sont disposés respectivement en bas et en haut de la colonne.
- 4- Peser un kilogramme de sol.
- 5- Verser le sol en haut de colonne de tamis puis fermer le couvercle.
- 6- Procéder manuellement puis automatiquement à l'agitation de la colonne pendant environ 5 min.
- 7- Peser les tamis avec les refus partiels en commençant par le tamis supérieur (la masse perdue lors du tamisage ne doit pas dépasser 1% de la masse de la prise).

Travail demandé

- Réaliser l'essai.
- Présenter vos résultats selon le tableau suivant :

Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Tamisé cumulé (g)	Tamisé cumulé (%)
5				
2,5				
1,25				
0,63				
Fond				

- Tracer la courbe granulométrique.
- Calculer le module de finesse ainsi que les deux coefficients C_u et C_c .
- Nommer ce sol selon la classification LCPC.
- Commenter vos résultats.

Calculs

Formule de HAZEN $C_u = D_{60}/D_{10}$

Coefficient de courbure $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$

Module de finesse : Le module de finesse correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture (exprimée en mm) : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5

Annexe F

Institut des Sciences et de la Technologie
Département de génie civil

TP N°3 : EQUIVALENT DE SABLE

But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

Principe de l'essai

Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon à l'aide d'une solution lavante, puis on laisse reposer durant 20 mn.

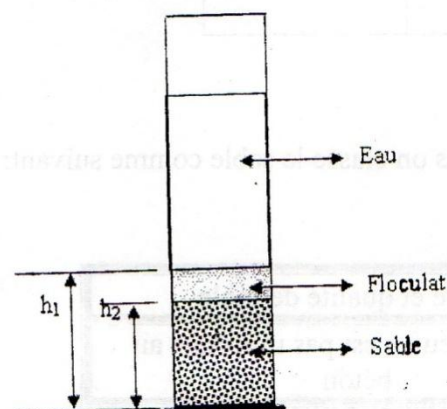
Ensuite on mesure les éléments suivants :

- h1 : sable propre + éléments fins
- h2 : sable propre seulement

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est égal à :

$$ES = \frac{h2}{h1} * 100$$

L'essai s'effectue sur 120 grammes de sable.



Mode opératoire :

- Verser la quantité de sable (120g) dans le tube pendant 10minute pour absorber l'eau.
- Fermer l'éprouvette et on met dans l'agitateur pendant 30minute.
- Laisser l'éprouvette 15 minute sans vibration.
- Lire la hauteur h_1 et h_2 par la règle.
- On refait la même expérience une autre fois.

Résultats :

Les résultats de l'essai sont donnés comme suit:

Équivalent de sable à vue Esv :

$$Esv = (h_2/h_1) \times 100\%$$

h_2 : hauteur de sable propre.

h_1 : hauteur de sable propre + hauteur des imputées.

	Essai 1	Essai 2
h_1 (cm)	3,6	2,7
h_2 (cm)	2,7	2,2
Esv		
moy Esv		

Classification de sable:

D'après les résultats obtenus on classe le sable comme suivant:

Esv	Nature et qualité de sable
<65	sable argileux n'est pas utilisable au béton
65<Esv<75	sable argileux utilisable au béton
75<Esv<80	sable propre utilisable au béton
Esv< 85	sable trop propre utilisable au béton

Annexe G

Centre Universitaire d'Ain Témouchent

Institut des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil

FICHE DE MANIPULATION

**FOISONNEMENT DU SABLE
ET TENEUR EN EAU**

➤ **Foisonnement du sable :**

❖ **Principe :**
L'essai consiste à mesurer la variation de la masse volumique apparente d'un échantillon de sable en fonction de l'accroissement progressif de sa teneur en eau.
Les résultats sont portés sur un graphique en vue de tracer la courbe de foisonnement du sable testé.

❖ **Matériel utilisé :**
Le même matériel utilisé pour la mesure de la masse volumique apparente d'un agrégat.

❖ **Mode opératoire :**
Peser 2 kg de sable sec ($w = 0\%$) et mesurer sa masse volumique apparente (moyenne de 3 essais).
Ajouter 1% d'eau soit 20 g à l'échantillon sec (2000 g) et bien mélanger.
Mesurer la nouvelle masse volumique apparente, refaire l'opération pour les valeurs de teneur en eau suivantes : 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 10%.

➤ **Teneur en eau :**

❖ **Définition :**
La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec.
On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.
 P_s = Poids du matériau sec.
 P_h = Poids matériau humide


Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

❖ **Principe.**
Trois procédés peuvent être utilisés pour la mesure de la teneur en eau in situ et/ou au laboratoire.

1. Flambage à l'alcool à brûler :
C'est le procédé couramment désigné sous le nom de "la poêle à frire".

- Peser l'échantillon humide, soit M_h ,
- Le placer dans un récipient métallique plat, et l'arroser d'alcool à brûler (1/2 l pour 2kg de sable),
- Allumer et agiter avec une tige métallique. Quand l'alcool est éteint, laisser refroidir,
- Répéter l'opération jusqu'à ce que le matériau soit sec, le peser soit M_s . Déterminer la W .



Page 1

FICHE DE MANIPULATION

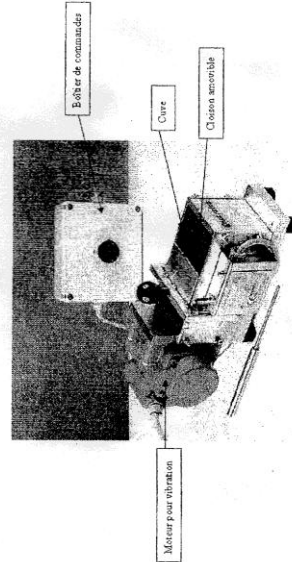
Mesure de la consistance des mortiers

➤ **Objectif :**

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou superplastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance ; c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 et NF P 15 -437.

➤ **description de l'appareil:**

- **maniabilimètre a mortier**



1 La cuve.

Elle se compose :

- d'un **bac rectangulaire** (60 cm x 30 cm x 30cm) monté sur patins de caoutchouc et séparé en 2 parties distinctes par une cloison amovible. Cette cloison coulisse verticalement dans des glissières fixées sur la face externe de la cuve.

- D'un **vibrateur** constitué par un moteur électrique, fixé à l'extérieur du bac. Il entraîne un axe sur lequel sont fixées des masses excentrées assurant une vibration de l'ensemble lors de leur rotation.

2 Le boîtier de commande.

Le boîtier de commande comporte un bouton ON, OFF, assurant la commande à distance de la mise sous tension de l'appareil et de son extinction.

3 La tige de piquage.

Elle sert lors du remplissage de la cuve.

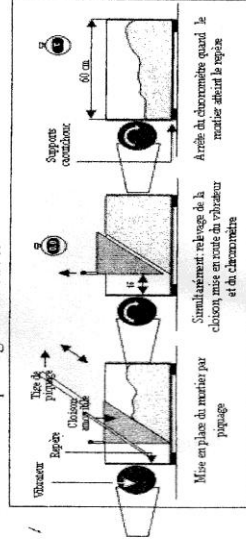


Fig.2: Principe de fonctionnement du maniabilimètre B

- **Chronomètre**
- **Malaxeur pour mortier**

➤ **Principe de l'essai**
 Dans ces essais, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration

- **Conduite de l'essai**
- **Préparation de mortier (EN 196-1)**

La composition du mortier à tester est le suivant :

- sable normalisé = 1350 g 65 g.
- ciment = 450 g 6 2 g.
- eau de gâchage = 225 g 1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).

on mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

Opérations	Introduction de l'eau de ciment	Introduction du sable	Rachage de la cuve
Durée des opérations	30 s	30 s	15 s
Etat du malaxeur	Arrête	Vitesse lente	Vitesse rapide

Tableau 1: *Opération pour déterminer le mortier normal*

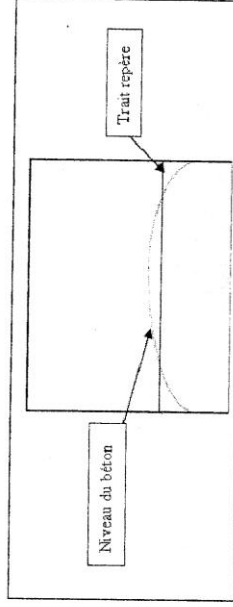
- **Remplissage de la cuve**
 Le remplissage doit se faire au maximum 2 min 30s après la fin du malaxage.
- Remplir de mortier le grand compartiment du maniabilimètre en quatre couches à peu près égales.
- Pour chaque couche, piquer le mortier de **6 coups** avec la tige de piquage, celle-ci étant **tenue parallèlement à la paroi inclinée** de la cloison amovible.

- A la fin, araser.

- **Mesures**

Lorsque le maniabilimètre est rempli, l'essai peut commencer :

- Mettre le bouton de commande sur ON : le micro- contact de la cloison amovible est armé.
 - Pour commencer l'essai, soulever la trappe et déclencher un chronomètre. Le fait d'ôter la trappe commande automatiquement la mise en route du moteur.
 - Arrêter le chronomètre lorsque le niveau du mortier atteint le trait repère supérieur de la cuve.
- Il arrive souvent que le niveau du mortier ne soit pas parallèle au trait repère et se présente comme l'indique le schéma. Il faut alors arrêter le chronomètre lorsque le niveau de ressuage recouvre les 2/3 du trait repère.



- Lorsque l'essai est terminé, mettre le bouton du boîtier sur OFF pour arrêter le moteur.



FICHE DE MANIPULATION

Mesure de l'air occlus dans le mortier

➤ **Objetif:**

Afin de faciliter la mise en place du ciment et pour augmenter sa durée de vie,

Il a été démontré que les caractéristiques mécaniques du ciment étaient optimales lorsqu'il contenait 3 à 4 % d'air en volume.

D'autres tests ont montré qu'il était primordial que la répartition de l'air occlus soit la plus uniforme possible.

Les aéromètres permettent de suivre l'effet des adjuvants sur la quantité d'air introduite dans le ciment lors du processus de fabrication. Leur fonctionnement repose sur la loi de Boyle Mariotte relative à la compressibilité des gaz.

➤ **description de l'appareil:**

Une cuve (1) d'un volume de 1 l est rendue hermétiquement close lors de l'essai grâce à un couvercle (2) étanche comportant 2 attaches rapides (3). Le couvercle comprend une chambre de pression (9) en liaison avec une pompe à air (4). Celle-ci permet d'appliquer la pression de travail au fluide utilisé lors de l'essai.

Des valves (6 et 5) permettent d'ajuster la pression à la pression de travail (soupape noire) ou d'effectuer le test (soupape verte). 2 vannes (7), vissées sur le couvercle, permettent de remplir d'eau ou de chasser l'air de la cuve.

La cuve communique avec le manomètre (8) via la chambre de pression.

Le manomètre, la pompe à main et les commandes des soupapes sont protégés de la poussière et de l'humidité.

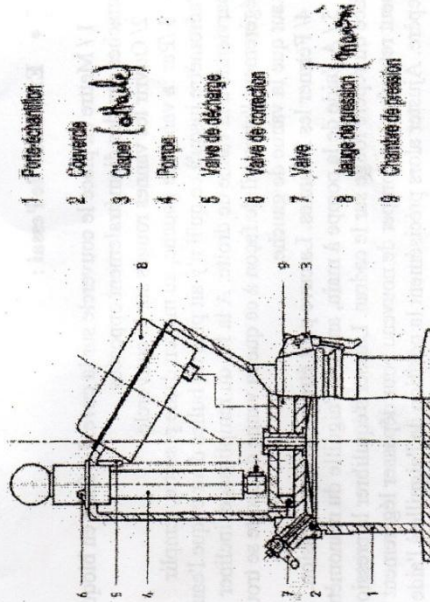


Schéma de l'appareil de mesure de la teneur en air

A mode opératoire.

• **Mise en place du mortier dans la cuve :**

- 1 / Introduire dans la cuve, en 2 couches, le mortier après la fin du malaxage.
- 2 / Appliquer 10 coups de tige de compactage à chaque couche, répartis uniformément sur la surface du mortier.
- 3 / Araser le mortier au niveau du bord supérieur de la cuve à l'aide d'une règle métallique à faces biseautées, avec un mouvement de sciage, et essuyer le bord du récipient avec une éponge.

• **Exécution de l'essai :**

- 1 / Mettre en place le couvercle sur la cuve. Le fixer en bloquant les attaches rapides diamétralement opposées.
- 2/ Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle.
- 3 /Par la vanne de gauche, au moyen d'une pissette, remplir l'aéromètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air et que l'eau parvienne à la vanne de droite. A la fin du remplissage, incliner légèrement l'appareil de façon à ce que la vanne de droite se trouve plus haut que la vanne de gauche.
- 4/ Fermer les 2 vannes. La cuve peut être mise sous pression.
- 5 / A l'aide de la pompe à main, amener l'aiguille du manomètre en face du repère rouge sur le cadran. Laisser s'équilibrer la pression (qui peut retomber) et pomper de nouveau pour dépasser légèrement le repère. Ajuster alors précisément la position de l'aiguille à l'aide du bouton poussoir noir (6).

- 6 / Tapoter légèrement le manomètre et l'aéromètre pour s'assurer que la pression ne change pas.
- 7 / Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes jusqu'à ce que les pressions entre cuve et chambre de pression s'équilibrent.
- 8 / Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'air occlus dans le mortier. **Noter la valeur de la teneur en air à 0.5 % près.**
- 9 / A la fin de la mesure, appuyer simultanément sur les touches **noire et verte** pour faire chuter la pression.
- 10 / Ouvrir les vannes et rajuster le niveau de l'eau.
- 11 / Répéter la mesure.
- 12 / Le même essai doit être recommencé sur un autre échantillon de la même gâchée. Le pourcentage d'air retenu est la moyenne arithmétique des lectures effectuées.

