

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option: Structure

Thème

Etude du comportement rhéologique des mortiers composés de poudre de marbre

Réalisé par : BENAHMED Fadhila

Membres du Jury

M. MEHADDENE

Professeur.

Président

M. ILLOULI

M.C.B.

Examineur

M^{me}. O. HADDAD-MALEK

M.C.B.

Encadreur

Promotion 2017/2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option: Structure

Thème

Etude du comportement rhéologique des mortiers composés de poudre de marbre

Réalisé par : **BENAHMED épouse MEDJBER Fadhila**

Membres du Jury

M. MEHADDENE	Professeur	Président
M. ILLOULI	M.C.B.	Examineur
M^{me}. O. HADDAD-MALEK	M.C.B.	Encadreur

Promotion 2017/2018

Soutenue publiquement le : **11/12/2018**

Remerciements

*Je remercie en premier lieu **Dieu** tout puissant de m'avoir accordé le courage, la patience et la volonté pour achever ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes plus vifs remerciements à ma promotrice : **M^{me} O. MALEK-HADDAD**, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer ce thème et m'a dirigé toute au long de l'année et m'a guidée toujours de façon très positive, je l'a remercie pour sa disponibilité, sa compétence, son optimisme et ses nombreux encouragements. Son regard de formatrice et ses connaissances furent très précieux.*

*J'adresse mes sincères remerciements **aux membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je remercie chaleureusement ma famille et ma belle famille en particulier **mes parents** pour leur soutien quotidien et indéfectible. Qu'ils trouvent dans ce travail le témoignage de ma gratitude.*

*Je voudrais également adresser mes sincères remerciements aux doctorantes **Ghanem Fadhila** et **Aldjia** et au personnel du laboratoire du département de Génie Civil **Mr. Bouheraoua.R** et **Melle Babaci.A** pour m'avoir facilité le travail au laboratoire, et pour le soutien et encouragement ; qu'ils trouvent ici l'expression de ma plus grande considération.*

J'exprime mes vives reconnaissances à tous les enseignants rencontrés durant mon parcours au sein de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Enfin, Je tiens à remercier tous mes amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mon marie et mes chers parents qui m'ont apporté leurs soutiens, leurs amours et leurs encouragements. Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.

A mes très chers enfants Ahmed Ramzi et Maria

A mes chers frères Yacine et Abd El Ghani

A mes très chères sœurs Sabrina et Kamilia

A mes nièces Amélia et Anaïs

A ma belle famille en particulier ma belle mère

A mes amies Aldjia Fadhila Amina et Samira

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail

Merci pour tous.

Résumé

Résumé : L'objectif de cette étude est de faire le point sur l'ensemble des questions qui se posent vis-à-vis des effets des poudres minérales sur le comportement rhéologiques des matériaux cimentaires, notamment les coulis et les mortiers. Deux type d'essais empiriques ont été utilisés : affaissement et étalement au mini cône d'Abrams ; écoulement au cône de Marsh. Ces deux essais permettent d'apprécier deux paramètres physiques qui sont le seuil de cisaillement et la viscosité. On a alors utilisé la poudre de marbre de deux manières différentes : une fois en substitution au ciment puis en substitution au sable. On a également fait varier le dosage en superplastifiant. Les résultats de substitution au ciment ont permis de confirmer l'effet viscosant de la PM. En contre partie les résultats de substitution au sable ont permis de confirmer l'effet plutôt contraire.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Définitions et Bibliographie.....	4
I.1.Introduction.....	4
Partie 1: Généralités sur les ciments.....	4
I.2.Définition du ciment	4
I.3.Constituants du ciment.....	4
I.3.1. Le clinker	4
I.3.2. Le gypse	5
I.3.3. Les additifs.....	5
I.4. Matières principales du ciment premières.....	5
I.4.1. Les calcaires.....	5
I.4.2. Les argiles	6
I.4.3. Les marnes	7
I.5. Matières auxiliaires	7
I.5.1. Les matériaux correctifs.....	7
I.5.2. Les minéralisateurs.....	7
I.6. Ajouts cimentaires.....	8
I.6.1. Les fillers calcaires.....	8
I.6.2. Les ajouts pouzzolaniques.....	9
I.6.3. Les ajouts hydrauliques latents	9
I.7. Définition du ciment portland.....	9
I.8. Composition chimique et minéralogique du clinker	10
I.8.1. Composition chimique	10
I.8.2. Composition minéralogique	10
I.9. Catégories des ciments.....	11
I.9.1. Classification des ciments	11
I.10. Caractéristiques du ciment	12
I.10.1. Prise.....	12
I.10.2. Durcissement.....	12
I.10.3. Fausse prise	12
I.10.4. Chaleur d'hydratation.....	13
I.10.5. Finesse de mouture.....	13
I.10.6. Retrait.....	13
I.10.7. Expansion.....	13
I.10.8. Gonflement.....	13
I.10.9. La résistance.....	14

Partie 2: Généralités sur les mortiers	15
I.11.Introduction	15
I.12.Eléments de ressemblance entre les bétons et mortiers.....	16
I.13. Constituants des mortiers	17
I.13.1. Le Liant	17
I.13.2. Le sable	17
I.13.2.1 Origines de sable	18
I.13.2.2. Granulométrie	19
I.13.2.3. Rôle de sable dans le mortier	19
I.13.2.4. Exigences sur le sable d'usage général	20
I.13.3. L'eau de gâchage.....	20
I.13.4. Les additifs.....	20
I.13.4.1. Les adjuvants.....	20
I.13.4.2. Les ajouts	22
I.14. Les mortiers et leurs utilisations	24
I.15. Le mortier comme outil d'aide à la formulation des bétons	25
I.15.1. Cas du Mortier normal (EN 196-1).....	25
I.15.2. Les mortiers dans le bâtiment	26
CHAPITRE II : Généralités sur la Rhéologie des produits cimentaires.....	30
II.1. Introduction.....	30
II.2.Comment évalue-t-on la rhéologie ?.....	30
II.2.1.La mesure rhéologique et les rhéomètres	34
II.3.Les éléments qui influencent la rhéologie des produits cimentaires.....	34
Chapitre III : Composition des mortiers & Procédures expérimentales.....	36
III .1. Introduction	36
Partie 1 : Composition des mortiers	37
III.2. Formulation des mortiers.....	37
III.3. Matériaux et Formulation.....	37
III.3.1. Matériaux utilisés	37
III.3.1.1. Ciment	37
III.3.1.2. Sable	37
III.3.1.3. Poudre de marbre.....	38
III.3.1.4. Adjuvant	38
III.3.1.5. Eau de gâchage.....	39
III.4. Caractérisation du sable.....	39
III.4.1. Echantillonnage (NF P 18-553):.....	39
III.4.2. Analyse granulométrique.....	39

Sommaire

III.4.3. Module de finesse du sable.....	40
III.4.4. Absorption et masses volumiques du sable	41
III.5. Formulation des mortiers.....	42
III.5.1. Compositions des mortiers	44
III.6. Formulation des mortiers pour l'écoulement	44
Partie 2 : Procédures expérimentales	46
III.7.Procédures expérimentales et conditions de conservations	46
III.7.1. Confections des mortiers	46
III.7.2. Préparation de la gâchée.....	46
III.8. Résistance à la compression à 28 jours	47
III.9. Essais d'affaissement et d'étalement des mortiers.....	49
III.10. Essais d'écoulement des mortiers.....	50
CHAPITRE IV : Résultats et Exploitations.....	51
IV.1. Introduction	51
Partie.1. Résultats des essais de résistances sur les mortiers.....	51
IV.2. Résultats des résistances à 28 jours.....	51
IV.2.1. Résistance à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 1.....	52
IV.2.2. Résistance à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 3.....	54
Partie 2 : Résultats de la rhéologie des mortiers.....	56
IV.3. Résultats des essais d'affaissement et d'étalement	56
IV.3.1. Etalement et Affaissement du mortier de référence	57
IV.3.1.1. Etalement et Affaissement des mortiers du groupe 1	57
IV.3.1.2. Etalement et Affaissement des mortiers du groupe 2.....	60
IV.3.1.3. Etalement et Affaissement des mortiers du groupe 3.....	62
IV.4.Résultats des essais d'écoulement.....	65
IV.4.1. Ecoulement mortier de référence composé du sable de dune.....	66
IV.4.2.1. Ecoulement des mortiers du groupe 1	66
IV.4.2.2. Ecoulement des mortiers du groupe 2	67
IV.4.2.3. Ecoulement des mortiers du groupe 3	68
IV.5. Conclusion.....	70
Conclusion générale	72
Références bibliographiques.....	74
Annexe 1 : Différents essais de laboratoire	75
Annexe 2 Résultats des différents essais de caractérisation	85

Liste des figures

Figure I.1: Différents types d'ajouts cimentaires.....	8
Figure I.2. Désignation d'un ciment courant [3].....	15
Figure I.3. Constituants des mortiers [7].....	16
Figure I.4: Sable roulé (naturel).....	18
Figure I.5: Sable concassé (Artificiel).....	19
Figure I.6: Différents ajouts cimentaires.....	23
Figure I.7: Une calcite dans le système rhomboédrique.....	23
Figure I.8: Le gypse.....	24
Figure I.9. Composition granulométrique du sable de référence CEN.....	26
Figure II.1. Table à secousses.....	31
Figure II.2. le principe de l'essai de Maniabilimètre du LCPC.....	32
Figure. II.3. viscosimètre Le cône Marsh.....	32
Figure II.4. Essais de caractérisation rhéologique des bétons autoplaçants [7].....	33
Figure II.5. La mesure rhéologique et les rhéomètres.....	34
Figure III 1 : mottes de marbre récupérées.....	38
Figure III.2. Courbe granulaire du Sable 0/3.....	40
Figure III.3. Malaxeur électrique pour mortier.....	46
Figure III.4. Moule de confection des éprouvettes 5×5×5 cm ³	48
Figure III.5. cube de mortiers.....	48
Figure III.6. Mortier soumis à la compression pure.....	48
Figure III.7. Mesure de l'étalement.....	49
Figure III.8. Mesure de l'affaissement.....	49
Figure. III.9. Essais d'écoulement des mortiers.....	50
Figure VI.1. Exemple de courbe chargement en fonction de la déformation obtenue.....	52
Figure IV.2. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 1.....	53
Figure IV.3. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de PM.....	54
Figure IV.4. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 3.....	55
Figure IV.5. Ségrégation du mortier.....	56
Figure IV.6. Mortier ferme.....	57
Figure IV.7. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 1.....	58
Figure IV.8. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 1.....	59
Figure IV.9. Affaissement fct. Etalement des mortiers du groupe 1.....	59

Liste des figures

Figure IV.10. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 2.....	60
Figure IV.11. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 2.....	61
Figure IV.12. Affaissement fct. Etalement des mortiers du groupe 2.....	62
Figure IV.13. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 3.....	63
Figure IV.14. Influence de la PM sur l'étalement.....	63
Figure IV.15. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 3.....	64
Figure IV.16. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 3.....	64
Figure IV.17. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 1.....	67
Figure IV.18. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 2.....	68
Figure IV.19. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 3.....	69

Tableau I.1. Composition chimique du gypse.....	5
Tableau I.2. Teneurs moyennes des oxydes constitutifs du clinker.....	10
Tableau I.3. Composition minéralogique du clinker.....	11
Tableau I.4. Liste des différents types de ciments courants normalisés [1, 11].....	11
Tableau I.5. Résistance à la compression [3].....	14
Tableau I.6. Différents types d'essais pour Béton et Mortier.....	17
Tableau I.7. Différentes actions des adjuvants.....	21
Tableau III.1. Masses volumiques et coefficients d'absorption du sable.....	41
Tableau III.2. Nomenclature des compositions de mortiers testés.....	43
Tableau III.3.1. Des mortiers en gramme Compositions du 1 ^{er} groupe de mortier.....	44
Tableau III.3.2. Compositions des mortiers en gramme du 2 ^{ème} groupe de mortiers.....	44
Tableau III.3.3. Compositions des mortiers en gramme du 3 ^{ème} groupe de mortiers.....	44
Tableau III.3.4. Compositions des mortiers en gramme du 2 nd programme.....	45
Tableau III.3.5. Compositions des mortiers en gramme du 2 ^{ème} groupe de mortiers.....	45
Tableau III.3.6. Compositions des mortiers en gramme du 3 ^{ème} groupe de mortiers.....	45
Tableau IV.1. Résistances moyennes en Compression en (MPa) des mortiers du groupe 1...52	52
Tableau IV.2. Résistance moyenne en Compression en (MPa) des mortiers du groupe 3.....	55
Tableau IV.3. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 1.....	58
Tableau IV.4. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 2.....	60
Tableau IV.5. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 3.....	62
Tableau IV.6. Ecoulement des mortiers du groupe 1.....	66
Tableau IV.7. Ecoulement des mortiers du groupe 2.....	67
Tableau IV.8. Ecoulement des mortiers du groupe 3.....	69

Introduction générale

Le principe du mortier et du ciment est connu depuis l'antiquité et les égyptiens utilisaient déjà, il y a plus de 4 500 ans, un mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau pour sceller les pierres. Par la suite, les Romains ont mis au point un ciment particulièrement performant en chauffant du calcaire et en le transformant en chaux vive. Ce ciment contient de la chaux et du sable fin constitué de pouzzolanes, scories volcaniques basaltiques. Ce mélange permet d'obtenir un ciment d'une solidité remarquable et d'une bonne durabilité, grâce à la teneur élevée en aluminium des roches volcaniques employées. C'est en utilisant de manière particulièrement ingénieuse ce mortier exceptionnel que les Romains ont pu réaliser des ouvrages qui ont traversé les siècles presque sans dommages !

Au fil des siècles, le ciment, le mortier et le béton n'ont pas cessés de nous impressionner par leurs évolutions performantielles et de longévité. En contre partie, la formulation de ces produits devient de plus en plus complexe par le nombre de produits qu'ils renferment ou bien par les performances que l'on envisage d'atteindre. En effet, les mortiers et les bétons d'aujourd'hui renferment souvent des poudres autres que le ciment, toutes sortes d'adjuvants, parfois des fibres et récemment des produits de récupération. Cette variété de produits qui sont soit inertes ou actives sont introduits pour améliorer certaines propriétés du matériau, mais souvent engendre en parallèle des effets non désirables sur d'autres, c'est le cas par exemple du filler calcaire. Le filler calcaire qui est une poudre inerte est souvent introduit dans les matériaux cimentaires pour améliorer leurs propriétés rhéologiques de l'état frais au détriment de leurs performances mécaniques de long terme.

Le comportement rhéologique des matériaux cimentaires est un paramètre déterminant quant aux performances que développera le produit final. Une bonne mise en place, « bonne maniabilité » conduira à une meilleure compacité du matériau et de meilleures performances mécaniques et de durabilité. Or la rhéologie de ces produits reste toujours difficile à maîtriser, les choses ne sont pas toujours claires, notamment avec les bétons composés.

En effet, on trouve deux sortes d'affirmations. Certains travaux affirment que les poudres minérales ont pour effet d'améliorer la viscosité des matériaux et d'autres affirment que les poudres minérales ont des effets d'améliorer la fluidité des matériaux. Or ces deux propriétés.

Introduction générale

sont opposées. Plus un matériau est fluide, moins il sera visqueux, et plus le matériau est visqueux moins il sera fluide. Ces affirmations sont mises en évidence avec le développement des matériaux autoplaçants.

L'objectif de cette étude consiste à travailler d'avantage les effets de l'introduction des fines minérales sur les propriétés rhéologiques des mortiers de ciment. On a alors choisi de travailler avec la poudre de marbre issue du recyclage

Par cette étude on souhaite répondre à la question : l'addition minérale telle que la poudre de marbre (PM) joue elle un effet fluidifiant ou bien épaississant (viscosant) sur les matériaux cimentaires ? Pour répondre à cette question on a choisi de travailler sur des mortiers au lieu des bétons. On a introduit cette PM de deux manières différentes :

- La PM en substitution au ciment (poudre – poudre) : mêmes classes granulaires.
- La PM en substitution au sable (poudre – sable) : classes granulaires différentes.

Plusieurs taux de substitution sont utilisés.

Les essais rhéologiques choisis pour mener à bien cette étude sont :

Pour caractériser la fluidité

- Affaissement au mini cône d'Abrams (échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams des bétons).
- Etalement au mini cône d'Abrams (échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams des bétons).

Pour caractériser la viscosité

- Ecoulement au cône de Marsh (entonnoir d'écoulement).

Trois Groupes de mortiers sont étudiées :

- ❖ **Groupe 1** : une partie du ciment est remplacée graduellement avec de la PM. Pour ce groupe de mortier on a maintenu le dosage en superplastifiant constant, fixé par rapport à la masse du ciment.
- ❖ **Groupe 2** : une partie du ciment est remplacée graduellement avec de la PM. Pour ce groupe de mortier on a le dosage en superplastifiant est fixé constant par rapport à la masse des fines (ciment + PM). Il est donc variable par rapport à la masse du ciment.
- ❖ **Groupe 3** : une partie du sable est remplacée graduellement par de la PM. La masse du ciment est maintenue constante ainsi que le dosage en superplastifiant.

En plus du mortier de référence nommé MR, cinq mortiers, par groupe, sont initialement prévus pour l'étude.

Introduction générale

Par les difficultés rencontrées à la partie expérimentale, on a dû reprendre le programme est redéfinir les formulations initialement prévues. Pour la partie écoulement, on a dû remplacer le sable concassé initialement utilisé par du sable de dune.

On a également mesuré les résistances à 28 jours des mortiers étudiés.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Après l'introduction générale, ce document est composé de quatre chapitres et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre : est composé de deux parties

- ❖ Partie 1 : Rappels des définitions et généralités sur les ciments.
- ❖ Partie 2 : on a fait une petite recherche sur les mortiers et leurs utilisations.

Le deuxième chapitre :

- ❖ On a fait une petite recherche sur la rhéologie et méthodes de caractérisation rhéologique des matériaux cimentaires.

Le troisième chapitre est composé de deux parties :

- ❖ Partie 1 : Présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos mortiers.
Calculé les différentes compositions des mortiers.
- ❖ Partie 2 : Présenté les procédures expérimentales suivies pour réaliser les campagnes d'essais (essais de résistance à la compression, affaissement et étalement au mini-cône d'Abrams, écoulement au cône de Marsh).

Le quatrième chapitre est composé de deux parties traitant chacune une partie de l'étude menée. On a alors présenté les résultats et l'interprétation des résultats obtenus.

En dernier, on a récapitulé nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.

Chapitre I : Définitions et Bibliographie

I.1.Introduction

Dans ce présent chapitre on a souhaité faire une petite synthèse sur les propriétés des matériaux cimentaires, notamment les mortiers. Pour cela, on a préféré dans un premier temps aborder les définitions essentielles du ciment. En effet, pour comprendre les phénomènes régissant les mortiers de ciment il y a lieu dans un premier temps de comprendre le ciment. On a par la suite, essayé de faire une petite recherche sur les mortiers et leurs utilisations. Et enfin, on a abordé une petite recherche sur l'état de l'art de la rhéologie des matériaux cimentaires.

Partie 1: Généralités sur les ciments

I.2.Définition du ciment

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier [1, 2, 3,4].

I.3.Constituants du ciment

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage. Ils se composent de:

I.3.1. Le clinker

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant scorie. Il est obtenu en cuisant, vers 1450°C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile, appelés crus. L'argile, principalement composée de silicates d'alumine, se scinde sous l'effet de la chaleur en ses constituants, silice et alumine, qui se combinent ensuite à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

I.3.2. Le gypse

Le gypse dénommé aussi gypsite est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre.

Tableau I.4: Composition chimique du gypse.

Composant	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl^-
%	10,05	2,99	1,55	26,90	3,86	0,41	0,05	30,33	0,007

I.3.3. Les additifs

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1% [1, 5,6].

I.4. Matières principales du ciment premières

Les matières premières principales sont 80% de calcaire et 20% d'argile. Ces matières premières sont présentes partout. Des roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux, ont une composition qu'est proche de cette composition. Des correcteurs, minerai de fer qui apporte Fe_2O_3 , bauxite (Al_2O_3), sable (SiO_2) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée.

I.4.1. Les calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée d'au moins de 50% de calcite et pouvant contenir de la dolomite, de l'aragonite. Les calcaires se forment soit par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires (coraux, bivalves, foraminifères,...), soit

par précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium. Ce dernier est utilisé en un poids qui est trois fois supérieur à celui d'argile, on le retrouve sous les formes suivantes:

- ❖ **Marbre:** matière pure de composition chimique: CaCO_3 ou $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$.
- ❖ **Calcaires durs:** possèdent une structure microcristalline et contiennent le plus souvent des impuretés.
- ❖ **Craie:** roche tendre blanche et micro granulaire, elle est composée de cristaux fins de calcite organogène de teneur en CaCO_3 atteint souvent 98 à 99% sous forme de tuff-calcaire et les types lithologiques suivants:
- ❖ **Calcaire cristallin:** représenté par des cristaux de calcite qui peuvent être formés par voie chimique de dimensions variables (0,01 à 2,0mm), ces calcaires sont formés lors de la précipitation des solutions.
- ❖ **Calcaire organogène:** constitué de squelette ou de coquille d'animaux ou de végétaux, constitués de calcite et d'aragonite.
- ❖ **Calcaire détritique:** formé de débris des calcaires anciens.
- ❖ **Calcaire à structure mélangée:** variété intermédiaire entre les trois calcaires cités, ils sont très répandues dans la nature.

I.4.2. Les argiles

L'argile est un minéral (plus exactement une famille des minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllo-silicates (silicates en feuillets). Leur structure est identifiable par étude aux rayons X; elle se caractérise par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques ou octaédriques. Dans l'espace entre les feuillets, ou espace interfoliaire, se placent divers cations comme K, Na, Ca. L'argile est généralement issue de l'altération par l'eau des autres silicates (sauf le quartz). C'est pour cette raison qu'on le trouve systématiquement dans les sols et les formations superficielles. Minéral détritique ultra fin, on le trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires. Mélangé à un autre minéral comme la calcite il formera de la marne, sa formule générale est la suivante: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$.

❖ Classification des argiles

Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique on peut classer les argiles en différents groupes:

- ❖ Groupe de kaolin: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- ❖ Groupe de l'halloysite: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- ❖ Groupe de la montmorillonite: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- ❖ Groupe des minéraux argileux micacés (séricite)
- ❖ Groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite)

I.4.3. Les marnes

C'est une roche sédimentaire formée d'un mélange de carbonate de calcium (le calcaire) et d'argile comptant pour 35 à 65%. Les marnes ont une composition chimique intermédiaire entre les calcaires marneux d'argile (5 à 35%) et les argiles calcareuses ou marnes argileuses (65 à 90%). Les marnes sont très répandues dans la nature, elles contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des rapports de calcaires ou d'argiles afin de parfaire leur dosage, les calcaires argileux sont préférés pour la fabrication des ciments puisqu'ils se présentent comme mélange naturel de calcaire et de substance argileuse.

I.5. Matières auxiliaires

Leur utilisation est sans cesse croissante, on distingue:

- ❖ Les matériaux correctifs, qui sont ajoutés au cru pour ajuster les teneurs en certains oxydes comme SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .
- ❖ Les régulateurs de prise du ciment.
- ❖ Les minéralisateurs.
- ❖ D'autres ajouts comme les fluidifiants et les entraîneurs d'air... [5].

I.5.1. Les matériaux correctifs

On distingue:

- ❖ Les correctifs siliceux: le sable et le grès.
- ❖ Les correctifs alumineux: bauxite...
- ❖ Les correctifs ferrugineux: minerai de fer, pyrite grillée.

I.5.2. Les minéralisateurs

L'activation chimique du processus de cuisson se réalise grâce à des minéralisateurs accélérateurs qui mènent à une:

- ❖ Accélération de la décomposition de CaCO_3 .
- ❖ Accélération des réactions à l'état solide par action sur le réseau cristallin.
- ❖ Diminution de la température de formation du clinker fondu.
- ❖ Augmentation de la quantité de la phase fondue.

I.6. Ajouts cimentaires

Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs [1 ,2].

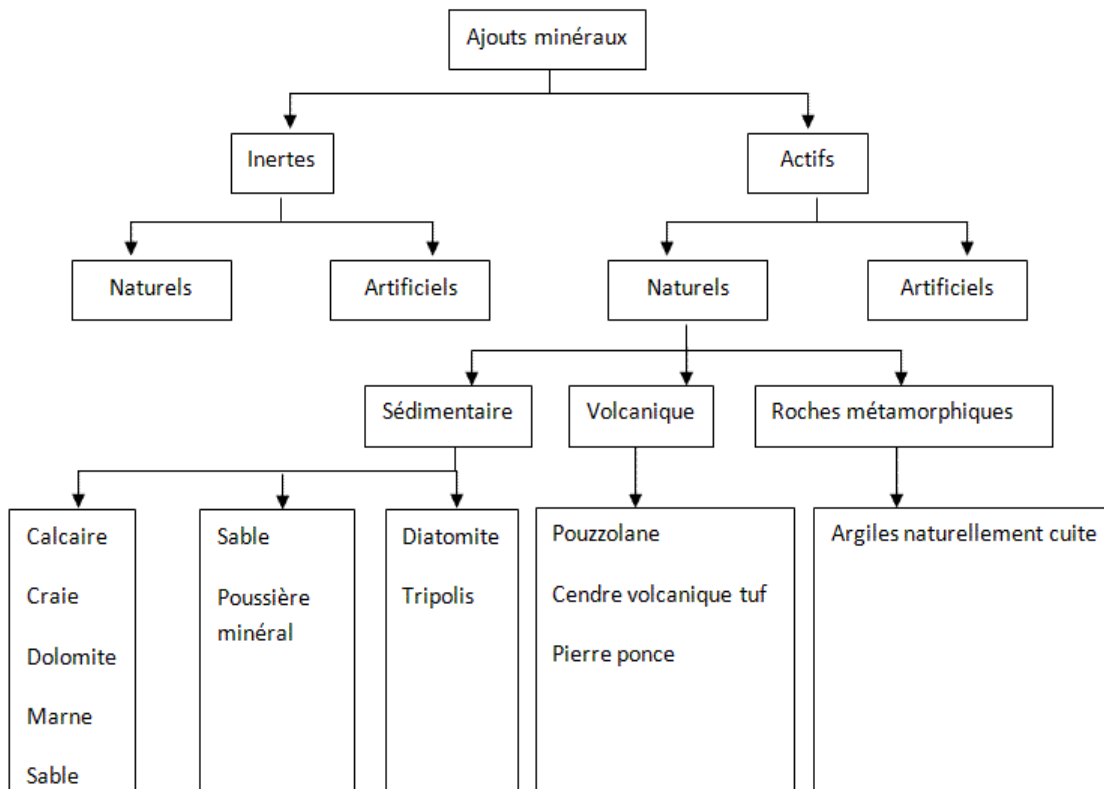


Figure I.1: Différents types d'ajouts cimentaires.

Les différentes variétés du ciment sont liées directement par les qualités et les proportions des différents matériaux ajoutés au clinker, selon leurs activités, on peut les classées en trois types [1, 2].

I.6.1. Les fillers calcaires

Ils sont constitués du calcaire broyé. Ils jouent un rôle de remplissage. Une partie de clinker peut être remplacée sans avoir un impact sur les propriétés finales par un matériau pratiquement inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates du ciment. En fait, les fillers calcaires ne sont pas complètement inertes, ils conduisent à la formation des carboaluminates de calcium.

I.6.2. Les ajouts pouzzolaniques

Ils tirent leur nom des pouzzolanes, cendres volcaniques utilisées par les romains en mélange avec de la chaux pour faire leur ciment. Par extension, un matériau est dit pouzzolanique s'il conduit à des propriétés hydrauliques en mélangeant avec la chaux.

Ces ajouts peuvent être d'origine naturelle comme les matériaux d'origine volcanique ou des sous-produits industriels comme les cendres volantes obtenues par dépoussiérage des gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé ou les fumées de silice, sous-produit de l'industrie du silicium.

I.6.3. Les ajouts hydrauliques latents

Ce sont des composés qui contiennent les principaux oxydes du clinker, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 dans des proportions telles qu'ils conduisent à la formation des hydrates similaires. Cependant, leur solubilité dans l'eau est très inférieure à celle des anhydres du clinker, de sorte qu'il est nécessaire de modifier le milieu pour qu'ils réagissent (activation). Ce sont essentiellement les laitiers granulés de haut-fourneau obtenus par trempe du surnageant de la fonte résultant de la fusion du minerai de fer.

I.7. Définition du ciment portland

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker portland, de gypse et éventuellement d'additifs telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles...[1].

Une notation cimentière a été établie pour simplifier l'écriture des phases solides. Les équivalences sont les suivantes: $\text{CaO}=\text{C}$; $\text{SiO}_2=\text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3=\text{A}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{F}$; $\text{SO}_3=\bar{\text{S}}$; $\text{H}_2\text{O}=\text{H}$

I.8. Composition chimique et minéralogique du clinker

I.8.1. Composition chimique

La composition chimique du clinker est comme suit [1 ,2]:

Tableau I.5: Teneurs moyennes des oxydes constitutifs du clinker.

Oxydes constitutifs	Teneur limite (%)	Source Calcaire	
CaO	60 à 69	Argile	
SiO ₂	18 à 24		
Al ₂ O ₃	4 à 8		
Fe ₂ O ₃	1 à 8		
MgO	0 à 5		Calcaire et argile
Alcalis (K ₂ O et Na ₂ O)	0 à 2		
SO ₃	0 à 3		

I.8.2. Composition minéralogique

On appelle clinker le produit tel qu'il sort du four après cuisson des matières premières, ces principaux minéraux sont:

- ❖ **Alite (C₃S):** silicate tricalcique, formulé 3CaO.SiO₂ ou C₃S en notation cimentière, est le principal constituant anhydre du clinker, qui lui confère ses propriétés hydrauliques.
- ❖ **Belite(C₂S):** silicate bicalcique, formulé 2CaO.SiO₂ ou C₂S en notation cimentière, est le constituant qui permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.
- ❖ **Aluminate (C₃A):**C'est la phase qui réagit en premier lors de l'hydratation en dégageant une grande quantité de chaleur (réaction exothermique), elle contribue essentiellement à la prise de la pâte du ciment. Elle est facilement attaquable par les sulfates.
- ❖ **Ferrite (C₄AF):** Forme la solution solide C₂A et C₂F, elle réagit moins que C₃S, son rôle est mineur dans les réactions de durcissement.

En plus de ces quatre phases le clinker peut contenir également:

- ❖ **La chaux libre (CaO₁):**dont le pourcentage ne peut pas dépasser 2% (risque d'expansion).
- ❖ **Périclase (MgO):** dont le pourcentage ne peut pas dépasser 5% (risque d'expansion).

Tableau I.6: Composition minéralogique du clinker.

<i>Teneur (%)</i>	<i>Composant minéralogique</i>
40 à 70	<i>Silicate tricalcique (C₃S)</i>
0 à 30	<i>Silicate bicacique (C₂S)</i>
2 à 15	<i>Aluminate tricalcique (C₃A)</i>
0 à 15	<i>Ferro-aluminate tétracalcique (C₄AF)</i>

I.9. Catégories des ciments

I.9.1. Classification des ciments

Tableau I.4. Liste des différents types de ciments courants normalisés [1, 11]

Désignations	Types de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I(CPA)	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
CEM II/A (CPJ)	Ciment portlandcompose	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5%
CEM II/B (CPJ)		65 à 79%	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	
CEM III/A (CHF)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	/
CEM III/B (CHF)		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	
CEM III/C (CLK)		5 à 19 %	81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	
CEM IV/A (CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
CEM IV/B (CPZ)		45 à 64 %	36 à 55 % comme si dessus	
CEM V/A (CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
CEM V/A (CLC)		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	

Il existe d'autres ciments, spéciaux, décrits par d'autres normes, généralement utilisés pour des ouvrages spéciaux ou dans des conditions spéciales. Parmi d'autres, nous avons :

- ❖ Ciment prompt naturel (CNP).
- ❖ Ciment alumineux fondu (CA)
- ❖ Ciment de laitier à la chaux (CLX)
- ❖ Ciment à maçonner (CM)

I.10. Caractéristiques du ciment

Une fois la poudre de ciment mélangé à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon le ciment et la rapidité de prise.

I.10.1. Prise

On entend par la prise du ciment le phénomène d'épaississement du système: Ciment- Eau succédant au gâchage (augmentation brusque de la viscosité du mélange). La prise correspond chimiquement à une hydratation des principaux constituants et à la formation des composés hydratés assurant la cohésion de la matière.

I.10.2. Durcissement

Le durcissement est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques transformant après la prise, le système Ciment – Eau en une masse solide résistant aux efforts mécaniques. Il y a enchevêtrement des cristaux, ce qui donne à la pâte une adhésion et une dureté, c'est le durcissement.

I.10.3. Fausse prise

Dans la composition des ciments la présence du gypse($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est indispensable. Si le clinker EST trop chaud ou s'échauffe trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la fausse prise. Dans ce cas il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage.

I.10.4. Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leur pourcentage relatif, le dégagement de chaleur est donc plus au moins important. Suivant le type de ciment, cette chaleur est comprise à 12h, approximativement, entre 65j/g pour certain CPA-CEMI.

I.10.5. Finesse de mouture

La finesse de mouture, également appelée finesse de Blaine, exprimée en m^2/kg , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment. Elle est d'une façon générale, comprise entre 300 et 350 (la finesse s'exprimait auparavant en cm^2/g et il existe de nombreux utilisateurs continuent à l'exprimer ainsi (il ressort qu'une finesse de 300 m^2/kg correspond à 3000 cm^2/g). Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait qui accroissent par conséquent la fissuration ainsi que d'éventement du ciment.

I.10.6. Retrait

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 4x4x16cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. La norme impose les valeurs limites à 28 jours de:

- ❖ 800 $\mu m/m$ pour les ciments portland CPA-CEM I et CPJ-CEM II de la classe 32.5.
- ❖ 1000 $\mu m/m$ pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R-42.5 et 42.5R.

I.10.7. Expansion

Les causes possibles de l'expansion proviennent de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium qui peuvent contenir certains ciments sous forme de chaux ou de magnésie libre. Les ciments doivent être stables, car les risques d'expansion dans le temps peuvent provoquer des désordres importants par dislocation des maçonneries.

I.10.8. Gonflement

Bien que non normalisé, il est utile de rappeler qu'alors qu'il se rétracte dans l'air, le ciment augmente de volume lorsqu'il est immergé dans l'eau, sa variation dimensionnelle étant environ $1/10^{eme}$ de celle constatée dans l'air.

I.10.9. La résistance

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF EN 196 – 1, elle est exprimée en MPa. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées, 32,5, 42,5 et 52,5.

Tableau .I.5. Résistance à la compression [3]

<i>Résistance à la compression (en MPA)</i>				
<i>Désignation de la Classe de résistance</i>	<i>Résistance à court terme</i>		<i>Résistance courante à 28 Jours</i>	
	<i>À 2 jours</i>	<i>À 7 jours</i>		
32,5N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5R	≥ 10	–		
⊘ 42,5N	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5R	≥ 20	–		
52,5N	≥ 20	–	≥ 52,5	–
52,5R	≥ 30	–		

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

Désignation et marquage :

La désignation complète d'un ciment courant est décrite dans la norme NF EN 197-1 ; voir l'exemple [CEM II / A – LL 32,5 R CE CP2 NF].

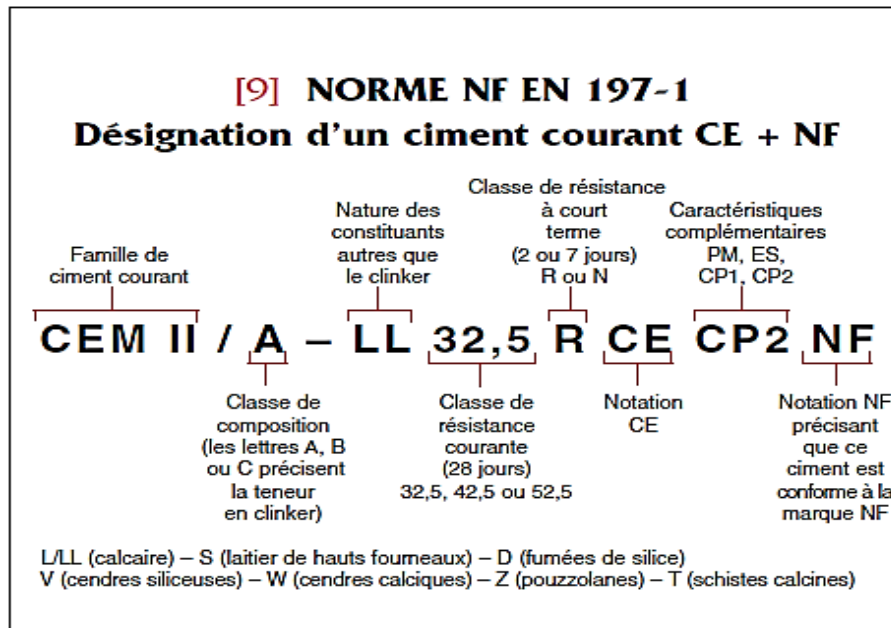


Figure I.2. Désignation d'un ciment courant [3]

Les ciments courants doivent être marqués CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et permet à ces ciments de circuler librement au sein de l'espace économique européen.

Partie 2: Généralités sur les mortiers

I.11.Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant pour obtenir un « **mortier** », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons [7, 8].

La ressemblance des compositions des mortiers à celles des bétons fait que le mortier s'apparente bien au béton sur tous les aspects, propriétés à l'état frais, propriétés à l'état durci, propriétés de durabilité.... Ainsi, toutes les définitions déjà abordées à la partie une de ce chapitre reste valable sur le mortier.

En comparaison au béton, les mortiers sont utilisés pour assurer une très large gamme de fonctions, cela va de la résistance, à la liaison, à la protection, isolation, esthétique, bouchage...

I.12.Éléments de ressemblance entre les bétons et mortiers

Les éléments de ressemblance de ces deux matériaux est lié au fait qu'ils soient composés de mêmes produits voir figure suivante :

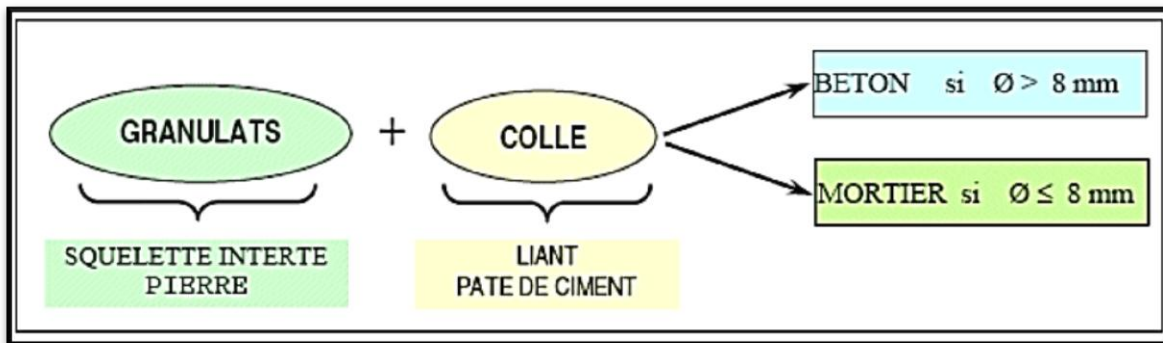


Figure I.3. Constituants des mortiers [7]

Parmi d'autres points de ressemblance on peut citer :

- ❖ Mûrissement : le processus d'hydratation, et donc de durcissement du mortier est le même que ce que l'on rencontre dans les bétons.
- ❖ Maniabilité et facilité de mise en place, comme pour les bétons on peut trouver plusieurs classes de consistance des mortiers, on peut avoir des mortiers fermes, plastique, ...à autoplaçants.
- ❖ Résistances : il existe plusieurs classes de résistances des mortiers, on peut aller des mortiers à maçonner à faible résistance mécanique, au mortier structuraux comme le Ductal à une résistance mécanique à la compression dépassant les 100 MPa.
- ❖ Comportement mécanique (lois de comportement, retrait, fluage, fatigue, fragilité, ...)
- ❖ Masse volumique : mortiers lourds à mortiers légers.
- ❖ Durabilité : on optimisant la composition des mortiers, on peut très bien développer des mortiers à des durées de vie très intéressantes, notamment pour les ouvrages hydriques.
- ❖ Effets des Adjuvants : en effet, les adjuvants interagissent principalement avec les ciments, leurs effets restent donc identiques qu'en les utilisent pour confectionner un béton ou un mortier.

Ainsi, pour définir les propriétés d'un mortier à l'état frais ou bien durci, on a tendance à utiliser les mêmes essais de laboratoire, quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.6. Différents types d'essais pour Béton et Mortier

Propriété	Béton	Mortier
Affaissement & Etalement	Cône D'Abrams	Cône D'Abrams (échelle 1 /2)
Viscosité	Temps d'écoulement au V-Funnel	Temps d'écoulement au Cône de Marsh
	Maniabilimètre à béton	Maniabilimètre à mortier
Prise et durcissement	Aiguille de Vicat	Aiguille de Vicat
Résistances	Cylindre ou cubes normalisés	Prismes 4 x 4 x 16 cm, des cubiques 5 x 5 x 5cm ³
...

I.13. Constituants des mortiers

I.13.1. Le Liant

On utilise généralement des liants hydrauliques comme le ciment, ce dernier est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson [7, 8, 9,10].

Généralement, on peut utiliser:

- ❖ Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- ❖ Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt,...).
- ❖ Les liants à maçonner.
- ❖ Les chaux hydrauliques naturelles.
- ❖ Les chaux éteintes.

I.13.2. Le sable

Matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet,

amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements: il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut [1,11].

I.13.2.1 Origines de sable

Sable d'origine naturelle :

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho-scopie) au cours des temps géologiques. Les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les sables sont toujours définis en fonction des constituants (masses orbitaires), on parle ainsi de sable quartzeux, feldspathique, ferrugineux, micacé, calcaire, ou encore de sable coquillier. Toutefois, dans le langage courant, le sable est généralement associé au sable quartzeux.

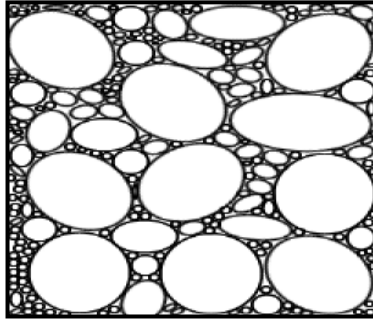


Figure I.4: Sable roulé (naturel).

Sable d'origine artificielle

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane), dit aussi sable concassé, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant.

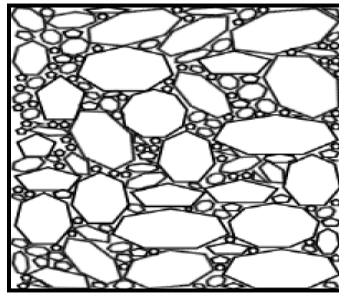


Figure I.5: Sable concassé (Artificiel).

I.13.2.2. Granulométrie

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- ❖ Extra-fins: jusqu'à 0,08 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- ❖ Fins: jusqu'à 1,6 mm.
- ❖ Moyens: jusqu'à 3,15 mm.
- ❖ Gros: jusqu'à 5 mm.

I.13.2.3. Rôle de sable dans le mortier

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant de ça, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide [1,7].

I.13.2.4. Exigences sur le sable d'usage général

Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable L'indice fourni par cet essai (ESV) doit être inférieur à 75%. Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 3mm.

En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0% à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié, c'est le phénomène bien connu du foisonnement du sable.

I.13.3. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

I.13.4. Les additifs

I.13.4.1. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants, les superplastifiants (haut réducteurs d'eau), les entraîneurs d'air, les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) et les hydrofuges [1,7,12]. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé, pour les raisons suivantes:

- ❖ On ajoute les adjuvants qui servent à aérer en vue d'améliorer la maniabilité et la durabilité du mortier. Toutefois, des recherches ont démontré que des contenus

d'air dans le mortier en excès de 12 % augmentent la probabilité que l'humidité y pénètre en plus de diminuer l'adhérence.

- ❖ On utilise quelquefois un antigel ou autre produit semblable pour abaisser le point de congélation du mortier afin de poser de la brique par temps froid. Toutefois, pour que cette méthode soit efficace, il faut ajouter une quantité considérable et cela diminue considérablement l'adhérence, en plus de contribuer à l'efflorescence et à l'effritement des surfaces du briquetage.
- ❖ Les accélérateurs comme le chlorure de calcium servent à accélérer l'hydratation du mortier par temps froid en vue d'éviter de chauffer les matériaux du mortier. Toutefois, le chlorure de calcium chlorite tend à corroder l'armature dans le mortier. Les accélérateurs, même ceux qui ne contiennent pas de chlorure de calcium, ont tendance à causer de l'efflorescence.
- ❖ Une bonne composition du mélange, l'utilisation de matériaux de qualité et une bonne technique permettent habituellement d'obtenir une maçonnerie solide. Par contre, une mauvaise composition, l'utilisation de matériaux de qualité inférieure et une technique défectueuse ne peuvent pas être corrigées par l'emploi d'adjuvants. Selon l'effet recherché, on peut distinguer trois grandes familles d'adjuvants [1, 7,12].

Tableau I.7. Différentes actions des adjuvants.

Action	Rôle	Domaine d'emploi
La prise	Il diminue le temps ou prise ou durcissement du ciment.	Bétonnage pour temps froid, décoffrage rapide, travaux sous l'eau.
	Il augmente le temps de prise.	Bétonnage par temps chaud, avec coffrage glissant.
L'ouvrabilité	A teneur en eau égale, il augmente l'ouvrabilité du béton et mortier.	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	A même maniabilité, il augmente les résistances.	Travaux Génie civil, bétonnage avec coffrage glissant.
	Il provoque un fort croisement de maniabilité.	Fondation, dalles, raideurs, béton pompé.
Les résistances aux agents extérieurs	Il entraîne la formation de microbulle d'air uniformément.	Béton exposé au gel, bétons routiers
	Ils diminuent l'absorption capillaire des bétons et mortiers.	Ouvrage hydraulique, mortiers d'étanchéité.

I.13.4.2. Les ajouts

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton et mortiers durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois.

- ❖ Les cendres volantes

Il existe trois classes qui sont :

- ❖ **Classe F:** moins de 10% de CaO.
- ❖ Grande proportion de Silice et d'Alumine.
- ❖ Structure: verre d'Aluminosilicate.
- ❖ Composition: cristaux de mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), quartz, hématite, magnétite.
- ❖ **Classe C:** de 15 à 35% de CaO .

- Plus réactif que la classe F.

- ❖ **Classe F et C:** - 60 à 85% de verre.
- ❖ 10% à 30% phases cristallines.
- ❖ 10% carbone non calciné.
- ❖ Diamètre de $1\mu m$ à $100\mu m$.
- ❖ Le laitier de haut fourneau
- ❖ Laitier acide:
- ❖ Pourcentage élevé de la silice fondue de 50 à 60%.
- ❖ Alumine.
- ❖ 25 à 30% de chaux.
- ❖ Le rapport pondéral (Silice/Chaux) ≤ 1.10 .
- ❖ Laitier basique:
- ❖ Rapport pondéral: $CaO/SiO_2 \geq 1.3$.
- ❖ Composition chimique: 40 à 55% de CaO, 25 à 35% de SiO_2 , 12 à 25% de Al_2O_3 .
- ❖ Les pouzzolanes
- ❖ Pouzzolane naturelle:

L'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

- ❖ Pouzzolane artificielle:

Matière essentiellement composée de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et de schiste cuit.

- ❖ Les colorants

On peut donner la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6% du poids du ciment portland. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée. L'ajout d'une trop grande quantité de pigment diminuera la résistance et la durabilité. Le poids maximal de pigment ne devra pas dépasser, en poids, 1% du ciment, sauf dans le cas de noir de carbone qui ne devrait pas représenter plus de 2%.



Figure I.6 : Différents ajouts cimentaires.

Avec: 1: cendre volante classe C, 2: métakaolin, 3: fumée de silice, 4: cendre volante classe F, 5: laitier, 6: schiste.

❖ Les calcites

Ce sont des ajouts incolores de couleur blanche, jaune, brune, rouge, et noire. Elles se composent que de CaCO_3 , leur densité varie entre 2,6 et 2,8, leur [Indice de réfraction](#) varie entre 1,48 et 1,65. Elles éclatent dans la flamme et libèrent CO_2 , le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl.



Figure I.7: Une calcite dans le système rhomboédrique.

❖ La fumée de silice

Elle est composée essentiellement de silice (SiO_2) avec un diamètre qui varie entre 0,1 et 2 μ , elle est utilisée dans la confection des BHP et les bétons coulés sous l'eau comme elle peut être utilisée aussi comme ajout au ciment (10% du poids du ciment).

❖ Les fillers

Selon les normes françaises NF 1979, les fillers sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier ou cendre volante) naturelles ou non.

❖ Le gypse

C'est une espèce minérale qui se compose de sulfate de calcium hydraté (voir tableau I.1).



Figure I.8: Le gypse

I.14. Les mortiers et leurs utilisations

Les fabricants de mortiers proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de jointoiment,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressassage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

I.15. Le mortier comme outil d'aide à la formulation des bétons

Avec tous les nouveaux produits qui se développent continuellement, il est devenu très difficile de choisir les produits les plus adaptés aux exigences des cahiers des charges pour la formulation des bétons. Pour faciliter l'étape de formulation et de tri des produits, plusieurs essais sur pâte de ciment, sur coulis ou sur mortier sont alors développés [7].

L'étalement au mini cône d'une pâte de ciment est utilisé pour étudier l'influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur l'ouvrabilité de la pâte de ciment. En 1989, le LCPC, a développé la méthode des coulis comme outil d'aide à la formulation des bétons à hautes performances [8]. La méthode des coulis utilise les fines de béton à diamètres inférieurs à 80 μm . Les techniques de mesure sont diverses ; mesures de l'étalement du coulis en utilisant un mini cône; mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh pour comparer la fluidité de plusieurs pâte de ciment et ou d'additions [7,11]. Les résultats obtenus sont utilisés pour sélectionner les constituants de la pâte et étudier leurs interactions, mais ne permettent pas de prédire complètement le comportement du béton.

La méthode du Mortier de Béton Equivalent considère un mortier dont la composition est dérivée de celle du béton et dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton [7]. La méthode est considérée comme un outil d'aide à la formulation. Elle a pour but de diminuer le nombre de gâchées de béton à réaliser pour l'optimisation de la composition d'une formule de béton.

Actuellement, la méthode MBE est utilisée au laboratoire pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation des bétons, en utilisant des tests sur mortier en complément voire en remplacement de tests sur béton.

Les coulis et les mortiers sont donc utilisés pour appréhender le comportement à l'état frais du béton, son murissement et ses propriétés à long terme résistance et durabilité.

I.15.1. Cas du Mortier normal (EN 196-1)

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme pour déterminer la consistance de la pâte de ciment. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CECN EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est

commercialisé en sac plastique de 1350 ± 5 g. Sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la Figure I.9.

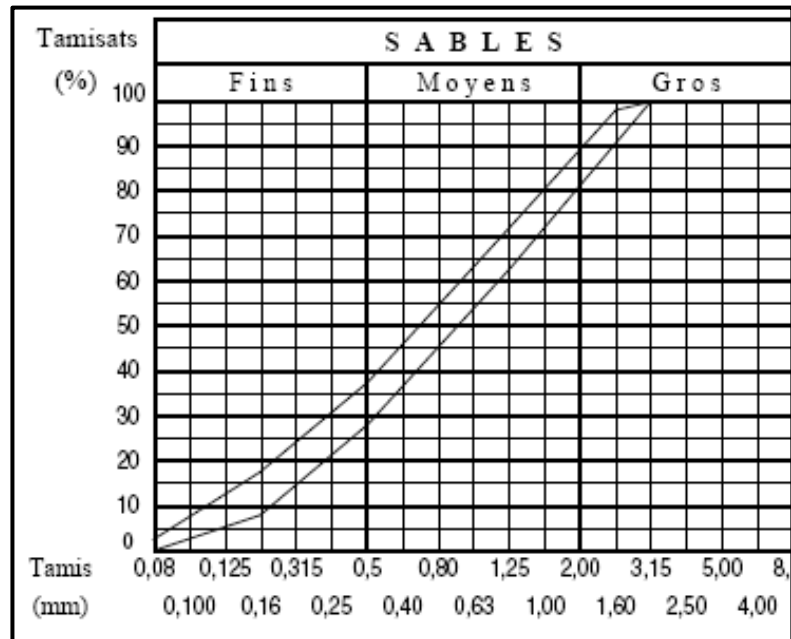


Figure I.9. Composition granulométrique du sable de référence CEN

La composition du mortier à tester est le suivant :

- sable normalisé = 1350 ± 5 g.
- ciment = 450 ± 2 g.
- eau de gâchage = 225 ± 1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).

I.15.2. Les mortiers dans le bâtiment

Les mortiers peuvent être très différents les uns des autres, selon le domaine de leurs d'applications on peut citer les catégories suivantes:

- Mortier de pose.
- Mortier de joints.
- Mortier pour les crépis.
- Mortier pour le sol.
- Mortier pour les stucs.
- Pierres artificielles.
- Support pour les peintures murales.
- Mortier d'injection.
- Mortier pour les mosaïques.
- Mortier de réparation pour pierres.

Selon la nature et les pourcentages des constituants on peut citer :

Mortier de ciment : Il est plus résistant que les mortiers de chaux mais il reste imperméable à l'air, par conséquent, il maintient l'humidité dans une maçonnerie traditionnelle de pierres qui doit toujours être aérée. Ce mortier doit être utilisé uniquement pour la maçonnerie des blocs de bétons ou autrement dit de parpaings en ciment. Sa rigidité en fait un matériau qui a tendance à fissurer sous l'action des écarts de température, notamment alternances gel & dégel, tandis que son imperméabilité l'expose aux moisissures. En revanche, il est plus facile, rapide, et tolérant à mettre en œuvre.

Mortier de chaux grasse : Il fait prise en contact avec l'air. Il durcit en surface et reste souple à l'intérieur de la maçonnerie. Cette qualité en fait un mortier qui reste élastique et donc qui ne fissure pas. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques. Mais il ne doit pas être utilisé dans un milieu humide (cave, mur souterrain, etc.). Le mortier de chaux grasse est moins résistant par rapport à un mortier de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

Mortier de chaux hydraulique : Il est fabriqué à partir de calcaires argileux. Il fait sa prise même sans contact avec l'air, sous l'eau par exemple. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques. Deux avantages sont qu'il reste plus flexible que le mortier de ciment et est perméable à la vapeur d'eau, donc régule l'humidité ambiante. En revanche, il est plus technique et lent à mettre en œuvre, et demande des conditions de température et hygrométrie plus étroites (néanmoins courantes en zone tempérée).

Mortier bâtard : Le mortier bâtard est constitué par un mélange de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Le mortier bâtard permet d'avoir un ciment qui respire un peu sans trop absorber l'eau ; il convient bien pour crépir et ne se fissure pas comme un ciment fort. De plus, la chaux augmente le pouvoir collant du mortier, ce qui est appréciable en enduit vertical. La perméabilité d'un mortier bâtard à la vapeur d'eau diminue proportionnellement au

pourcentage de ciment qu'il contient. Il est utilisé également pour la fixation d'éléments de maçonnerie demandant une résistance mécanique plus importante (scellements etc).

Mortier de terre : Le mortier de terre est un mortier fait avec de l'argile ou de la terre crue. De par la disponibilité de la matière première, ce type de mortier est ou a été probablement employé partout dans le monde depuis des temps immémoriaux éventuellement en remplacement de la chaux.

Les mortiers de fibres : L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers prémélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales.

Mortier réfractaire : fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues ...

Mortiers industriels secs prémélangés : Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration par le fabricant, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité.

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les autres avantages présentés par ces produits sont les suivants:

- Prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité;
- pas d'approvisionnement et de stockage sur place des constituants (sables, liants, adjuvants);
- perte de temps limitée (appréciable dans le cas de travaux à effectuer rapidement et lorsque la place fait défaut);
 - ❖ Chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins. Ils peuvent également étudier des compositions de mortier adaptées, donnant les performances optimales requises pour chaque usage. Ces mortiers reçoivent le plus souvent un ou plusieurs adjuvants en poudre, afin de modifier les propriétés rhéologiques, les temps de prise, la durabilité, l'aspect (mortiers colorés) ou leur adhérence grâce à l'ajout de résines vinyliques ou acryliques. Ils sont conditionnés en sacs. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiment.
- Mortier de ragréage.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment...
- Mortier de réparation

CHAPITRE II : Généralités sur la Rhéologie des produits cimentaires

II.1. Introduction

La rhéologie est une branche de la physique qui s'occupe de mesurer, de modéliser, de prévoir l'écoulement des différents fluides. Le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse qu'a chaque fluide à s'opposer aux sollicitations mécaniques qu'il subit.

L'étude de la rhéologie s'occupe de proposer des modèles mathématiques qui peuvent décrire les différents comportements rhéologiques. La rhéologie permet de comprendre comment le comportement des matériaux change lorsqu'ils sont soumis, par exemple, à une étape de malaxage, quand leur texture évolue au cours du temps, quand ils passent du repos au mouvement et vice-versa [1,7].

Cette science s'applique à des substances fort différentes : l'eau, l'huile, les yaourts, le sang, le dentifrice, le bitume, le mortier, le béton...

Le comportement à l'état fluide des matériaux cimentaires (bétons et mortiers) est décisif pour leur utilisation optimale. Souvent, dans les métiers de la construction, on utilise le terme rhéologie au sens du "maintien de l'ouvrabilité", C'est-à-dire la variation dans le temps d'une des caractéristiques d'écoulement du produit, à savoir : son étalement, son écoulement. Mais d'autres mesures peuvent également être utilisées vitesse d'écoulement dans l'entonnoir (V-Funnel pour les bétons et cône de Marsh pour les coulis et mortiers).

II.2. Comment évalue-t-on la rhéologie ?

Les propriétés d'écoulement recherchée dans un matériau réfléchissent directement le processus de sa production : énergie de son malaxage, sa mise en place (avec ou sans vibration) sa pompabilité (son flux dans des tuyaux), les forces qu'il exerce sur les parois des coffrages, et ainsi de suite. Il est facile d'anticiper l'impact de ces aspects dans les conditions de production et mise en œuvre des matériaux cimentaire mortiers et bétons [1, 4, 7,13].

Pour évaluer de façon empirique ces aspects, des essais technologiques ont été introduits dans la caractérisation de ces matériaux notamment les bétons pour qui les ingénieurs s'intéressent le plus : **cône d'Abrams, mini-cône d'Abrams, table à secousse, Maniabilimètre, V-funnel, L-box, cône de Marsh...**Tous visent à simuler un aspect des conditions de mise en œuvre du béton ou mortier, de manière plus générale, de son écoulement.

Dans ce qui suit on présente quelques illustrations des appareillage de caractérisation des mortiers.

❖ Table à secousses

Après le démoulage du mortier, ce dernier reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

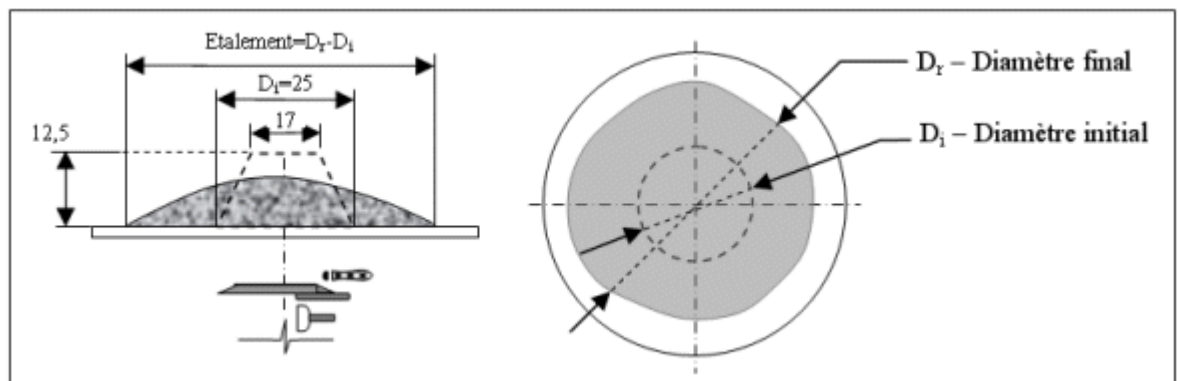


Figure II.1. Table à secousses.

Avec: D_r : diamètre final ; D_i : diamètre initial

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

❖ Maniabilimètre du LCPC

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

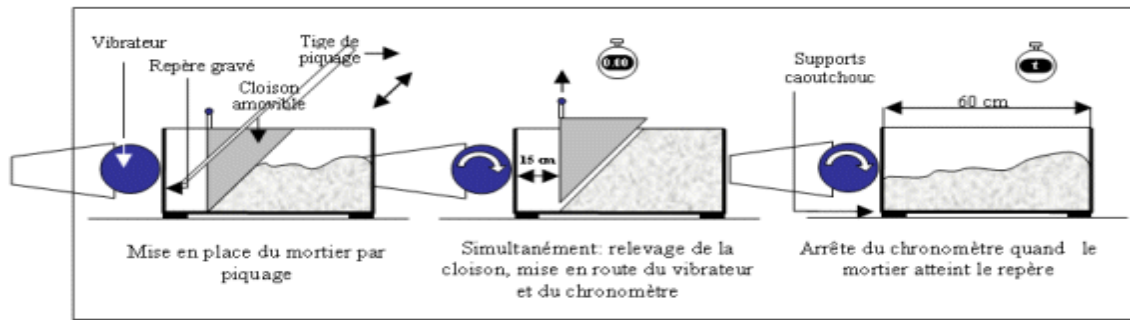


Figure II.2. Principe de l'essai de Maniabilimètre du LCPC.

Le cône Marsh, viscosimètre

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône, le cône peut aussi être muni d'un vibreur.



Figure. II.3. viscosimètre « Le cône Marsh »

Dans ce qui suit on présente quelques illustrations de l'appareillage de caractérisation des bétons autoplaçants.

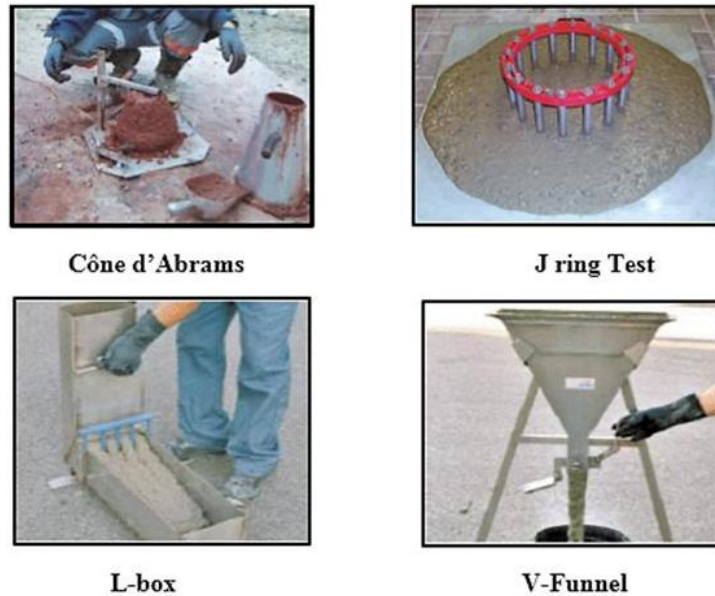


Figure II.4. Essais de caractérisation rhéologique des bétons autoplaçants [7]

Ces essais sont très simples, utiles, légers et irremplaçables dans la pratique quotidienne. Néanmoins, ils donnent des résultats (temps, longueurs, ratios) qui ne correspondent pas directement à des grandeurs physiques intrinsèques du matériau et qui, souvent, dépendent de plusieurs d'entre elles. C'est justement l'accès aux propriétés physiques intrinsèques du matériau qui permet de caractériser de façon univoque et indépendante leurs comportements à l'écoulement. Pour ce faire, on se sert de rhéomètres. Ce sont des appareils qui imposent au fluide à étudier un écoulement contrôlé et en mesurent simultanément la réponse. Ceci permet d'obtenir un rhéogramme, soit la "**signature rhéologique** «spécifique à chaque matériau. Cette information nous informe en détail et, de façon absolue, sur le comportement rhéologique du matériau testé.

Les courbes obtenues permettent de comparer de matériaux différents et d'évaluer comment les grandeurs rhéologiques caractéristiques du matériau sont affectées, par exemple, par le rapport solide / fines, par le type d'adjuvant, par le dosage en filler, etc.

En somme, la caractérisation rhéologique permet de donner une interprétation quantitative des caractéristiques à l'état frais du produit (béton, mortier et coulis), en précisant de façon objective et absolue des aspects essentiels, mais souvent repérés de façon vague et subjective (béton "collant", "liquide", ...)

II.2.1. La mesure rhéologique et les rhéomètres

Pour caractériser le comportement à l'écoulement d'un matériau cimentaire, on se sert de rhéomètres. Ces appareils peuvent fonctionner sur des principes différents. Les plus communs visent à induire un écoulement à symétrie cylindrique au produit, confiné dans une cuve, comme le montre la figure II.5.a, par l'imposition d'une vitesse de rotation sur un mobile. Ils mesurent en retour la résistance que le fluide oppose à ce mouvement.

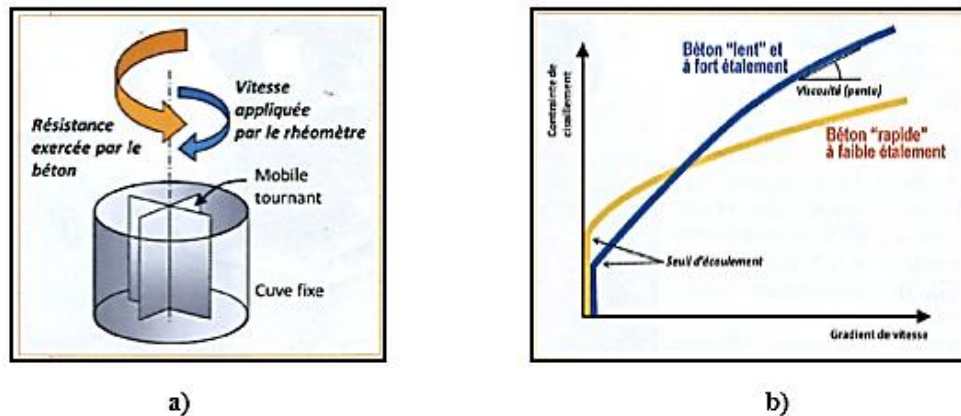


Figure II.5. La mesure rhéologique et les rhéomètres

a) Principe de fonctionnement d'un rhéomètre, b) Exemples de rhéogrammes [7]

Par le biais de considérations physiques et mathématiques, il est possible de remonter à des grandeurs qui ne dépendront pas de la taille de la cuve, ni du type de mobile, mais seulement du fluide lui-même. Ce sont là les grandeurs rhéologiques absolues (le gradient de vitesse et la contrainte de cisaillement).

Il est ainsi possible d'établir des courbes que relient ces deux grandeurs (Voir courbes) et donc de définir le comportement du produit indépendamment des conditions de caractérisation et de mise en œuvre.

Après la modélisation des courbes, deux paramètres sont déduits de leur tracé : le seuil d'écoulement (la contrainte minimale à exercer pour mettre en mouvement le produit) et la viscosité (pente de la courbe contrainte de cisaillement versus le gradient de vitesse).

II.3. Les éléments qui influencent la rhéologie des produits cimentaires

Les éléments qui conditionnent l'écoulement d'un mortier et ou béton peuvent être de natures très différentes :

- ❖ **Le temps** : depuis sa confection jusqu'à la prise, le mortier ne cesse d'évoluer, tout en restant un fluide, en général, son seuil d'écoulement augmente.
- ❖ **La température** : les températures les plus élevées augmentent la mobilité des molécules, et accélère le processus d'hydratation.
- ❖ **la composition** : par exemple, un mortier avec un rapport Eau/Ciment élevé, toute autre chose étant égale par ailleurs, présente une viscosité et un seuil d'écoulement plus faibles.
- ❖ **La nature des constituants** : la nature du ciment (sa finesse), du sable, des additions, la courbe granulométrique globale, le facteur de forme des granulats ont tous des effets différents et décisifs sur le comportement rhéologique du béton/mortier (des granulats roulés permettront un écoulement plus aisé que des granulats concassé). De même, la présence limitée d'ultrafines comme la fumée de silice peut favoriser la vitesse d'écoulement.
- ❖ **Les adjuvants (fluidifiants)** : plastifiant et superplastifiants, qui baissent le seuil d'écoulement ou aussi la viscosité (en agissant sur l'état de floculation des particules de ciment). A côté de ceux-ci, les agents viscosants, qui visent à assurer des conditions d'écoulement plus stable, ou encore les agents de stabilité qui, par le biais de différents mécanismes, agissent sur le seuil d'écoulement ou sur sa variation en fonction des conditions de repos/mouvement auxquelles le produit est soumis.

Chapitre III : Composition des mortiers & Procédures expérimentales

III .1. Introduction

On rappelle que l'objectif de notre travail est d'étudier l'impacte de la substitution des composants d'un mortier par la poudre de marbre (PM) sur le comportement rhéologique. La poudre est issue du recyclage. On veut répondre à la question : les aditions minérales tel que la poudre de marbre jouent elles un effet fluidifiant ou bien épaississant sur les matériaux cimentaires ? Pour répondre à cette question on a choisi de travailler avec des mortiers au lieu des bétons. On a introduit cette PM de deux manières différentes :

- La PM en substitution au ciment (poudre – poudre) : mêmes classes granulaires.
- La PM en substitution au sable (poudre – sable) : classes granulaires différentes.

Plusieurs taux de substitution sont utilisés.

Les essais rhéologiques choisis pour mener à bien cette étude sont :

- Affaissement au mini cône d'Abrams (échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams des bétons).
- Etalement au mini cône d'Abrams (échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams des bétons).
- Ecoulement au cône de Marsh (entonnoir d'écoulement).

On a également mesuré les résistances à 28 jours des mortiers étudiés.

Par les difficultés rencontrées à la partie expérimentale, on a dû reprendre le programme est redéfinir les formulations. Pour la partie écoulement, on a dû remplacer le sable concassé initialement utilisé par du sable de dune.

Dans ce chapitre sont présentés les critères considérés pour la composition des mortiers à étudier, on a donné leurs compositions. Par la suite on a présenté les procédures utilisées pour leur confection, depuis les pesées des matériaux jusqu'aux essais de caractérisations. On a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes.

Partie 1 : Composition des mortiers

III.2. Formulation des mortiers

La formulation d'un béton et aussi d'un mortier doit répondre à des exigences telles que la provenance, la qualité et la préparation des matériaux utilisés ; les propriétés mécaniques et de durabilité du béton, etc.

Programme initial :

Pour la composition des mortiers on s'est basé sur le principe de composition du mortier normalisé ; les quantités des produits sont choisies dans les rapports (1, 2, 3) ainsi :

La masse de l'eau est de $1 \times$ masse de l'eau choisie

La masse de ciment est de $2 \times$ masse de l'eau

La masse de sable est de $3 \times$ masse de ciment.

Pour la raison de non disponibilité dans notre laboratoire du sable normalisé, on a utilisé pour cette étude un sable de notre région. Pour la partie écoulement ce sable a été remplacé par du sable de Sahara. Ces deux sables sont caractérisés dans les paragraphes qui suivent.

Les mortiers ainsi formulés présentent un rapport E/C égale à 0,5.

III.3. Matériaux et Formulation

III.3.1. Matériaux utilisés

Dans cette étude on a utilisé des matériaux naturels locaux et ceux issus du recyclage, comme la poudre de marbre broyée.

III.3.1.1. Ciment

On a utilisé un ciment Portland composé (CEM II/B 42.5N NA442), ciment Lafarge MATINE, ciment pour béton exigeant. La composition minéralogique du Clinker, selon la formule de Bogue, est : le C_3S à $60 \pm 3\%$, le C_3A à $7.5 \pm 1\%$.

III.3.1.2. Sable

Le premier sable utilisé est un sable de carrière, il est concassé et il possède une étendue granulométrique allant de 0 à 3mm.

Pour le sable de Sahara, il est extrait de la nature, sans aucune transformation, il est considéré comme un sable très fin.

III.3.1.3. Poudre de marbre

A l'origine la PM utilisée est un déchet, elle est récupérée d'une marbrerie de la région. Le déchet est fourni sous forme d'une pâte humide (voir figure III 1).



Figure III 1 : Mottes de marbre récupérées.

La pâte est dans un premier temps séchée à une température 105 °C. Les mottes de marbre obtenues sont par la suite broyées pour disperser la poudre. La poudre grossière est concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer.

Afin d'obtenir un matériau de finesse de 0.8 mm, on a procédé par tamisage successive (tamis 1 mm puis tamis 0.8mm). Les fines sont nommées "PM" dans ce document.

Cette addition est inerte, l'objectif dans son utilisation dans la formulation des bétons est double : d'une part cela permet d'améliorer la compacité du béton ; d'autre part, la poudre est utilisée comme substituant d'une partie du ciment, notamment pour le cas des BAP. En effet, au début des BAP les formulateurs utilisent une grande quantité de ciment pour atteindre l'ouvrabilité souhaitée. Or, l'utilisation excessive du ciment rend les BAP non économique. Les fines inertes sont alors utilisées pour atteindre l'optimum en termes d'économie et d'ouvrabilité.

III.3.1.4. Adjuvant

Pour la rhéologie des mortiers nous avons utilisé un Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi «SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 ». Le superplastifiant "TEMPO 12" est un liquide brun clair, de pH égal à $5,5 \pm 1,0$ et de densité de $1,060 \pm 0,020$, spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage. Il est

incorporé préalablement à l'eau de gâchage, à des dosages compris entre 0,1 à 5,0% du poids du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Sans superplastifiant les mortiers initialement obtenus sont très fermes, pas de variation d'affaissement et l'étalement. On a introduit le superplastifiant pour pouvoir avoir des mortiers assez fluides et pour qui il est possible de constater des modifications sur le comportement rhéologiques. On a alors recherché le dosage en SP qui permet d'avoir des mortiers fluides allant jusqu'à des mortiers autoplaçants.

III.3.1.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau du robinet.

III.4. Caractérisation du sable

III.4.1. Echantillonnage (NF P 18-553):

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Voir l'annexe 1 pour le détail de la méthode d'échantillonnage.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps

- Prélèvement à la carrière d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

III.4.2. Analyse granulométrique

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

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, les dimensions des mailles sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur, la colonne de tamis est alors soumise à des vibrations qui permettent de séparer les grains sur les différents tamis.

Une courbe granulométrique permet d'anticiper les problèmes du béton à formuler. Lorsqu'une courbe est régulière et continue le squelette du béton formulé va être compact (meilleure compacité du squelette du béton) ; aussi la continuité de la courbe permet d'avoir des bétons à meilleure fluidité sans problèmes de ségrégation.

Dans ce qui suit, on a présenté les courbes granulométriques des deux sables utilisés (Sable 0/3 et sable de dune).

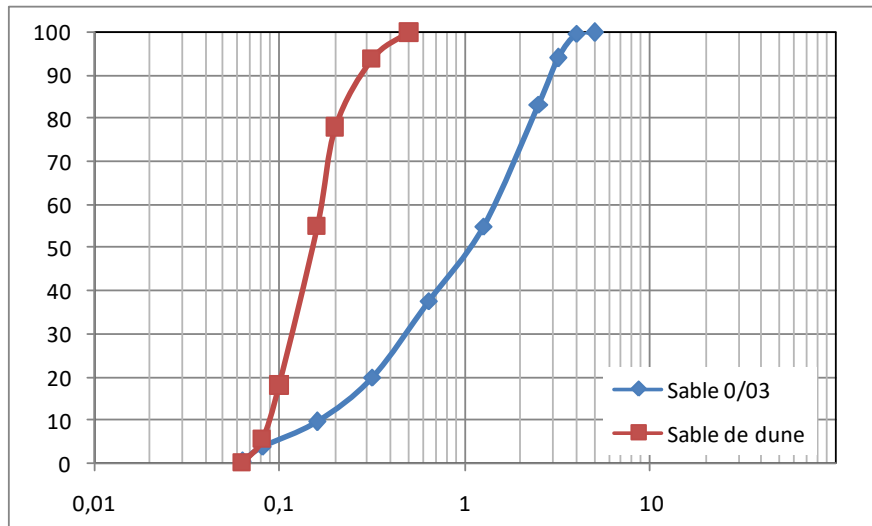


Figure III.2. Courbe granulométrique du Sable 0/3

Ainsi, on remarque que l'étendue granulométrique de ces deux sables n'est pas la même, on a un sable concassé qui va de 0 mm à 3 mm ; et le sable de dune va de 0 mm à 0,5 mm, ce qui représente réellement un sable très fin et d'une granulométrie très serrée.

Le descriptif des essais de granulométrie ainsi que les calculs des différents résultats sont donnés dans l'ANNEXE 1 et 2.

III.4.3. Module de finesse du sable

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. D'après la norme [NFP 18-540], le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100^{ème} de la somme des refus cumulés, exprimés en % sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm.

Ce paramètre est important pour déterminer les caractéristiques des sables utilisée dans le béton. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

Le module de finesse du sable 0/03 est $MF = 2.948$

Ce sable a un module de finesse compris entre 2.8 et 3.2 donc il est peu grossier.

Le module de finesse du sable de dune est $MF = 0.512$

Ce sable a un module de finesse très petit c'est un sable qui est très fin.

III.4.4. Absorption et masses volumiques du sable

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons **NF P 18-555**. En effet cette mesure va nous permettre de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du mortier. En fonction de l'état d'humidité des granulats avant la gâchée (granulats secs ou saturés ou simplement humides), on doit recalculer la quantité d'eau à introduire dans le mortier; ainsi si les granulats sont secs ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport E/C en baisse, à l'inverse, si les granulats sont humides ou saturés ils vont alors fournir au mortier plus d'eau, et le rapport E/C varie en hausse.

Les résultats de caractérisation de l'absorption ainsi que ceux des masses volumiques du Sable 0/3 sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1. Masses volumiques et coefficients d'absorption du sable

Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.74
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2.68
Masse volumique saturée à surface sèche (g/cm^3)	2.71
Capacité d'Absorption (%)	0.79

La procédure de l'essai est décrite dans l'ANNEXE 1.

III.5. Formulation des mortiers

Trois Groupes de mortiers sont étudiées :

- **Groupe 1** : Ciment varie dosage en SP constant : une partie du ciment est remplacé graduellement avec l'introduction de la poudre de marbre. Pour ce groupe de mortier on a maintenu **le dosage** en superplastifiant constant (fixé par rapport à la masse du ciment).
- **Groupe 2** : Ciment varie dosage en SP varie : une partie du ciment est remplacé graduellement avec l'introduction de la poudre de marbre. Pour ce groupe de mortier on a **le dosage** en superplastifiant est fixé constant par rapport à la masse des fines (ciment + PM). Il est donc variable par rapport à la masse du ciment.
- **Groupe 3** : Sable varie SP constant : Pour ce groupe de mortiers c'est le sable qui est remplacé par de la PM. Par contre la masse du ciment est maintenue constante ainsi que la quantité d'adjuvant. Le dosage en SP est donc maintenu constant.

En plus du mortier de référence nommé MR, cinq mortiers sont utilisés par groupe, soit donc un total de 16 formulations sont étudiées. Le tableau suivant illustre la nomenclature des mortiers.

Tableau III.2.Nomenclature des compositions de mortiers testés

Groupe 1 (SP/ciment = constante)						
	MR	M03g1	M06g1	M09g1	M12g1	M15g1
CIMENT %	100	97	94	91	88	85
PM %	0	03	06	09	12	15

Groupe 2 (SP/ciment = variable)						
	MR	M03g2	M06g2	M09g2	M12g2	M15g2
CIMENT %	100	97	94	91	88	85
PM %	0	03	06	09	12	15

Groupe 3 (SP/ciment = constante)						
	MR	M03g3	M06g3	M09g3	M12g3	M15g3
Sable %	100	97	94	91	88	85
PM %	0	03	06	09	12	15

Ainsi à titre d'exemple le mortier M09g2 est un mortier du groupe 2 de pourcentage en PM de 09 % et de 91 % de ciment en comparaison au MR.

Les pourcentages de substitution par la poudre de marbre sont (3 %, 6 %, 9 %, 12 % et 15 %). Après avoir définis les proportions du mortier de référence "MR", on a déterminé les compositions des autres mortiers. La quantité d'eau est maintenue constante pour les différents mortiers.

III.5.1. Compositions des mortiers

Toutes les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau III.3.

Tableau III.3.1. Des mortiers en **gramme** Compositions du 1^{er} groupe de mortier

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1350	450	0	5,4	225	0,5
M03g1	1350	436,5	13,5	5,4	225	0,515
M06g1	1350	423	27	5,4	225	0,53
M09 g1	1350	409,5	40,5	5,4	225	0,55
M12 g1	1350	396	54	5,4	225	0,57
M15 g1	1350	382,5	67,5	5,4	225	0,59

Tableau III.3.2. Compositions des mortiers en **gramme** du 2^{ème} groupe de mortiers

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1350	450	0	5,4	225	0,5
M03g2	1350	436,5	13,5	5,24	225	0,515
M06g2	1350	423	27	5,08	225	0,53
M09g2	1350	409,5	40,5	4,91	225	0,55
M12g2	1350	396	54	4,75	225	0,57
M15g2	1350	382,5	67,5	4,59	225	0,59

Tableau III.3.3. Compositions des mortiers en **gramme** du 3^{ème} groupe de mortiers

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1350	450	0	5,4	225	0,5
M03g3	1309,5	450	40,5	5,4	225	0,515
M06g3	1269	450	81	5,4	225	0,53
M09g3	1228,5	450	121,5	5,4	225	0,55
M12g3	1188	450	162	5,4	225	0,57
M15g3	1147,5	450	202,5	5,4	225	0,59

III.6. Formulation des mortiers pour l'écoulement

Avec les compositions présentées au paragraphe précédent on a obtenu des mortiers qui bloquent au cône d'écoulement. On a fait plusieurs tentatives de reformulation avec ces mêmes produits. Toutes les compositions testées ont eu des problèmes de blocage. On a alors opté a

une nouvelle solution qui est de remplacer le sable concassé par du sable de dune, cela pour optimiser la fluidité des mortiers. En effet, il est connu que les sables concassés présentent des risques de blocage à l'écoulement, manque de fluidité ; et que les sables fins favorisent l'écoulement, d'où cette proposition de solution pour répondre à l'objectif initial de l'étude.

Tableau III.3.4. Compositions des mortiers en gramme du 2nd programme

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1300	500	0	10	300	0,60
M05g1	1300	475	25	10	300	0,63
M15g1	1300	425	75	10	300	0,71
M25g1	1300	375	125	10	300	0,80
M35g1	1300	325	175	10	300	0,92

Tableau III.3.5. Compositions des mortiers en gramme du 2^{ème} groupe de mortiers

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1300	500	0	10	300	0,60
M05g2	1300	475	65	9,5	300	0,63
M15g2	1300	425	195	8,5	300	0,71
M25g2	1300	375	325	7,5	300	0,80
M35g2	1300	325	455	6,5	300	0,92

Tableau III.3.6. Compositions des mortiers en gramme du 3^{ème} groupe de mortiers

Mortier	Sable	Ciment	PM	SP	Eau	E/C
MR	1300	500	0	10	300	0,60
M05g3	1235	500	65	10	300	0,60
M15g3	1105	500	195	10	300	0,60
M25g3	975	500	325	10	300	0,60
M35g3	845	500	455	10	300	0,60

Partie 2 : Procédures expérimentales

III.7. Procédures expérimentales et conditions de conservations

III.7.1. Confections des mortiers

Pour la confection des mortiers, il faut préparer le matériel ainsi que les matériaux nécessaires. Pour uniformiser les essais, on a décidé de travailler avec du sable sec. Il a donc fallu mettre en étuve le sable pendant au moins 24 heures à 105°C. Après séchage, laisser refroidir à la température ambiante puis le mettre dans des sacs étanches afin d'éviter que le sable reprenne de l'humidité.

III.7.2. Préparation de la gâchée

Pour chaque type d'essai : résistance à 28 jours, écoulement puis (affaissement et étalement) ; on a eu à reproduire trois fois chaque mortier.

On utilise le petit malaxeur pour la confection des mortiers (Figure III.3). Pour la préparation des mortiers on a à chaque fois répété le protocole suivant :



Figure III.3. Malaxeur électrique pour mortier

1/- Préparer les pesées des matériaux nécessaires (sable, ciment, eau, PM, adjuvant). pour la confection des mortiers.

2/- Rassembler le matériel nécessaire (balance, malaxeur, mini cône d'Abrams, spatules, éprouvettes graduées, pieds à coulisse, règle....).

3/- Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, les séquences du malaxage sont données comme suit :

- a. Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- b. Introduire le sable en premier dans la cuve du malaxeur ;
- c. Verser l'eau de pré-humidification, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente;
- d. Après 30 s de malaxage laissé reposer 1 min30 s ;
- e. Ajouter le ciment et la PM, ensuite mélanger le tout à vitesse lente pendant 30 s ;
- f. Arrêter le malaxeur et procéder au raclage ;
- g. Verser l'eau restante dans la cuve et mettre le malaxeur en marche pendant 30 s à vitesse lente jusqu'à obtention d'une pâte homogène ;
- h. Ajouter l'adjuvant, tout en laissant le malaxeur en marche et laisser malaxer pendant 30 s à une vitesse lente ;
- i. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires;
- j. Arrêter le malaxeur pendant 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérant aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- k. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 1min30s;

A l'issue de ces étapes, le mortier est prêt à être exploité pour la suite du programme, soit pour la confection des éprouvettes de résistance, soit pour les essais de rhéologie.

III.8. Résistance à la compression à 28 jours

- Coulage et cure des mortiers

La caractérisation de la résistance à 28 jours des mortiers a été faite sur des éprouvettes cubiques de 5 cm de côtés. Les moules utilisés sont présentés sur la figure suivante. A l'arrêt de malaxage les moules sont remplis de mortiers, puis protégés par un film en plastique pour empêcher la dessiccation du mortier. Après 24 heures les éprouvettes sont démoulées et conservées dans de l'eau à température ambiante.



Figure III.4. Moule de confection des éprouvettes $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$

- Essais de compression pure

Au 28^{ème} jour les cubes de mortiers sont retirés d'eau, une fois essuyés ils sont alors sollicités en compression pure.



Figure III.5. cube de mortiers

L'essai de compression pure consiste à soumettre les éprouvettes de forme cubiques entre deux plateaux d'une presse à deux forces axiales opposées (Figure III.5). La presse utilisée est de marque IBERTEST (figure III.6). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression, la flexion et le poinçonnement. La machine est équipée d'une cellule de force maximale de 200 KN.



Figure III.6. Mortier soumis à la compression pure

III.9. Essais d'affaissement et d'étalement des mortiers

Les deux mesures, l'affaissement et l'étalement, se font sur un même essai. Ainsi, après la confection des mortiers, à l'état frais, en procède aux étapes suivantes.

- Disposer le mini cône d'Abrams sur une surface lisse horizontale;
- Le remplir de mortier progressivement jusqu'à la surface ;
- A l'aide d'une règle araser soigneusement la surface ;
- Retiré verticalement avec les deux mains posées de part et d'autres du moule ;

L'échantillon de mortier s'effondre sous son poids propre, une fois le mortier stable, on mesure à l'aide du Pied à coulisse l'étalement et à l'aide d'une règle graduée l'affaissement.

L'étalement est le diamètre de la surface étalée, il est déterminé par la moyenne des deux mesures diamétralement opposées. L'une la plus large dimension de la galette formée à l'étalement est l'autre perpendiculaire à la première mesure. (Figure III.7)



- L'affaissement est la différence de hauteur entre celle du moule et celle du mortier affaissé (Figure III.8).



Figure III.8. Mesure de l'affaissement

III.10. Essais d'écoulement des mortiers

Cet essai consiste à mesurer le temps que met 1 litre de mortier à traverser un entonnoir, appelé aussi cône de Marsh . Ce cône est généralement utilisé pour la caractérisation de l'écoulement des pâtes cimentaires.

Ainsi, à l'état frais, le mortier est versé dans une carafe contenant de 1 litre. Tout de suite après, le mortier est vidé dans l'entonnoir pour que l'ouverture inférieure est préalablement fermée. Juste après, on lance le chronomètre en même temps que l'on ouvre la trappe de fermeture. Le chronomètre est arrêté à l'instant où l'entonnoir est vidé. La mesure est répétée deux fois car l'essai est très rapide.

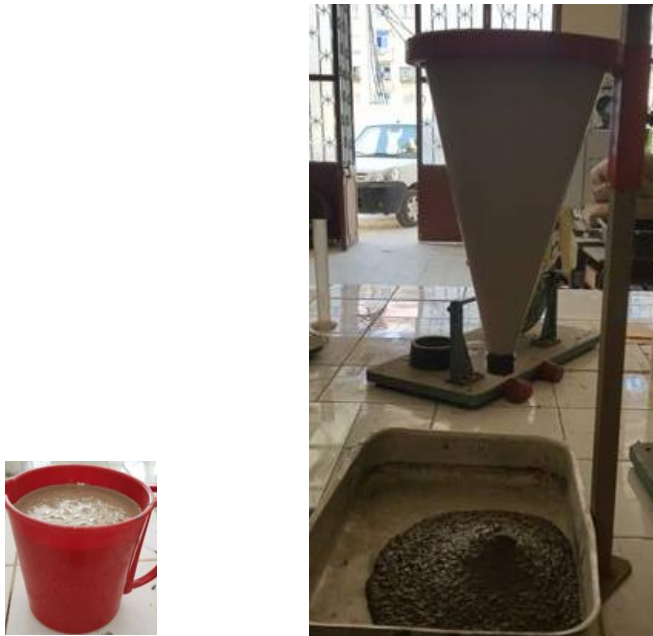


Figure.III.9.Essais d'écoulement des mortiers

Pour éviter les erreurs de mesure cet essai est fait par deux opérateurs et dans la mesure du possible les mêmes opérateurs.

CHAPITRE IV : Résultats et Exploitations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre on a présenté les résultats et l'exploitation des différentes parties de l'étude, on a également discuté les difficultés rencontrées lors de cette étude.

Comme pour le chapitre précédent, on a donné dans la première étape les résultats de caractérisation mécanique, en occurrence la résistance moyenne à la compression et à 28 jours. On a par la suite présenté les résultats de la rhéologie (fluidité et viscosité) en fonction des différentes variables.

On rappelle que la fluidité a été approchée par des essais d'affaissement et d'étalement au mini-cône d'Abrams (échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams), alors que la viscosité a été approchée par des essais d'écoulement à l'entonnoir (cône de Marsh).

On a également essayé d'établir des corrélations entre les résultats des différentes parties.

Partie.1. Résultats des essais de résistances sur les mortiers

IV.2. Résultats des résistances à 28 jours

Deux types de résultats sont présentés. Les premiers concernent les résultats de caractérisation de la résistance à 28 jours pour les mortiers du groupe 1, pour qui on a fait la substitution du ciment par du filler calcaire, le dosage en super plastifiant est resté fixe par rapport à la masse du ciment, soit 1,2 %. Les seconds concernent les résultats de caractérisation de la résistance à 28 jours pour les mortiers du groupe 3, pour qui on a fait la substitution du sable par du filler calcaire, le dosage en super plastifiant est resté fixe par rapport à la masse du ciment, soit 1,2 %. On a alors, pour les deux cas, présenté les résistances moyennes calculées sur les mesures de trois éprouvettes.

La presse d'écrasement des mortiers nous permet de mesurer la courbe d'évolution des contraintes en fonction du chargement appliqué. Les courbes obtenues sont de la forme de celle présentée sur la figure IV. 1 suivante. On a un total de (11×3) courbes, nombre qui correspond au nombre d'éprouvettes totales écrasées sous l'essai de compression pure.

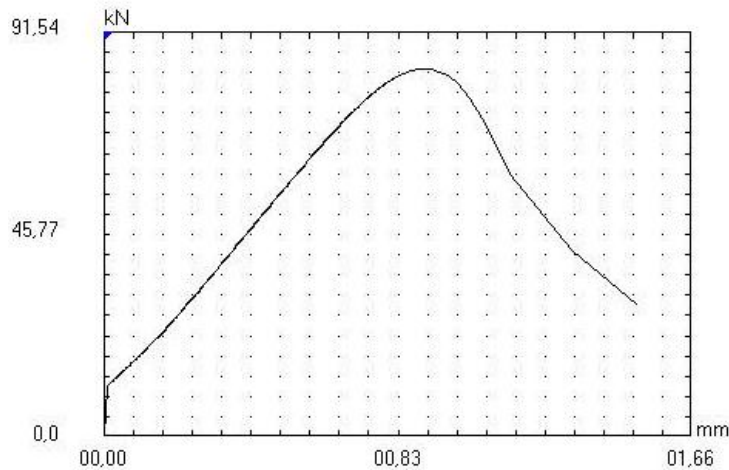


Figure VI.1. Exemple de courbe chargement en fonction de la déformation obtenue.

La courbe représente le chargement appliqué en kN exprimé en fonction de la déformation enregistrée en mm. On a obtenu ce genre de courbe pour toutes les éprouvettes écrasées. Le Pic de cette courbe traduit la résistance à la rupture à 28 jours du mortier testé.

Les courbes peuvent être exploitées pour définir les modules de déformation des mortiers étudiés ainsi que leur énergie de rupture.

IV.2.1. Résistance à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 1

Dans ce paragraphe sont exploités les résultats de caractérisation de la résistance à 28 jours pour les mortiers du groupe 1, pour qui on a fait la substitution du ciment par du filler calcaire, le dosage en super plastifiant est resté fixe par rapport à la masse du ciment, soit 2 %. On a alors présenté les résistances moyennes calculées sur les mesures de trois éprouvettes.

Tableau IV.1. Résistances moyennes en Compression en (MPa) des mortiers du groupe 1

Mortiers	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	moyenne	% de baisse
MR	47,48	46,79	47,06	47,11	
M03g1	44,09	47,03	46,13	45,75	2,9
M06g1	40,52	41,54	41,14	41,07	12,8
M09g1	37,97	25,84	34,62	32,81	30,4
M12g1	35,91	33,29	33,43	34,21	27,4
M15g1	21,3	39,1	36,94	32,44	31,1

Pour une meilleure appréciation des résultats on a représenté sur la figure IV.2 les résultats des résistances en compression des différents mortiers en fonction du pourcentage de substitution du ciment par la PM. Les résultats sont représentés sous forme de nuage de points avec une courbe de tendance.

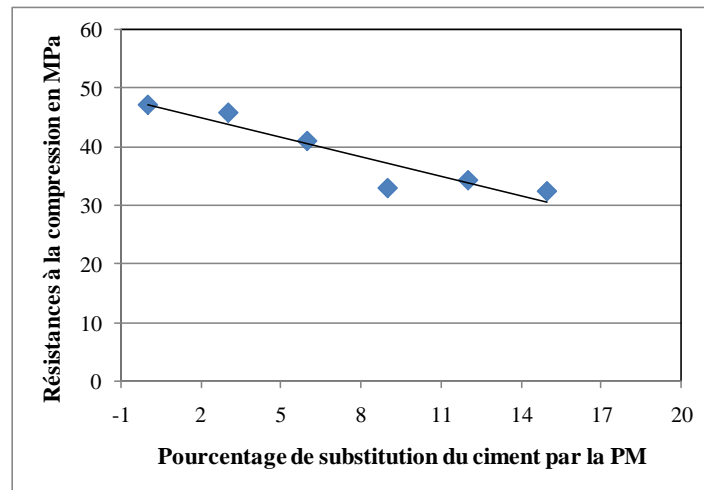


Figure IV.2. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 1

D'après les résultats présentés sur la figure IV.2 on constate que les mortiers formulés avec la PM présentent des résistances plus faibles que celle enregistrée sur le mortier de référence (sans PM). Les résistances ont tendance à baisser en fonction du taux de substitution du ciment dans les mortiers. On passe d'une résistance à 28 jours de l'ordre de 47 MPa pour le MR (100 % de ciment) à une résistance de l'ordre de 32 MPa pour le mortier MC15 (15 % de PM et 85 % de ciment), soit une baisse de près de 30 % de la résistance à 28 jours par rapport à celle du MR.

On constate également que la baisse des résistances peut être lissée par une courbe de tendance de type linéaire avec un coefficient de régression $R^2 = 0.87$.

Ainsi donc on peut écrire :

$$R_{c28j} = a \times PM + b$$

Avec PM pourcentage de substitution du ciment par la PM, a et b paramètres de la droite de régression égalent à (a = - 1.106 ; b = 47.2).

Pour plus d'analyse des résultats on a cherché à établir des corrélations entre le % de PM dans les mortiers et le % de baisse des résistances. La courbe est représentée sur la figure IV.3 suivante.

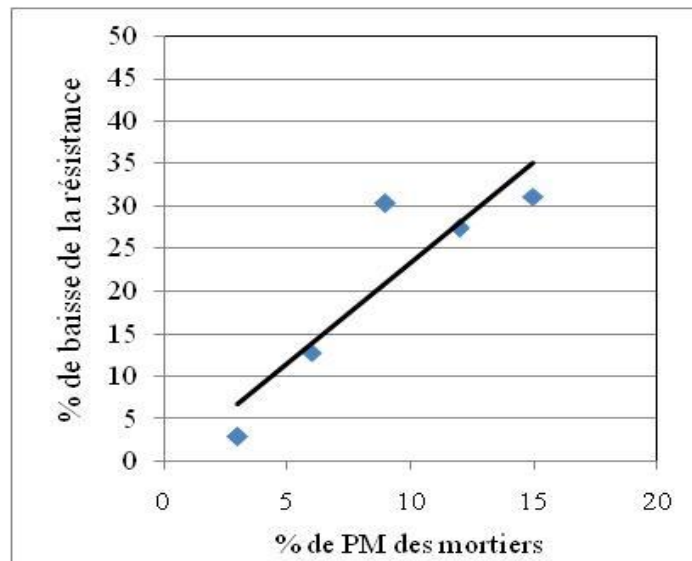


Figure IV.3. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de PM

Selon la figure on voit que pour un pourcentage de substitution du ciment de 15 %, on perd près de 30 % de résistance à 28 jours. La baisse de la résistance est de type linéaire entre le pourcentage de PM et le pourcentage de baisse en résistance à 28 jours.

IV.2.2. Résistance à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 3

Dans ce paragraphe sont exploités les résultats de caractérisation de la résistance à 28 jours pour les mortiers du groupe 3, pour qui on a fait la substitution du ciment par du filler calcaire, le dosage en super plastifiant est resté fixe par rapport à la masse du ciment, soit 2 %. On a alors présenté les résistances moyennes calculées sur les mesures de trois éprouvettes.

Tableau IV.2. Résistance moyenne en Compression en (MPa) des mortiers du groupe 3

Mortier	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	moyenne
MR	47,48	46,79	47,06	47,11
M03g3	46,92	50,4	51,26	49,53
M06g3	50,04	42,34	46,84	46,41
M09g3	43,17	42,23	33,97	39,79
M12g3	46,87	46,87	41,95	45,23
M15g3	48,66	47,17	47,59	47,81

Pour une meilleure appréciation des résultats on a représenté sur la figure IV.4 les résultats des résistances en compression des différents mortiers en fonction du pourcentage de substitution du ciment par la PM. Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme.

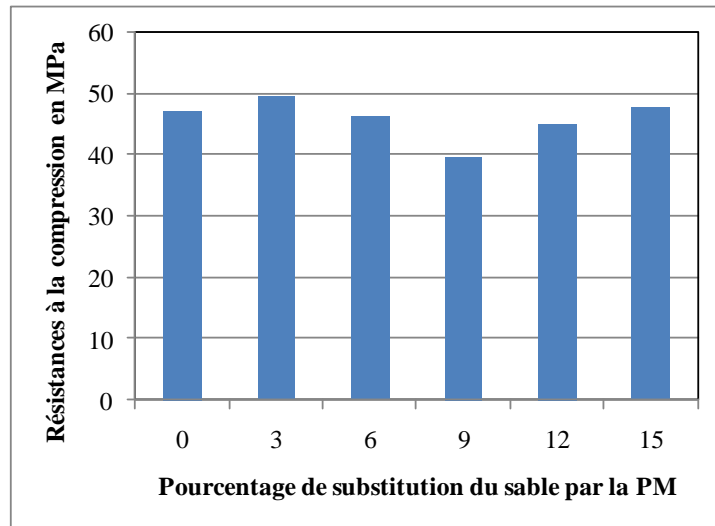


Figure IV.4. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 3

D'après les résultats présentés sur la figure IV.4 on constate qu'il n'y a pas de tendance globale. Ainsi les résultats obtenus restent proches de la résistance obtenue sur le mortier de référence. Dans ce cas on a remplacé un produit inerte par un autre qui est inerte, le sable et la PM ne forment pas d'hydrates qui participent à la résistance finale du mélange. Toutefois il est à noter que le fait de réduire la quantité de sable on est plutôt entraîné de modifier la structure granulaire du mélange.

Partie 2 : Résultats de la rhéologie des mortiers

Dans cette partie on a représenté les résultats et l'exploitation de la partie rhéologie. Deux parties se distinguent : Partie de l'étude de la fluidité par les essais d'affaissement et d'étalement des mortiers, puis partie viscosité par les essais d'écoulement des mortiers.

L'étude est prévue initialement sur les trois groupes de mortiers préalablement définis, mais au cours des essais d'écoulement on a rencontré plusieurs difficultés qui ont fait que les formulations initiales soient modifiées. Tous les détails de ces difficultés sont expliqués dans les paragraphes qui traitent l'écoulement des mortiers.

On rappelle que l'objectif initialement prévu est d'étudier les effets rhéologiques (fluidité et viscosité) de l'introduction de la PM en substitution au ciment dans un premier lieu (substitution poudre par une poudre), puis en substitution au sable dans un second lieu (substitution du sable par une poudre).

IV.3. Résultats des essais d'affaissement et d'étalement

Pour effectuer ces mesures rhéologiques des mortiers on a utilisé le mini cône d'Abrams (Echelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams : $h = 15$ cm ; base inférieure = 10 cm et base supérieure = 5 cm). A un étalement nul correspond une mesure de 10 cm, cette mesure en réalité est la mesure du diamètre du cône à sa base inférieure. L'étalement est déterminé comme étant la moyenne de deux mesures perpendiculaires. Il n'y a pas de limite supérieure à l'étalement, mais au-delà de 35 cm généralement les mortiers commencent à présenter une laitance en périphérie qui traduit la ségrégation du mortier figure IV.5 Le mortier devient liquide.



Figure IV.5. Ségrégation du mortier

Ainsi, un mortier ferme se traduit par un affaissement égal à 0 cm. Un affaissement total correspond à une mesure proche de la hauteur du cône (15 cm) figure IV.6, les mortiers pour qui les affaissements dépassent les 13 cm sont des mortiers très fluides.

Pour cette étude on a décidé de ne pas garder les mortiers pour qui l'affaissement est nul. En effet, avec un affaissement nul on s'est rendu compte que le cône ne se remplit pas correctement et qu'il faut piquer par une tige le mortier pour remplir le cône uniformément voir la photo jointe.



Figure IV.6. Mortier ferme

Or, si on pique, cela rajoutera un nouveau paramètre à l'étude qui est l'intensité du piquage et la durée du piquage.

Par ailleurs, pour pouvoir faire les essais d'écoulement pour l'étude de la viscosité avec le cône de Marsh on doit alors travailler avec des mortiers présentant une certaine limite de fluidité, traduite par un affaissement supérieur à 1 cm et un remplissage correcte lors du soulèvement du mini cône.

IV.3.1. Etalement et Affaissement du mortier de référence

Pour la formulation du mortier de référence on a dû faire plusieurs tentatives notamment pour la recherche du dosage en super plastifiant à maintenir pour la suite de l'étude.

Le mortier de référence MR est finalement validé avec un dosage en super plastifiant de 1,2 % de la masse du ciment soit donc 5.4 g.

IV.3.1.1. Etalement et Affaissement des mortiers du groupe 1

Les résultats d'étalement et d'affaissement obtenus pour les mortiers du groupe 1 où le ciment est substitué graduellement par du filler et le dosage en superplastifiant est maintenu constant

par rapport à la masse du ciment sont donnés dans le tableau IV.3. Dans ce cas la quantité du superplastifiant baisse avec la baisse de la masse de ciment.

Tableau IV.3. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 1

PM %	Etalement (cm)			Affaissement (cm)
	Mesure 1	Mesure 2	Moyenne	
MR	33	33,5	33,25	14
M03g1	31,8	32	31,9	13,9
M06g1	31,8	32	31,9	13,9
M09g1	31	32,1	31,55	13,9
M12g1	32,5	32,5	32,5	14
M15g1	31	30,5	30,75	13,9

Sur la Figure IV.7 ci-dessous on a représenté les valeurs d'étalement sous forme d'un nuage de points avec une courbe de tendance des différents résultats du tableau.

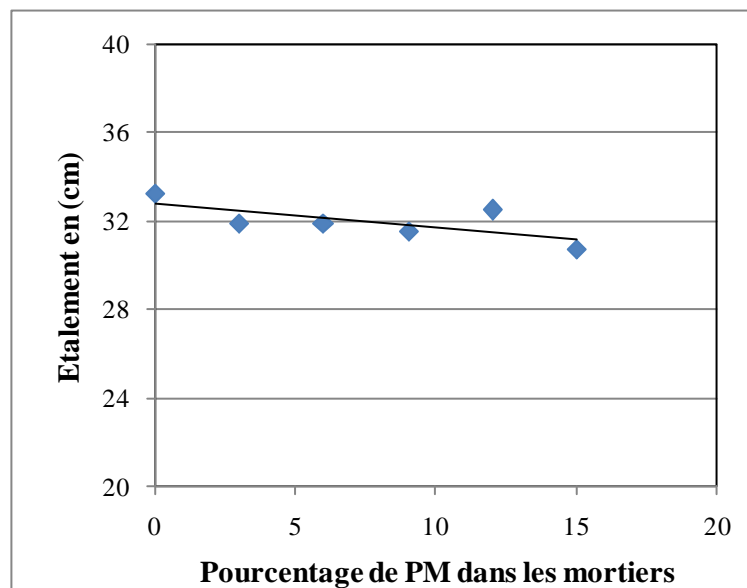


Figure IV.7. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 1

D'après la figure IV.7 ci-dessus on constate que l'étalement reste quasiment constant avec l'augmentation de la teneur en PM dans les compositions, les valeurs d'étalement sont semblables.

Sur la figure IV.8 ci-dessous on a représenté les valeurs d'affaissement sous forme de points en fonction du dosage en PM. Selon les résultats les mortiers n'ont pas eu de modification en termes d'affaissement.

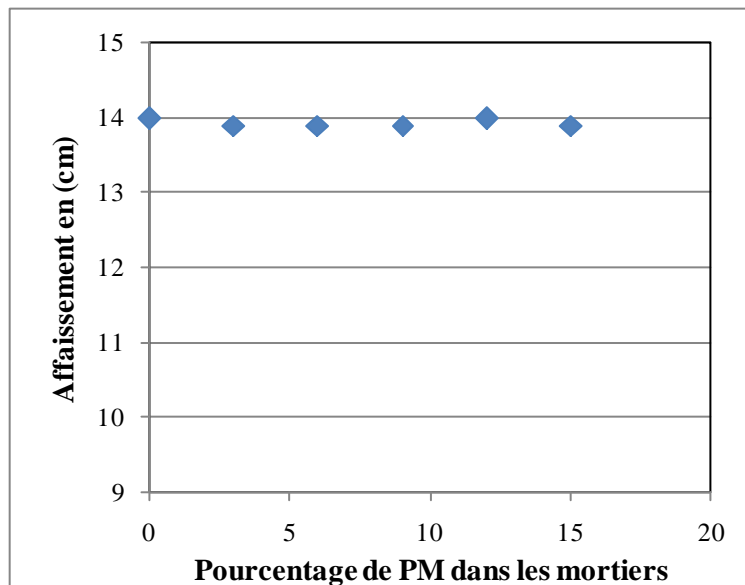


Figure IV.8. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 1

❖ Corrélation entre l'étalement et l'affaissement des mortiers du groupe 1

Sur la figure suivante on a représenté la courbe de corrélation de l'évolution de l'étalement et de l'affaissement.

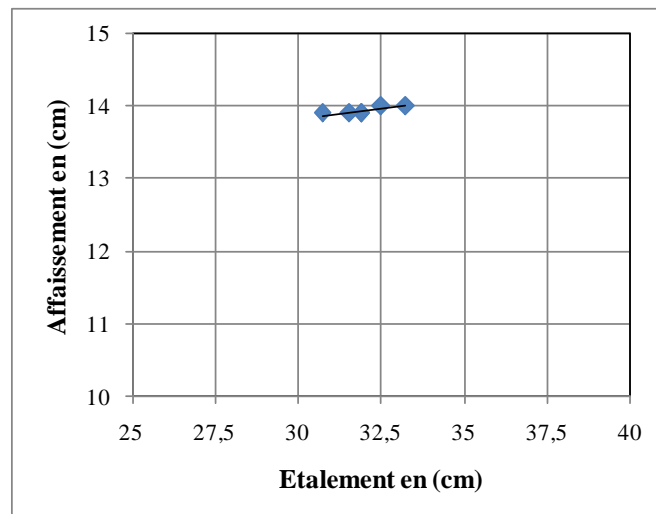


Figure IV.9. Affaissement fct. Etalement des mortiers du groupe 1

La courbe de la figure IV.9 montre que tous les points sont très proches les uns des autres, cela est dû au fait que tous les mortiers du groupe 1 ont quasiment la même fluidité.

IV.3.1.2. Etalement et Affaissement des mortiers du groupe 2

Pour les mortiers de ce groupe 2 le ciment est substitué graduellement par du filler et le dosage en super plastifiant est maintenu constant par rapport à la masse de la poudre, la quantité du superplastifiant est restée la même pour les différents mortiers. Les résultats d'étalement et d'affaissement obtenus sont donnés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 2

PM %	Etalement (cm)			Affaissement (cm)
	Mesure 1	Mesure 2	Moyenne	
MR	33	33,5	33,25	14
M03g2	34	34,9	34,45	14,6
M06g2	33,4	33,5	33,45	14
M09g2	32,8	33	32,9	13,6
M12g2	31,8	32,6	32,2	13,3
M15g2	30,9	31,7	31,3	13

Sur la Figure IV.10 ci-dessous on a représenté les valeurs d'étalement sous forme d'un nuage de points avec une courbe de tendance des différents résultats du tableau.

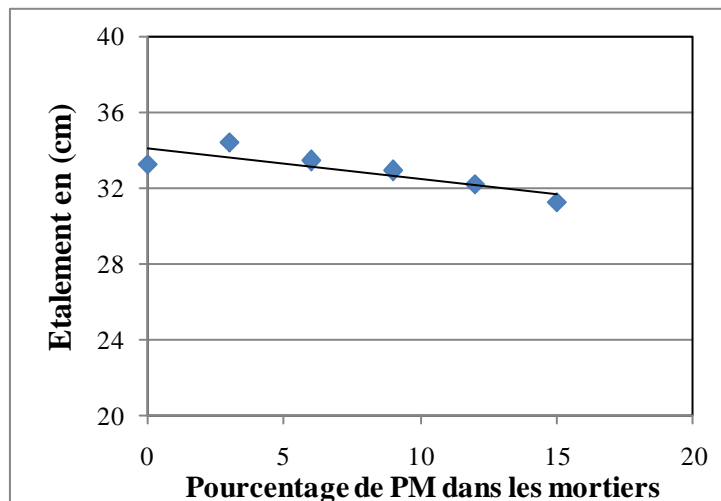


Figure IV.10. Résultats d'étalement des mortiers du groupe 2

D'après la figure IV.10 ci-dessus on constate que l'étalement baisse légèrement avec l'augmentation de la teneur en PM dans les compositions, les mortiers perdent de plus en plus de leur fluidité.

Chapitre IV : Résultats et Exploitations

La courbe de tendance de l'évolution de l'étalement en fonction du % en PM est de type linéaire avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,71.

$$\text{Etalement} = -0,162 \times \% PM + 34,14$$

Sur la figure IV.11 ci-dessous on a représenté les valeurs d'affaissement sous forme d'un nuage de points explicatif des différents résultants du tableau (affaissement en fonction de la substitution du ciment par les PM).

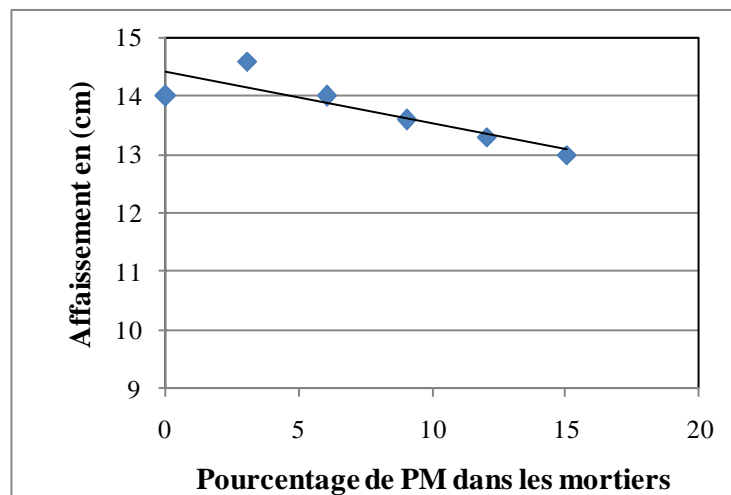


Figure IV.11. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 2

Comme pour l'étalement, d'après la figure IV.11 ci-dessus on constate que l'affaissement baisse légèrement avec l'augmentation de la teneur en PM dans les compositions, les mortiers perdent un peu de leur fluidité, ils deviennent moins fluides.

La courbe de tendance de l'évolution de l'affaissement en fonction du % en PM est de type linéaire avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,75.

$$\text{Affaissement} = -0,09 \times \% PM + 14,41$$

Corrélation entre l'étalement et l'affaissement des mortiers du groupe 2

Sur la figure IV.12 suivante on a représenté la courbe de corrélation de l'évolution de l'étalement et de l'affaissement.

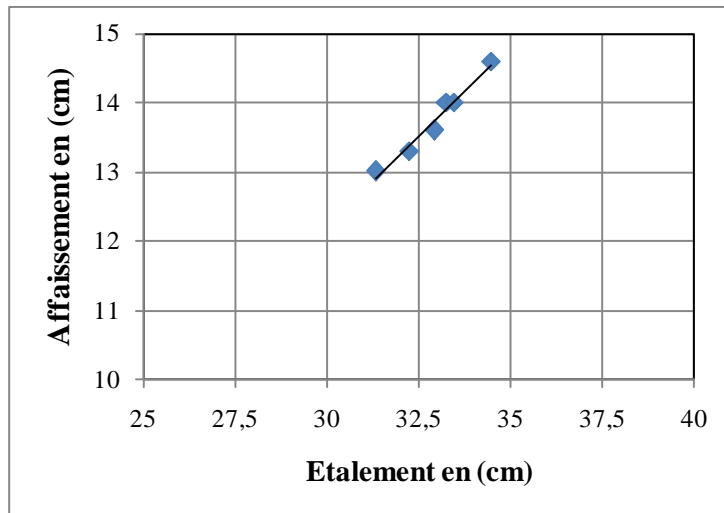


Figure IV.12. Affaissement fct. Étalement des mortiers du groupe 2

La courbe de la figure IV.12 montre que les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent au même temps de façon proportionnelle en suivant une tendance linéaire.

Il est à noter que les mortiers de ce groupe ne changent pas beaucoup de fluidité en passant de MR au mortier à 15 % de PM. Car les mortiers n'ont pas perdu beaucoup en fluidité (1 cm en affaissement et 2 cm en étalement).

IV.3.1.3. Étalement et Affaissement des mortiers du groupe 3

Pour les mortiers de ce groupe 3, la quantité de ciment est maintenue constante ainsi que le dosage en superplastifiant, la variable étant la quantité de sable qui est remplacée par de la PM. Les résultats d'étalement et d'affaissement obtenus sont donnés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5. Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers du groupe 3

PM %	Étalement (cm)			Affaissement (cm)
	Mesure 1	Mesure 2	Moyenne	
MR	33	33,5	33,25	14
M03g3	29,7	31,7	30,7	13,5
M06g3	27,3	26,3	26,8	12,5
M09g3	28,3	26,6	27,45	12,8
M12g3	27,6	26,1	26,85	13
M15g3	17,5	19,1	18,3	12

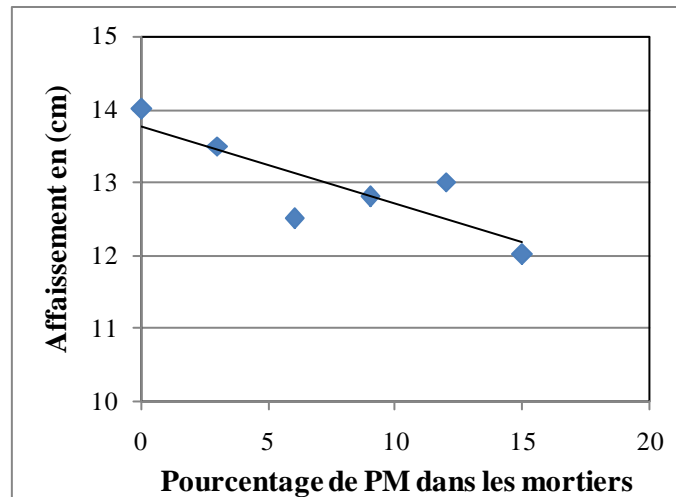


Figure IV.15. Résultats d'affaissement des mortiers du groupe 3

Comme pour l'étalement, d'après la figure IV.15 ci-dessus on constate que l'affaissement baisse légèrement avec l'augmentation de la teneur en PM dans les compositions, les mortiers perdent un peu de leur fluidité, ils deviennent un peu ferme. La courbe de tendance de l'évolution de l'affaissement en fonction du % en PM est de type linéaire avec un coefficient de corrélation R^2 de 0.71.

$$\text{Affaissement} = -0,106 \times \% \text{ PM} + 13,76$$

Corrélation entre l'étalement et l'affaissement cas des mortiers du groupe 3

Sur la figure suivante on a représenté la courbe de corrélation de l'évolution de l'étalement et de l'affaissement.

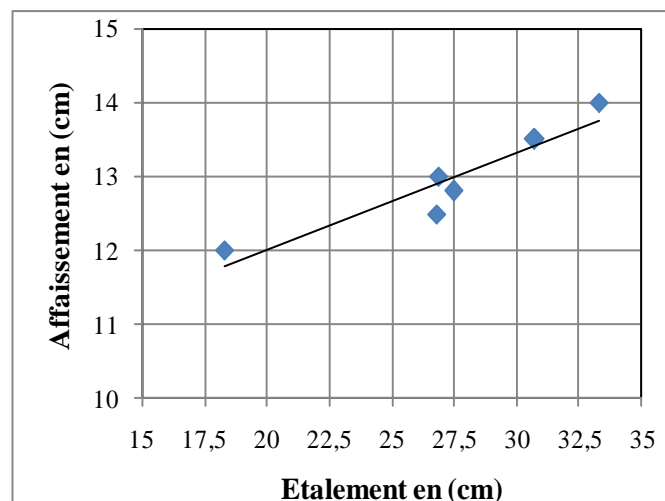


Figure IV.16. Affaissement fct. Etalement des mortiers du groupe 3

La courbe de la figure IV.16 montre que les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent au même temps de façon proportionnelle en suivant une tendance linéaire.

Dans le cas de ce groupe de mortiers on constate un changement dans la fluidité des mortiers. On passe du MR (33 cm d'étalement et 14 cm d'affaissement) au mortier à 15 % de PM (18,3 cm d'étalement et 12 cm d'affaissement). On perd 15 cm d'étalement et 2 cm d'affaissement.

Il est à noter que pour ces mortiers on a pas changer les quantités de ciment, eau et adjuvant.

IV.4.Résultats des essais d'écoulement

Pour effectuer les mesures d'écoulement des mortiers on a utilisé le cône de Marsh.

Difficultés :

Difficulté liée au sable : Cet essai permet de tester uniquement les matériaux très fluide, capable de se déverser en un flux continu, sans interruption, pour avoir une lecture correcte du temps d'écoulement et comparer les mortiers entre eux. Or, avec les mortiers que l'on a initialement prévus, on n'a pas réussi à avoir ce genre de comportement. Les mortiers initialement formulés bloqués, ne traversent pas le cône en flux continu. Ce problème nous a contraint à tester plusieurs formulations en jouant d'abords sur le dosage en superplastifiant, puis on remplaçant le sable par du sable de rivière qui est un sable roulé. Le constat est resté le même.

Suite à ces difficulté, on a décidé de travailler avec du sable de dune pour qui le diamètre maximal est très faible 0,08 mm.

Difficulté liée au matériel : A l'origine ce cône est développé pour de mesurer le temps d'écoulement d'un volume donné de coulis (ciment +eau), placé dans un cône normalisé, passant au travers d'un orifice de diamètre donné. Ces dernières années, ce même cône est utilisé pour caractériser l'écoulement des mortiers composés de sable et de coulis. Or le sable possède un diamètre maximal de l'ordre de 4 mm, il fallait donc fabriquer des embouts (extrémité de l'entonnoir) qui permettra aux mortiers de traverser. On a alors essayé un diamètre de 6 mm puis 8 mm et enfin 10 mm.

A l'issue de toutes ces tentatives, on a à la fin décidé de travailler avec des mortiers Autoplaçant, qui se mettent en placent sous leurs propres poids et qui coulent en flux continus, composés de sable de dune et avec un cône procédant un embout de 10 mm.

IV.4.1. Ecoulement mortier de référence composé du sable de dune

Cette étape consiste à trouver un dosage en super plastifiant qui permettra d'avoir un mortier auto-plaçant qui soit à la fois très fluide et assez visqueux pour qu'il se divise en flux continu.

Ainsi pour aboutir à cette composition on a dû apporter quelques modification au mortier de référence utilisé précédemment pour la partie affaissement et étalement. En effet le sable de dune est très fin, il développe donc une surface spécifique plus importante que le sable grossier précédemment utilisé, ces mortiers vont donc nécessiter plus d'eau pour les fluidifier. Ainsi, on a donc baissé la quantité de sable à 1300 g et augmenter la quantité d'eau à 300 g puis à 330 g, car les fluidités ainsi obtenues restent insuffisantes. Quant à la quantité de ciment elle est maintenue constante.

Ainsi le nouveau mortier de référence (MR) pour la partie écoulement est validé avec un dosage en SP égale à 2 % de la masse du ciment. Son étalement est de 34 cm et son affaissement est de 14,5 cm. Le temps d'écoulement est de 22,49 secondes.

IV.4.2.1. Ecoulement des mortiers du groupe 1

Les résultats d'écoulement obtenus pour les mortiers du groupe 1 sont donnés dans le tableau IV.6, ce temps est donné en secondes. Le sable utilisé est le sable de dune. Le ciment est substitué à des pas de 5 % par de la PM. Cinq mortiers sont utilisés. Le dosage en SP est maintenu constant par rapport à la masse de ciment.

Tous les mortiers de ce groupe ont eu un étalement de près de 34 cm et un affaissement de près de 14,5 cm.

Tableau IV.6. Ecoulement des mortiers du groupe 1

%PM	Ecoulement (secondes)
MR	22,49
M05g1	25,95
M15g1	28,94
M25g1	30,4
M35g1	42,02

Sur la Figure IV.17 ci-dessous on a représenté les valeurs d'écoulement sous forme d'un nuage de points.

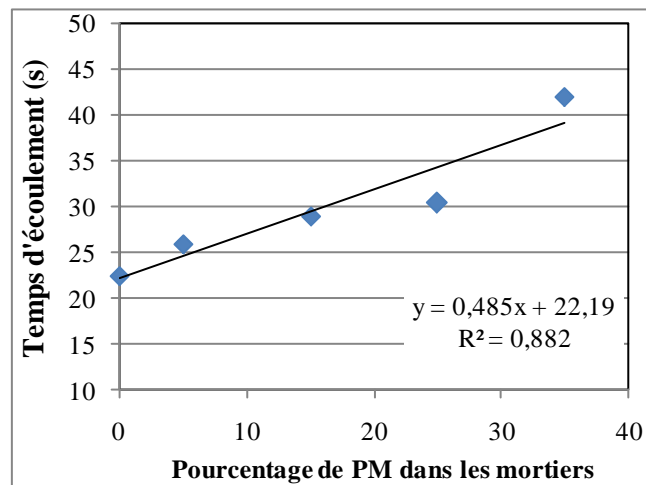


Figure IV.17. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 1

D'après la figure IV.17 ci-dessus on constate que le temps d'écoulement des mortiers varie avec l'introduction de la PM à la place du ciment. A 35 % de substitution le temps d'écoulement a doublé. Les mortiers deviennent de plus en plus visqueux et ce malgré leurs affaissement et étalement qui eux sont restés constant. Les mortiers de ce groupe 1 présentent donc la même fluidité mais leur viscosité augmente avec la quantité de PM. La même quantité de mortier met de plus en plus de temps pour s'écouler et traverser le cône.

IV.4.2.2. Ecoulement des mortiers du groupe 2

Les résultats d'écoulement obtenus pour les mortiers du groupe 2 sont donnés dans le tableau IV.7, ce temps est donné en secondes. Le sable utilisé est le sable de dune. Le ciment est substitué à des pas de 5 % par de la PM. La quantité de SP reste constante, donc le dosage en SP par rapport à la masse de ciment vari.

Tous les mortiers de ce groupe ont eu un étalement de près de 34 cm et un affaissement de près de 14,5 cm.

Tableau IV.7. Ecoulement des mortiers du groupe 2

PM%	Ecoulement (secondes)
MR	22,49
M05g2	22,02
M15g2	21,86
M25g2	21,74
M35g2	18,95

Sur la Figure IV.18 ci-dessous on a représenté les valeurs d'écoulement sous forme d'un nuage de points.

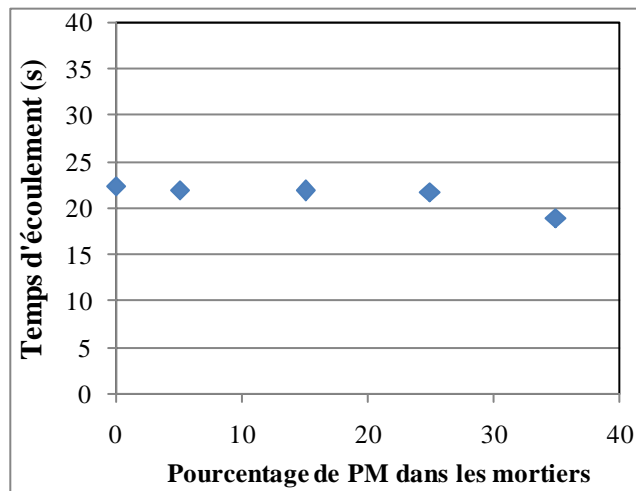


Figure IV.18. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 2

D'après la figure IV.18 ci-dessus on constate que le temps d'écoulement des mortiers reste quasiment constant avec l'augmentation de la teneur en PM dans les compositions, ce temps est de près de 20 secondes. Ainsi ce groupe de mortiers maintiennent leurs fluidités et leurs viscosités constantes.

Contrairement au comportement du groupe 1 ces mortiers ont eu un temps d'écoulement constant avec l'introduction de la PM. Dans ce cas l'apport en viscosité liée à la poudre de marbre se trouve compensé par une perte de viscosité liée au dosage en SP qui lui augmente avec la baisse de la quantité de ciment.

Ce que l'on peut également constater c'est que ce super plastifiant n'interagit pas avec cette PM.

IV.4.2.3. Ecoulement des mortiers du groupe 3

Les résultats d'écoulement obtenus pour les mortiers du groupe 3 sont donnés dans le tableau IV.8, ce temps est donné en secondes. Le sable utilisé est le sable de dune. Le Sable est substitué à des pas de 5 % par de la PM. Les quantités de ciment et de SP sont maintenues constantes.

Tous les mortiers de ce groupe ont eu un étalement de près de 34 cm et un affaissement de près de 14,5 cm.

Tableau IV.8. Ecoulement des mortiers du groupe 3

PM%	Ecoulement (secondes)
MR	22,49
M05g2	22,15
M15g2	21,18
M25g2	20,82
M35g2	20,84

Sur la Figure IV.19 ci-dessous on a représenté les valeurs d'écoulement sous forme d'un nuage de points.

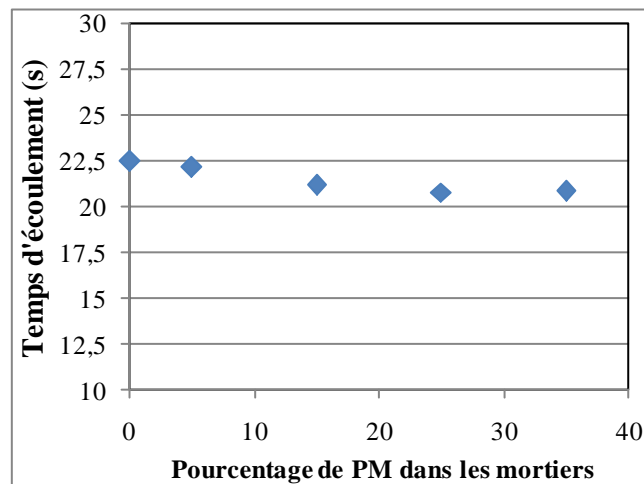


Figure IV.19. Résultats d'écoulement en secondes des mortiers du groupe 3

D'après la figure IV.19 ci-dessus on constate que le temps d'écoulement des mortiers baisse légèrement avec la substitution du sable par la PM à des pourcentages de plus en plus grands. Ainsi ce groupe de mortiers maintiennent leurs fluidités et leurs viscosités presque constantes.

IV.5. Conclusion

Les résultats de la partie résistance pour les mortiers du groupe 1 pour qui le ciment est remplacé graduellement par de la PM montre que la résistance moyenne en MPa des mortiers baisse avec la baisse de la quantité de ciment dans les mortiers. Cela montre que la poudre de marbre est une poudre inerte, n'est d'aucun apport en résistance mécanique. Pour le mortier à 15 % de substitution on a eu une baisse de près de 30 % de la résistance à 28 jours par rapport au MR.

Pour les mortiers du groupe 3 pour qui on a remplacé le sable par de la PM les résultats ne sont pas très concluants. En effet, dans ce cas on n'a pas eu de tendance particulière qui dépendrait du pourcentage de substitution du sable par la PM. Les résistances sont restées proches, groupées dans la plage de 39 à 49 MPa.

Pour la rhéologie deux parties se distinguent. Partie de la fluidité évaluée par les mesures d'étalement et d'affaissement ; partie viscosité évaluée par l'écoulement. Pour la partie écoulement on a dû travailler avec des mortiers composés de sable très fin et des consistances autoplaçant, sinon les mortiers ne s'écoulaient pas en flux continu dans le cône de Marsh.

Les mortiers du groupe 1 : les mortiers de ce groupe ont tous les mêmes affaissements et mêmes étalements, par contre ils n'ont pas eu les mêmes temps d'écoulements. Ainsi, on peut dire que la poudre de marbre n'affecte pas la fluidité au sens valeurs limites d'étalement et d'affaissement appelé aussi seuil de cisaillement, mais elle affecte la viscosité, le temps que les mortiers mettent pour s'écouler et donc se mettre en place.

Ainsi on peut dire que la PM rend les mortiers plus visqueux (à dosage constant en SP).

Les mortiers du groupe 2 : Les mortiers de ce groupe ont eu une légère baisse dans les mesures d'affaissements d'étalements. Ces mortiers ont eu un temps d'écoulement constant avec l'introduction de la PM. Dans ce cas l'apport en viscosité liée à la poudre de marbre, tel que constatée avec le groupe 1 se trouve compensé par une perte de viscosité liée au dosage en SP qui lui augmente avec la baisse de la quantité de ciment.

Les mortiers du groupe 3 : comme la variable ici est le sable on préfère conclure séparément les résultats des deux parties : mortiers composés de sable concassé puis ceux composés de sable de dune.

Sable concassé : pour la fluidité on a constaté que le fait de substituer le sable concassé par la PM rendait les mortiers de plus en plus fermes, ils perdaient en étalement et en affaissement. La consistance de ces mortiers nous a empêchée de faire les essais d'écoulement, il fallait les fluidifier plus.

Sable de dune : Le temps d'écoulement des mortiers de ce groupe baisse légèrement avec la substitution du sable par la PM. Ces mortiers deviennent alors légèrement moins visqueux tout en maintenant les mêmes étalements et affaissements.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les effets de l'introduction des poudres minérales sur le comportement rhéologique des mortiers cimentaires. Comme poudre on a utilisé les fines de marbre issues de la récupération. Les deux paramètres d'étude sont la fluidité estimée par les deux mesures d'étalement et d'affaissement des mortiers au mini-cône échelle $\frac{1}{2}$ du cône d'Abrams, la viscosité estimée par des essais d'écoulement au cône de Marsh.

Les formulations étudiées sont définies comme suit :

- Groupe 1 : une partie du ciment est substituée par la PM. Le dosage du superplastifiant est maintenu constant par rapport à la masse du ciment.
- Groupe 2 : une partie du ciment est remplacée graduellement avec de la PM. Le dosage en superplastifiant est maintenu constant par rapport à la masse des fines (ciment + PM).
- Groupe 3 : une partie du sable est substituée graduellement par la PM. La masse du ciment est maintenue constante ainsi que le dosage en superplastifiant.

Les pourcentages de substitution utilisés vont de 0% à 35 %. Sur l'ensemble des essais menés on a fait une substitution massique par la PM tout en maintenant les autres paramètres de compositions constants.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure ce qui suit :

Résistance :

La résistance moyenne à la compression à 28 jours des mortiers du groupe 1 baisse avec la baisse de la quantité de ciment dans les mortiers. Cela montre que la PM est une poudre inerte, n'est d'aucun apport en résistance mécanique.

Pour les mortiers du groupe 3 les résultats ne sont pas très concluants. Dans ce cas on n'a pas eu de tendance particulière en fonction du pourcentage de substitution du sable par la PM. Les résistances sont restées proches, groupées dans la plage de 39 à 49 MPa.

Rhéologie :

Pour la partie écoulement on a dû travailler avec des mortiers composés de sable très fin et une consistance autoplaçant, sinon les mortiers ne s'écoulaient pas en flux continu dans le cône de Marsh.

Conclusion générale

Les mortiers du groupe 1 ont tous la même consistance (affaissements et étalements), par contre ils n'ont pas eu les mêmes temps d'écoulements. Ainsi, on peut dire que la PM n'affecte pas la fluidité au sens valeurs limites d'étalement et d'affaissement appelé aussi seuil de cisaillement, mais elle affecte la viscosité, le temps que les mortiers mettent pour s'écouler et donc se mettre en place. Ainsi la PM rend les mortiers plus visqueux (à dosage constant en SP).

Les mortiers du groupe 2 ont eu une légère baisse dans les mesures d'affaissements d'étalements. Ces mortiers ont eu un temps d'écoulement constant avec l'introduction de la PM. Dans ce cas l'apport en viscosité liée à la poudre de marbre, tel que constatée avec le groupe 1 se trouve compensé par une perte de viscosité liée au dosage en SP qui lui augmente avec la baisse de la quantité de ciment.

Les mortiers du groupe 3 : par les difficultés expérimentales rencontrées, on a été contraint de changer la nature du sable en remplaçant le sable concassé par du sable de dune. Cette partie c'est donc diviser en deux sous groupes : mortiers composés de sable concassé puis ceux composés de sable de dune.

Sable concassé : pour la fluidité on a constaté que le fait de substituer le sable concassé par la PM rendait les mortiers de plus en plus fermes, l'étalement et l'affaissement baissent en fonction de la teneur en PM. La consistance de ces mortiers nous a empêchée de faire les essais d'écoulement, il fallait les fluidifier plus.

Sable de dune : Le temps d'écoulement des mortiers baisse légèrement avec la substitution du sable par la PM. Ces mortiers deviennent alors légèrement moins visqueux tout en maintenant les mêmes étalements et affaissements.

Perspectives :

A la réalisation de cette petite étude on a rencontré pleins de difficultés soit en matériels soit en matériaux, qui parfois nous ont obligé de reproduire le travail trois à quatre reprises, et parfois sans même avoir de piste de remplacement et de conclusion à tirer. L'idée c'est donc de reprendre cette étude avec les mêmes produits de son début à sa fin, notamment pour le sable de dune, mais aussi de travailler sur la nature de la poudre pour pouvoir tirer des conclusions plus générales.

Références bibliographiques

- [1] NEVILLE A., « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000.
- [2] M. REGOURD. « L'hydratation du ciment portland », Le béton hydraulique' P.E.N.P.Ch 1982.
- [3] AFN 196-NF EN 196-1, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques », AFNOR Avril 2006.
- [4] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «les bétons – constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel » chapitre 3; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 13_14
- [5] DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants» 8ème édition Eyrolles 2002.
- [6] KARA A.R., « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », thèse de Doctorat, U Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [7] HADDAD O., « Contribution au développement d'outils d'aide a la formulation des BAP relatifs à la rhéologie a l'état frais et à la résistance au jeune âge », thèse de doctorat, France, 2007.
- [8] F. DE LARRARD « Structures granulaires et formulation des bétons », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [9] BARON J., OLLIVIER J. P., « Les bétons - bases et données pour leur formulation », Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1997»
- [10] G. DREUX, J. FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants» 8° édition Eyrolles 1998.
- [11] DUPAIN R., SAINT ARROMAN J.C. « granulats, sols, ciments et bétons », 4ème édition Casteilla 2009.
- [12] AITCIN P. C., S. JIANG, B. KIM, P. NKINAMUBANZI, N. PETROV, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [13] FABER FABBRIS Article de Rhéologie « La rhéologie du béton » Mai/Juin 2013 Laboratoire de la Matière.

Annexe 1 : Différents essais de laboratoire

1. ECHANTILLONNAGE (NF P 18- 553)

1.1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- b) Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

- ❖ Prélèvement sur tas normaux (sables et graviers)
- ❖ Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

a) à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.

b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure1.1**

c) au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulat.

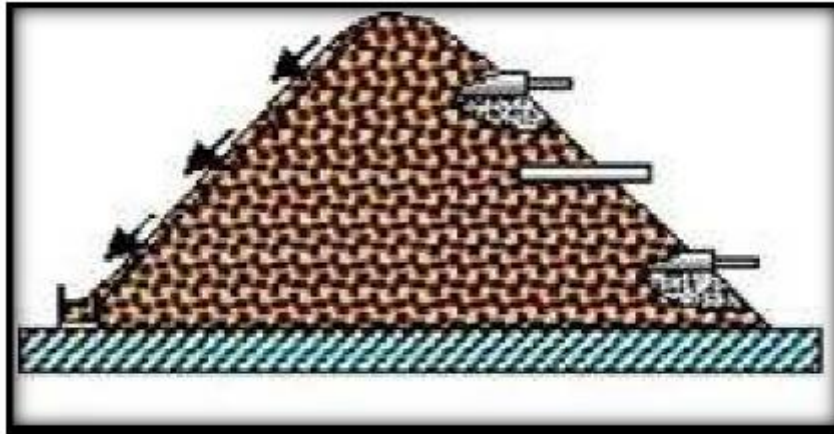


Figure 1.1. Le matériau en stock.

b. Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

1.2. Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (**figure1.2**): Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres ; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ; Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (**figure1.2**) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

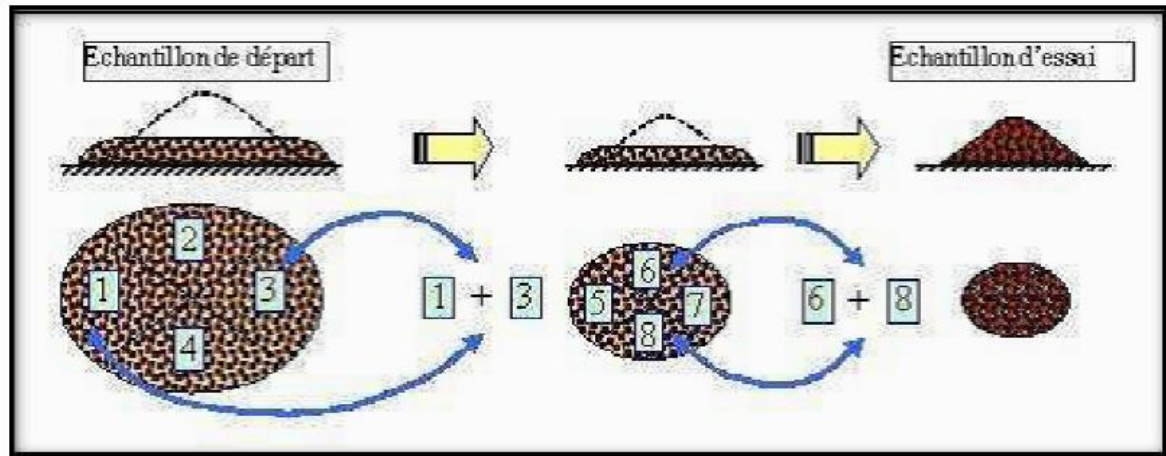


Figure 1.2. Opération de quartage

1.3. Echantillonneur (quarteur)

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons à comme but de diviser une certaine quantité de matière meuble (exp : un gravier, un sable, ou tout mélange de fragments résultant d'un concassage) en deux portions de poids égaux. L'une des portions peut à son tour être passée dans le quarteur (et ainsi de suite), jusqu'à l'obtention de la quantité réduite désirée, qui sera toujours représentative de l'échantillon de départ.



Figure 1.3. Echantillonneur utilisé

Aspects pratiques

Les pièces typiques d'un système de quartage sont (**Figure1.3**) :

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon. La largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.
- Trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3). Le procédé peut être résumé par la (**figure 1.4**) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse $3m$.

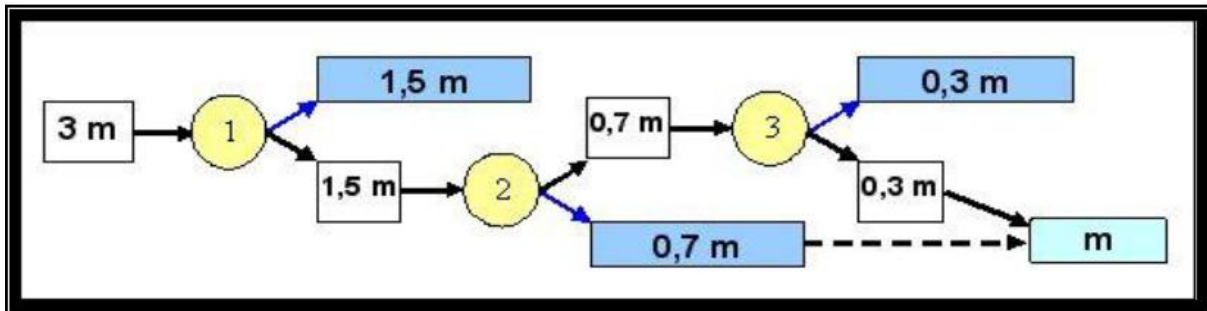


Figure 1.4. Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 ET EN 933-2)

2.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$ (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.

Tamis (mm)	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63
Tamis (mm)	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
Tamis(mm)	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125	/	/

2.3. Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M1**). On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063 mm soit claire. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à (110 ± 5) °C. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (**masse M2**). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

Dimensions des tamis utilisés

En fonction des dimensions d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (**tableau 1.1**)



Figure.1.5. Colonne de tamis utilisée

Note : Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

Préparation de l'échantillon

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que : $M \geq 0,2D$ avec :

M : masse de l'échantillon en kg ;

D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

Description de l'essai

Le matériau séché, de masse M_2 , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci est vibrée à l'aide de la **tamiseuse électrique**. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

3. ABSORPTION (NF P 18- 555)

3.1. But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

3.2. Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption (A_b) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_s = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C. M_a = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des sables

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface

externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.



Figure I.6. Différents étapes de détermination de l'absorption du sable

On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure I.6)

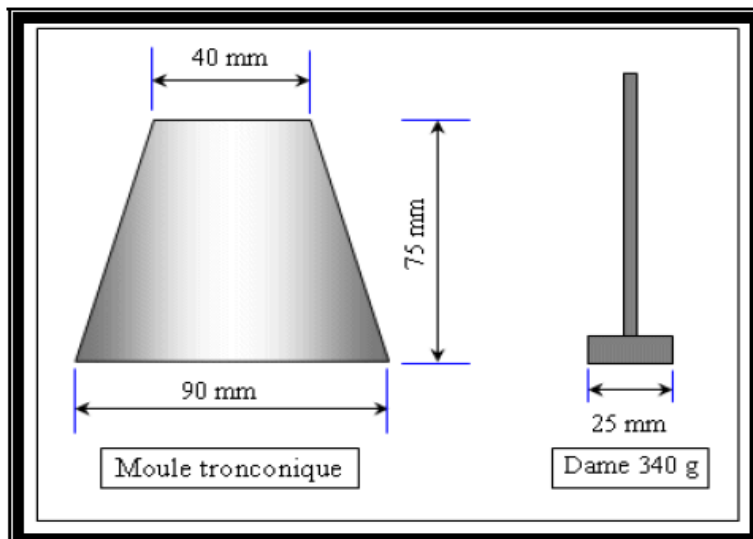


Figure 1.7. Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.

Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des gravillons (NF p 18 554)

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.



Figure 1.8 Etapes de déterminations de l'absorption des granulats cas de graviers.

Annexe 2 Résultats des différents essais de caractérisation

Dans cette annexe nous avons représenté les différents résultats expérimentaux des granulats utilisés dans notre étude.

❖ Analyse granulométrique

<i>Matériau : Sable 00/3</i>				
Nature	Gravier semi concassé 00/03			
Provenance	Gravier de Tizi ouzou			
Date d'analyse	06/05/2018			
Masse initial a l'état sec en (g)	M ₁ =	2000 g		
Masse après le tamisage	M ₂ =	1995,5 g		
Pert des granulats en (g)	M ₁ - M ₂ =	4,5 g		
	P =	4,5 g		
Tamis en (mm)	Refus en (g)	Refus C en (g)	Refus C en (%)	Tamisat C en (%)
5	0	0	0	100
4	2,5	2,5	0,125	99,87
3,15	117,5	120	6	94
2,5	215,5	335,5	16,77	83,23
1,25	642,5	978	48,9	51,1
0,63	271,5	1249,5	62,47	37,53
0,315	353	1602,5	80,125	19,87
0,16	206	1808,5	90,425	9,57
0,08	115,5	1924	96,2	3,8
Fond	71,5	1995,5	99,77	0,23