

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

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil



Mémoire de Master recherche

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Thème

Influence de l'ajout de la poudre de marbre sur
le comportement mécanique d'un mortier



Dirigé par :

Mme CHAHOUR Kahina

Etudié par :

Melle BENTOUATI Ilham

Promotion: 2016/2017

Remerciements

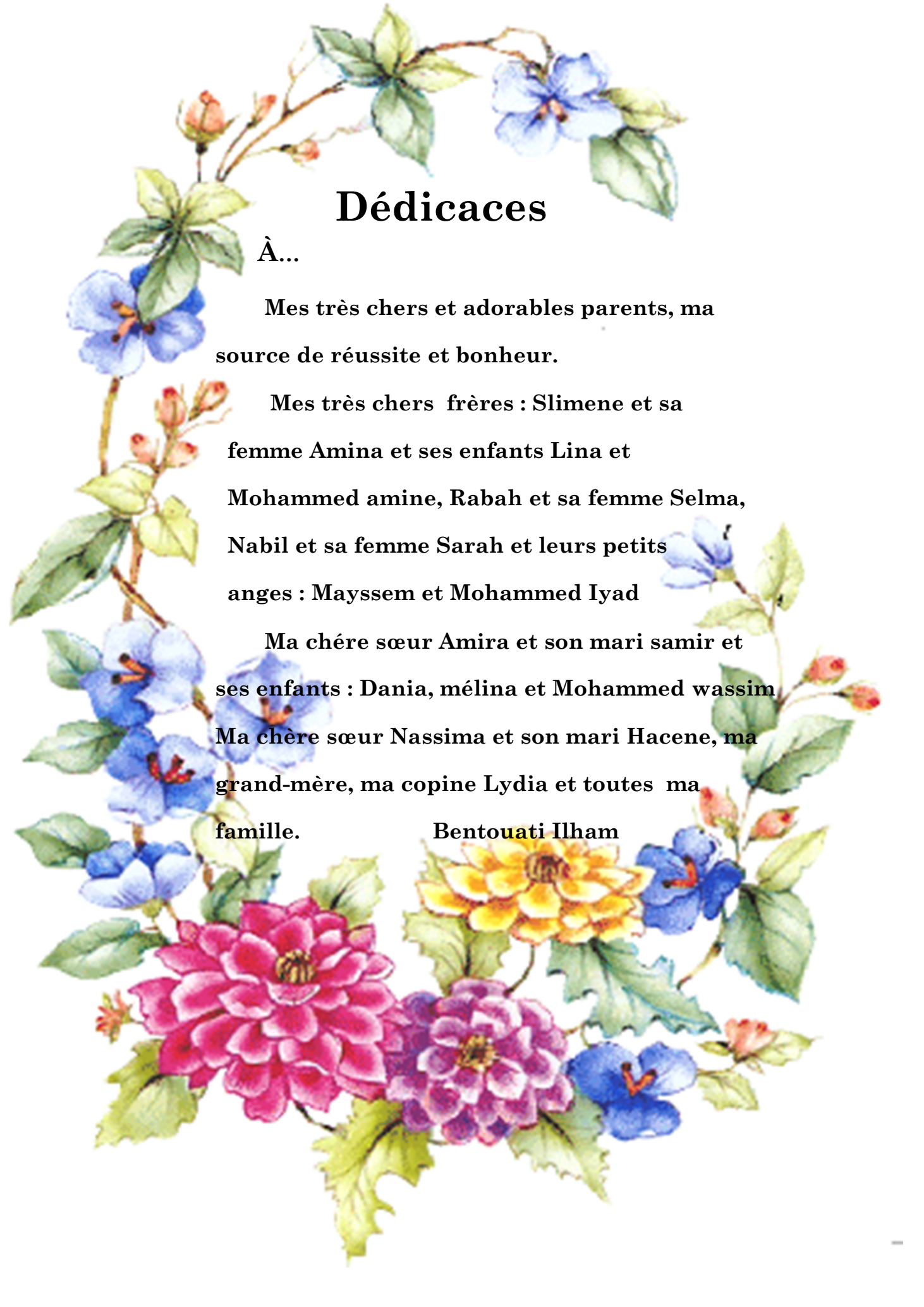
Tout d'abord je remercie avant tous, Dieu le tout puissant, pour m'avoir accordé la santé, le courage, la patience et la volonté jusqu'à l'aboutissement de mes études, et l'accomplissement de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice M^{me} Chahour pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, sa modestie, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du laboratoire Génie Civil, Université Mouloud MAMMER de TIZI OUZOU, en particulier à Monsieur BOUHERRAOUA. R, pour sa précieuse aide à la réalisation de la partie expérimentale et ainsi M^{me} MADJBER. F.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et de l'enrichir par leurs propositions.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'études.



Dédicaces

À...

Mes très chers et adorables parents, ma source de réussite et bonheur.

Mes très chers frères : Slimene et sa femme Amina et ses enfants Lina et Mohammed amine, Rabah et sa femme Selma, Nabil et sa femme Sarah et leurs petits anges : Mayssem et Mohammed Iyad

Ma chère sœur Amira et son mari samir et ses enfants : Dania, mélina et Mohammed wassim
Ma chère sœur Nassima et son mari Hacene, ma grand-mère, ma copine Lydia et toutes ma famille.

Bentouati Ilham

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur le mortier

I-1 : Introduction	3
I-2 : Les mortiers.....	3
I-3 : Les ciments.....	5
I-3-1 : Constituants principaux	6
I-3-2 : Principe de fabrication des ciments courante.....	11
I-3-3 : Différents types de ciments courants.....	15
I-3-4 : Propriétés des ciments	17
I-4 : Les sables	22
I-5 : L'eau de gâchage.....	25
I-6 : Les adjuvants	25
I-7 : Les additions minérales.....	26
I-7-1 : L'intérêt de l'utilisation des additions minérales dans le génie civil.....	26
I-7-2 : Les inconvénients d'utilisation des additions minérales.....	27
I-7-3 : Effets des additions sur les propriétés des bétons.....	27
I-7-4 : L'utilisation des additions en Algérie	29

Chapitre II : Le recyclage dans le bâtiment.

II-1 : Introduction.....	31
II-2 : Les déchets de la construction et de l'environnement.....	31
II-3 : L'utilisation des déchets de marbre dans le bâtiment	33
II-4 : Essais de résistance et de durabilité.....	33
II-4-1 : Compression	33
II-4-1-1 : Principe de l'essai	33
II-4-1-2 : Comportement en compression	34
II-4-2 : Traction.....	44

II-4-2-1 : Principe de l'essai.....	44
II-4-2-1-1 : Essai de traction directe	44
II-4-2-1-2 : Essai de traction par flexion	45
II-4-2-1-3 : Essai de traction par fondage	46
II-4-2-2 : Comportement en traction.....	46
II-4-3 : Perméabilité	52
II-4-4 : Porosité	52
II-4-5 : Résistance en milieu agressif.....	53

Chapitre III : Etude expérimentale

III-1 : Matériaux et formulation	56
1 : Introduction.....	56
2 : Matériaux	56
2-1 : Ciment.....	56
2-2 : Sable.....	57
2-3 : L'eau de gâchage	57
2-4 : Adjuvant	58
2-5 : Ajout minérale.....	60
3 : Caractérisation des matériaux.....	62
3-1 : Essais sur sable.....	62
3-1-1 : Analyse granulométrique.....	62
3-1-2 : Module de finesse	64
3-1-3 : Equivalent de sable.....	65
3-1-4 : Masse volumique absolue	67
3-1-5 : La masse volumique apparente	68
3-2 : Essais sur la poudre de marbre.....	69
3-2-1 : Masse volumique absolue.....	69

3-2-2 La masse volumique apparente	69
3-2-3: Résultats des essais sur la poudre de marbre	72
3-3 : Essais sur le ciment	72
3-3-1 : Essai de consistance	72
3-3-2 : Temps de prise à 20°C	72
4 : Composition des mortiers.....	73
5 : Formulation des mortiers.....	74
5-1 : Préparation du matériau	74
5-2 : Confection des mortiers	76
6- Essais sur mortiers.....	82
6-1 : Essais sur mortier frais.....	82
6-2 : Essais à l'état durci.....	85
II-2 : Résultats et interprétation.....	91
1 : Introduction.....	91
2 : Résultats des essais mécaniques	91
2-1 : Résistance en compression.....	91
2-2 : Résistance à la flexion trois points	94
2-3 : Résistance à la traction par fondage	97
Conclusion	100
Conclusion générale	102

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les différents types de ciment courants	16
Tableau I.2 : Caractéristique chimique de ciment courant.....	20
Tableau I.3 : Caractéristique mécanique des ciments courants	21
Tableau I.4 : Résistances garanties des ciments courants	22
Tableau I-5 : Classement des sables en fonction de leur composition granulométrique	24
Tableau I-6 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.....	30
Tableau III-1 : Composition chimique et caractéristiques physico-mécaniques du ciment	57
Tableau III-2 : Caractéristiques pétrographiques de la poudre utilisée	60
Tableau III-3 : Composition minéralogique de la poudre utilisée.....	60
Tableau III-4 : Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre utilisée.....	61
Tableau III-5: Caractéristiques chimiques de la poudre utilisée	61
Tableau III-6 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre concassé (0/3).....	61
Tableau III-7 : Mélanges des mortiers préparés	62
Tableau III-8 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable	66
Tableau III-9 : Résultats d'analyse granulométrique du sable	70
Tableau III-10 : Module de finesse du sable	71
Tableau III-11 : Valeurs de l'équivalent de sable.....	71
Tableau III-12 : Masse volumique apparente et absolue de sable	71
Tableau III-13 : Masse volumique apparente et absolue de la poudre de marbre	72
Tableau III-14 : Le début et la fin de prise du ciment	72
Tableau III-15 : Composition de trois éprouvettes cubiques de mortier témoin.....	73
Tableau III-16 : Composition de trois éprouvettes prismatiques de mortier.....	74
Tableau III-17: Composition de trois éprouvettes cylindriques de mortier témoin.....	74
Tableau III-18: Composition des mortiers pour 5 % de la poudre de marbre.....	75
Tableau III-19 : Composition des mortiers pour 10 % de la poudre de marbre	75
Tableau III-20 : Composition des mortiers pour 15 % de la poudre de marbre	75

Tableau III-21 : Composition des mortiers pour 20 % de la poudre de marbre	76
Tableau III-22 : Désignation des différentes éprouvettes	76
Tableau III-23 : Consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.....	83
Tableau III-24 : Vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques travers les mortiers	90

Liste des figures

Figure I.1 : Mortier.....	3
Figure I.2 : Poudre de ciment courant	5
Figure I-3: Microphotographie d'un clinker.....	7
Figure I-4 : Fabrication du ciment.....	12
Figure II-1 : Compression d'une éprouvette cylindrique.....	34
Figure II-2: Comportement du béton en compression simple, Chen.	35
Figure II-3 : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al.....	36
Figure II-4: Loi parabole-Rectangle du béton en compression BAEL	37
Figure II-5 : Diagramme parabole- rectangle du béton en compression, EUROCODE2.....	39
Figure II-6 : Diagramme non linéaire du béton en compression, EUROCODE2	40
Figure II-7: Comportement du béton en compression selon Sargin	42
Figure II-8: Essai de traction sur un tirant en béton armé	44
Figure II-1 : Compression d'une éprouvette cylindrique.....	34
Figure II-2: Comportement du béton en compression simple, Chen.	35
Figure II-3 : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al.....	36
Figure II-4: Loi parabole-Rectangle du béton en compression BAEL	37
Figure II-5 : Diagramme parabole- rectangle du béton en compression, EUROCODE2.....	39
Figure II-6 : Diagramme non linéaire du béton en compression, EUROCODE2	40
Figure II-7: Comportement du béton en compression selon Sargin	42
Figure II-8: Essai de traction sur un tirant en béton armé	44
Figure II-9: Essai de flexion a trois points.....	45
Figure II-10 : Essai de flexion quatre points.....	45
Figure II-11: Essai de fendage	
Figure II-12 : Courbe contrainte-déformation du béton en traction	47

Figure II-13 : Comportement local du béton en traction selon MAZARS.....	49
Figure II-14 : Comportement de béton avant fissuration	50
Figure II-15 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat.....	51
Figure III-1 : Ciment MATINE utilisé	56
Figure III-2 : La poudre de marbre utilisé.....	61
Figure III-3 : Colonne de tamis.....	64
Figure III-4 : Tamiseur électrique.....	64
Figure III-5 : Essai d'équivalent de sable.....	66
Figure III-6 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue du sable	68
Figure III-7 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable	68
Figure III-8: Essai de la détermination de la masse volumique absolue de la poudre de marbre.....	69
Figure III-9 : Essai de détermination de la masse volumique apparente de la poudre de marbre.....	69
Figure III-10 : Courbe granulométrique du sable.....	70
Figure III-11 : Appareil de Vicat de l'aiguille amovible	73
Figure III-12 : Moules des éprouvettes.....	77
Figure III-13 : Matériaux pesés dans le malaxeur utilisé.....	77
Figure III-14 : Table vibrante utilisée	78
Figure III-15 : Eprouvettes avant le décoffrage.....	78
Figure III-16 : Décoffrage des éprouvettes	79
Figure III-17 : Eprouvettes après le décoffrage.....	79
Figure III-18 : Conservation des éprouvettes dans l'eau de robinet.....	79
Figure III-19 : Histogramme des masses d'éprouvettes cubiques avant/après la conservation dans l'eau.....	80

Figure III-20 : Histogramme des masses d'éprouvettes prismatiques avant/après la conservation dans l'eau	81
Figure III-21 : Histogramme des masses d'éprouvettes cylindriques avant/après la conservation dans l'eau	82
Figure III-22 : Cône d'Abrams.....	84
Figure III-23 : Affaissement en fonction de la teneur en poudre de marbre	84
Figure III-24 : Essai de compression	85
Figure III-25 : Eprouvettes cubiques après écrasement.....	86
Figure III-26 : Essai de traction par flexion trois points	87
Figure III-27 : Eprouvettes prismatiques après écrasement	87
Figure III-28 : Essai de traction par fondage.....	88
Figure III-29 : Eprouvettes cylindriques après écrasement.....	88
Figure III-30 : Equipement de l'ultrason utilisé	89
Figure III-31 : Superposition des courbes de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les différents mortiers.....	90
Figure III-32 : Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 7 jours.....	91
Figure III-33 : Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 14 jours	92
Figure III-34 : Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 28 jours	93
Figure III-35 : Superposition des courbes contrainte-déformation en flexion à 7 jours.....	94
Figure III-36 : Superposition des courbes contrainte-déformation en flexion à 14 jours	95
Figure III-37 : Superposition des courbes contrainte-déformation en flexion à 28 jours	96
Figure III-38 : Superposition des courbes contrainte-déformation en traction par fondage à 7 jours	97

Figure III-39 : Superposition des courbes contrainte-déformation en traction par fondage à 14 jours	97
Figure III-40 : Superposition des courbes contrainte-déformation en traction par fondage à 28 jours	98
Figure III-41 : Histogramme des contraintes maximales de compression des différents mortiers....	99
Figure III-42 : Histogramme des contraintes maximales de flexion des différents mortiers	99
Figure III-43 : Histogramme des contraintes maximales de traction par fondage des différents mortiers.....	100

➤ Contexte générale de l'étude:

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale en ciments, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physicomécaniques demandées.

Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (CPJ-CEMII/ A ou B), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. Dans cette étude, on a utilisé l'ajout de la poudre de marbre.

➤ Objectif de l'étude :

L'étude entreprise dans ce mémoire vise à atteindre un objectif principal suivant :

Etude des effets de l'incorporation de la poudre de marbre sur le comportement mécanique d'un mortier.

➤ Organisation du mémoire :

Le contenu du mémoire englobe les chapitres suivants :

Une introduction générale

- **Le premier chapitre** : nous avons fait un rappel des définitions fondamentales sur les mortiers et les composants d'un mortier (le sable, l'eau, les adjuvants et l'élément principal du mortier qui est le ciment et les additions minérales).

- **Le deuxième chapitre** : dans ce chapitre on a parlé sur les déchets de la construction et de l'environnement, et l'utilisation de ces déchets dans le bâtiment (dans cette étude on a utilisé les déchets de marbre), et nous avons fait un petit rappel sur les essais de résistances et de durabilité (compression, flexion, traction, perméabilité, ...).

- **Le troisième chapitre :** dans ce chapitre on a fait une étude expérimentale; en variant le pourcentage d'ajout de la poudre de marbre de 0%, 5%, 10%, 15 %, 20% du poids du ciment.

Ce chapitre est composé de deux parties :

-Dans la première partie nous avons fait une présentation détaillée sur les étapes d'élaboration des différents mortiers, à savoir : les matériaux utilisés, la formulation, le procédé de préparation des éprouvettes, la réalisation des éprouvettes et enfin les essais effectués sur le mortier.

-Dans la deuxième partie nous avons présenté les résultats et l'exploitation de ces résultats.

- Et à la fin on conclue ce travail par une conclusion générale.

I-1- Introduction :

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration, ... Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers, ...

I-2-Les mortiers :

Le mortier est un mélange, durci ou non, de **sable**, de **liant(s)** et d'**eau**, avec ou sans **adjuvants** et/ou additifs. On distingue trois types de mortiers: les mortiers pour utilisation générale, les mortiers pour fines couches et les mortiers allégés. Le but du mortier est d'attacher les briques les unes aux autres et de répartir les charges.



Figure I-1 : mortier.

- **Les mortiers de maçonnerie normalisés :**

Depuis le 1er février 2005, la norme européenne EN 998-2 s'applique. En ce qui concerne les mortiers de maçonnerie normalisés, la norme NBN-EN 998-2 précise les types suivants:

Le type de mortier selon le projet (art. 3.2 de la NBN-EN 998-2): mortier livré pour des prestations et des exigences d'utilisation spécifiques.

Le type de mortier selon l'usage (art. 3.3 de la NBN-EN 998-2): mortier pour usage ordinaire (G), mortier-colle (T) et mortier de ciment léger (L).

Le type de mortier selon la méthode de fabrication (art. 3.4 de la NBN-EN 998-2): mortier humide industriel, mortier sec industriel et mortier partiellement préparé en usine.

L'ancienne norme belge NBN B 14-001 (retirée) distinguait les mortiers de maçonnerie normalisés en mortiers de ciment et mortiers bâtards, selon leur résistance moyenne à la compression après 28 jours.

- **Le mortier de ciment pur :**

Le mortier de ciment pur présente une meilleure résistance à la compression que le mortier bâtard et sa prise est plus rapide. En revanche, il est davantage sujet au retrait.

- **Le mortier bâtard :**

Le mortier bâtard est composé de ciment et de chaux aérienne (Ca(OH)_2). Il présente le grand avantage d'être plus élastique et plus facile à mettre en œuvre que le mortier de ciment pur. Son retrait est en outre moins marqué. Les adjuvants ne sont pas nécessaires. Le temps de durcissement relativement long peut parfois s'avérer gênant lors de la mise en œuvre, surtout en cas de menace de gel.

Grâce à un dosage précis des adjuvants en usine, la plupart des fabricants de mortier sont en mesure de livrer des mortiers prédosés (voir plus loin) qui réunissent les avantages du mortier bâtard (facilité de mise en œuvre) et ceux du mortier de ciment pur (prise rapide).

- **Les mortiers (légers) isolants :**

La norme NBN-EN 998-2 définit un mortier de maçonnerie allégé comme étant un mortier de maçonnerie dont le poids volumique sec après durcissement est inférieur à 1300 kg/m^3 . Certains adjuvants rendent ces mortiers de maçonnerie plus légers et donc plus isolants.

Un mortier léger ou isolant permet d'améliorer quelque peu la résistance thermique de la maçonnerie.

Son poids volumique sec après durcissement est inférieur à 1300 kg/m³.

A titre de comparaison:

- le mortier de ciment: 1900 kg/m³
- le mortier bâtard: 1600 kg/m³

Un mortier isolant est toujours un mortier industriel.

- **Le mortier de maçonnerie industriel ou mortier préparé en usine :**

Pour maintenir la stabilité du rapport entre les composants du mortier, ce qui est très difficile avec une bétonnière classique et requiert beaucoup de temps, on peut avoir recours aux mortiers préparés en usine. Ces mortiers offrent l'avantage d'une qualité certifiée (BENOR).

I-3-Les ciments :

Le ciment est un **liant** hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment.[01]



Figure I-2 : Poudre de ciment courant.

I-3-1 : Constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire,
- du laitier de haut fourneau,
- des cendres volantes,
- des fines calcaires,
- de la pouzzolane naturelle,
- des schistes calcinés,
- des fumées de silice,

Dans le but de modifier certains de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques.[01]

I-3-1-1 : Clinker portland (k) :

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- silicate tricalcique également dénommé « alite », C_3S , dont la formule est $3CaO, SiO_2$;
- silicate bicalcique ou « bélite », C_2S , de formule $2CaO, SiO_2$;
- aluminate tricalcique C_3A , de formule $3CaO, Al_2O_3$;
- alumino-ferrite tétracalcique C_4Af , de formule $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$ (le ciment portland contient au moins 95%de clinker).

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont en moyennes de :

50 à 70% pour le C₃S ;

5 à 25% pour le C₂S ;

2 à 12% pour le C₃A ;

0 à 15% pour le C₄AF.

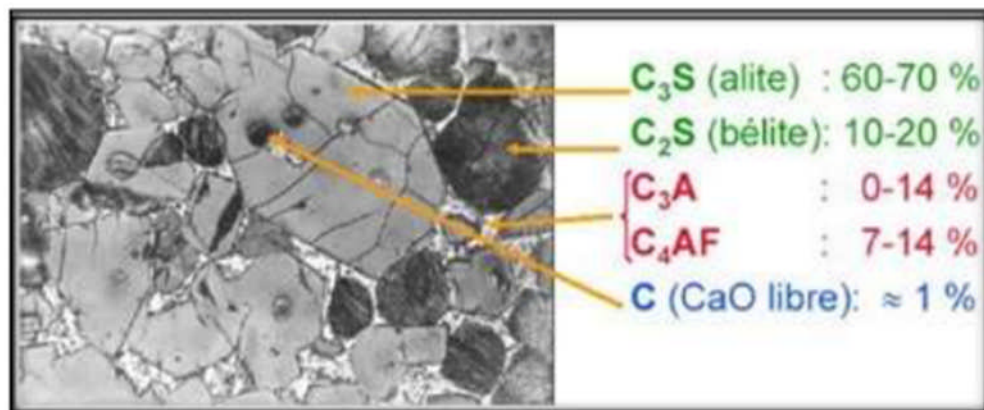


Figure I-3 : Microphotographie d'un clinker.

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases ,c'est ainsi que :

- Le C₃S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C₂S, donne au ciment une résistance rapide et élevée ;cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.
- Le C₂S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ;à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.
- L'aluminate tricalcique C₃A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pate de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale .Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates.

- L'alumino-ferrite tétracalcique C4AF, qui forme une solution solide de C2A et C2F, réagit moins vite que C3A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

En dehors de ces quatre principales phases, la clinker comporte également :

- De la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2% dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau ;
- De l'oxyde de magnésium MgO, encore appelé périclase, qui , non combiné, peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

De ce qui précède, il ressort qu'un ciment contenant par exemple 60% de C3S ainsi qu'un pourcentage en C3A supérieur à 10% ,présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé par temps froid, alors qu'un ciment dont le pourcentage en C3S est supérieur à 40% et celui en C3A n'excède pas 5%, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé par temps chaud.[01]

I-3-1-2 : Laitier granulé de haut-fourneau (S) :

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de la silice entre 25 et 35%, de l'alumine entre 12 et 30% ainsi que de la magnésie et d'autre oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les memes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. [01]

I-3-1-3 : Cendres volantes (V et W) :

Les cendres volante, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être :

- siliceuse (V), auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation ;
- ou calciques (W), auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydraulique.

Les cendres volantes siliceuses (v) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55%, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25%, et d'alumine entre 20 et 30% environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5%. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5%. [01]

I-3-1-4 : Pouzzolanes naturelles (Z) :

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont essentiellement composées de silice réactive 5 dans des proportions supérieures à 25%), d'alumine et d'oxyde de fer. [01]

I-3-1-5 : Schistes calcinés (T) :

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800 °C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.

Actuellement les ciments fabriqués en France ne comportent pas de schistes calcinés. [01]

I-3-1-6 : Calcaires (L) :

Les calcaires utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, c'est-à-dire lorsqu'ils représentent plus de 5 % de la masse totale du ciment, doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75 % en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) au plus égale à 0,5 %. [01]

I-3-1-7 : Fumées de silice (D) :

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85 % de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes. [01]

I-3-1-8: Constituants secondaires :

Les constituants secondaires peuvent être :

- Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion $\leq 5\%$, exception faite du clinker ;
- Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3 %.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton. [01]

I-3-1-9: Sulfate de calcium :

Le sulfate de calcium a pour effet de réguler la prise du ciment. Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité, c'est-à-dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum. [01].

I-3-1-10 : Additifs :

Les additifs ne doivent présenter aucune action novice 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. Ils agissent comme défloculant, empêchant ainsi les phénomènes de réagglomération des grains en cours de broyage.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, bétons ou coulis qui, dans ce cas, agissent sur une caractéristique précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée en vue d'éviter d'éventuelles incompatibilités avec d'autres produits.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne devant 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 CHF-CEM III /A ou B et des CLK-CEM III/C, pour lesquels la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1%. [01]

I-3-2 : Principe de fabrication des ciments courants :

Sans vouloir entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est cependant nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20 %.

Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels que la magnésie MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalis K_2O et Na_2O ..., dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises. [01]

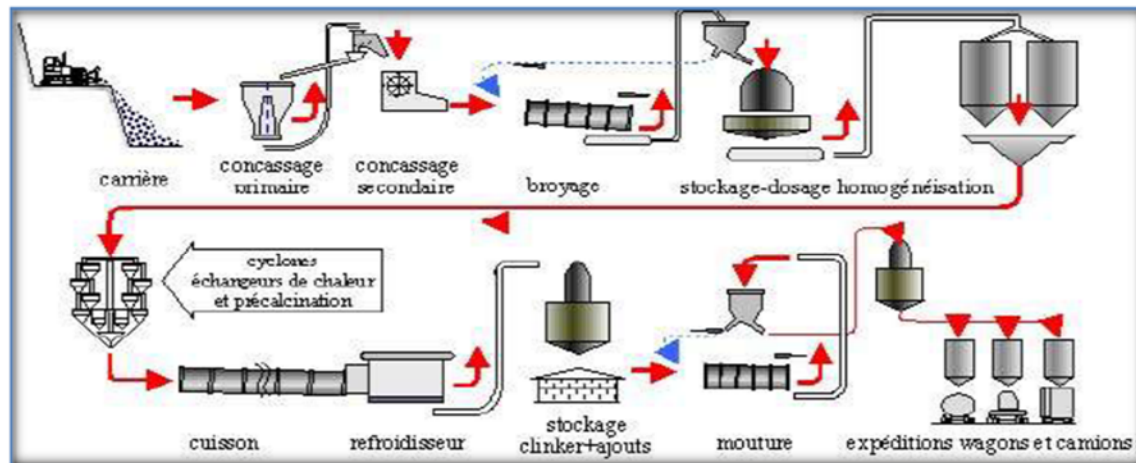


Figure I-4 : Fabrication du ciment.

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

I-3-2-1 : Extraction :

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues-pelles avant d'être transportée par camions.

[01]

I-3-2-2 : Concassage :

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières allant jusqu'à m^3 , le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes. [01]

I-3-2-3- : Préparation du cru :

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile, peut se faire suivant différents procédés, le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

• 65 % de CaO	fourchette de	60 à 69 %,
• 21 % de SiO ₂	fourchette de	18 à 24 %,
• 6 % de Al ₂ O ₃	fourchette de	4 à 8 %,
• 3 % de Fe ₂ O ₃	fourchette de	1 à 8 %,
• 2% de MgO	fourchette de	0 à 5 % maximum,
• 1 % d'alcalis	fourchette de	0 à 2 % maximum,
• 1 % de SO ₃	fourchette de	0 à 3 % maximum,

Ces proportions permettant de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment.

La préparation du cru peut être réalisée suivant quatre procédés différents :

- La voie sèche, la plus généralement utilisée en France dont nous résumons les phases aux paragraphes 2.3.1 à 2.3.4 ;
- La voie humide, pratiquement abandonnée en France parce que grande consommatrice d'énergie et qui consiste à préparer une pâte dans des délayeurs, pâte qui est ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé ;
- La voie semi-sèche qui consiste à humidifier la poudre obtenue après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile ;
- La voie semi-humide qui consiste à filtrer la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide mais, après filtration, à en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.

La fabrication par voie sèche, comporte les phases suivantes :

I-3-2-4 : Préhomogénéisation :

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire, consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de préhomogénéisation ». [01]

I-3-2-5 : Broyage-séchage :

Repris à l'aide de roues-pelles ou de gratteurs, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grain inférieurs à 160 microns. [01]

I-3-2-6 : Séparation :

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz. [01]

I-3-2-7 : Homogénéisation :

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit. [01]

I-3-2-8 : Cuisson :

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide), à une température comprise entre 1400 et 1500°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four, le gaz chauds provenant du four y brassant la farine à contre-courant ;
- La décomposition des argiles qui se situe au dessus de 500°C ;
- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000°C ;
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1450°C qui s'effectue en partie aval du four près du brûleur.

I-3-2-9 : Refroidissement :

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent

pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C3S en C2S qui entraîne une baisse de résistances. [01]

I-3-2-10 : Broyage :

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres, ...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés. [01]

I-3-2-11 : Stockage, ensachage , et expédition :

À la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30 % de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches. [01]

I-3-3 : Différents types de ciments courants :

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ou non ajoutés au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent. [01]

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants : laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	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 proportion est limitée à 10 % ;	0 à 5 %
CPJ-CEM II/B		65 à 79 %	-de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus ;	0 à 5 %
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CHF-CEM III/B		20 à 34 %	66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CLK-CEM III/C		5 à 19 %	80 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/A	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 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5 %
CLC-CEM V/A	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 pouzzolanes.	0 à 5 %
CLC-CEM V/B		20 à 39 %	31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

Tableau (I-1) : Les différents types de ciment courants [01].

I-3-4 : Propriétés des ciments :**I-3-4-1 :-Caractéristique physiques:****-Comportement physico –chimique de la pâte :**

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C3S
- Silicate bicalcique : C2S
- Aluminate tricalcique- : C3A
- Aluminoferrite tétracalcique: C4AF

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

Cette réaction chimique accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

- **Prise :**

La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R.

1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R-52,5-52,5R.

D'une façon générale les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2h 30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendant

pour une température ambiante de 20°C.

- **Durcissement :**

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours des quelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevé et de préférence de classe « R » c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ».il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistances. [02]

- **Chaleur d'hydratation :**

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C3A que l'on intérêt à les temps chaud. Suivant les ciments, cette chaleur est comprise à 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CPA-CEM I.

- **Finesse de mouture :**

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1kg de ciment .elle est, d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g , certains ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieure à 4500 cm^2/g . [02]

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'événement du Ciment sont accrus.

- **Retrait :**

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4×4cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%. [02]

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800µm/m pour les ciments portland CPA-CEM I ET CPJ-CEMII de classe 32,5R.
- 1000µm/m pour des types de ciment identique mais des classes 32,5R-42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture ;
- le dosage en ciment, dans le béton ;
- le dosage en eau ;
- la propreté et nature des granulats ;

- **Gonflement :**

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes.

I-3-4-2 :-Caractéristiques chimiques du ciment :

Ciments courants :

D'une façon générale, les ciments doivent satisfaire au respect d'un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau ci-après, quant à leur composition chimique.

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM II CLK-CEM III	toutes classes	≤ 5
Oxyde de magnésium MgO	CPA-CEM I	Toutes classes	≤ 5
Résidu insoluble	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤ 5
Sulfates SO ₃ Limite supérieure	CPA-CEM I	32,5	$\leq 3,5$
	et	32,5 R	
	CPJ-CEM II	42,5	
	CPZ-CEM IV	42,5	≤ 4
	et	52,5	
	CLC-CEM V	52,5 R	
	CHF-CEM III	toutes classes	
Chlorures	tous types de ciment	52,5 R	$\leq 0,05$
		toutes les autres classes	$\leq 0,10$

Tableau I-2 : Caractéristique chimique de ciment courant. [02]

I-3-4-3 :- caractéristiques mécaniques des ciments courants :

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Classe des ciments	Résistance à 2 jours	Résistances minimale à 28 jours	Résistances maximale à 28 jours
32,5		$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 13,5$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
42,5	$\geq 12,5$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
52,5	≥ 20	$\geq 52,5$	-
52,5 R	≥ 30	$\geq 52,5$	-

Tableau I-3 : Caractéristique mécanique des ciments courants. [02]

Classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage trouvent par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication.

Il y a lieu de distinguer les valeurs spécifiées pour chaque classe de ciment par la norme (tableau précédent), la probabilité étant statistiquement de 95 % pour les résistances minimales et de 90 % pour les résistances maximales, et les valeurs garanties que le fabricant doit respecter à 100 % et qui sont indiquées dans le tableau (I.4) ci-dessous :

Classe des ciments	Résistances garanties à 2 jours	Résistances garanties à 7 jours	Résistances garanties à 28 jours
32,5		17,5	30
32,5 R	12	-	30
42,5	10	-	40
42,5 R	18	-	40
52,5	18	-	50
52,5 R	28	-	50

Tableau I-4 : résistances garanties des ciments courants. [02]

I-4 : Les sables :

I-4-1 : Provenance et forme : Les sables sédimentaires extraits de gravières (couches plus ou moins profondes et épaisses) et ceux récoltés dans les lits des rivières, fleuves et torrents fournissent un matériau bien adapté à la fabrication des mortiers de hourdage et d'enduit. L'érosion répétée a façonné ces agrégats qui, grâce à leur forme roulée, offrent une meilleure régularité et une maniabilité de mise en œuvre.

Les sables concassés et broyés, puis criplés, permettent d'obtenir toutes les classes granulaires souhaitées, à partir de gros éléments. Cependant leur forme moins homogène, anguleuse ou plate, rend le malaxage plus difficile et plus long. La perte de rapidité dans la réalisation du mélange favorise l'entraînement de l'air dans le mortier et peut donc initier un début de prise du liant. Les sables de type anguleux laissent de plus grands vides entre les grains que les sables ronds ; ils sont plus difficilement serrables. De plus, ces sables contiennent généralement un pourcentage important de « fines », éléments trop fins.[03]

I-4-2 : Composition chimique : on distingue trois groupes principaux.

- Les sables siliceux. Ils proviennent de la décomposition de roches granitiques ou gréseuses. Constitués de silice presque pure, ils sont dits quartzeux.

- Les sables calcaires.ils sont issus de la décomposition de roches calcaires .certains peuvent être composés de débris de coquillages.
- En général, les sables de carrière sont formés par un mélange silico-calcaire.

Aux alentours des années 1930, Raucourt, à travers l'étude de la composition chimique des sables ,avait observé que « l'ordre de prééminence des sables d'après leur composition, était des sables siliceux, basaltiques, quartzeux, granitiques, calcaires et volcaniques ».[03]

I-4-3 : Caractéristiques :(selon normes NF C 18-301)

I-4-4 : La granularité : c'est la proportion de grains de différentes grosseurs.

I-4-5 : La granulométrie : c'est la détermination de cette granularité par une mesure physique. Déjà Vitruve [02] avait établi l'importance du choix du sable, selon la nature de la chaux utilisée. Au XIX^e siècle, VICAT a classé les types de sables en fonction des chaux que l'on utilisait :

« Pour les chaux éminemment hydrauliques :

1)-sables fins ;

2)- sables à grains inégaux résultant du mélange, soit du gros sable avec le fin ,soit du fin avec du gravier ;

3)- le gros sable.

Pour les chaux communes, grasses et très grasses :

1)- les gros sables

2)-les sables mêlés ;

3)-les sables fins. »

Cette citation revient à expliquer que la résistance plus faible des chaux aériennes oblige à choisir des sables de bonne granulométrie, garantissant ainsi un squelette adhérent, une armature solide et une bonne circulation d'air dans les vides de l'agrégat .Ce n'est pas le cas

avec la chaux éminemment hydraulique aux meilleurs performances. On recherche alors un mélange rapide et aisé, contenant des agrégats de plus faible taille. [03]

Classement des sables en fonction de leur composition granulométrique	
Types de sables	Dimension maximum des grains en mm
Fines	0,1
Sables fins	0,5
Sables moyens	2
Sables gros	5

Tableau I-5: Classement des sables en fonction de leur composition granulométrique. [03]

- La compacité : elle correspond au rapport entre le volume des agrégats inertes et le volume occupé par le mortier. La bonne compacité est réalisée en utilisant un sable contenant 2/3 de gros grains et 1/3 de grains fins. On emploie moins d'eau et moins de liant dans ce mélange. La bonne compacité d'un sable permet l'obtention d'un mortier où chaque grain de sable établit un contact direct avec les autres grains. Cette propriété favorise la grande dureté des mortiers.
- La densité : elle varie en fonction de la nature du sable, de sa composition granulométrique, de son tassement, mais aussi de son degré d'humidité.
- On appelle foisonnement l'augmentation de volume que subit un sable, lorsque sous l'influence des forces capillaires, il se gorge d'humidité ou lorsqu'il est remué. Un sable pesé sec a un poids de 20% plus élevé qu'un sable contenant 2% d'eau. Il est donc essentiel de tenir compte de ce phénomène lors du dosage de l'agrégat.
- Les fines : il faut faire attention à ne pas avoir trop de fines dans le sable, celles-ci augmentent le retrait, baissent la résistance. Les pigments rajoutés dans un mortier jouent ce rôle. Le DTU26.1 limite leur usage à 3% du poids de chaux.

I-5 :L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

I-6-Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton frais en faibles quantités, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton. Les principaux adjuvants sont :

I-6-1 : Les fluidifiants (ou réducteur d'eau) :

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C (Eau / Ciment) constant (fixé pour une résistance souhaitée). Ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton. Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant.[04]

I-6-2 : Les retardateurs de prise du ciment :

Dans le cas du bétonnage en temps chaud ou bien d'éléments massifs, il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage. [04]

I-6-3 : Les accélérateurs de prise du ciment :

Pour le bétonnage en temps froid, il est conseillé d'utiliser les accélérateurs de prise pour, dans ce cas, provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement du béton freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent de réduire les délais de

chantier, car ils permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés. [04]

I-6-4 : Les entraîneurs d'air :

Ils permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies. [04]

I-7-Les additions minérales :

Il existe deux catégories de fines minérales :

-Les fines actives à caractère pouzzolanique ; ce sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de silice, laitier.....)

-les fines inertes comme les fillers calcaires ; l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons notamment dans le cas des bétons autoplacants qui nécessite une forte teneur en fines pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apporté par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I-7-1 :-L'intérêt de l'utilisation des additions minérales dans le génie civil:

L'utilisation des additions minérales dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques

I-7-1-1 : Intérêt du point de vue technique:

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration. [05]

I-7-1-2 : Intérêt du point de vue économique:

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland. [05]

I-7-1-3 : Intérêt du point de vue environnemental:

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂. [05]

I-7-2 : Les inconvénients d'utilisation des additions minérales :

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.

I-7-3 : Effets des additions sur les propriétés des bétons :**I-7-3-1 : Amélioration de l'ouvrabilité:**

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres

volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 %. [06]

I-7-3-2 : Chaleur d'hydratation:

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

I-7-3-3 : Durabilité:

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH.

Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

I-7-3-4 : Développement des résistances:

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

I-7-3-5 : Développement des bétons à haute résistance :

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales .Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. [07]

I-7-4 : L'utilisation des additions en Algérie :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El- Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

Le tableau I-6 (donne une idée sur les additions utilisés dans les cimenteries algériennes).

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisées
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	Pouzzolane
	Hamma Bouziane	Pouzzolane
	H'djar Essaoud	Laitier
ERCE	Meflah	Tuf /Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire / Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

Tableau I.6 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [07]

Conclusion :

Notre but dans ce chapitre est de citer les différents constituants du mortier et leurs propriétés.

II-1-Introduction :

L'industrie de construction pose de nombreux problèmes à la mise en décharge des déchets des matériaux (impact sur l'environnement, la place occupée par les sites de stockage,...). Donc, Il est nécessaire de trouver un moyen pour la valorisation et la réutilisation de ces déchets pour la protection de l'environnement, notre étude s'inscrit dans une politique de valorisation des matériaux industriels locaux en Algérie, pouvant être utilisés dans la conception ou formulation du béton.

Le but principal de cette étude est de démontrer techniquement la possibilité d'utiliser les fines des déchets de marbre sous forme d'addition dans la formulation de béton, Il convient d'étudier les caractéristiques physiques et mécaniques du béton composé de ces déchets.

II-2 : Les déchets de la construction et de l'environnement :

Un déchet est, selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code de l'environnement français : **[09]**

« tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

Selon les critères liés à : la nature, l'origine, le type de collecte, la composition, la consistance, l'hétérogénéité, ..., on considère 3 grandes catégories de déchets :

- **Déchets dangereux :**

Ils sont potentiellement les plus polluant pour l'environnement et créant le plus de dangers pour la santé humaine. Ce déchet nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement. **[04]**

Exemples : bois spécifiquement utilisé en extérieur (traité au CCA ou à la créosote),

produits de revêtement (peintures et vernis), emballages souillés, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants, piles et accumulateurs, néons, huiles et combustibles liquides usagés, matériau contenant de l'amiante friable, déchets d'équipements électriques et électroniques, explosifs,... **[08]**

- **Déchets non dangereux :**

Ce sont les déchets industriels ordinaires qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ils sont assimilables à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères.

[04]

Exemples : - Métaux et leurs alliages, Bois bruts ou faiblement adjuvantés, Papiers, Cartons, Plastiques, Laines minérales, Peintures, vernis, colles, mastics en phase aqueuse (ne comportant pas de substances dangereuses), Cartouches ne contenant pas de produits

toxiques, Mélanges de ces différents déchets, y compris les mélanges contenant des déchets inertes, DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) ne contenant pas de substances dangereuses, Déchets alimentaires liés à la vie sur le chantier..., du Plâtre. [09]

- **Déchets inertes :**

Ils sont souvent solides (minéraux) ne subissant aucune transformation physique ou chimique importante : pavés, sables, gravats, tuiles, béton, carrelage. Ils ne sont pas biodégradables et n'affectent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ils proviennent des chantiers de construction, mais aussi des mines et des carrières.

[04]

Exemples : Béton, briques, marbre ; parpaings, tuiles, céramiques, enrobés bitumeux sans goudron, terre et cailloux, déchets de construction et de démolition en mélange ne contenant pas de substance dangereuse et ne contenant que des déchets minéraux,... etc. [08]

Les principaux objectifs d'utilisation des déchets sont :

-Réduire la production des déchets ;

-Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toutes autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;

-Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique.

II-3 :L'utilisation des déchets de marbre dans le bâtiment :**II -3-1: Nécessité pour l'usage de la poudre de marbre :**

L'industrie en pierre de marbre produit des déchets solides et de la boue de pierre. La boue en pierre produite pendant le traitement correspond environ à 20% du produit fini de l'industrie en pierre. Par conséquent la communauté scientifique et industrielle doit commettre vers des pratiques plus viables. Il y a plusieurs réutilisation et réutilisant des solutions pour ce sous-produit industriel, à une phase expérimentale et dans des applications pratiques. [10]

II-3-2: Les avantages de la poudre de marbre : [10]

- La poudre de marbre peut être employée comme remplissage dans le béton et les aires de pavage.
- la poudre de marbre peut être employée dans le béton pour augmenter la résistance.
- Nous pouvons réduire la pollution environnementale en utilisant la poudre de marbre pour fabriquer les autres produits.
- la poudre de marbre est également employée pour faire la couche de fond pour des peintures de toile, et comme remplisseur de peinture.
- Elle est utilisé comme composant pour la fabrication du ciment blanc.

II-4 : Essais de résistance et de durabilité :**II-4-1: Compression :****II-4-1-1: Principe de l'essai :**

Cet essai est utilisé pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge d'écrasement. L'éprouvette est comprimée, puis la déformation sous diverses charges est enregistrée. La contrainte et la déformation de compression sont représentées graphiquement sous forme d'une courbe contrainte-déformation qui est ensuite utilisée pour déterminer la limite d'élasticité, la limite de proportionnalité, le point de transition élastique-plastique, la contrainte au seuil d'écoulement et (pour certains matériaux) la résistance à la compression.

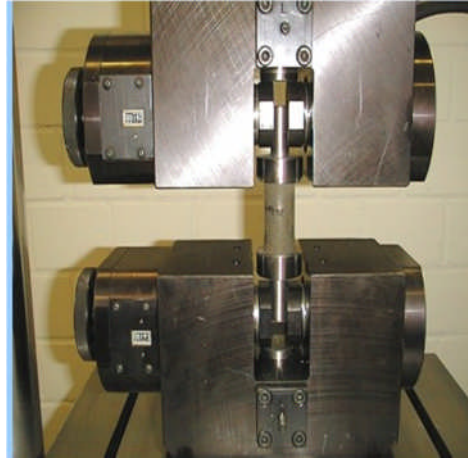


Figure II-1 : Compression d'une éprouvette cylindrique.

II-4-1-2 : Comportement en compression :

La résistance du béton à la compression est le facteur primordial qui donne une image globale sur la qualité du béton. Elle est la propriété fondamentale et l'élément clé souvent employé lors de la conception des structures en béton.

Ainsi, le béton est défini par sa résistance à la compression. Cette résistance se mesure par des essais de compression simple, uniaxiale.

En raison de sa facilité de réalisation, l'essai de résistance en compression uniaxiale sur des éprouvettes de béton normalisées est l'expérience la plus répandue pour estimer les caractéristiques générales de résistance du béton.

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité liée à la microfissuration du matériau. En effet, lorsque le béton est soumis à des contraintes supérieures à 30% de sa résistance en compression, la microfissuration s'initie et tend à se propager parallèlement au chargement lors de son augmentation.

La relation contrainte-déformation tend alors à se courber graduellement, traduisant une perte de rigidité, jusqu'à une augmentation plus rapide des déformations au-delà d'une

contrainte de 70 à 80% de la résistance en compression qui mène à la rupture par fissuration parallèle à l'axe de chargement.

La figure (II.2) illustre la relation contrainte-déformation ($\sigma - \varepsilon$) du béton en compression.

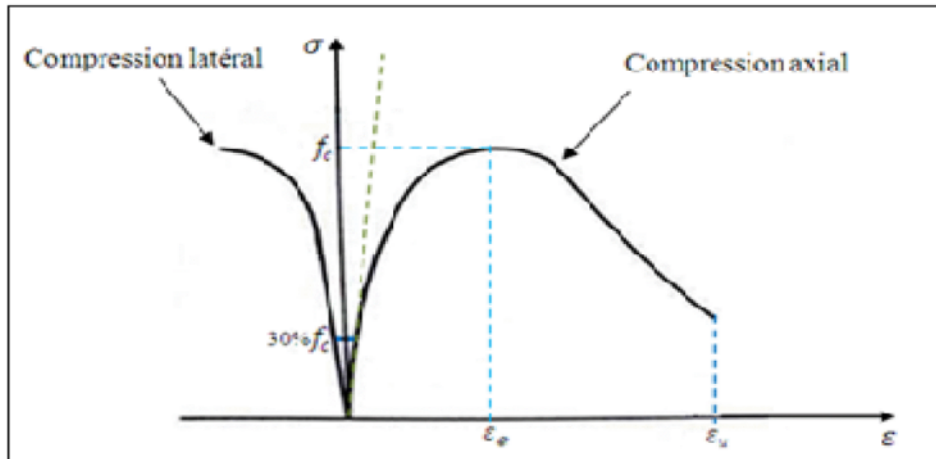


Figure II-2: Comportement du béton en compression simple, Chen. [11]

Une certaine résistance subsiste après la rupture et se traduit par une branche descendante dont l'allure dépend des conditions et procédures de l'essai, jusqu'à la déformation ultime du matériau, généralement admise à 0.0035. Cette valeur n'est en réalité pas constante, elle tend à diminuer avec l'augmentation de la résistance ultime.

Les essais de compression du béton sous charge cyclique ont montré la présence de boucles

d'hystérésis assez importantes durant le processus de chargement-déchargement (Figure II-3). L'amplitude de ces hystérésis influence considérablement le comportement à la rupture du béton. Cette dissipation d'énergie peut être expliquée par l'importante friction existant entre les fissures lors de leurs ouvertures-fermetures. Cette friction produit des effets viscoplastiques.

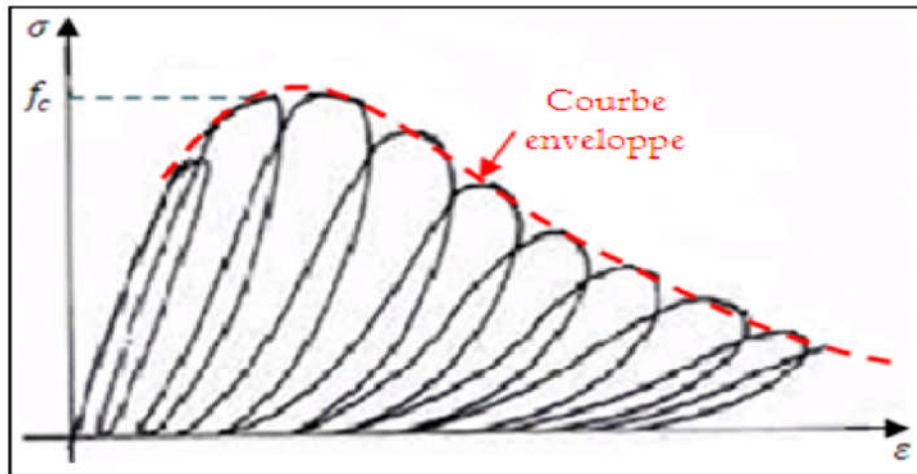


Figure 1I-3 : Comportement cyclique du béton en compression simple, Karsan et al. [12]

➤ **Quelques modèles de comportement du béton en compression :**

Le béton présente des caractéristiques variables de déformation sous diverses conditions et niveaux de chargement.

Une grande part de la connaissance des mécanismes de son comportement résulte d'observations expérimentales réalisées sur des essais. L'accumulation des connaissances empiriques et l'expérience acquise sont des éléments très importants à prendre en considération lors de la modélisation analytique du comportement du béton.

En général le comportement mécanique du béton décrit dans la littérature présente ce matériau comme élastique, fragile et endommageable (Mazars J, Millard A [13]). La partie élastique est modélisée de manière linéaire ou non linéaire (Exadaktylos G.E [14]) selon les besoins auxquels doivent répondre ces modèles. Le comportement élastique en compression est non linéaire et la diversité de formulation des bétons conduit à un large éventail de matériaux ayant des caractéristiques mécaniques très variées.

Ci-dessous est représenté un nombre restreint de propositions de ces lois qui sont classées selon deux grandes familles :

➤ **Les modèles réglementaires :**

Les modèles réglementaires servent de base aux calculs simplifiés aux Etats limites, ces règlements de calcul sont applicables à tous les ouvrages et construction en béton armé, avec un dosage en ciment au moins égal à 300 Kg/m de béton mis en oeuvre (BAEL [15], EURCODE [16]).

Parmi ces modèles on peut citer :

- **Le modèle de béton simplifié BAEL**

Le diagramme contrainte-déformation du béton reprend le diagramme de calcul dit : Parabole Rectangle (Figure I1.3). Il peut être utilisé dans tous les calculs aux états limite ultimes dans le but de simplifier ces calculs.

La loi parabole rectangle est composée de deux branches :

Une branche de parabole de second degré d'axe parallèle à l'axe des contraintes de compression σ_{bc} , qui s'étend de l'origine jusqu'à son sommet.

Une branche d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations ϵ_{bc} , et tangent à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2‰ à 3.5‰ de la déformation ϵ_{bc} .

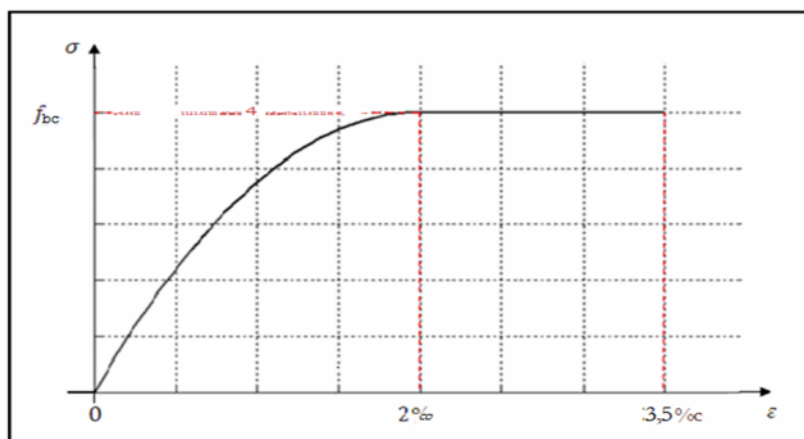


Figure II-4 : Loi Parabole-Rectangle du béton en compression BAEL. [15]

Les relations entre les contraintes et les déformations sont les suivantes

Alors :

$$\begin{array}{ll} \sigma_{bc} = 0.25 f_{bc} 10^3 \cdot \varepsilon_{bc} (4 - 10^3 \cdot \varepsilon_{bc}) & 0 \leq \varepsilon_{bc} \leq 2\text{‰} \\ \sigma_{bc} = f_{bc} & 2\text{‰} \leq \varepsilon_{bc} \leq 3.5\text{‰} \end{array}$$

$$f_{bc} = \frac{0.85 \cdot f_{cj}}{\gamma_b}$$

Avec :

0.85 : est un coefficient de réduction de la résistance du béton dans le temps, il tient en compte l'effet du fluage.

γ_b : vaut 1,5 pour les combinaisons fondamentales et 1,15 pour les combinaisons accidentelles.

• **Le modèle de béton simplifié Eurocode 2 :**

Les Eurocodes structuraux constituent des normes européennes transposables en norme nationales dans de nombreux pays de l'Europe, ces normes nationales sont amenées à se substituer aux textes réglementaires correspondants en vigueur dans ces pays. Ainsi, en France, l'Eurocode2 remplacera définitivement les règles BAEL 91 pour le béton armé et BPEL 91 pour le béton précontraint en mars 2010.

Pour le calcul des sections, on utilise le diagramme idéalisé dit « parabole-rectangle », constitué par un arc de parabole du second degré prolongé par un segment de droite.

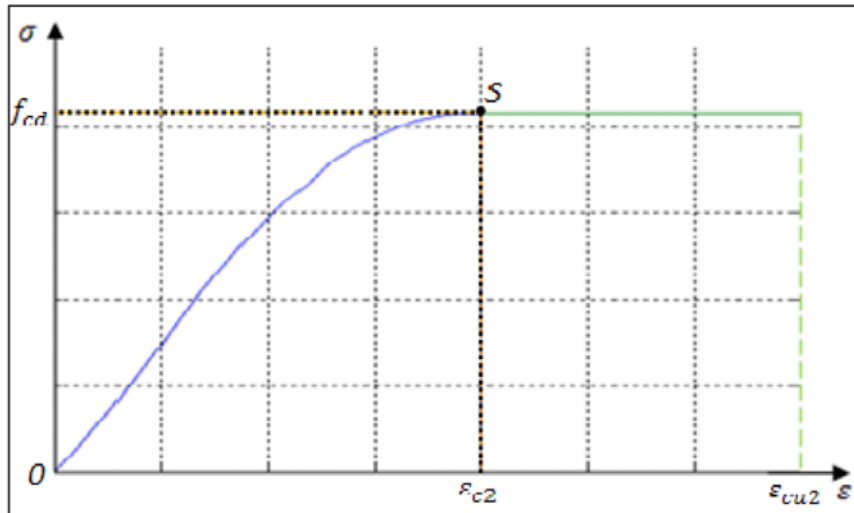


Figure II-5 : Diagramme parabole-rectangle du béton en compression, EUROCODE2 [16].

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{c2}$$

Avec :

f_{cd} : contrainte de compression du béton correspondant à la partie rectiligne du diagramme.

ε_{c2} : Déformation de pic correspondant à f_{cd} .

n : exposant.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Avec :

$$\gamma_c = \begin{cases} 1,2 & \text{pour les situations accidentelles.} \\ 1,5 & \text{dans les autres cas.} \end{cases}$$

f_{ck} : Résistance caractéristique du béton à 28 jours.

-Pour les bâtiments : $\alpha_{cc}=1$ valeur recommandée et à utiliser pour l'Annexe nationale française.

-Pour les ponts : $\alpha_{cc} = 0.85$ valeur recommandée. L'Annexe nationale française préconise $\alpha_{cc} = 1$.

Le coefficient $0.85 < \alpha_{cc} < 1$ tient en compte l'effet défavorable de la durée de l'application des charges, vis-à-vis de l'essai de courte durée utilisé pour définir f_{ck} . Pour l'analyse non linéaire telle que pour le calcul des effets de second ordre et pour des charges de courte durée d'application, on utilise le diagramme de calcul défini de la manière suivante :

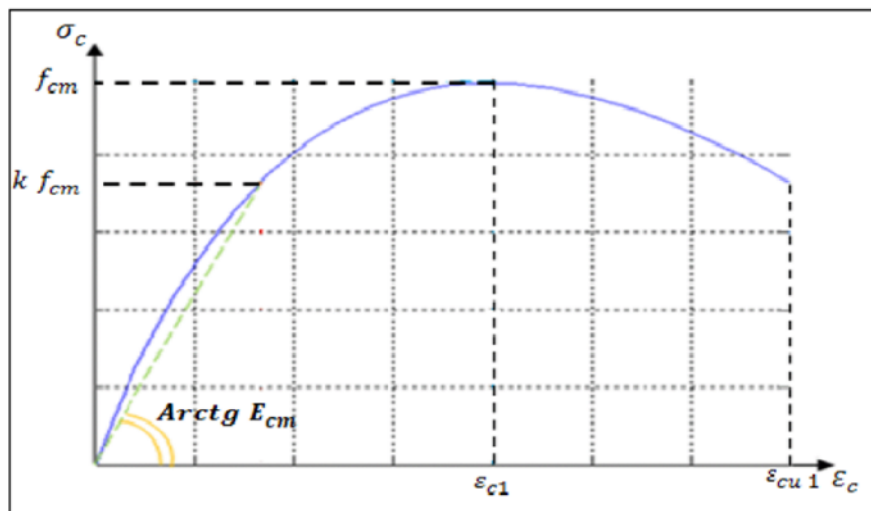


Figure II-6: Diagramme non linéaire du béton en compression, EUROCODE2[16].

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + (k - 2)n}$$

Avec :

$$n = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$$

Où ε_c et ε_{c1} sont pris en valeur absolue.

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31}$$

: Déformation correspondant au pic de la courbe ($\sigma - \varepsilon$)

$$k = 1,05 \frac{E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$$

f_{cm} : Résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours

E_{cm} : Module de déformation instantanée du béton.

➤ Les modèles non linéaires :

L'utilisation des modèles de comportement non linéaire pour le béton est encore relativement difficile. C'est qu'il faut pouvoir disposer des modèles adéquats, des paramètres qui caractérisent ce matériau considéré tel que l'élasticité, plasticité et l'endommagement..., dans des codes de calculs des structures pour mieux l'appliquer aux ouvrages de Génie Civil. On se limitera au modèle de comportement de Sargin.

• Lois du comportement de Sargin [17] :

Ce modèle est essentiellement employé dans le calcul des structures en béton armé. Il présente l'avantage de faciliter la détermination des paramètres du modèle à partir des essais en laboratoire.

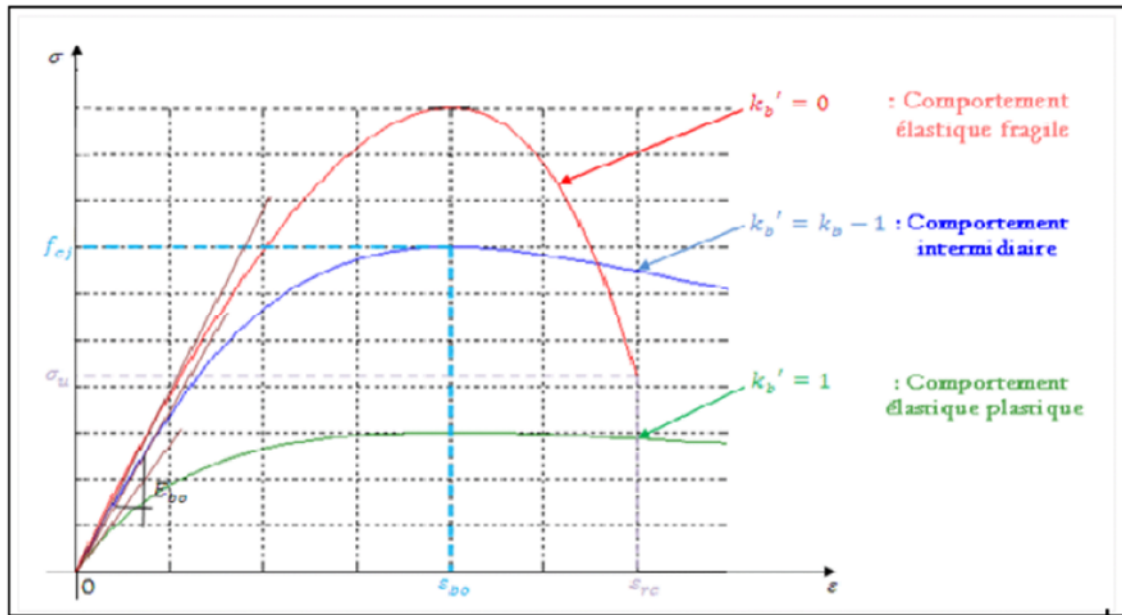


Figure II-7: Comportement du béton en compression selon Sargin. [17]

Caractéristiques de la courbe :

Ce modèle présente deux branches :

- Branche ascendante, à concavité vers le bas admettant un module tangent initial, et un maximum de contrainte qui correspond à la compression f_{cj}
- Branche descendante, commençant par le maximum de la branche ascendante et se terminant par le point définissant la déformation ultime correspondante à la contrainte ultime du béton.

Pour décrire le comportement non linéaire du béton en compression, SARGIN a proposé la relation suivante :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \cdot \bar{\epsilon} + (k_b - 1) \bar{\epsilon}^2}{1 + (k_b - 2) \bar{\epsilon} + k_b \bar{\epsilon}^2}$$

Tel que :

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_0$$

$$k_b = \frac{E_{b0} \cdot \varepsilon_0}{f_{cj}}$$

$$E_{b0} = 11000 \sqrt[3]{f_{c0}}$$

Avec :

E_{b0} : module d'élasticité longitudinal du béton.

ε_{b0} : déformation du pic correspondant à f_{cj} .

f_{cj} : résistance à la compression du béton à l'âge j.

K_b, K'_b : sont des paramètres adimensionnels, ajustent la branche ascendante et descendante , respectivement, de la loi de Sargin.

Le paramètre K'_b influe essentiellement sur l'allure de la branche descendante.

$K'_b=0$: Correspond à un béton ayant un comportement élastique fragile, avec une branche qui descend brutalement.

$K'_b=1$: Correspond à un béton ayant un comportement élastique ductile, plastique, avec une branche descendante assez plate.

Pour un béton normal, on prend généralement : $K'_b=K_b-1$.

Le BPEL propose de prendre :

$k_b' = k_b - 1$	<i>pour</i>	$f_{cj} \leq 30 [Mpa]$
$k_b' = 0$	<i>pour</i>	$f_{cj} \geq 55 [Mpa]$
$k_b' = (k_b - 1) \left(\frac{55 - f_{cj}}{25} \right)$	<i>pour</i>	$30 < f_{cj} < 55 [Mpa]$

La déformation ε_0 correspondant au pic de contrainte peut être estimée par la formule donnée par le BPEL :

$$\varepsilon_0 = 0,62 \cdot 10^{-3} \sqrt{f_{cj}}$$

Et le module à l'origine par :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt{f_{co}}$$

Le béton non armé possède une capacité de déformation à la rupture ε_{cu} très limitée, de l'ordre de $3,5 \cdot 10^{-3}$. Cette valeur est de l'ordre de 2 fois le raccourcissement maximum élastique ε_{b0}

II-4-2 : Traction :

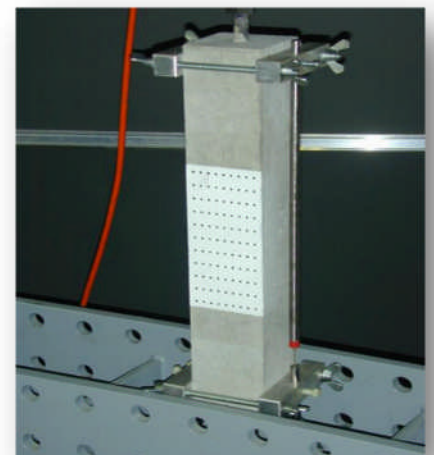
II-4-2-1 : Principe de l'essai :

Trois types d'essais permettent de mesurer la résistance à la traction d'un béton : l'essai de traction directe, l'essai de traction par flexion et l'essai de traction par fendage.

I-4-2-1-1 : Essai de traction directe : [18]

. L'essai de traction directe est l'essai le plus représentatif du phénomène de la traction mais, il est entre autre, très délicat à réaliser. L'application directe d'un effort de traction pure, en dehors de toute excentricité, est très difficile car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite. Cette essai, satisfaisant sur le plan théorique, a deux défauts principaux :

Figure II-8: Essai de traction sur un tirant en béton armé.



Il est assez dispersé dans ces résultats, ceci en raison du sciage des extrémités qui crée un affaiblissement dans ces zones, les ruptures se produisent assez souvent dans la zone du collage.

En dépit du succès de l'emploi de fixations spéciales, il est difficile d'éviter des contraintes secondaires telles que celles induites par les mâchoires ou par des ancrages noyés. La rupture se fait toujours au niveau des extrémités de l'éprouvette cylindrique.

II-4-2-1-2: Essai de traction par flexion :

Dans cet essai, un prisme de béton non armé, d'un élancement 4, reposant sur deux appuis, est soumis à un effort de flexion ; soit par application :

-D'une charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre). La charge étant placée au centre du prisme, l'essai est dit « flexion à trois points ». [18]



Figure (II-9): Essai de flexion a trois points.

-De deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges). Les points d'applications de la charge étant placés aux tiers de la portée, l'essai est dit « flexion quatre points » (figure (II-9)). [18]

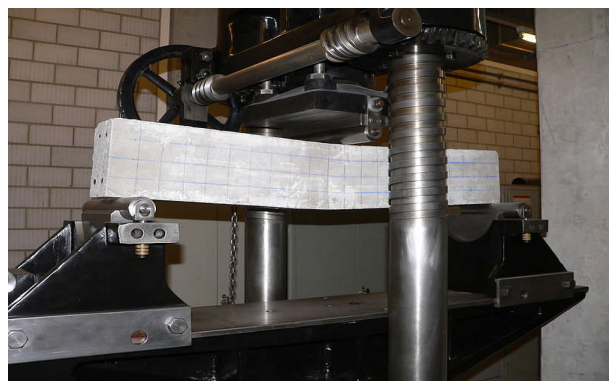


Figure (II-10): Essai de flexion quatre points.

II-4-2-1-3 :-essai de traction par fendage, ou traction indirecte, ou essai brésilien :

Lors de l'essai de fendage, le cylindre du béton est placé à l'horizontale entre les plateaux de la presse et la charge est augmentée jusqu'à la rupture par traction indirecte, qui apparaît sous forme de fendage le long du diamètre vertical du cylindre. [18]



Figure (II-11): Essai de fendage.

II-4-2-2 : Comportement en traction :

Afin de définir complètement le comportement du béton, il est nécessaire de connaître aussi sa résistance à la traction, la résistance mécanique du béton ordinaire en traction reste inférieure au 1/10 de celle en compression.

Le comportement réel d'un élément soumis à la traction directe est très complexe alors plusieurs recherches ont été réalisées afin d'étudier les différents phénomènes (élasticité, plasticité, fragilité, endommagement,..) selon les conditions de chargement (mono-axiale, biaxiale, triaxial, température..).

On représente dans ce qui suit quelques modèles de comportement du béton en traction uniaxiale.

II-4-2-2-1 : Comportement du béton en traction uniaxiale :

La courbe contrainte-déformation du béton obtenue en traction uniaxiale (Figure II-12) est similaire à celle de la compression, mis à part le fait que la résistance limite en traction f_t soit nettement plus faible que celle en compression ($f_t=0.1f_c$).

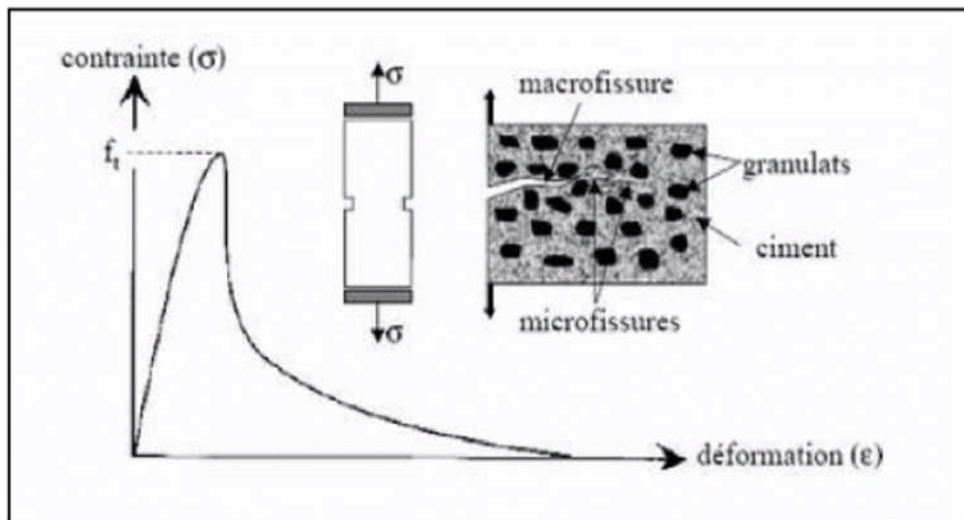


Figure II-12 : Courbe contrainte-déformation du béton en traction.

La courbe est linéaire jusqu'à environ 75% de sa résistance limite de traction, f_t . Les microfissures s'initient à se développer dans la région qui précède la résistance au pic et qu'elles s'agrandissent plus rapidement que lors du test de compression et par conséquent la rupture survient plus tôt.

Des tests expérimentaux de traction directe effectués sur des éprouvettes en béton ont montré que, juste avant le pic, une décohésion des granulats les plus importants apparaissait et que les fissures nées de cette décohésion coalescente ensuite avec les microfissures existantes pour former une macro fissure continue. De plus, les résultats révèlent la présence de nombreux grains reliant les surfaces de la fissure, ce qui explique la branche d'adoucissement de la courbe contrainte-déformation. La ruine des éprouvettes apparaît lors de la rupture de ces grains.

II-4-2-2 : Résistance à la traction du béton :

La fissuration du béton, essentiellement due à son comportement en traction, est un phénomène critique dans le calcul des constructions en béton armé. Depuis le début des années quatre-vingts, des chercheurs ont tenté de modéliser le comportement du béton sous charges **cycliques** en traction.

La résistance à la traction du béton est d'une part influencée par l'état de contraintes, la géométrie de l'élément de structure, les conditions d'essai (vitesse de chargement, contrôle en déformation,...).

La détermination de la résistance à la traction par d'autres types d'essais donne des résultats différents, car cette résistance dépend de la façon dont elle est déterminée. On a une résistance à la traction différente pour chaque sorte de béton. L'évolution dans le temps de la résistance à la traction dépend de nombreux facteurs, comme la composition du béton, le type et la classe du ciment, les adjuvants et les ajouts, les conditions de production et de durcissement du béton ainsi que le type de cure.

II-4-2-2-3 : Les causes de la fissuration :

La fissuration du béton est un processus hasardeux, hautement variable et influencé par plusieurs facteurs. Cette fissuration est due au fait que le matériau béton a un comportement très fragile en traction. Ces niveaux de résistance peuvent être atteints par les contraintes de retrait et celles des variations thermiques climatiques et donc le béton peut se fissurer même en l'absence de charges externes. Dans ce sens, il est utile de noter que malgré la présence des aciers de renforcement pour reprendre les contraintes de traction dans les éléments en béton armé, les fissures ne sont pas éliminées. En effet, les fissures créées par les charges de flexion sont non seulement inévitables, mais réellement nécessaires pour que les armatures puissent être utilisées efficacement.

On peut ainsi classer la fissuration du béton en deux catégories :

- 1 ère catégorie : les fissures causées par les charges externes appliquées à la structure telles que celles dues aux charges de flexion ou celles inclinées induites par l'effort tranchant.
- 2ème catégorie : les fissures causées par le retrait et celles causées par les effets thermiques.

II-4-2-2-4 : Quelques modèles de comportement du béton et du béton armé en traction :

➤ Comportement local du béton en traction (Béton seul) :

•Comportement du béton selon MAZARS

Une loi théorique a été développée par MAZARS [19]. Elle présente l'avantage d'ajuster la courbe décroissante avec deux paramètres A_t et B_t (Figure II.13).

$$\sigma = E_{c0} \left\{ \varepsilon_{ct} (1 - A_t) + \frac{A_t \varepsilon}{e^{B_t (\varepsilon - \varepsilon_{ct})}} \right\} \quad \text{si } \varepsilon > \varepsilon_{ct}$$

Avec :

$0.7 < A_t < 1$ en moyenne ; $A_t = 0.8$

$10^4 < B_t < 10^5$ en moyenne ; B_t

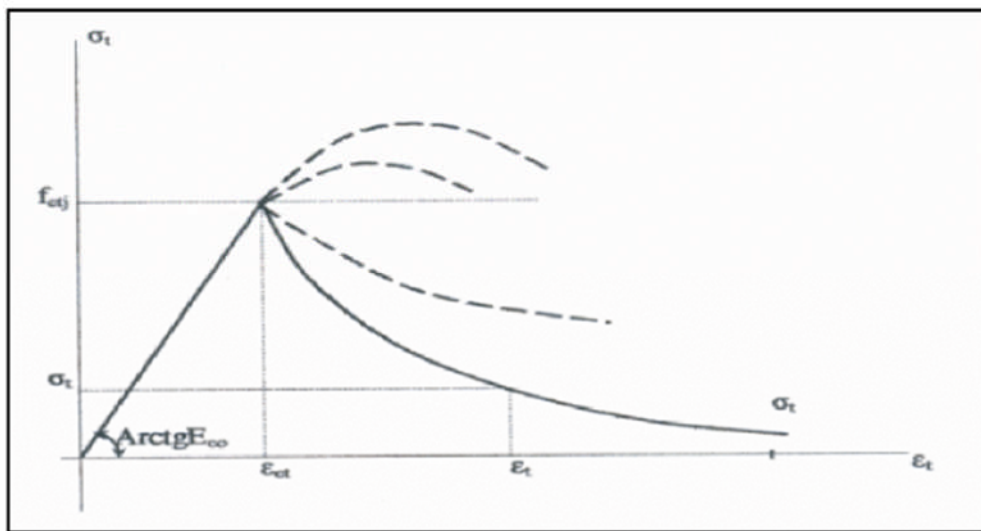


Figure (II-13) : Comportement local du béton en traction selon MAZARS. [19]

➤ **Lois de Comportement uni axiales fictives du béton tendu :**

Pour approcher correctement le comportement d'une structure (surtout pour les courbes charge-flèche), les lois de comportement en traction du béton seul ne sont pas adéquates.

En effet, plusieurs facteurs rentrent en jeu quand le béton est mélangé à des aciers, à savoir :

- le diamètre des armatures et leur disposition,
- la fissuration,
- le mode de mise en charge,

-l'interaction acier-béton,...

On se limitera au comportement du béton selon Grelat.

• **Comportement du béton en traction selon Grelat :**

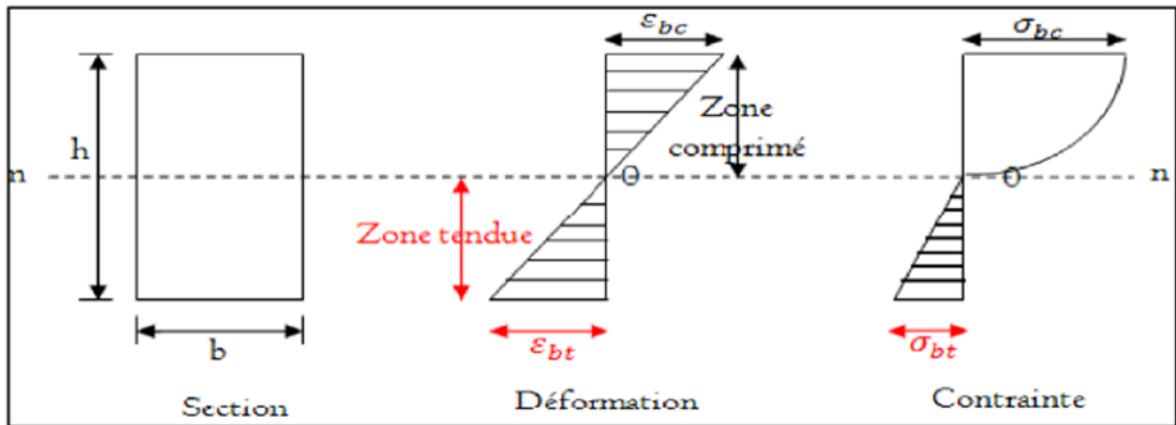


Figure II-14 : Comportement de béton avant fissuration.

La formulation de Grelat [20] tient compte d'une répartition linéaire des contraintes, elle attribue au béton tendu fissuré un diagramme fictif triangulaire à partir de l'axe neutre, dont la contribution du béton s'annule à la plastification des aciers.

Les fibres du béton tendu d'un module de déformation E_{bt} est défini par la contrainte et la déformation instantanée du bord tendu :

$$E_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{\varepsilon_{bt}}$$

Au-delà de la fissuration en traction on tient compte d'une participation du béton tendu situé entre deux fissures successives.

La contrainte ne s'annule pas brusquement, elle décroît selon une loi parabolique progressivement jusqu'à plastification et rupture des aciers tendus (Figure (II-15)). Dans ce cas, l'étude concerne le comportement moyen d'une section située entre deux fissures donne les relations suivantes:

- Domaine élastique linéaire :

$$\sigma_{bt} = E_{b0} \cdot \varepsilon_{bt} \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{ft}$$

- Fissuration avec participation du béton tendu :

$$\sigma_{bt} = -f_{tj} \frac{(\varepsilon_{bt} - \varepsilon_{rt})^2}{(\varepsilon_{rt} - \varepsilon_{ft})^2} \quad \text{si} \quad \varepsilon_{ft} < |\varepsilon_{bt}| < \varepsilon_{rt}$$

- Fissuration sans participation du béton tendu :

$$\sigma_{bt} = 0 \quad \text{si} \quad |\varepsilon_{bt}| > \varepsilon_{rt}$$

Avec :

E_{b0} : Module d'élasticité longitudinale du béton

f_{tj} : Résistance de béton à la traction.

ε_{ft} : Déformation de traction correspondant à f_{tj} .

ε_{rt} : Déformation correspondant à plastification de l'acier le plus tendu.

ε_{bt} : Déformation de la fibre de béton la plus tendu.

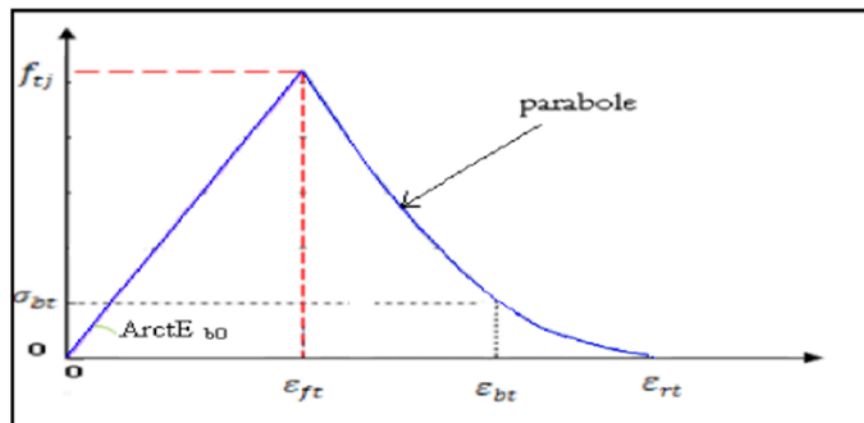


Figure II-15 : Diagramme contrainte-déformation du béton selon Grelat. [20]

II-4-3: Perméabilité :

La perméabilité est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte.

La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.

Les plastifiants et les additions minérales fournissent une grande variété de moyens pour faire des bétons ayant un niveau de résistance à la compression fixée. Les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés, le cas des cendres volantes, le laitier, la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité.

II-4-4 : Porosité :

Le béton est un mélange composé d'un ensemble de constituants: ciment, granulats, eau, adjuvants mais qui renferment aussi des vides dus, entre autres, à l'eau excédentaire.

Le béton durci courant présente une porosité de 10 à 12% du à la présence de pores inclus dans la texture même des hydrates et de capillaires qui se développent dans la structure des grains. Les capillaires qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns, les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits.

Le comportement du béton et son évolution ont montré, dès l'origine, l'influence de la porosité sur la résistance. Il est aujourd'hui admis que la réduction de la porosité du béton, qui est entre autres, la condition pour réaliser des bétons de hautes performances est requise pour l'amélioration de la résistance du béton aussi bien d'un point de vue mécanique vis à vis d'agressions d'ordre chimiques.

La réduction de la porosité du béton dépend principalement de sa conception et de sa mise en oeuvre. Deux facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton

de faible porosité :

- Une faible teneur en eau.
- une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actif, une quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats [21], [22].

III-4-5 : Résistance en milieu agressif :

Les altérations du béton peuvent être dues à des agents extérieurs (solutions acides, sols gypseux agressifs vis-à-vis de la pâte de ciment) ou à des appuis internes (hydratation de CaO et de MgO) libre dans le ciment, solidification de l'eau sous l'action du gel). Les altérations sont de deux types : Soit l'érosion, qui entraîne une partie du liant, soit le gonflement, par formation de composés expansifs [23].

A / La dissolution et l'érosion :

De tous les constituants hydratés du ciment. La chaux est la plus soluble. Elle peut être dissoute par attaque superficielle. La dissolution de la chaux peut s'accompagner de la formation de composés nouveaux. S'ils sont solubles, les sels formés diminuent la résistance du béton. S'ils sont insolubles, ils peuvent, au contraire, se substituer à la chaux et former une couche protectrice [23].

B/ Les gonflements et les éclatements :

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment.

B-1/ Action des bases :

Les bases sont en général peu nuisibles pour le béton. Les bases fortes, telles que l'hydroxyde de sodium ou de potassium, réagissent toutefois avec les composés d'aluminates hydratés, en particulier avec l'aluminate tricalcique hydraté. Le ciment Portland ne contenant que peu d'aluminates, ces réactions sont d'importance secondaire. Avec

l'hydroxyde de sodium, on a observé que des solutions à 10% avaient pour effet d'augmenter la résistance ; ce n'est qu'à partir de concentrations à 25% que les bases entraînent d'importantes pertes de résistance.

B-2 / Action des sels :

De très nombreux sels attaquent la pâte de ciment durcie en formant des sels solubles dans l'eau, lesquels sont lessivés. Tous les sels de magnésium, à l'exception du sulfate de magnésium très difficilement soluble dans l'eau sont ainsi à même de remplacer les ions de calcium dans la pâte de ciment durcie. Il se forme à la surface du béton de l'hydroxyde de magnésium et des silicates de magnésium, qui empêchent une autre attaque. L'hydroxyde de magnésium se présente toute fois sous forme de masse molle, gélatineuse, qui est emportée par l'eau coulant plus rapidement.

B-3/ Action des sulfates :

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'autres couches à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

B-4 /Action de l'eau de mer :

Les sels dissous sont principalement des chlorures et des sulfates. L'attaque du béton est le résultat de réactions séparées mais plus au moins simultanées entre les sulfates et les chlorures et les constituants du ciment. Aucun des composants du ciment portland n'est stable en milieu marin.

B-5/ : Action des acides : Les acides sont deux types organiques et inorganiques, ces derniers sont plus nuisibles pour les bétons et mortiers que les acides organiques. Les acides inorganiques forment avec le Ca(OH)_2 contenus dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau [24].

Conclusion :

L'étude présentée dans ce chapitre, nous a permis de parler sur l'utilisation des déchets de marbre dans le bâtiment et de revoir les essais de résistance et de durabilité du béton.

III-1 : Matériaux et formulation :

1-Introduction :

Dans ce chapitre nous avons défini l'importance des essais appliqués sur le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des mortiers confectionnés à base de ciment portland composé (CPJ CEMII/B 42,5R).

2-Matériaux utilisés :

2-1: Ciment :

Le ciment utilisé pour notre étude dit MATINE est un ciment gris de haute résistance et finale résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation : MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent des hautes résistances mécaniques tels que :

- Logements et d'autres constructions civils.
- Tunnels, ponts, aéroports, ...
- Les secteurs industriels.
- Barrage, châteaux d'eau, station d'épuration, stations de dessalement,



Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe de résistance 42,5, il provient de la cimenterie de **LAFARGE**.

Les différentes caractéristiques physico-chimiques sont représentées sur le tableau III.1

Composants chimiques	Pourcentage (%)
SiO ₂	18,13
Al ₂ O ₃	4,42
Fe ₂ O ₃	3,03
CaO	60,78
MgO	1,84
SO ₃	2,34
K ₂ O	0,64
Na ₂ O	0,13
P ₂ O ₅	0,10
TiO ₂	0,23
Perte au feu	8,36
Début de prise	150- 180 min
Fin de prise	3h30- 4h30
Masse spécifique	3,1g/cm ³
Chaleur d'hydratation	456,60 j/g

Tableau III-1: Composition chimique et caractéristiques physico-mécaniques du ciment

Voir la fiche technique en **annexe 1** pour plus de détails sur ce ciment.

2-2 : Sable :

Le sable utilisé dans cette étude c'est le sable d'OUED roulé de classe 0/3.

2-3- : L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du robinet du réseau publique de la ville de TIZI OUZOU.

2-4 : Adjuvant (superplastifiant) :

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA ® de type VISCOCRETE ® TEMPO 12 Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi. Conforme à la norme NF EN 934-2. Cet adjuvant est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

Caractères généraux : SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h),
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement.

Conditionnement

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

Stockage Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Caractéristiques

- Données techniques densité $1,06 \pm 0,01$
- pH 4,5 à 6,5
- Teneur en Na₂O Eq. $\leq 1 \%$
- Extrait sec 28,0 à 31,0 %
- Teneur en ions Cl $-\leq 0,1 \%$

Conditions d'application : Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

Propriétés et effets : Grace à ces propriétés le SIKA ® VISCOCRETE ® TEMPO 12 permet d'avoir les effets suivants :

Sur béton frais

- Obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- Une très bonne maniabilité
- Un long maintien de l'ouvrabilité
- De facilité la mise en œuvre du béton

Sur béton durci

- Bonne résistances initiale et finales
- De diminuer la porosité
- Bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

Délai de conservation : Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Voir la fiche technique en **annexe 1** pour plus d'indications sur ce produit.

2-5 : Ajout minérale :

- **Poudre de marbre :**

Ce déchet est récupéré de la carrière FILFILA de SKIKDA. Le marbre est fourni sous forme d'une poudre mouillée. 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. Nous avons alors récupéré par tamisage les fines à diamètre inférieur à $80\text{ }\mu\text{m}$.

Ces caractéristiques sont données dans les tableaux suivants :

Nature pétrographique	Couleur	Aspect	Texture	Structure
Calcaire microcristallin	Blanche	Homogène	Massive	Microcristallin

Tableau III-2 : Caractéristiques pétrographiques de la poudre utilisée.

	Calcite	Quartz	Oxyde de fer
Composition minéralogique	100%	--	--

Tableau III-3 : Composition minéralogique de la poudre utilisée.

Masse volumique [g/cm ³]	2,736
Compacité [%]	98,03
Porosité [%]	1,96
Coefficient d'absorption d'eau [%]	0,39
Coefficient de saturation [%]	0,87
Résistance à la compression à l'état sec [kg/cm ²]	961
Résistance à la compression après refroidissement [kg/cm ²]	966
Résistance à l'usure [g/cm ²]	1,82
Résistance au choc [kg/cm ²]	40

Tableau III-4 : Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre utilisée.

Caco3	Mgo	Cao	Fe2O3	Al2O3	SiO2	P.C
99.05	1.03	54.86	0.04	0.08	0.15	44.26

Tableau III-5 : Caractéristiques chimiques de la poudre utilisée.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique absolue	2.564	(g /cm³)
Masse volumique apparente	20.349	(g /cm³)

Tableau III-6: Caractéristiques physiques de la poudre de marbre concassé (0/3) selon la norme NF EN 933-1.



Figure (III-2) : La poudre de marbre utilisé.

Cinq mélanges de mortiers sont préparés, la seule variable étant la poudre de marbre, la substitution est faite conformément au tableau III-4.

Mélange	Ciment	La poudre de marbre
1 ^{er} mélange	100 %	0 %
2 ^{eme} mélange	95 %	5 %
3 ^{eme} mélange	90 %	10 %
4 ^{eme} mélange	85 %	15 %
5 ^{eme} mélange	80 %	20 %

Tableau III-7 : Mélanges des mortiers préparés.

3- Caractérisation des matériaux :

La caractérisation des matériaux de construction telle que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

3-1 : Essais sur le sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier.

Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

3-1-1 : Analyse granulométrique:

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en

employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

a-But de l'essai :

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

b-Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

c- Matériel nécessaire :

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis. Figure III-4. La dimension nominale de tamis se suit dans une progression géométrique de raison.

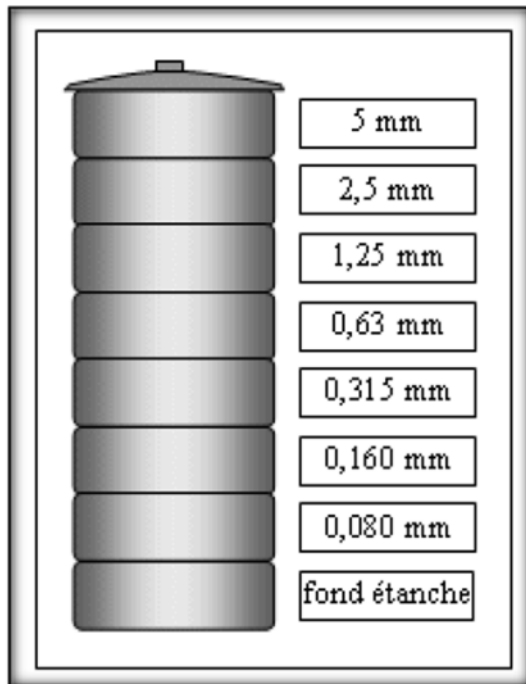


Figure III-3 : Colonne de tamis



Figure III-4 : tamiseur électrique.

3-1-2 : Module de finesse (Mf) :

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- **Pour $1,8 < M_f < 2,2$:** le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en oeuvre au détriment probable de la résistance.
- **Pour $2,2 < M_f < 2,8$:** le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **Pour $2,8 < M_f < 3,2$:** le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- **Pour $M_f > 3,2$:** le sable est à rejeter.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P 18-540). [27].

$$Mf = \Sigma RC / 100.$$

Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenées à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38.

3.1.3-Equivalent de sable (la norme NF P 18 -598) [21]:

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fin qui flocculent.

a-But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers .une procédure normalisé permet de détermination un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

b-Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier .Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout .Au bout de 20minutes, on mesure les éléments suivants :

- **Hauteur h1** : sable propre +élément fins,
- **Hauteur h2** : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable qui, par convention,

$$ES = (h_1/h_2) \cdot 100.$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée à l'aide d'un piston, on détermine ES_p (équivalent de sable au piston).



Figure III-5: Essai d'équivalent de sable.

ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
$60\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$70\% \leq ES < 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau III-8: les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.

3-1-4 : Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m³, en kg/dm³, ou en g/cm³.

a-But de l'essai :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une compression de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaire malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

b-Conduite de l'essai :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume **V1** d'eau.
- Peser un échantillon sec **M_s** sable (environ 100g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume **V2**.

La masse volumique est alors :

$$\rho_{absolu} = \frac{m_{mat}}{V_{absolu}} = \frac{m_{mat}}{V_{réel} - V_{pores}}$$



Figure III-6 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue du sable.

3-1-5 : La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

$$\rho_{app} = \frac{m_{mat}}{V_{app}} .$$



Figure III-7 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable.

3-2 : Essais sur la poudre de marbre :**3-2-1 : Masse volumique absolue :**

C'est le même principe avec la masse volumique absolue du sable.



Figure III-8 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue de la poudre de marbre.

3-2-2 : La masse volumique apparente :

C'est le même principe avec la masse volumique apparente du sable.



Figure III-9 : Essai de détermination de la masse volumique apparente de la poudre de marbre.

3-1-4 : Résultats des essais sur le sable :

Les tableaux et la courbe suivants représentent les résultats des différents essais sur le sable.

➤ résultats d'analyse granulométrique du sable :

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés R_i (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisas cumulés (%)
5	1	0,066	99,934
3,15	140	9,333	90,667
2,5	231,5	15,433	84,567
1,25	535	35,666	64,334
0,63	858	57,2	42,8
0,315	1162	77,466	22,534
0,16	1411,5	94,1	5,9
0,08	1465	97,666	2,334
Fond des tamis	1500	100	0

Tableau III-9: résultats d'analyse granulométrique du sable.

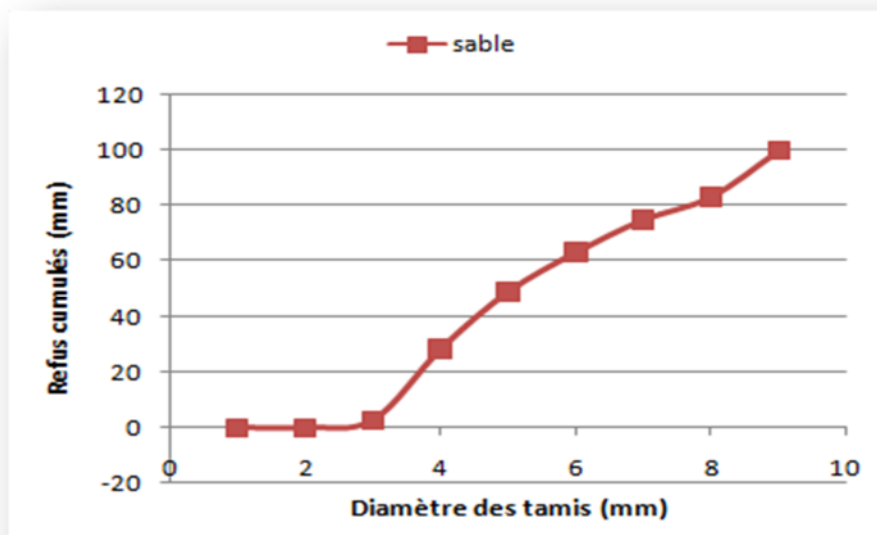


Figure III-10 : Courbe granulométrique du sable.

➤ **Module de finesse :**

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables des bétons. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Les résultats sont indiqués dans le tableau III-10 :

	Module de finesse	Spécification
Sable	2,798	2,8 < Mf < 3,2 sable grossier 2,2 < Mf < 2,8 sable moyen 1,8 < Mf < 2,2 sable fin

Tableau III-10 : Module de finesse du sable. [28].

Dans notre cas on a un sable moyen.

➤ **Equivalent de sable :**

	Valeurs
Equivalent de sable sous le poids d'un piston (ES) (%)	74,1

Tableau III-11 : Valeurs de l'équivalent de sable.

D'après le tableau III-8, Donc on a un sable propre.

➤ **Masse volumique apparente et absolue de sable :**

	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,449
Masse volumique apparente (g/cm³)	1,781

Tableau III-12: Masse volumique apparente et absolue de sable.

3-2-3 : Résultats des essais sur la poudre de marbre :

➤ **Masse volumique apparente et absolue de la poudre de marbre :**

	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm³)	2,564
Masse volumique apparente (g/cm³)	1,073

Tableau III-13 : Masse volumique apparente et absolue de la poudre de marbre.

3-3: Essais sur le ciment :

3-3-1 : Essai de consistance EN (196-3) :

La consistance de la pâte caractérise sa plus au moins grande fluidité. Cet essai est effectué avec l'appareil de Vicat conformément à la norme EN 196-3.

3-3-2: Temps de prise à 20 °C :

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après quelques heures. Il est donc nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en oeuvre in situ des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat conformément à la norme EN 196-3 (Figure III-11), qui donne deux repères pratiques : le début de prise et la fin de prise (Tableau III-14) :

Début de prise	Fin de prise
190 min	265 min

Tableau III-14 : Le début et la fin de prise du ciment.



Figure III-11 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible.

4- Composition des mortiers :

Dans 1m^3 de mortier on a :

- 1400 Kg de sable.
- 400 Kg de ciment.
- 250 Kg d'eau.
- 3 Kg de superplastifiant (0,75% du poids du ciment).

Le tableau III-15 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour trois éprouvettes cubiques ($5\times 5\times 5$) cm^3 de mortier (témoin).

Type de matériau	Sable	Ciment	Eau	Superplastifiant
Poids (g)	579	165	108	1,5

Tableau III-15 : Composition de trois éprouvettes cubiques de mortier témoin.

Le tableau III-16 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour trois éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm³ de mortier (témoin).

Type de matériau	Sable	Ciment	Eau	Superplastifiant
Poids (g)	1185	342	213	6

Tableau III-16 : Composition de trois éprouvettes prismatiques de mortier témoin.

Le tableau III-17 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour trois éprouvettes cylindriques (d=10 cm, h=20 cm) de mortier (témoin).

Type de matériau	Sable	Ciment	Eau	Superplastifiant
Poids (g)	7260	2076	1299	18

Tableau III-17 : Composition de trois éprouvettes cylindriques de mortier témoin.

5- Formulation des mortiers :

5-1 : Préparation du matériau :

Notation des mélanges :

- **Substitution ciment :** Utilisation de la poudre de marbre comme ajout cimentaire.

M0 : mortier témoin ;

M5 : mortier à 5 % de substitution du ciment par la poudre de marbre ;

M10 : mortier à 10 % de substitution du ciment par la poudre de marbre ;

M15 : mortier à 15 % de substitution du ciment par la poudre de marbre ;

M20 : mortier à 20 % de substitution du ciment par la poudre de marbre ;

Après le calcul, Les compositions des mortiers utilisés sont données dans les tableaux III-18, III-19, III-20, III-21 :

Constituants(g)	M 5 (3éprouvettes cubiques)	M 5 (3éprouvettes prismatiques)	M 5 (3éprouvettes cylindriques)
Sable	579	1185	7260
Ciment	156	324	1971
Eau	108	213	1299
Superplastifiant	1,5	6	18
Poudre de marbre	9	18	105

Tableau III-18 : Composition des mortiers pour 5 % de la poudre de marbre.

Constituants(g)	M 10 (3 éprouvettes cubiques)	M 10 (3 éprouvettes prismatiques)	M 10 (3 éprouvettes cylindriques)
Sable	630	1293	7920
Ciment	162	333	2037
Eau	117	231	1416
Superplastifiant	1,5	6	18
Poudre de marbre	18	39	228

Tableau III-19 : Composition des mortiers pour 10 % de la poudre de marbre.

Constituants(g)	M 15 (3 éprouvettes cubiques)	M 15 (3 éprouvettes prismatiques)	M 15 (3 éprouvettes cylindriques)
Sable	630	1293	7920
Ciment	153	315	1923
Eau	117	231	1416
Superplastifiant	1,5	6	18
Poudre de marbre	27	57	342

Tableau III-20 : Composition des mortiers pour 15 % de la poudre de marbre.

Constituants(g)	M 20 (3 éprouvettes cubiques)	M 20 (3 éprouvettes prismatiques)	M 20 (3 éprouvettes cylindriques)
Sable	630	1293	7920
Ciment	144	297	1812
Eau	117	231	1416
Superplastifiant	1,5	6	18
Poudre de marbre	36	75	453

Tableau III-21 : Composition des mortiers pour 20 % de la poudre de marbre.

5-2: Confection des mortiers :

Dans cette partie de chapitre nous avons présenté les étapes de confection des mortiers depuis les pesées des matériaux jusqu'à la rupture des éprouvettes. On a décrit la méthode d'essai utilisée, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes.

Le tableau III-22 définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas.

Désignation	Compression		Flexion trois points		Traction par fondage	
	Type	Nombre	Type	Nombre	Type	Nombre
M0	Cubique	3	prismatique	3	cylindrique	3
M5	Cubique	3	Prismatique	3	cylindrique	3
M10	Cubique	3	Prismatique	3	cylindrique	3
M15	Cubique	3	Prismatique	3	cylindrique	3
M20	cubique	3	prismatique	3	cylindrique	3

Tableau III-22: Désignation des différentes éprouvettes.

5-2-1 : Préparation de la gâchée :

Pour la confection des bétons ou bien des mortiers, on suit le mode opératoire suivant:

- Préparation des moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.



Figure III-12 : (a): Moule d'éprouvettes (b) : Moule d'éprouvettes (c) : Moule d'éprouvette

Cubiques ($5 \times 5 \times 5$) cm³.
cm³.

Prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm³.

Cylindrique ($d=10, h=20$)

- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à l'eau de gâchage.
- Humidifier le malaxeur. Dans notre le malaxeur utilisé pour la fabrication des mortiers est un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 60 litres (voir la figure III-13).
- Peser les matériaux secs (ciment, sable, la poudre de marbre) et les introduire dans le malaxeur.



Figure III-13 : Matériaux pesés dans le malaxeur utilisé.

- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec, pendant 1 minute.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (qui contient l'adjuvant) et laisser le pendant 30 secondes.
- Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement et laisser le pendant 30 secondes.
- Effectuer immédiatement les essais à l'état frais après arrêt du malaxage .
- Remplir les éprouvettes, et les vibrer à l'aide de la table vibrante (voir la figure III-14) pendant 30 secondes pour évacuer les bulles d'air et d'éviter les cavités dans le mortier frais.



Figure III-14 : Table vibrante utilisée.

5-2-2 : conservation des éprouvettes :

-Les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24 heures.



Figure III-15 : Eprouvettes avant le décoffrage.



Figure III-16 : Décoffrage des éprouvettes.



Figure III-17 : Eprouvettes après le décoffrage.

- On mentionne sur la surface supérieure des éprouvettes la référence du mortier. Et on pèse les éprouvettes après le décoffrage.

-Les éprouvettes sont par la suite immergées dans l'eau de robinet (voir la figure III-18) pendant 7, 14, 28 jours.



Figure III-18 : Conservation des éprouvettes dans l'eau de robinet.

- Les éprouvettes sont alors retirées et pesées (humide) pour être testées à l'essai de compression, flexion, de traction par fondage et ultrason à 7, 14, 28 jours.

Les histogrammes suivants représentent les masses d'éprouvettes avant la conservation dans l'eau (après le décoffrage), et après la conservation dans l'eau.

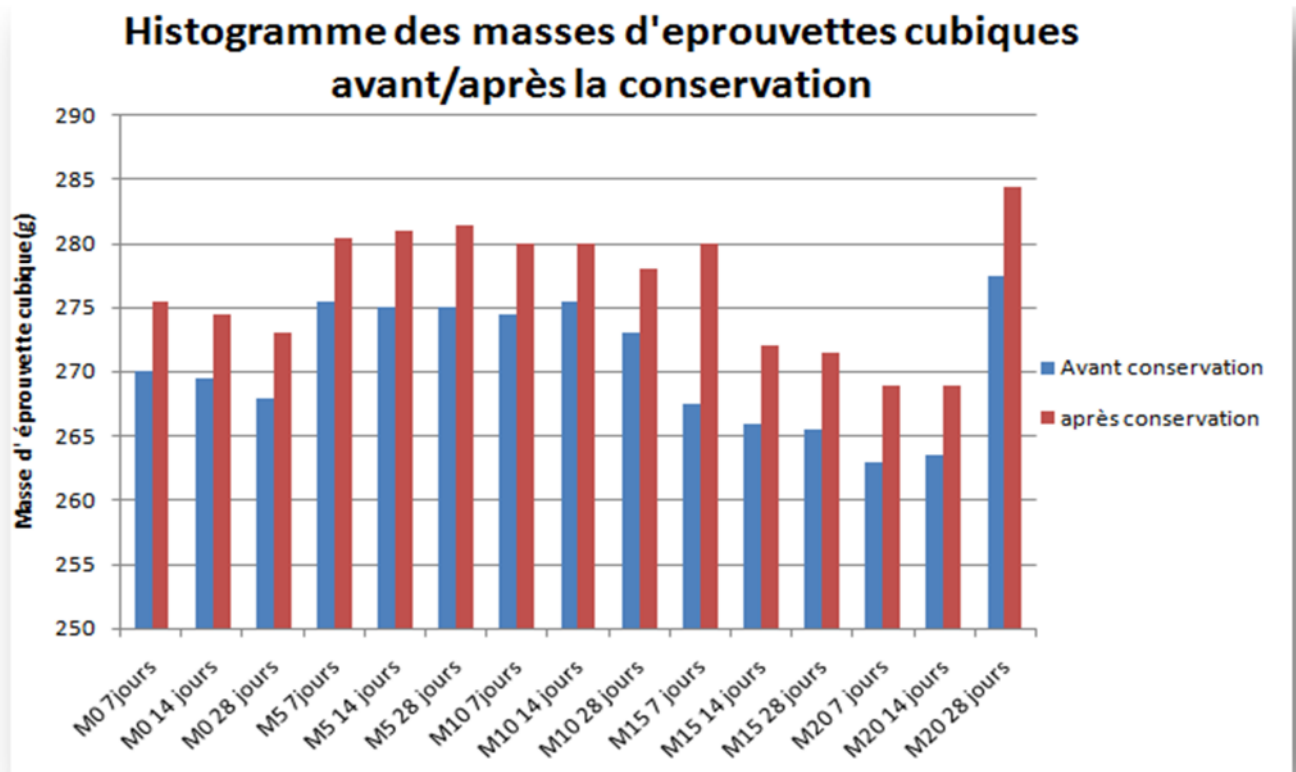


Figure III-19 :Histogramme des masses d'éprouvettes cubiques avant/après la conservation dans l'eau.

- D'après l'historgramme on remarque une grande augmentation de la masse d'éprouvette cubique après la conservation dans l'eau pour les différents mortiers au cours du temps.

-on remarque que le mortier M20 à 28 jours présente la plus grande masse après la conservation dans l'eau, qui égale à 284 g.

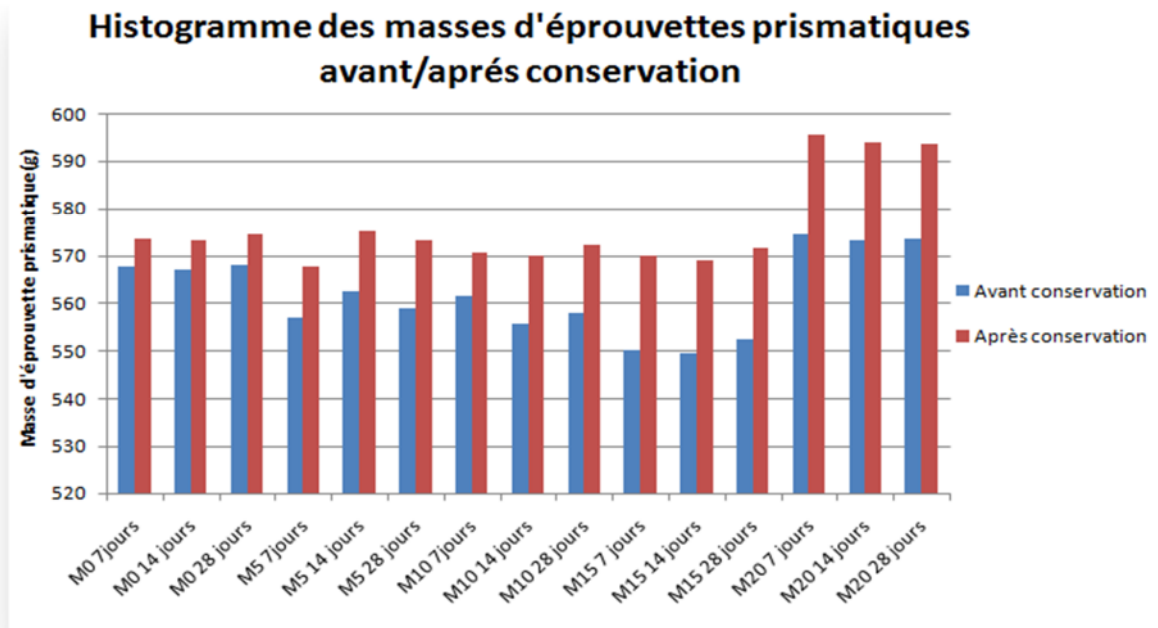


Figure III-20 :Histogramme des masses d'éprouvettes prismatiques avant/après la conservation dans l'eau.

- D'après l'histogramme on remarque une grande augmentation de la masse d'éprouvette prismatique après la conservation dans l'eau pour les différents mortiers au cours du temps.

-on remarque que le mortier M20 à 7 jours, 14 jours et 28 jours présente les plus grandes masses après la conservation dans l'eau, la masse de mortier M20 à 7 jours est la plus élevée qui égale à 596 g.

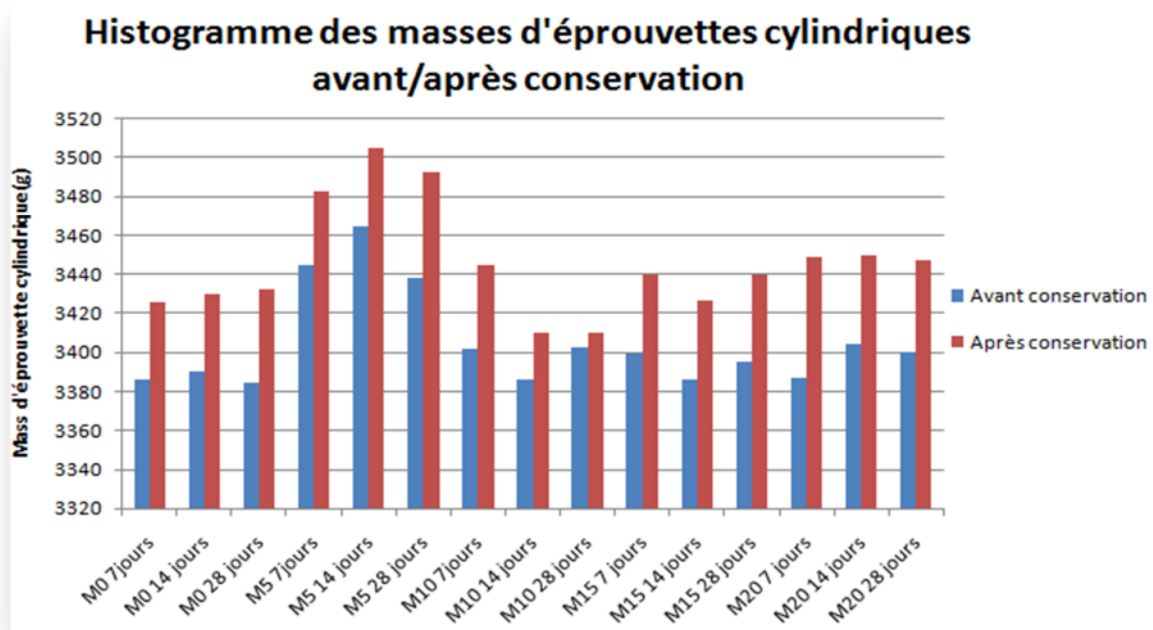


Figure III-21 : Histogramme des masses d'éprouvettes cylindriques avant/après la conservation dans l'eau.

- D'après l'histogramme on remarque une grande augmentation de la masse d'éprouvette cylindrique après la conservation dans l'eau pour les différents mortiers au cours du temps.

-on remarque que le mortier M5 à 7 jours, 14 jours et 28 jours présente les plus grandes masses après la conservation dans l'eau, la masse de mortier M5 à 14 jours est la plus élevée qui égale à 3504 g.

6- Essais sur mortiers :

6-1: Essais sur mortier frais :

➤ Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

a- Le but de l'essai : caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné.

b- Matériel nécessaire :

- Plateau équipé d'une plaque métallique plane de forme carrée au moins 90 cm de coté.
- Moule tronconique en tôle de 10 cm de diamètre à la base, de 5cm de diamètre en

partie haute, de 15cm de hauteur (on a utilisé le mini cône d'Abrams) dispose d'un empattement pour être maintenu contre le plateau avec les pieds de l'opérateur.

–Tige de piquetage de 16mm de diamètre.

–Mètre.

c- Mode opératoire :

–Mettre le plateau sur un support stable et horizontal ;

–Humidifier la surface de la plaque ;

–Placer le cône au centre du plateau ;

–Prélever un échantillon représentatif du béton ;

–Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir ;

– Remplir le cône en déversant le béton en quatre couches piquées avec la tige à raison de 25coups par couche.

– Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer la plaque avec un chiffon humide ;

– Soulever le cône verticalement sans secousses à l'aide des deux poignées et mesurer l'affaissement.

Consistance du béton	Affaissement	Serrage nécessaire
Très ferme	2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	≥ 16	Léger piquage

Tableau III-23 : consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.



Figure III-22: (a): cône d'Abrams ; (b): Essai d'affaissement

au cône d'Abrams.

Il faut rappeler qu'est considéré comme plastique, un mortier qui a un affaissement compris entre 6 et 9 centimètres.

L'affaissement est mesuré pour les cinq mélanges de mortier préparés, les résultats sont illustrés sur la figure III-14.

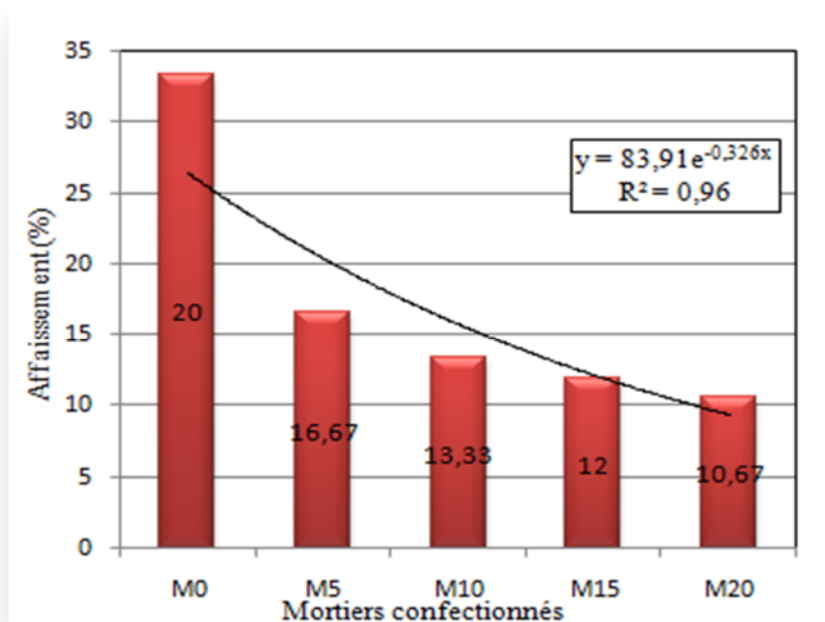


Figure III-23 :L'affaissement en fonction de la teneur en poudre de marbre.

On remarque une courbe déssendente de forme hyperbolique d'équation : $y=83,91e^{-0,326x}$

6-2 : Essais à l'état durci :

➤ Essai de compression (NF P 18-406) :

La résistance mécanique en compression d'un béton ou d'un mortier correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continu jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton ou mortier, c'est le paramètre fondamental de notre étude. Notre objectif dans cette étude est de déterminer les résistances à la compression des différents mortiers à 7, 14 et 28 jours.

Les essais de compression sont effectués sur des éprouvettes cubiques ($5 \times 5 \times 5$) cm^3 en utilisant une presse de capacité maximale de 200 kN (voir figure III-24). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 2,4 kN/s.



Figure III-24:(a):Presse Ibertest ; (b):éprouvette soumise en ;(c):éprouvette après rupture

Compression.



a)-M0/7 jours

b)-M5/14 jours

c)-M10/14 jours

d)-M10/28 jours



e)- M15/14 jours

f)-M20/7 jours

g)-M20/14 jours

h)- M20/28 jours

Figure III-25 : Eprouvettes cubiques après écrasement.

➤ **Essai de traction par flexion trois points (NF P 18-407) :**

L'essai de traction par flexion trois points est effectué sur des prismes de sections prismatique (4x4x16) cm³. Le prisme est placé dans une presse hydraulique de marque Ibertest pilotée par un ordinateur. Sa capacité maximale est de 200 KN, (voir figures III-26). L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 KN/s.



Figure III-26 : (a) : Epreuve soumise à la ; (b) : Epreuve après rupture.
traction par flexion trois points.



a)-M0/7 jours

b)-M5/7 jours

c)- M5/14 jours

d)-M10/14 jours



e)-M10/28 jours

f)-M15/14 jours

g)-M20/14 jours

h)-M20/28 jours

➤ **Figure III-27 :** Epreuves prismatiques après écrasement.

Essai de traction par fondage :

L'essai de traction par fondage est effectué sur des éprouvettes cylindriques de sections cylindriques ($d=10, h=20$) . Le cylindre est placé dans une presse de marque Ibertest pilotée par un ordinateur. Sa capacité maximale est de 200 KN. L'éprouvette est soumise à

une charge croissante jusqu'à sa rupture. (Voir la figure III-28). Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 KN/s.



Figure III-28 : (a) :Eprouvette soumise à la traction par fondage. ; (b) :Eprouvette après rupture.



a)-M0/7 jours

b)-M5/7 jours

c)-M0/28 jours

d)-M5/14 jours



d)-M10/14 jours

e)-M15/7 jours

f)-M20/14 jours

h)-M20/28 jours

Figure III-29 : Eprouvettes cylindriques après écrasement.

➤ **Essai par ultrason :**

Afin de caractériser un béton ou un mortier, on utilise un ultrason qui est un appareil non destructif basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton ou le mortier. (Voir la figure III-31).

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation (pour cette essai on a utilisé des éprouvettes cylindriques (10*20) cm³) ; à savoir le calibrage de l'appareil et la préparation des points de mesure. Cette dernière opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (on peut marquer ces points avec de la craie ou avec un crayon), en évitant d'appliquer les sondes sur des cavités, ainsi les enduire de matière plastique pour assurer le couplage acoustique .



Figure III-30 : Equipement de l'ultrason utilisé.

Les valeurs de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers les mortiers sont représentées dans le tableau III-24.

Mortiers confectionnés	Vitesse à 7 jours		Vitesse à 14 jours		Vitesse à 28 jours	
M0	3831	3795	3960	3968	3984	3976
M5	3831	3876	4167	4132	3984	4049
M10	3929	3802	3906	3899	4032	4032
M15	3781	3738	3868	3876	3937	3937
M20	3795	3752	3861	3861	3960	3929

Tableau III-24 : Vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers les mortiers.

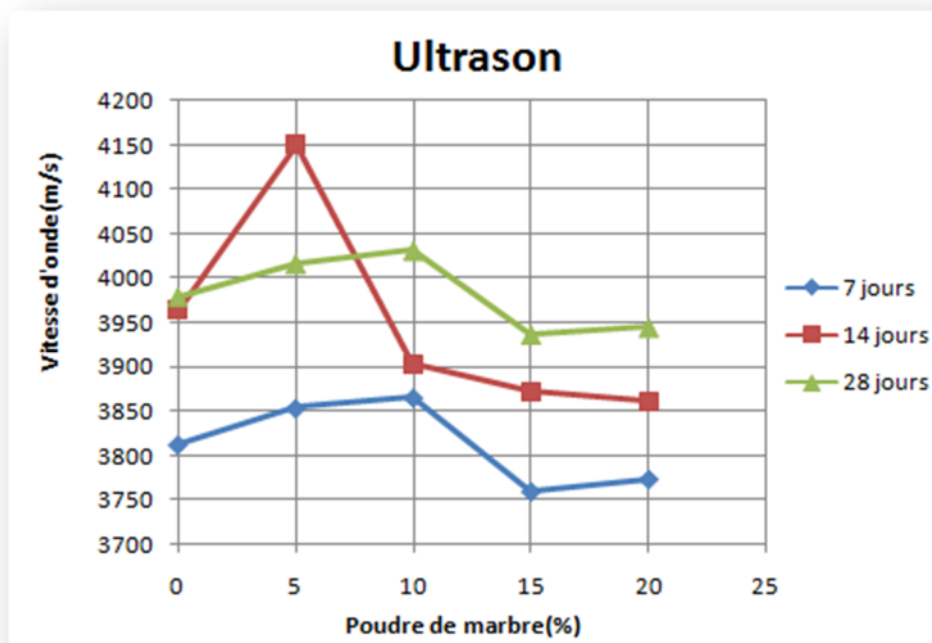


Figure III-31 : Superposition des courbes de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les différents mortiers.

-le pourcentage de la poudre de marbre influe sur la vitesse d'ondes, une augmentation de vitesse est notée lorsque on a utilisé 5% et 10% de la poudre de marbre, après on observe une chute de vitesse lorsque on a utilisé 15% et 20% .

III-2 : Résultats et interprétation :

1-Introduction :

Les différents résultats des essais mécaniques des mortiers à base de la poudre de marbre, seront présentés dans cette partie de chapitre, et également les interprétations de ces résultats.

2- Résultats de l'essai mécaniques :

Notre premier constat porte sur la résistance à des mortiers avec d'ajout de la poudre de marbre, avec les matériaux utilisés, qui sont des matériaux locaux nous avons pu formuler un mortier. Pour comparer les valeurs de résistance entre les différents mortiers, nous avons présenté les valeurs des résistances moyennes sur les mêmes graphiques.

2-1 : Résistance en compression :

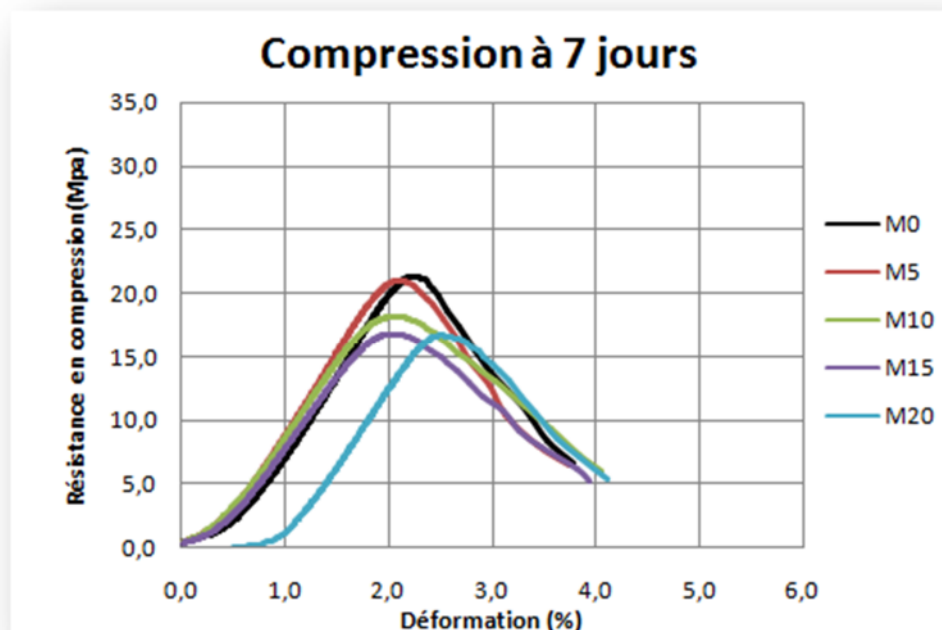


Figure III-32 : Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 7 jours.

-On remarque que la pente des courbes des mortiers M0, M5, M10, M15 est presque la même et on remarque une diminution de pente pour le mortier M20.

-Une légère chute de résistance est observée pour les mortiers avec les différents pourcentages de la poudre de marbre par rapport au béton témoin .

-La déformation est plus importante pour les mortiers avec poudre de marbre.

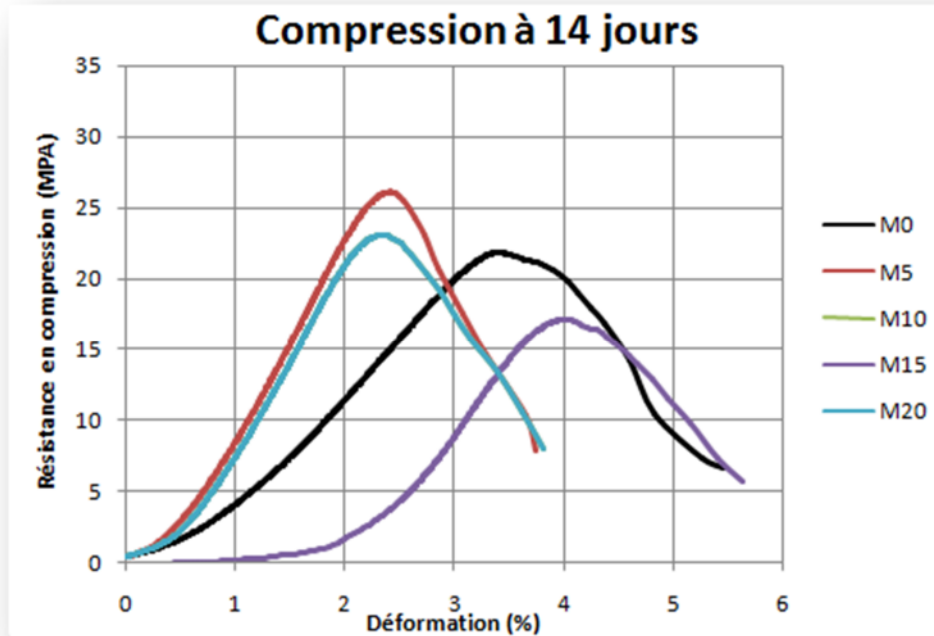


Figure III-33 : Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 14jours.

-On remarque une augmentation de pente des courbes des mortiers de M5 et M20 et M10, (M10 a la même pente avec M20) après on remarque une diminution de pente pour M15 .

-Une augmentation de résistance est observée pour le mortier M0 à M5, après on observe une chute de résistance de M5 jusqu'à M15

.-La déformation est plus importante pour les mortiers M0 et M15.

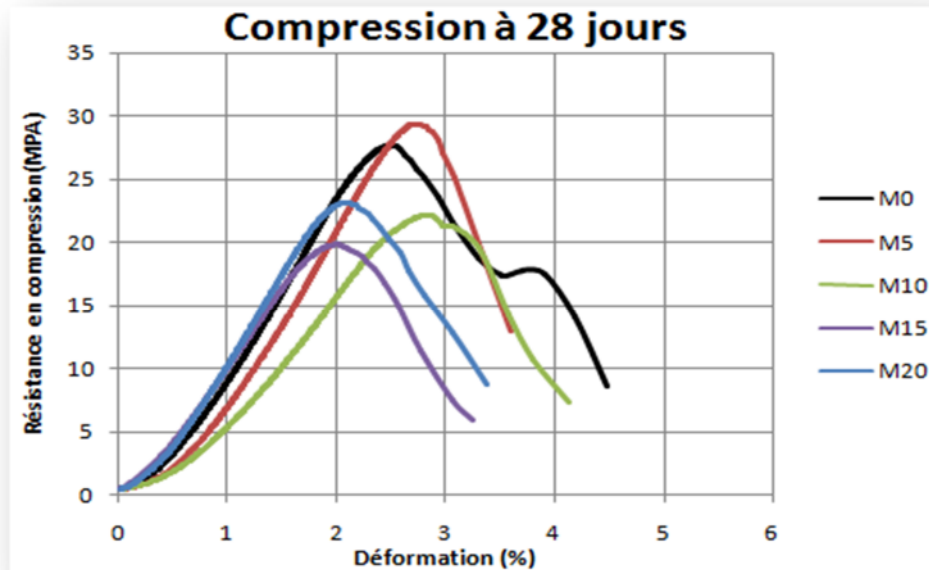


Figure III-34: Superposition des courbes contrainte-déformation en compression à 28 jours.

-On remarque que la pente des courbes des mortiers M0, M15 et M20 est la même. après on remarque une diminution de pente pour M5 et M10.

-on remarque une augmentation de résistance est observée pour le mortier M0 à M5, après on observe une chute de résistance de M5 jusqu'à M15. (la résistance de M10 et M20 est presque la même).

-La déformation est moins importante pour les mortiers avec poudre de marbre.

2-2 : Résistance à la flexion trois points :

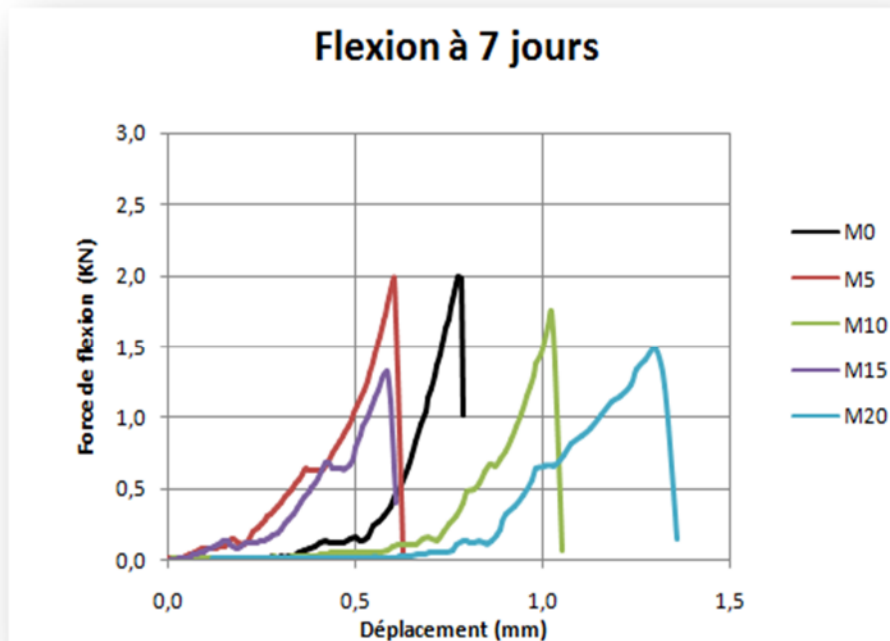


Figure III-35 : Superposition des courbes force-déplacement en flexion à 7 jours.

-Les courbes illustrées sur cette figure montrent une différence en terme de rigidité (pente), le mortier témoin(a la même pente avec le mortier M5) présente une rigidité en flexion plus élevée par rapport aux mortiers avec la poudre de marbre.L'augmentation du pourcentage de cette dernière réduit la rigidité.

-Une diminution des résistances ultimes est observée en flexion.

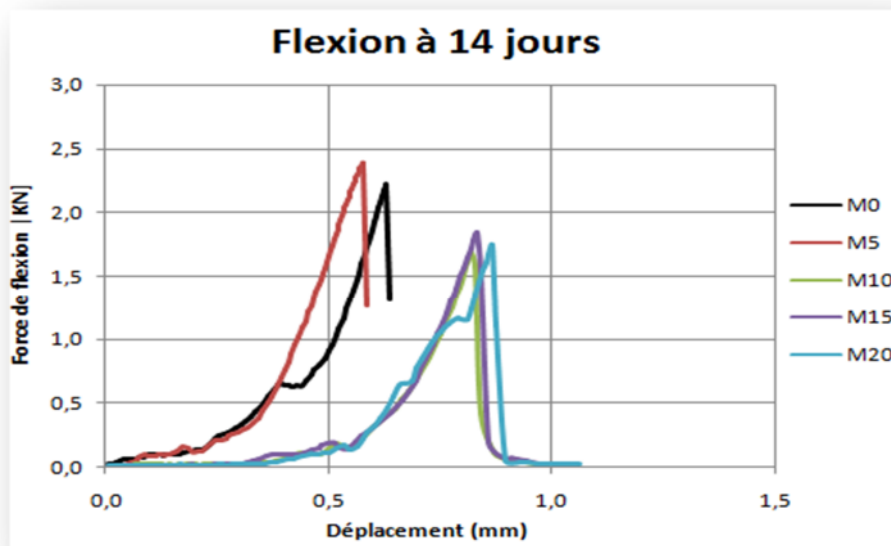


Figure III-36 : Superposition des courbes force-déplacement en flexion à 14 jours.

-Les courbes illustrées sur cette figure montrent une différence en terme de rigidité (pente), le mortier M5 présente une rigidité en flexion plus élevée par rapport aux mortiers avec la poudre de marbre et mortier témoin .

-Une augmentation de résistance est observée en flexion pour le mortier M0 à M5, après on remarque une diminution de M5 à M10 à M20 (M10 et M15 et M20 (ont presque le même résistance en flexion)).

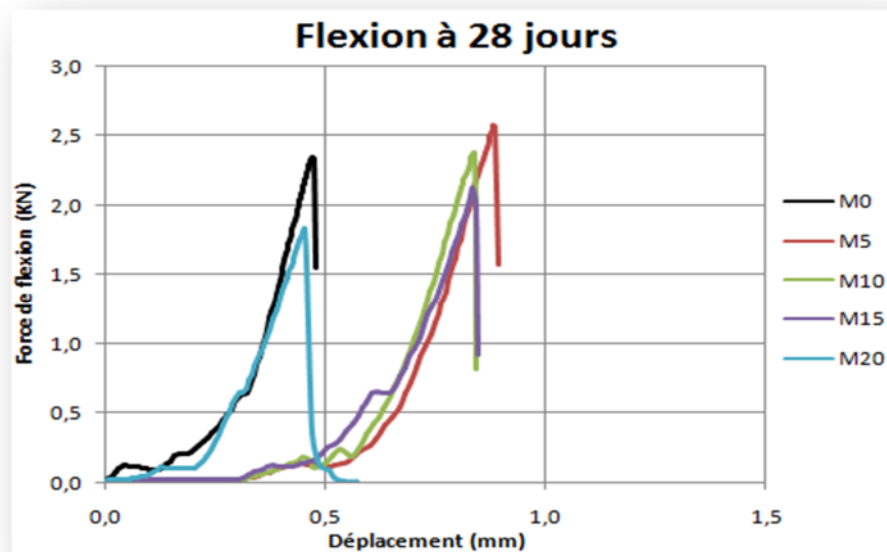


Figure III-37 : Superposition des courbes force-déplacement en flexion à 28jours.

-Les courbes illustrées sur cette figure montrent une différence en terme de rigidité (pente), le mortier M5 présente une rigidité en flexion plus élevée par rapport aux mortiers avec la poudre de marbre et mortier témoin .

-Une augmentation de résistance est observée en flexion pour le mortier M0 à M5, après on remarque une diminution de M5 à M10 à M15 à M20.(M0 et M10 ont presque la meme resistance).

2-3 : Résistance à la traction par fondage :

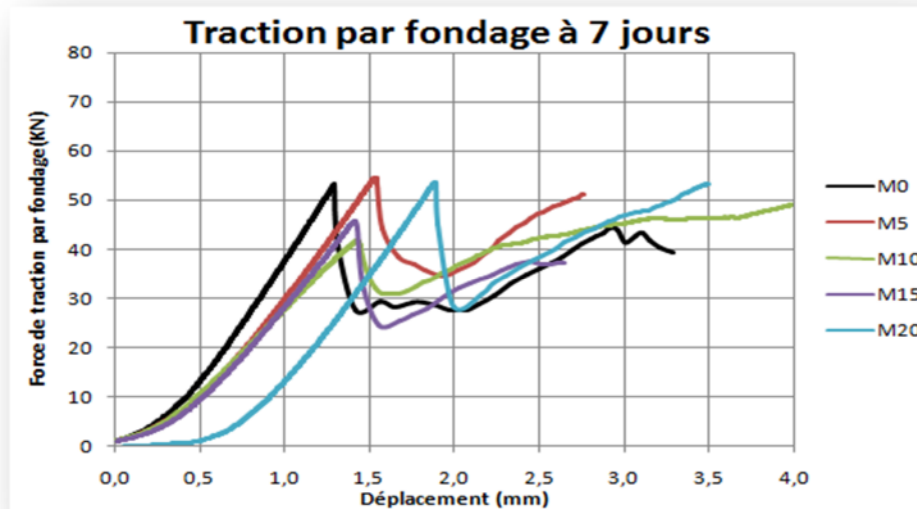


Figure III-38 : Superposition des courbes force-déplacement en traction par fondage à 7 jours.

-On remarque une faible diminution de pente des courbes des mortiers de M0 à M5, après on remarque que M5 et M10 et M15 ayant la même pente, après on remarque une diminution pour M20.

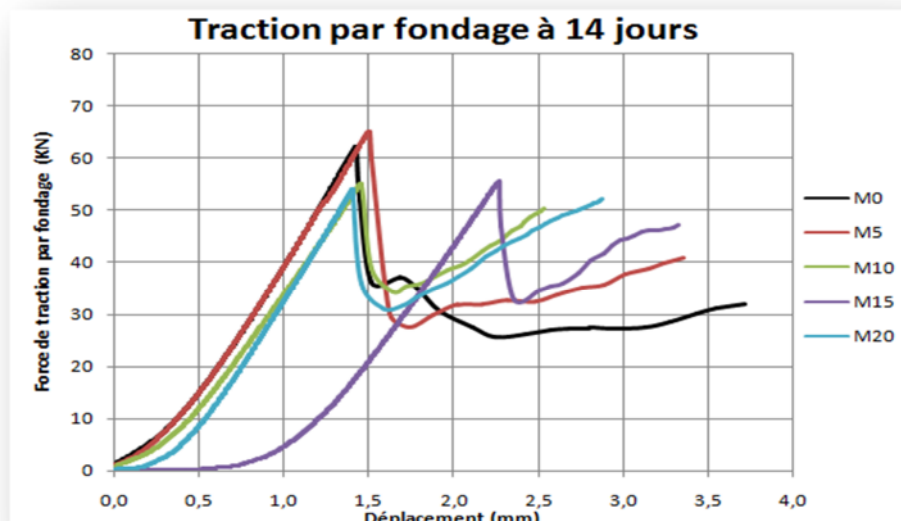
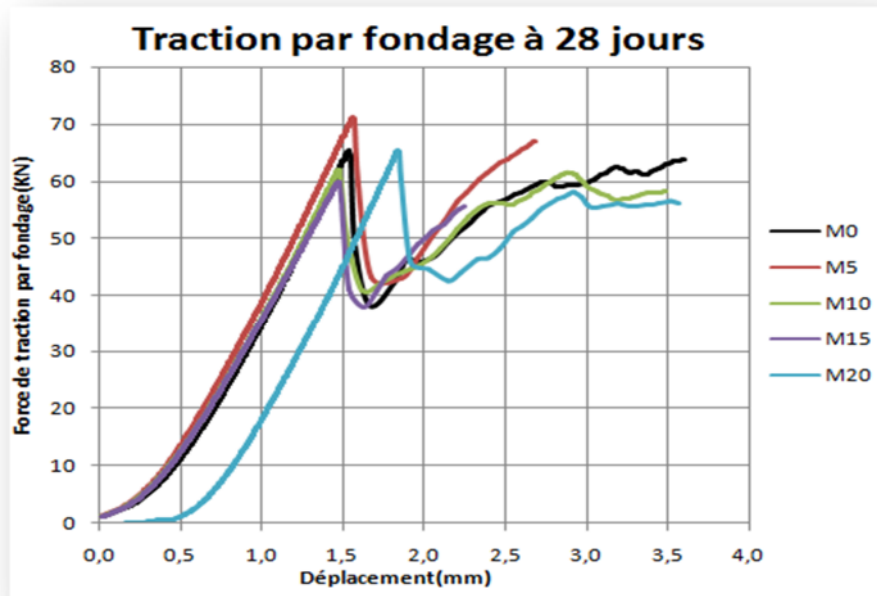


Figure III-39: Superposition des courbes force-déplacement en traction par fondage à 14 jours.

-On remarque une faible diminution de pente des courbes pour les mortiers M0 et M5, M10 et M15, et une grande diminution pour les mortiers M20



Figure

III-40: Superposition des courbes force-déplacement en traction par fondage à 28 jours

-On remarque que M0 et M5 et M10 et M15 ayant la même pente, après on remarque une diminution pour M20.

-On remarque une faible diminution de résistance.

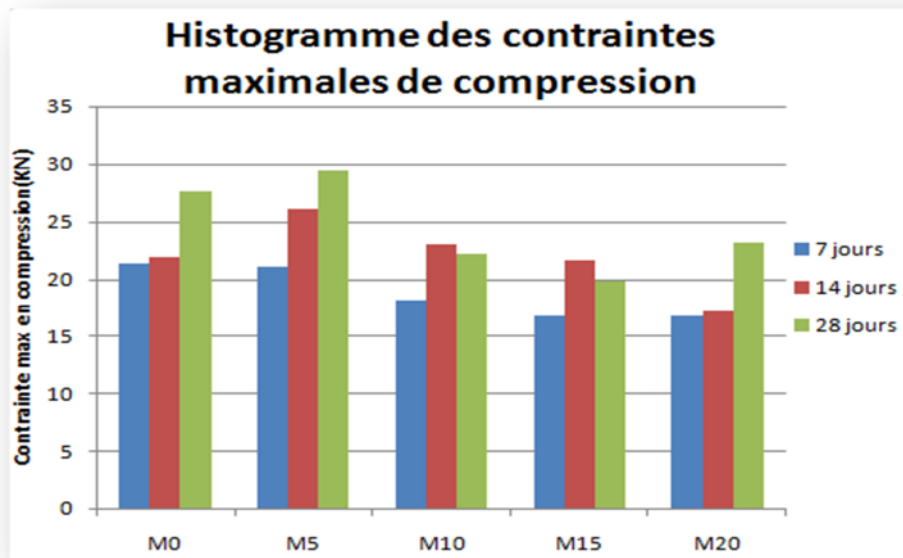


Figure III-41 :Histogramme des contraintes maximales de compression des différents mortiers.

- D'après l'histogramme on remarque que la contrainte maximale en compression pour les différents mortiers augmente au cours du temps.

-on remarque que le mortier avec 5 % de la poudre de marbre (M5) présente les meilleurs résultats en compression, tel qu'il résiste à une contrainte limite (29 KN).

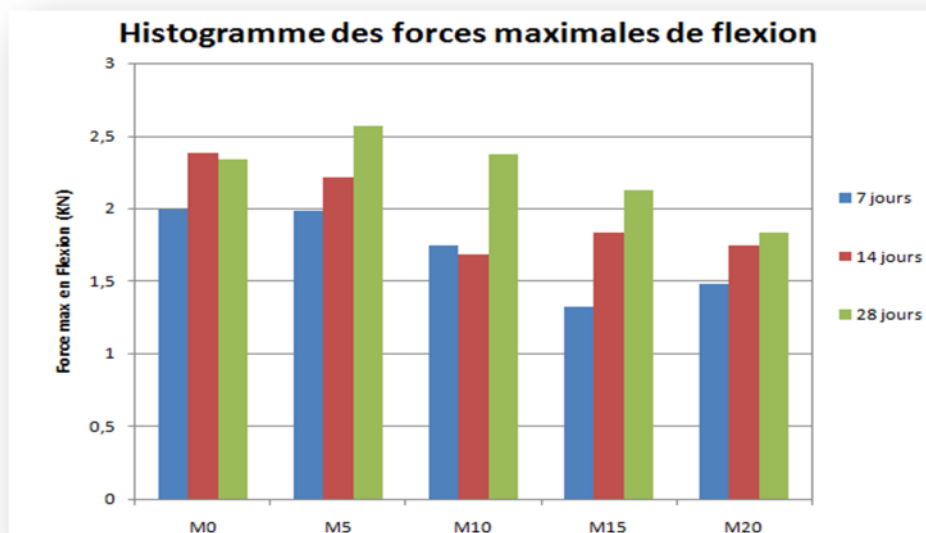


Figure III-42 :Histogramme des forces maximales de flexion des différents mortiers.

- D'après l'histogramme on remarque que la force maximale en flexion pour les différents mortiers sa augmente au cours du temps.

-on remarque que le mortier M5 présente les meilleurs résultats en flexion , tel qu'il resiste a une force limite (**2,60 KN**).

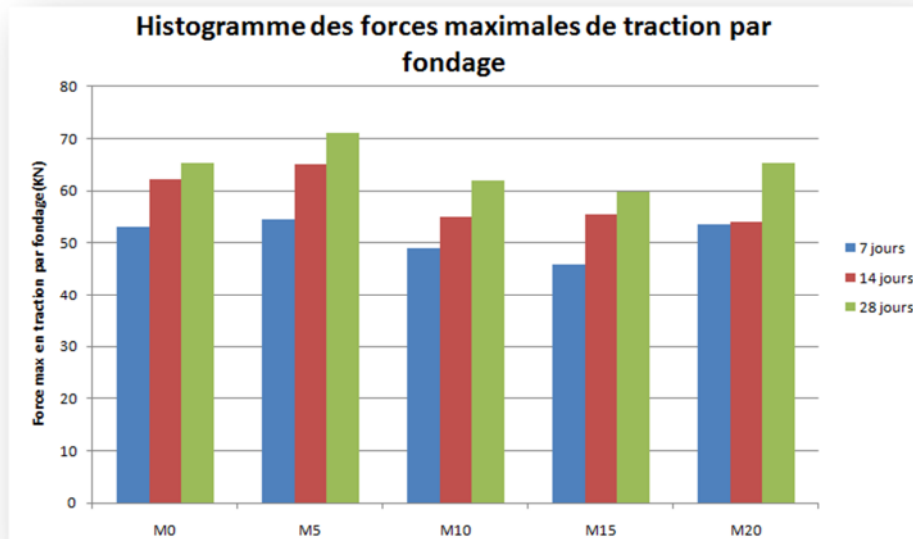


Figure III-43 :Histogramme des force maximales de traction par fondage des différents mortiers.

- D'après l'histogramme on remarque que la force maximale en traction par fondage pour les différents mortiers sa augmente au cours du temps.

-on remarque que le mortier M5 présente les meilleurs résultats en traction par fondage , tel qu'il resiste a une force limite (**71 KN**).

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale des propriétés des mortiers.

Cette partie expérimentale a pour objectif de caractériser la résistance des mortiers avec ajout de la poudre de marbre. Pour cela, plusieurs formulations de mortier avec ajout de la poudre de marbre ont été mises au point, à partir de matériaux identiques :

Cinq compositions différentes ont été envisagées et avec les différents pourcentages de la poudre de marbre.

D'après les résultats obtenus précédemment on peut dire qu'effectivement les mortiers avec un petit pourcentage d'ajout de la poudre de marbre ont de meilleures caractéristiques mécaniques qu'avec les grands pourcentages.

Par les résultats que l'on vient de présenter on peut tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible de confectionner un mortier à la fois : homogène et résistant c'est le mortier à base de la poudre de marbre.
- L'introduction du superplastifiant, mais surtout de la poudre de marbre, nous ont permis de formuler des mortiers à ouvrabilité conforme à celle du mortier témoin, tout en assurant une bonne viscosité par les ajouts.
- Le mortier à base de la poudre de marbre présente des résistances intéressantes à la compression ou à la flexion par trois points ou à la traction par fondage on comparaison au mortier témoin.
 - Au final, on peut dire que les réistances obtenues à la compression et à la flexion par trois points et à la traction par fondage sur les mortiers sont satisfaisantes, l'objectif était de fabriquer des mortiers avec des ajouts de résistance équivalente à celle de mortier normal, ce qui signifie la possibilité d'utiliser ce genre de mortier dans les cas des maçonneries...

Dans cette étude expérimentale nous avons essayé de répondre à plusieurs objectifs : le premier objectif était d'établir des formulations de mortier avec ajout de la poudre de marbre en substitution du ciment qui répondent aux recommandations et aux normes concernant les mortiers normales. Le deuxième objectif était d'évaluer l'influence de l'ajout de la poudre de marbre sur le comportement de mortier. Le troisième objectif, est de comparer les performances des différents mortiers utilisés, en termes de résistance mécanique (en compression et à la flexion trois points et à la traction par fondage), par rapport à des mortiers témoins qui sont élaboré en utilisant les mêmes matériaux.

Nous pouvons noter qu'il est possible de fabriquer des mortiers (avec ajout de la poudre de marbre) avec des matériaux locaux présentant les mêmes composantes de base qu'un mortier normale et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles connues à l'échelle international.

La quantité de pourcentage de l'ajout de la poudre de marbre qu'on a ajouté au ciment est satisfaisante pour présenter un avantage essentiel : de bonne résistance et une meilleure économie du ciment.

L'introduction du superplastifiant, mais surtout de la poudre de marbre, nous ont permis de formuler des mortiers à ouvrabilité conforme à celle du mortier témoin, toute en assurant une bonne viscosité par les ajouts.

Le mortier à base de la poudre de marbre présente des résistances intéressantes à la compression et à la flexion et à la traction par fondage très en comparaison au mortier témoin.

Perspectives et recommandations :

A la lumière des conclusions rapportées précédemment, nous recommandons quelques perspectives et axes de recherches suivants :

- Etude des mortiers ternaires (deux ajouts à la fois).
- Substitution des fines argileuses de sable au lieu du ciment par les ajouts.
- Elargir l'étude de la durabilité des mortiers avec ajouts.

Et comme recommandation on peut dire que l'utilisation des additions minérales (la poudre de marbre) présente une alternative économique et écologique dans la fabrication des mortiers et des bétons.

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 – 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 – 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 – 195
Fin de prise (min)	195 – 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Hamman: Dadas, Mista (ACC)
Tél: +213 35 50 78 20
Fax: +213 35 55 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins Hydra, Alger
Tél: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 10 71

Ciment Blanc Algérie (SPA)

Usine Oggaz (CEBA)
BP 57, 20360, Mascara
Tél: / Fax: +213 (0) 40 94 66 66



SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant /Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.						
Domaines d'application	■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. ■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.						
Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : ■ longue rhéologie (>2h), ■ robustesse à la ségrégation, ■ qualité de parement. <table><tr><th>RHÉOLOGIE</th><th>RÉSISTANCES INITIALES</th><th>RÉDUCTION D'EAU</th></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU	5	3	4
RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU					
5	3	4					
Agréments, essais de laboratoire	■ PV CNERIB : DTEM : 33/2010.						
Caractéristiques							
Aspect	Liquide brun clair						
Conditionnement	■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac						
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.						
Conservation	1 an en emballage intact						
Données techniques							
Densité	1,06 ± 0,01						
PH	6 ± 1						
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %						
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %						

Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08



Références Bibliographiques :

- [01] - **GEORGES DREUX, JEAN FESTA** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » huitième édition ,2002.
- [02]-**G. Dreux** "Nouveau guide du béton " Edition, Eyrolles- Paris- 1998.
- [03]- **EYROLLES** « Techniques et pratique de la chaux » 2ème édition, Ecole d’Avignon, 2003.
- [04]- **NECHAF SAMIA**, « Influence de l’ajout de la poudre de verre sur les bétons ordinaires soumis à un chargement extérieur », mémoire magister, Université mouloud mammeri de tizi,Année 2015.
- [05]-**DJOBO YANKWA Jean Noël** , « effets de l’incorporation d’adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments géopolymerisés à base scories volcanique ».
- [06] - **Bouglada Mohamed Salah**, «Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Mémoire Magister, Université de M’sila , Année 2007/2008.
- [07]- **A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane**(Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d’Oran, Es-sénia, Oran)(Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers).
- [08]-Guide pratique de l’entreprise du bâtiment « Déchets du bâtiments », juin,2004.
- [09]- Déchets du bâtiment, chateau, Layrent “Service mobilization et valorization des déchets, direction économie circulaire”, Ademe Angers, décembre 2014.
- [10]- **Pooja J.Chavhan et al Int**, « Journal of Engineering Research and Applications: 2248-9622 », Vol. 4, Issue 4(Version 1), April 2014.
- [11]-**Chen.W.F**, « Plasticity in reinforced concrete », published by McGraw-Hill Bookstore, New York, 1982.
- [12]- **Karsan.P, Jirsa.J.O**, « Behavior of concrete under compressive loadin », Journal of Structures Div.
- [13]- **Mazars.J, Millard.A**, «Comportement dynamique des bétons et génie parasismique », Hermès Sciences, 2004.
- [14]-**Exadaktylos.G.E, Vardoulakis.I, Kourkoulis.S.K**, « Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams – I ». Technical Theory. International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, 2001.

[15]- **BAEL 91 modifié 99**. "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites".

[16]- **Eurocode 2, PAILLÈ.J.M**, "Calcul des structures en béton", G12043, 2009.

[17]-**Sargin. M**, « Stress-strain relationships for concrete and the analysis of the structural concrete sections », S.M Study n°4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1971.

[18]- **Touhami Tahenni**, "Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance", mémoire de Magister, décembre 2006.

[19]-**Mazars. J**, « Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non-linéaire et à la rupture du béton de structure ». Thèse de doctorat d'état, Université Paris6, 1984.

[20]- **Grelat.A**, « Calcul non linéaire des ossatures en béton armé », Thèse de Docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 1978.

[21]- **M. Venuat** « Adjuvant et traitement des mortiers et bétons » 1^{ère} Ed. Venuat, Paris 1976.

[22]-M. Duriez Annales de l'institut technique du bâtiment et travaux public, Juin 1953

[23]- **S. BOUALLEG** « Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires », Thèse de Magister ,2004.

[24]- Communication Science & technologie (RESISTANCE AUX ACIDES ET A LA PENETRATION DES IONS CHLORURES DES MORTIERS AVEC POZZOLANE ET FINE CALCAIRE). Janvier 2010

[25]-**DREUX, G** : « Nouveau guide du béton ». Eyrolles.1981.

[26]-**J. Baron et J.P. Olivier** " les bétons : bases et données pour leur formulations "Edition , Eyrolles- Paris - 1999.