

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

ADDA BOUABDELLAH

AZZOUZ TAHIR

Sujet du mémoire

Étude expérimentale d'un béton à hautes performances recyclé à base de fumée de silice (Granitex, Sika)

Soutenu publiquement le 15/09/2021 devant le jury composé de :

Mr. H. BEKKI

Melle. Z. RENNAK

Mr. B. SERBAH

Mm. A. DRAOUI

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

PROMOTION : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

❧❧❧❧ REMERCIEMENTS ❧❧❧❧

Tous d'abord, nous tenons à remercier ALLAH clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et la volonté afin d'élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur monsieur madame ZOHRA RENNAK qui nous a guidé durant toutes les étapes de ce travail, pour son soutien, ses conseils judicieux et sa bienveillance sur nous.

Nous voudrions remercier également les membres du jury qui ont consacré leur précieux temps afin d'apporter les critiques constructifs à la mise en forme de ce travail.

Nous remercions tous l'équipe pédagogique s de l'université Ibn Khaldoun qui ont contribués à notre formation et spécialement monsieur ABDE ELRZAK qui nous a beaucoup aidé.

Enfin nous remercions tous les personnes de près ou de loin pour leurs aides et surtout pour leurs soutient

œ Dédicace œ

Nous dédions ce mémoire à :

Nos chers parents que sont la source de notre réussite, tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance qui nous avons pour vous.

À nos sœurs, nos frères et nos familles, que dieu les protège et les donne la longévité et le bonheur.

À nos chères amies et collègues sans exception.

Et à toutes les personnes que nous aimons.

ADDA BOUABDELLAH et AZZOUZ TAHIR

Résumé

Cette étude vise à valoriser les déchets de béton à hautes performances (BHP) sous forme de granulats dans les mélanges de béton à hautes performances recyclés (BHPR). Les particules de granulats recyclés ont été ajoutées aux mélanges en remplacement partiel du volume total de graviers à différents pourcentages (0%, 25%, 50%, et 75%). La démarche expérimentale entreprise dans ce travail de mémoire consiste à étudier l'influence du granulats recyclés sur les propriétés du BHPR, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

En présence du granulats recyclés, le BHPR est devenu moins dense et plus absorbant à l'eau. Le principal inconvénient lié à l'incorporation du granulats recyclés dans le BHPR est la diminution des propriétés mécaniques.

Mots clés :

BHPR, granulats recyclés, valorisation, résistance, amélioration, fumée de silice.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى التثمين استعادت نفايات الخرسانة العالية الأداء في هيئة حصى في مخاليط الخرسانة المعاد تدويرها العالية الأداء (خ ع أم ت) ولقد أضيفت جسيمات الحصى المعاد تدويرها إلى المخاليط في الاستبدال الجزئي للحجم الكلي للحصى بنسب مختلفة (0% , 25% ، و 50% ، و 75%). ويتمثل النهج التجريبي الذي تم القيام به في هذا العمل من المذكرة في دراسة تأثير الحصى المعاد تدويره على خصائص (خ ع أم ت) ، في كل من الحالة السائلة والحالة الصلبة.

وفي وجود الحصى المعاد تدويره ، أصبحت (خ ع أم ت) أقل كثافة وأكثر امتصاصا للمياه. والعييب الرئيسي في دمج الحصى المعاد تدويره في (خ ع أم ت) هو انخفاض الخصائص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية:

خ ع أم ت ، الحصى المعاد تدويره، التثمين ، المقاومة ، دخان السيليكا.

Summary

This study aims to recover high-performance concrete waste (HPC) in the form of aggregates in high-performance recycled concrete mixtures (RHPC). Recycled aggregate particles were added to mixtures in partial replacement of the total volume of gravel at different percentages (0%, 25%, 50%, and 75%). The experimental approach undertaken in this work of memory consists in studying the influence of recycled aggregate on the properties of RHPC, both in the fresh state and in the hardened state.

In the presence of recycled aggregate, RHPC has become less dense and more water absorbent. The main drawback of incorporating recycled aggregate into RHPC is the decrease in mechanical properties .

Key Words:

RHPC, recycled aggregate, valuation, strength, silica smoke.

Sommaire

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE :2

CHAPITRE I : Généralités sur le béton à haute performance

I.1 Introduction :	5
I.2 Définition :	5
I.3 Les classes de BHP	6
I.4 Principes des BHP	6
I.5 Choix des matériaux pour les B.H.P	6
I.5.1 Sélection des ciments	6
I.5.2 Les granulats	8
I.5.3 Les additions minérales :	12
I.5.4. Les adjuvants :	14
I.5.5 L'eau de gâchage	16
I.6 Formulation des BHP :	17
I.6.1 Les Méthode de formulation BHP :	17
I.6.2 Formulation d'un béton selon la méthode américaine :	18
I.7 Propriétés des BHP	19
I.7.1 Thermiques :	19
I.7.2. Résistance au feu	19
I.7.3. Durabilité	19
I.7.4. Mécaniques	20
I.7.5. Facteur influençant le comportement mécanique du BHP :	21
I.8 Avantages des BHP	22
I.8.1 Les BHP présentent des avantages en comparaison au béton traditionnel :	22
I.8.2. Avantage pour l'environnement d'utiliser un BHP	23
I.8.3. Autres avantages	23
I.9. Domaines d'application :	23
I.10. Conclusion :	24

CHAPITRE II : Le béton des Granulats recyclés

II.1 Introduction :	26
II.2 Granulats recyclés :	27
II.2.1 Déchets de la démolition	27
II.2.2 Classification [11]	31
II.3 Déchets de béton recyclé.....	32
II.3.1 Travaux de recherches sur les granulats recyclé et béton à haute performance :.....	32
II.3.2 Techniques d'amélioration de la qualité des granulats recyclés	33
II.4 Techniques et matériaux de démolition :	37
II.4.1 Techniques de démolition :	37
II.4.2 Statistique matériaux produits :.....	39
II.4.3 Élaboration des granulats de béton recyclé	40
II.5 Propriétés du béton recyclé durci :.....	43
II.5.1 Microstructure du béton recyclé :.....	44
II.5.2 Résistance à la compression :.....	45
II.5.3 Résistance à la traction par flexion et par fendage :.....	46
II.5.4 Module d'élasticité :.....	46
II.6 Propriétés mécaniques différées :	46
II.6.1 Influence du taux de substitution des GBR sur le retrait :.....	47
II.6.2 Influence du taux de substitution des granulats recyclés sur le fluage :.....	47
II.7 Propriétés liées à la durabilité :	47
II.8 Comportement au feu :.....	48
II.9 Adhérence entre armatures et bétons de GBR :	48
II.10 Conclusion :	50

CHAPITRE III : Caractéristiques des matériaux

III.1 Introduction.....	52
III.2 Les essais sur les matériaux utilisés :	52
III.2.1 Les essais physiques :.....	52
III.2.2 Les essais mécaniques :.....	57
III.2.3 Les essais chimique :.....	58
III.2.4 Ciment :.....	60
III.2.5 Fumée de silice :.....	62
III.2.6 Les adjuvants :.....	64
III.2.7 Compatibilité (ciment/ superplastifiant) et Formulation.....	67
III.2.8 Formulation des bétons	71
III.2.9 Fabrication des bétons :.....	73
III.2.10 Mise en œuvre et Malaxage	73

III.3 Essai d'écrasement :	79
III.3.1 Résistance en compression :.....	79
III.3.2 Résistance en traction.....	79
III.4 Conclusion	80
CHAPITRE IV : Résultats et Discussion	
IV.1 Introduction :	82
IV.2 Les granulats :.....	82
IV.2.1 Analyse granulométrique par tamisage.....	82
IV.2.2 Courbes granulométriques	84
IV.2.3 Caractéristiques.....	86
IV.3 Essais physico-mécaniques	93
IV.3.1 Masse Volumique à l'états durci.....	93
IV.3.2 Résistances mécaniques en compression	94
IV.3.3 Résistance de traction par flexion :.....	98
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	102
Références bibliographiques	

Liste des figures :

Figure (I. 1) Le pont de Dumbarton - San Francisco en Californie	5
Figure (I. 2) Échantillonnage par division.....	9
Figure (I. 3) Diviseur à ouvertures réglables.....	9
Figure (I. 4) Graphique et courbes granulométriques	10
Figure (I. 5) forme des granulatsE.....	10
Figure (I. 6) forme des granulats	11
Figure (I. 7) Masse volumique	12
Figure (I. 8) Béton ordinaire ; fissures d'adhérence et fissures dans le mortier.....	20
Figure (I. 9) Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés.....	20
Figure (II. 1) Différentes phases du cycle d'un matériau de construction ou d'un bâtiment. [74] ...	26
Figure (II. 2) Déchets de la démolition	27
Figure (II. 3) Déchets de bois	28
Figure (II. 4) Déchets des bardeaux de toiture	28
Figure (II. 5) Déchets de routes.....	28
Figure (II. 6) Déchets de gypse	29
Figure (II. 7) Déchets de métaux (acier et aluminium)	29
Figure (II. 8) Déchets de briques.....	30
Figure (II. 9) Déchets de verre	31
Figure (II. 10) Déchets de plastiques.....	31
Figure (II. 11) Démolition à l'aide d'une tenaille	38
Figure (II. 12) Démolition par dynamitage	39
Figure (II. 13) démolition manuelle	39
Figure (II. 14) Concasseur.....	42
Figure (II. 15) Concassage [73].....	42
Figure (II. 16) criblage des granulats	42
Figure (II. 17) Dépoussiérage.....	43
Figure (II. 18) Mortiers attachés.....	45
Figure (II. 19) Malaxage des différents constituants de béton	74
Figure (III. 1) les granulats (1-sable, 2-graviers 3/8, 3 -graviers 8/15).....	52
Figure (III. 2) Analyse granulométrique des granulats	53
Figure (III. 3) Éprouvette de mesure pour l'essai d'équivalent de sable.....	55
Figure (III. 4) Détermination des masses volumiques des granulats	56
Figure (III. 5) Préparation des échantillons pour la détermination du coefficient d'absorption et la propreté superficielle.....	57
Figure (III. 6) Essai Micro-Deval.....	58
Figure (III. 7) Essai au bleu de méthylène	59
Figure (III. 8) Ciment AL ESSES	60
Figure (III. 9) Représentation de la dose de saturation	71
Figure (III. 10) préparation des granulats recyclés.....	72
Figure (III. 11) Éprouvettes prismatiques (10x10x40)cm et cylindre (16x32)cm	73
Figure (III. 12) Malaxage à sec des différents constituants de béton.....	73
Figure (III. 13) Principe essais de consistance au cône d'Abrams	75
Figure (III. 14) Essais de consistance au cône d'Abrams	75
Figure (III. 15) Coulage et vibration du béton des éprouvettes cylindriques et prismatiques.....	77
Figure (III. 16) Mode de conservation des éprouvettes cylindriques et prismatiques.....	77
Figure (III. 17) rectifieuse des surfaces des éprouvettes cylindriques de béton.....	78

Figure (IV. 1) Courbes granulométriques de sable (0/5) et graviers (3/8 et 8/15)	85
Figure (IV. 2) Courbes granulométriques des graviers recyclés (3/8 et 8/15) (béton à base de fumée de silice Granitex)	85
Figure (IV. 3) Courbes granulométriques des graviers recyclés (3/8 et 8/15) (béton à base de fumée de silice Sika)	86
Figure (IV. 4) Résultats des essais Los-Angeles	87
Figure (IV. 5) Résultats de Essai Micro-Deval (MDE).....	88
Figure (IV. 6) Résultats des Masses volumiques apparentes (Mvapp)	89
Figure (IV. 7) Résultats des Masses volumiques absolues (Mvabs).....	89
Figure (IV. 8) Taux d'absorption d'eau (Ab %) des granulats naturels et recyclés.....	90
Figure (IV. 9) Résultats d'essai de carbonate.....	92
Figure (IV. 10) Maniabilité des différents BHP et BHPR.....	93
Figure (IV. 11) Masses volumiques des BHP et BHPR.....	94
Figure (IV. 12) Résistance en compression des BHP et BHPR à 7 et 28 jours de durcissement.....	97
Figure (IV. 13) Résistance en traction par flexion des BHP et BHPR à 7 et 28 jours de durcissement.....	100

Liste des tableaux :

Tableau (I. 1) Liste des différents types de ciments courants normalisés	7
Tableau (I. 2) Domaines d'utilisation des ciments	8
Tableau (I. 3) Caractéristiques des résistances (la norme EN 1992-1-1 :2004).....	21
Tableau (II. 1) Volume des différents types de Déchets de Construction et de Démolition [18]	40
Tableau (III. 1) Dimensions des granulats en millimètres :	54
Tableau (III. 2) Composition chimique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé.....	61
Tableau (III. 3) Composition minéralogique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé.....	61
Tableau (III. 4) Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé pour la confection des bétons	62
Tableau (III. 5) Caractéristiques de l'adjuvant utilisé (MEDAFLOW RE 25) :.....	65
Tableau (III. 6) Détermination de la dose de saturation en fonction du pourcentage de superplastifiant et le temps d'écoulement après 5 et 60 minutes.....	70
Tableau (III. 7) Composants des constituants dans 1m ³ de béton à haute performance BHP	72
Tableau (III. 8) Composition des BHP recyclés dans 1m ³ de béton:	72
Tableau (III. 9) Classes de consistance (au cône d'Abrams)	76
Tableau (III. 10) les Mode de serrage pour la confection des éprouvettes	76
Tableau (IV. 1) Résultats du tamisage de sable	82
Tableau (IV. 2) Résultats de tamisage de gravier Naturel (3/8 et 8/15).....	83
Tableau (IV. 3) Résultats du tamisage des Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Granitex) (3/8 et 8/15).....	83
Tableau (IV. 4) Résultats du tamisage des Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Sika) (3/8 et 8/15).....	84
Tableau (IV. 5) Résultats des Coefficients d'Aplatissements (A)	86
Tableau (IV. 6) Résultats des Essais Los-Angeles (LA).....	87
Tableau (IV. 7) Résultats des Essais Micro-Deval (MDE).....	88
Tableau (IV. 8) Résultats des Masses volumiques apparentes (Mvapp).....	88
Tableau (IV. 9) Résultats des Masses volumiques absolues (Mvabs).....	89
Tableau (IV. 10) Taux d'absorption d'eau (Ab %) des granulats naturels et recyclés	90
Tableau (IV. 11) Équivalent de sable avant le lavage	91
Tableau (IV. 12) Équivalent de sable après lavage	91
Tableau (IV. 13) Essai de carbonate.....	91
Tableau (IV. 14) Valeurs de l'affaissement (en cm) au cône d'Abrams des BHP et BHPR	92
Tableau (IV. 15) Détermination de la masse volumique des BHP et BHPR	93
Tableau (IV. 16) Résistance en compression des BHP et BHPR.....	95
Tableau (IV. 17) Récap des résultats obtenus pour la détermination de la résistance en compression des BHP et BHPR	96
Tableau (IV. 18) Résistance de traction par flexion des BHP et BHPR	98
Tableau (IV. 19) Récap des résultats obtenus pour la détermination de la résistance de traction par flexion des BHP et BHPR	99

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique a fait des progrès spectaculaires à partir des années 80.

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures pour réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides etc.)

Le développement au cours de la dernière décennie, de nouveaux bétons dont les caractéristique et les performances diffèrent notablement de celles des bétons couramment utilisés jusqu'alors, leur utilisation de matière d'ouvrage d'art, apportent une confirmation incontestable à l'opinion d'Albert Caquot [1] :

« L'amélioration des caractéristiques des matériaux conduira à des transformations beaucoup plus radicales que celles résultant des progrès, pourtant considérables, que vont faire, dans l'avenir, les méthodes de calcul ».

Hautes performances signifient aussi faciliter de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien.

Les clefs de ces performances sont :

- La réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants ;
- L'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité.

Les BHP ont rapidement démontré qu'ils permettaient d'offrir un potentiel de progrès extraordinaire pour la construction de bâtiments et de structures de génie civil. Ils sont désormais valorisés par d'autres performances que la simple résistance mécanique, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures. Ce concept de valorisation des performances du béton autre que la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons.

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil.

Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets.

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la l'utilisation des déchets de démolition (granulats recyclé) dans le béton hydraulique. Cela permet d'éliminer les déchets par recyclage et utilisation d'où la protection de l'environnement, et aide à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats.

Les déchets peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers des travaux publics ou encore en d'autre application dans le domaine de la construction, en particulier, comme granulats pour le béton.

L'objet principal de cette étude de recherche est de contribuer à la valorisation des granulats recyclés de déchet des bétons à haut performance dans la fabrication du nouveau béton à haut performance, cela permet donc :

D'éliminer les déchets par recyclage d'où protection de l'environnement.

Aider à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats et en particulier à l'utilisation des granulats de de démolition.

Ce mémoire se subdivise en deux grandes parties : une partie bibliographique et une partie expérimentale.

La première partie relative à une synthèse bibliographique est constituée comme suite :

Chapitre 1 :

Généralités sur les bétons, les différents constituants du béton BHP et les méthodes de formulation.

Chapitre 2 :

Généralités sur le déchet, déchets inertes et granulats recyclés ainsi que leurs valorisations dans le domaine de construction.

La deuxième partie de ce travail, à son tour est divisée en deux chapitres :

Chapitre 3 :

Destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés pour la réalisation de la partie expérimentale et Formulation des bétons à haut performance à base des granulâtes recyclés de déchet de démolition

Chapitre 4 :

Présente les résultats des essais sur le béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, suivi par l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin notre travail est terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Généralités sur le béton à haute performance

CHAPITRE I : Généralités sur le béton à haute performance

I.1 Introduction :

Les Bétons à Haute Performance ont montré qu'ils permettaient de produire un potentiel de progrès très fort pour la construction et les structures. En plus d'une simple résistance mécanique, ils sont désormais également valorisés par d'autres propriétés, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures.

Ce concept d'amélioration des performances du béton plutôt que de la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons modernes (BAP, BFUP, etc.). Le gain de résistance n'est pas le seul avantage de ces bétons, leurs propriétés découlent de leur microstructure très dense, d'une réduction significative de la porosité et d'un réseau capillaire non connecté. En effet, ces bétons sont des matériaux très compacts.

Ces propriétés sont dues à l'ajout de superplastifiants pour réduire la quantité d'eau dans l'opération, tout en maintenant une aptitude au traitement suffisante et en optimisant la distribution granulométrique des composants, et l'utilisation de poudre ultrafine pour compléter les vides du squelette des particules entre les composants. Des particules de ciment pour améliorer la compacité.

I.2 Définition :

Le béton à hautes performances est un béton avec une résistance mécanique plus élevée et une meilleure durabilité à long terme que le béton ordinaire car il est plus dense et donc imperméable à l'eau. Haute performance, c'est aussi facilité de mise en œuvre et flexibilité pour s'adapter aux contraintes d'exécution des travaux. En effet, le BHP offre également une excellente résistance à l'état frais (rhéologie, une surface Lissée...) et âge, ce qui permet par exemple d'accélérer la productivité en usine ou sur site ou de pomper des matériaux sur de longues distances. Ils confèrent une durabilité à la structure et augmentent considérablement sa durabilité en réduisant d'autant les coûts d'entretien et de maintenance.

Cette optimisation de ses performances est notamment due au dernier développement technologique des additifs, qui permet à la formulation de réduire considérablement la quantité d'eau tout en conservant une processabilité suffisante, et peut en outre utiliser des particules ultra-fines qui complètent les vides les particules de ciment améliorent la densité. Les caractéristiques du béton à hautes performances (BHP) sont :

- La résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 50 MPa ;
- Le rapport eau/liant est inférieur à 0,4. Le pont de Dumbarton - San Francisco en Californie



Figure (I. 1) Le pont de Dumbarton - San Francisco en Californie

I.3 Les classes de BHP

La classification actuelle des bétons est basée sur la résistance en compression à 28 jours.

- Un Béton Ordinaire (BO) à une résistance comprise entre 20 et 40 MPa ;
- Un Béton à Hautes Performances (BHP) à une résistance située entre 40 et 80 MPa ;
- Bétons à Très Hautes Performances (BTHP) : Pour des valeurs comprises entre 80 et 120 MPa ;
- Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP): au-delà de 120 MPa, de tel que les Bétons de Poudres Réactives (BPR).

I.4 Principes des BHP

Il faut admettre que, depuis longtemps, les progrès réalisés dans le domaine du BHP sont davantage le fruit de méthodes empiriques que de méthodes fondamentales et scientifiques. Cependant, à l'heure actuelle, les meilleures performances du BHP peuvent encore être expliquées sur la base de principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les caractéristiques du BHP en détail. En effet, tant que les matériaux utilisés pour fabriquer le BO sont aussi simples et bon marché que ceux utilisés pour fabriquer le béton BHP, la meilleure combinaison de matériaux locaux doit être recherchée pour obtenir du BHP avec le rapport eau-ciment requis.

Comme on le verra, fabriquer un BHP est une opération un peu plus compliquée que de produire un béton usuel. Les raisons en sont simples : au fur et à mesure que la résistance à la compression visée augmente, les propriétés du béton ne sont plus simplement reliées au rapport eau/liant, le paramètre fondamental qui gouverne les propriétés des bétons usuels par l'intermédiaire de la porosité de la pâte de ciment hydraté.

I.5 Choix des matériaux pour les B.H.P

Lorsque l'on choisit les matériaux pour fabriquer un BHP, certains choix sont plus critiques que d'autres. Ainsi on commencera à considérer la sélection du ciment Portland même dans le cas où d'autres ajouts cimentaires sont utilisés en conjonction avec le ciment Portland. La sélection se poursuit par celle du superplastifiant afin d'optimiser la combinaison ciment/superplastifiant.

Quand ces choix cruciaux sont faits, on évalue l'utilisation d'un ou plusieurs ajouts cimentaires. La sélection des granulats viendra par la suite puisque leur qualité devient de plus en plus critique pour augmenter la résistance à la compression du BHP.

Il n'existe pas une méthode précise pour formuler un BHP. Cette formulation dépend essentiellement de la résistance ainsi des performances visées par le BHP

I.5.1 Sélection des ciments

Les ciments utilisés pour les BHP sont en général des ciments dits à hautes performances (CPA-CEM I 52.5) dont la résistance à 28 jours sur éprouvettes de mortier normal (4x4x16cm) est en général supérieure à 60 MPa. Cependant certains ciments (CPA-CEM I 42.5) permettent d'atteindre des hautes résistances. Notons qu'on trouve actuellement sur le marché des CPJ, contenant des fumées de silice, dont l'application principale concerne les BHP. Les hautes résistances sont la plupart du temps obtenues grâce à une finesse de mouture élevée.

I.5.1.1 Types des ciments

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme ENV. 197-1). Au Clinker sont ajoutées, suivant la nature du ciment voulu, les additions minérales de différentes natures.

- Laitier granulé de haut fourneau (S)
- Pouzzolanes naturelles (Z)
- Cendres volantes (V et W)
- Fumées de silice (D)
- Calcaire (L)
- Schistes calcinés (T)

Constituants secondaires :

Les ciments courants normalisés sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne, l'ancienne appellation est indiquée entre parenthèse (voir tableau suivant). Pour chaque ciment sont indiqués les désignations propres et les pourcentages respectifs de leurs constituants.

Tableau (I. 1) Liste des différents types de ciments courants normalisés

No table of figures entries found.	Types de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I(CPA)	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
CEM II/A (CPJ) CEM II/B (CPJ)	Ciment portland compose	80 à 94% 65 à 79%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ; de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	0 à 5%
CEM III/A (CHF) CEM III/B (CHF) CEM III/C (CLK)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	/
CEM IV/A (CPZ) CEM IV/B (CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	0 à 5 %	0 à 5 %
CEM V/A (CLC) CEM V/A (CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

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

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

I.5.1.2 Domaines d'utilisation des ciments

Tableau (I. 2) Domaines d'utilisation des ciments

Ciment	Désignation	Utilisation	Contre indication
Ciment Portland Ciment composé	CEM I CEM II	-Tous travaux de béton armé -Bonne résistance -Décoffrage rapide (Préfabrication) -Bétonnage par temps froid	-Présence d'eaux agressives -Travaux souterrains -Bétonnage en grande masse
Ciment au laitier et pouzzolanique Ou laitier et cendre	CEM III CEM IV CEM V	-Béton de masse (barrage) -Béton de fondation (sol agressif) -Bétonnage en temps chaud -Eau usée -Travaux souterrains -Réservoir d'eau	-Bétonnage par temps froid -Béton préfabriqué -Résistance à jeune âge élevée

I.5.2 Les granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables graviers ou cailloux qui entrent dans la composition des bétons. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés « agrégats », cependant, cette appellation « agrégats » vieil usage tout à fait impropre.

I.5.2.1 Échantillonnage (NF EN P 18-553)

L'échantillonnage est la sélection d'une partie dans un tout qui produit une série d'échantillons à étudier.

Le terme prend un sens précis dans certaines spécialités scientifiques et techniques.

La masse de matériau nécessaire pour effectuer dans de bonnes conditions le ou les essais. Il est indispensable que cette quantité soit au moins deux fois plus grande que la masse nécessaire pour le ou les essais.

1-Échantillonnage Par quartage

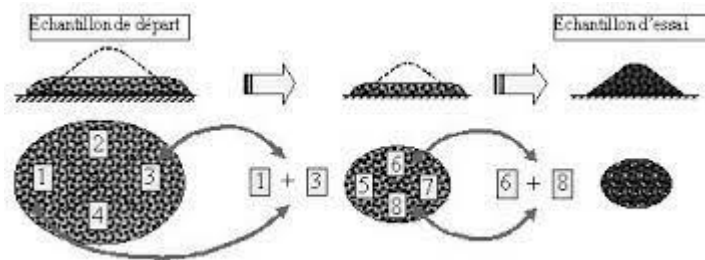
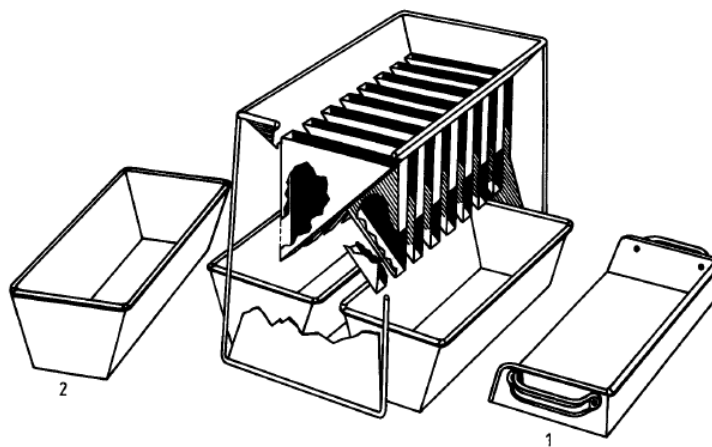


Figure (I. 2) Échantillonnage par division

2- Séparation au moyen de diviseurs :

- Verser le matériau à l'aide de la pelle dans le diviseur Figure (I. 3)
- Veiller à ce qu'il soit uniformément réparti sur toute la surface de la pelle correspondant à l'appareil utilisé.
- La largeur des couloirs doit être supérieure ou égale à $2D$, D exprimé en millimètres est la plus grande dimension spécifiée.
- S'assurer que le nombre de couloirs est pair (en obstruant au besoin l'un des couloirs extrêmes), supérieur ou égal à 14 et que leur largeur est identique.
- Si la quantité obtenue dans chaque bac est trop importante pour l'essai envisagé, recommencer l'opération avec le matériau d'un des deux bacs.



Diviseur échantillonneur à couloirs
 1 Pelle correspondante
 2 Bac

Figure (I. 3) Diviseur à ouvertures réglables

I.5.2.2 Classes granulaires :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui passée à travers le tamis et « refus » la partie qui restée sur le tamis.

Le terme « Granulats d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits à D pour les plus grands.

Les dimensions recommandées pour la définition des classes granulaires par tamisage sont les suivantes :

Pour les sables, c'est-à-dire les granulats répondant à la condition « D » ≤ 6.3 mm

0.08 – 0.16 – 0.31 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 mm

Pour les graviers : 6.3 – 10 – 16 – 20 – 25 – 31.5 – 63 et 80 mm.

À noter qu'il existe des tamis intermédiaires 40 et 50 mm qu'il est parfois indispensable d'utiliser. Le terme général « graviers » recouvre les différentes catégories définies.

I.5.2.3 Courbes granulométriques :

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique ; la suite des valeurs de D est une progression géométrique de raison. [1]

1- La forme des courbes granulométriques apporte les renseignements suivants :

- 1-1 Les d et D du granulat en question.
- 1-2 La plus ou moins grande proportion d'éléments fins ; par exemple la courbe située au-dessus de celle du sable normal correspond à un sable à majorité de grains fins (A) et c'est l'inverse pour celle située en dessous (B). En effet, ces trois sables sont des sables 0/5 mm mais les proportions de grains fins (< 0.5 mm par exemple) sont pour chacun d'eux : 25% (A), 45% (B) et 60% (C).
- 1-3 La continuité ou la discontinuité de la granularité ; par exemple, les courbes de sables (A, B, C) sont continues mais la courbe du gravier 5/31.5 (E) présente une discontinuité ; en effet le palier s'étendant de 10 à 20 mm signifie que le granula en question ne contient pas de grains compris entre 10 et 20 mm.

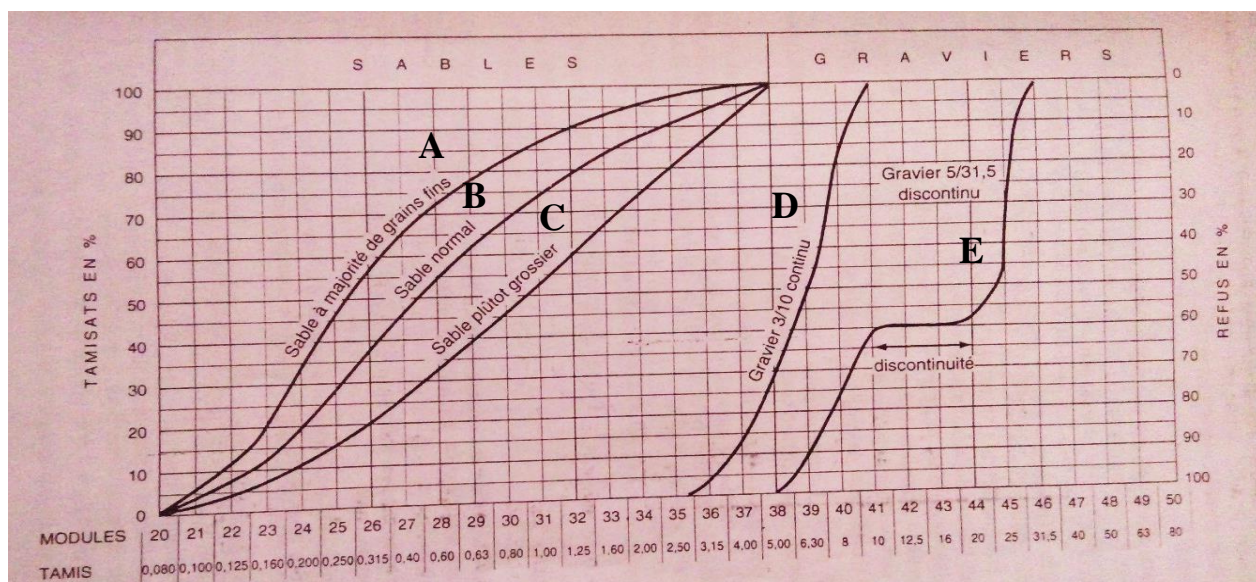


Figure (I. 4) Graphique et courbes granulométriques

I.5.2.4 Forme des granulats : Graphique et courbes granulométriques

La forme d'un granulat est définie par :

- Sa longueur L ;
- Son épaisseur E qui est le plus petit écartement d'un couple de plans tangentes parallèles ;
- Sa grosseur G .

Le coefficient d'aplatissement « A » qui caractérise donc la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur est par définition le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1.58$ (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale à travers de laquelle passe l'élément)

Le coefficient A est déterminé par un double tamisage d'abord à travers la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie puis par un second tamisage des refus retenus sur les dimensions des tamis et des grilles étant de 1.58.

La norme P18 541 Granulats pour bétons hydraulique de mai 1994 spécifie que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être : $A \leq 30\%$.

Cependant pour des ouvrages exceptionnels tels que certains bétons d'ouvrage d'air pour lesquels la résistance caractéristique du béton est supérieure à 36 MPa ou pour certains bétons de bâtiment pour lesquels la résistance du béton doit être supérieure à 60 MPa cette valeur doit être de :

$A \leq 20\%$ Pour les gravillons $D > 10\text{mm}$,
 $A \leq 25\%$ Pour les gravillons $D \leq 10\text{mm}$. [1]

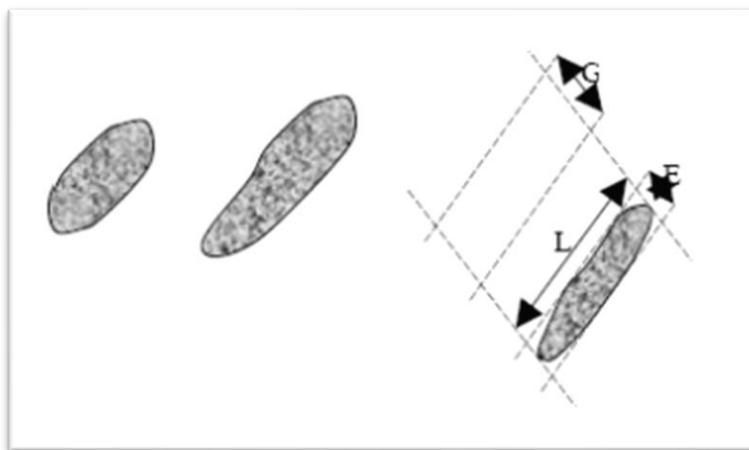


Figure (I. 6) forme des granulats

I.5.2.5 Propreté :

La norme 18 541 prohibe les impuretés telles que le charbon, les scories, les déchets de bois, brindilles, feuilles mortes, débris végétaux etc., dont le pourcentage doit être inférieur à 0,1 %.

De même les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matières organiques. Pour la propreté des gravillons, il convient d'éviter surtout la présence de la gangue argileuse ou des poussières qui risquent de compromettre l'adhérence du mortier sur les graviers.

Dans le cas des sables, la propreté (ES) est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui permet de mesurer la fraction argileuse du matériau ; L'essai consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage (plus la valeur de ES est grande, plus le sable est propre). [2]

I.5.2.6 Masse spécifique et la masse volumique :

La masse spécifique est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu).

La masse volumique est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre le constituant (volume apparent).

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des grains. Elle est comprise entre 1400 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour les granulats roulés silico-calcaires. La masse volumique réelle du granulat (vides entre grains exclus) est nettement plus élevée : de 2500 à 2600 kg/m³. [2]

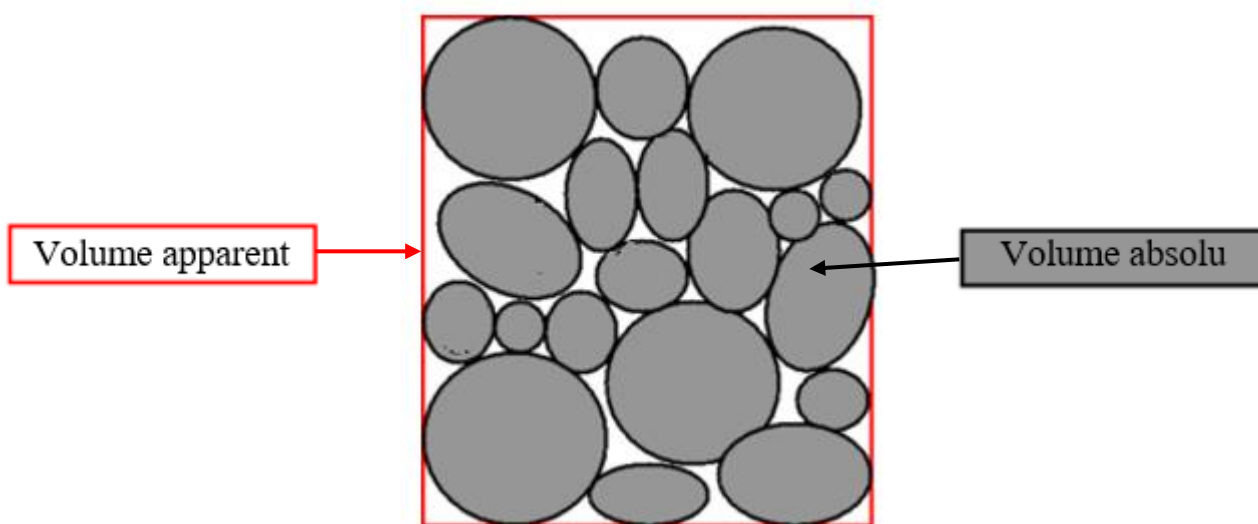


Figure (I. 7) Masse volumique

I.5.2.7 Nature et qualité :

La nature du matériau est caractérisée par la roche ou le produit constituant les grains : Basalte, porphyre, quartzite, silex, calcaire, silico-calcaire, grès, barytine, magnétite, pyrite, laitier expansé ou non, argile ou schiste expansé, ponce, etc.

Le granulat peut être un produit naturel obtenu par criblage (type roulé à grains plus ou moins arrondis) ou un produit de concassage (type concassé à grains plus ou moins anguleux).

La qualité peut être déterminée par des essais d'écrasement et d'usure. Sur le plan pratique on procède à des essais d'attrition (Los-Angeles et Micro-Deval) qui permettent de chiffrer la résistance aux chocs et à l'usure réciproque des gravillons.

I.5.2.8 Module de finesse d'un granulat :

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis de la série suivante 0.16-0.315-0.63- 1.25- 2.5- 5.

Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

I.5.3 Les additions minérales :

Ajouter une ou plusieurs additions minérales en complément ou en substitution partielle d'une certaine quantité de ciment est une alternative très intéressante du point de vue des résistances mécaniques et de la rhéologie.

I.5.3.1. Fumée de silice :

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair. [3]

La réduction du rapport eau-ciment par l'ajout d'un superplastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée – c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte. Cette zone est très poreuse et peu résistante. Sa largeur n'est que de 40 µm, mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton. L'ajout de particules extrêmement fines permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomerats. Parmi ces substances, citons notamment les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz concassé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. En raison de leurs petites dimensions et de leur immense surface spécifique, les fumées de silice sont les plus efficaces. La surface spécifique des fumées de silice oscille entre 15 000 et 25 000 m²/kg et est nettement supérieure à celle du ciment, comprise entre 350 et 500 m²/kg. Les fumées de silice disposent en outre de propriétés pouzzolaniques. Elles se lient à la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment et contribue de la sorte au développement de la résistance. [4]

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité. La résistance d'un béton obtenue grâce à un super plastifiant et à des fumées de silice peut excéder 100 MPa.

I.5.3.2 Laitier de haut fourneau :

Le laitier est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte. Lors de l'élaboration de la fonte dans le haut fourneau, il y a production de composés gazeux (gaz de haut fourneau), liquides (fonte, laitier) et solides (poussière de gaz). Ces éléments proviennent de la gangue des minerais, des cendres de combustibles et des additions siliceuses, calcaires ou magnésiennes des fondants. Les quantités de laitier par tonne de fonte sont donc déterminées par les conditions mêmes d'exploitation, et aussi par la nature des minerais.

Utilisés, les laitiers ont offert des performances aussi bonnes que le ciment Portland dans les bétons usuels et dans les BHP. [5]

I.5.3.4. Fillers (calcaire et siliceux) :

Ce sont des poudres de roche (calcaire ou siliceuse) obtenue par broyage et/ou sélection, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18-508 et 509 (NF P18-508, 12 ; NF P18-509, 12) respectivement pour les fillers calcaires et siliceux. La demande en eau des fines siliceuses telles que le quartz est supérieure à celle des fillers calcaires d'usage plus courant dans les bétons. Ceci est dû à la forme anguleuse des particules de quartz. En plus de leur effet physique, des études sur les fillers calcaires, ont montré qu'ils présentent une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du clinker par la création de sites de nucléation (germination)

hétérogène, notamment, lorsque l'addition est finement broyée. Néanmoins, l'effet n'est remarquable que seulement au jeune âge. D'après les mêmes études, le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carbo aluminates de calcium hydratés, qui sont favorables à la durabilité du matériau. À long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique.

I.5.4. Les adjuvants :

Le béton est constitué de trois ingrédients : des granulats, du ciment et de l'eau. Grâce aux adjuvants qui lui sont ajoutés, le béton peut devenir plus maniable, imperméable et se prêter d'autant mieux aux besoins de la construction. On peut même dire, que les adjuvants sont devenus le quatrième composant du béton.

Les adjuvants généralement utilisés sont soit les plastifiants réducteurs d'eau, soit les superplastifiants hauts réducteurs d'eau.

La multiplicité des composants rend extrêmement difficile la détermination de la composition optimale. Mais d'une manière générale, le dosage du ciment ne dépasse que très exceptionnellement 450 Kg/m³. La proportion de fumée de silice est de l'ordre de 5 à 10% du poids du ciment mis en œuvre. Le rapport eau-ciment est quant à lui situé entre 0,25 et 0,40. En cas de présence de fumées de silice, les adjuvants réducteurs d'eau seront indispensables pour faciliter la dispersion de ces derniers. La quantité des adjuvants tourne fréquemment aux alentours d'une dizaine de litres pour un mètre cube de béton.

I.5.4.1 Le rôle d'ajouter un adjuvant au béton :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui ajoutés à faible dose au béton (moins de 5 % du volume) vont modifier ses propriétés à l'état frais ou à l'état durci. Ils sont ajoutés au moment du malaxage.

Les adjuvants sont classés en fonction de leurs effets :

- Les retardateurs ou accélérateurs de prise ;
- Les plastifiants qui accroissent l'ouvrabilité du béton frais ;
- Les hydrofuges qui imperméabilisent ;
- Les entraîneurs d'air ;
- Les produits de cure qui protègent le béton pendant le durcissement ;
- Les agents de mouture.

I.5.4.2 Choix du superplastifiant :

Le superplastifiant est un adjuvant, introduit dans des bétons, mortiers ou coulis peu avant la mise en œuvre, il a pour fonction principale d'améliorer l'ouvrabilité du mélange sans ajout d'eau, ou de diminuer la quantité d'eau pour augmenter les résistances mécaniques sans modifier l'ouvrabilité du béton. Sa fonction secondaire est de modifier le temps de prise ou de Les superplastifiants étaient auparavant appelés (I.5.4.1).

I.5.4.3 Découverte des superplastifiants :

La découverte des plastifiants – et, plus particulièrement, de super plastifiants très puissants dans les années 1970 – a constitué un véritable tournant. L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus liquide, sans ajouter d'eau. La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en floculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces floculats sera toutefois emprisonnée. À partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de

ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des conglomérats. Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant – sous la forme de longues chaînes – renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent de la sorte leur rapprochement réciproque. Grâce aux structures de polymères modernes en forme de peigne, il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un superplastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80MPa.

I.5.4.4 Les types de superplastifiant

I.5.4.4.1 À base de mélamine

Les superplastifiants à base de mélamine peuvent être fabriqués par n'importe quel manufacturier. Ainsi, peuvent être produits sous différentes marques commerciales et leur performance sera sûrement beaucoup moins uniforme.

Les raisons de préférence de ce type de superplastifiants varient selon :

- Leur teneur en solides (dans la formulation à 22%) correspond à la moitié de celle d'un poly naphthalène ;
- Ils ne retardent pas la prise du béton ;
- Ils ont une qualité et une performance très constante ;
- Ils ne donnent pas une teinte légèrement beige aux BHP architecturaux qui sont fabriqués avec un ciment blanc.

I.5.4.2.2 À base de naphthalène

Les superplastifiants à base naphthalène sont vendus sous forme d'un liquide brun qui a une teneur totale en solides généralement comprise entre 40 et 42%.

Ils utilisent ce type de super plastifiant plutôt qu'une mélamine :

- Les poly naphthalènes ont une teneur en solide plus élevée si bien que leur emploi est plus économique pour obtenir un certain degré de maniabilité ;
- Il est facile de contrôler la rhéologie d'un BHP à cause du léger retard de prise et de durcissement qu'ils entraînent.

I.5.4.2.3 À base de lignosulfonate :

Les super plastifiants à base de lignosulfonate sont rarement utilisés de façon individuelle dans les BHP, mais plutôt en combinaison avec des mélamines ou des poly naphthalènes. Quelques producteurs de béton préfèrent introduire d'abord un super plastifiant à base de lignosulfonate au début du malaxage, en suite une polymélamine ou un polynaphthalène plus pure à la fin du malaxage ou lorsque l'affaissement du BHP doit être ajusté dans le chantier.

I.5.4.5 Effet et mode d'action du superplastifiant :

Le dosage en eau influence directement la maniabilité du béton frais et l'augmentation de ce dosage peut avoir des effets néfastes sur les propriétés du béton ; à court terme on peut signaler une perte d'homogénéité du matériau et à long terme, une diminution de la résistance mécanique et une

augmentation de la porosité sont envisageables et donc une durabilité diminuée. C'est pourquoi on a depuis longtemps fait appel à la chimie organique et plus précisément aux superplastifiant qui permettent une des réductions de dosage en eau d'environ 30% sans sacrifier la résistance du béton bien au contraire.

I.5.4.6 Influence du dosage en superplastifiant :

Pour augmenter la maniabilité d'un béton, le dosage normal des super plastifiants est compris entre 1 et 3 litres par mètre cube de béton, pour des supers plastifiants sous forme liquide contenant 40 % de matériaux actifs. Lorsque les super plastifiants sont utilisés pour réduire la teneur en eau du béton, leur dosage est beaucoup plus élevé et se situe entre 5 et 20 litres par mètre cubent de béton. Dans le cas de rapport eau/ciment très faible (BHP), pour obtenir l'affaissement désiré, il est nécessaire de rajouter une quantité de super plastifiant. Dans ce cas, on procède par une double introduction en introduisant une première quantité de super plastifiant juste nécessaire pour obtenir un béton d'affaissement de 50 à 100 mm qu'on peut malaxer convenablement et on introduit le reste à la fin du malaxage.

Lorsque l'on utilise des super plastifiants à très forts dosages, Atchin a montré que leur effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quel que soit la nature du super plastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains. Kadri a montré en étudiant l'ouvrabilité des bétons à hautes performances, que la composition chimique du ciment et en particulier la teneur en C3A, joue un rôle majeur sur la consistance du béton en absorbant les molécules de super plastifiants.

En effet, les ciments à faible teneur en C3A ont un effet favorable sur la diminution du dosage de saturation et sur la perte d'ouvrabilité au cours du temps. D'autre part, il a montré que parmi les 3 supers plastifiants considérés, le naphthalène sulfonate était supérieur en termes de dosage de saturation et maintien de la consistance du BHP au cours du temps.

I.5.5 L'eau de gâchage

Elle doit conformer à la norme NF P 18-303.

Le « gâchage » est l'opération irréversible de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage. L'eau de gâchage est la quantité totale d'eau que l'on utilise pour faire le béton. La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C du mélange.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables.

I.6 Formulation des BHP :

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

a. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- Sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- Détermination des proportions des constituants ;
- Optimisation du squelette granulaire.

b. Optimisation du mélange en laboratoire :

- Validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- Ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant ;
- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- Analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

c. Validation de la formule en centrale :

- Vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- Vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la comptabilité ;
- Vérification des caractéristiques du béton

I.6.1 Les Méthode de formulation BHP :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment [6]:

- La méthode Baron ;
- La méthode Bolomey ;
- La méthode de Féret ;
- La méthode de Faury ;
- La méthode Dreux-Gorisse.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats [6].

D'autres exigences de la norme NF EN 206-1 imposent l'emploi de ciment particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

I.6.2 Formulation d'un béton selon la méthode américaine :

Le manuel de pratique normalisé ACI 211 .1-91 décrit une méthode de formulation de béton à base de ciment Portland seul ou mélange à d'autres matériaux cimentaires et contenant aussi des adjuvants. La méthode nécessite de procéder à une première approximation des proportions du béton dans des gâchées d'essai. En fait, la méthode de la norme ACI 211.1-91 consiste en une suite logique d'étapes progressives prenant en compte les caractéristiques des matériaux utilisés [7].

I.6.2.1 choix de l'affaissement :

À l'étape de la formulation d'un béton, l'affaissement doit être déterminé par les exigences de construction. Il est à noter que l'affaissement ne devrait pas être spécifié uniquement par sa valeur minimale finale, mais également par une valeur maximale. Cette disposition est nécessaire pour éviter la ségrégation lorsque la gâchée, qui n'a pas été choisie pour avoir un affaissement plus élevé, devient soudainement trop liquide [7].

I.6.2.2 Choix de la dimension maximale du granulat :

La dimension maximale du granulat dépend habituellement de certains choix faits par le concepteur de la structure, en gardant présents à l'esprit les conditions découlant de la géométrie des éléments et l'espacement des armatures, ou parfois pour des questions de disponibilité [7].

I.6.2.3 Estimation du dosage en eau et de la teneur en air :

La quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement donné dépend de plusieurs facteurs : la dimension maximale des granulats, leur forme, leur texture et leur granulométrie ; la teneur en air entraîné ; l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau ou de plastifiants et la température du béton [7].

I.6.2.4 Choix du rapport eau/ciment :

Les deux critères du choix du rapport eau/ciment sont : la résistance et la durabilité. En ce qui concerne la résistance à la compression, la valeur moyenne visée doit dépasser la résistance minimale spécifiée d'une marge appropriée. L'expression ciment représente la masse totale des composants hydrauliques utilisés ; leur choix étant fonction de nombreux facteurs : développement de chaleur, vitesse d'évolution des résistances, résistance à différentes formes d'attaques, en sorte que le type de ciment composé doit être choisi avant l'étape du calcul de la composition proprement dite. A partir du type réel de ciment choisi, la relation entre la résistance et le rapport eau/ciment doit être établie pour une certaine plage de résistance [7].

I.6.2.5 Calcul du dosage en ciment :

Les résultats des étapes (chapitre III) donnent directement le dosage en ciment : c'est la quantité d'eau divisée par le rapport eau/ciment. Cependant, si, pour des considérations de durabilité, on exige une quantité minimale de ciment, on devra prendre en compte la plus élevée des deux.

I.6.2.6 Estimation du dosage en gros granulat :

La méthode suppose que le rapport optimal du volume en vrac des gros granulats au volume total du béton dépend seulement de la dimension maximale du granulat et de la granulométrie du granulat fin. La forme des éléments constituant le gros granulat n'entre pas directement en considération parce que, par exemple, un granulat concassé a un volume en vrac plus élevé pour une même masse (ce qui représente une masse volumique plus faible) qu'un granulat bien roulé [7].

I.6.2.7 Estimation du dosage en granulats fins :

La masse de granulats fins est de seule quantité qui demeure inconnue. Le volume absolu de cette masse peut être obtenu en soustrayant la somme des volumes absolus de l'eau, du ciment, de l'air entraîné et des gros granulats du volume de béton, qui est de 1m³.

Pour chacun des constituants, le volume absolu est égal à sa masse dans le mélange divisée par sa masse volumique (en kg/m³) ; la masse volumique absolue est la densité constituante multipliée par la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³).

Le volume absolu du granulats fins est converti en masse en multipliant son volume par la densité du granulats fins et par la masse volumique de l'eau [7].

I.6.2.8 Ajustement des proportions :

Comme dans chacune des méthodes de formulation des bétons, des gâchées d'essai doivent être réalisées. En général, il est important de se rappeler que, si la maniabilité doit être modifiée, mais sans changer la résistance, le rapport eau/ciment ne doit pas être pas modifié. On peut effectuer des modifications du rapport granulats/ciment ou, si des granulats convenables sont disponibles, de la granulométrie. Inversement, des changements de la résistance, mais non de la maniabilité, sont réalisés en modifiant le rapport eau/ciment du béton, sans modifier la quantité d'eau [7]. (valeurs [7]).

I.7 Propriétés des BHP**I.7.1 Thermiques :**

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels

I.7.2. Résistance au feu

Du fait de la structure très dense du matériau, la pression de vapeur apparaissant à l'intérieur du béton à une température excédante 100°C ne peut pas être évacuée rapidement vers l'extérieur.

C'est la raison pour laquelle la résistance du BHP se réduira de façon extrêmement rapide dans le cas où il sera confronté à une température supérieure à 100°C.

Pour y remédier, des fibres de polypropylène peuvent être ajoutées dans la composition du BHP. En effet, ces fibres fondront à cette température, laissant des petits canaux ouverts où les vapeurs pourront se dissiper plus facilement.

I.7.3. Durabilité

En relation avec sa résistance aux agents agressifs, comme la pénétration de ces substances étant évitée, les processus de dégradation y afférant ne pourront logiquement se produire que bien plus tard. De plus, le retrait et le fluage étant inférieurs à celui d'un béton usuel, la durée de vie d'une construction faite en BHP sera pérenne pendant bien plus longtemps.

I.7.3.1. Imperméabilité

Il a une très grande imperméabilité à l'air et à l'eau du fait de sa compacité plus élevée.

I.7.3.2. Résistance aux agents agressifs

L'imperméabilité du BHP du fait de leur faible porosité capillaire leur octroi une résistance élevée au transfert et à la pénétration des eaux de mer, des solutions acides, des eaux sulfatées, du dioxyde de carbone, des chlorures, etc.

I.7.3.3. Tenue aux attaques gel/dégel

En raison de leurs caractéristiques élevées en traction et leurs imperméabilités du fait de leur compacité accrue, le BHP présente une excellente résistance à l'alternance du gel et du dégel.

I.7.3.4. Carbonatation

De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel.

En effet, le réseau poreux, peu connecté limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire.

La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

I.7.4. Mécaniques

I.7.4.1. Résistance à la compression :

Étant donné que la résistance du béton dépend bien évidemment aussi de la résistance du ciment, un ciment de la classe 52,5N est la plupart du temps utilisé pour du béton à haute résistance, voire du 52,5R si une résistance initiale très élevée est souhaitée

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. À un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier.

En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage Figure (I. 8).

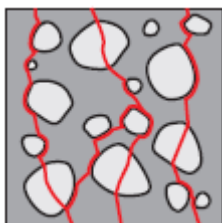


Figure (I. 8) Béton ordinaire ; fissures d'adhérence et fissures dans le mortier.

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale

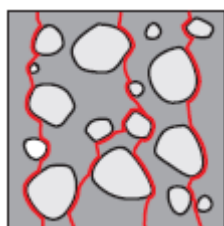


Figure (I. 9) Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés

I.7.4.2. Résistance en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au

béton conventionnel (tableau 1). Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

Tableau (I. 3) Caractéristiques des résistances (la norme EN 1992-1-1 :2004)

Résistance à compression cylindre [MPa]	Classes de résistance					
	45	50	55	60	70	80
Résistance à traction directe [MPa]	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8

I.7.4.3. Module de déformation

De même que pour les bétons usuels, le module de déformation instantané au jour j, peut être déduit de la résistance caractéristique selon la formule retenue par BAEL :

$$E_{ij} = 1100 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{BAEL A.2.1.2}) \quad \text{Eq (I. 1)}$$

I.7.4.4. Retrait

Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodissociation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10⁻⁶) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10⁻⁶).

Le retrait d'autodissociation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible

I.7.4.5. Fluage

Le fluage du béton à hautes performances – c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante – est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel

I.7.4.6. Adhérence acier-béton

Sa microstructure améliore la liaison entre les armatures et le BHP. Les qualités d'adhérence étant augmentées par rapport aux bétons usuels, les longueurs d'ancrage et de scellement peuvent être réduites.

Cette microstructure ralentira également la corrosion des armatures.

I.7.5. Facteur influençant le comportement mécanique du BHP :

I.7.5.1. Influence du rapport E/C

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle :

* l'une physique qui confère au béton ses propriétés rhéologiques,

* et l'autre chimique qui contribue au développement des réactions dites d'hydratation.

En effet, pour un mélange granulaire sec, l'ajout d'eau agit tout d'abord comme un lubrifiant entre les particules qui ont le plus de facilité à glisser les unes sur les autres et à se placer de façon optimale ; Mais les ciments ne le permettent pas d'une part, parce que les particules de ciment présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées et ont alors tendance à flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau. D'autre part, la réaction d'hydratation se développe aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau. Jouant une fonction rhéologique qui permet d'assurer la maniabilité du béton frais, l'idéal serait tout de même que la quantité d'eau nécessaire à la rhéologie du béton soit strictement celle nécessaire à l'hydratation du ciment. En effet, si la quantité d'eau nécessaire pour une hydratation complète est de 25 à 30 % de la masse de ciment, près du double de cette quantité est nécessaire pour obtenir une maniabilité suffisante sans adjuvantation (47% en pratique).

De multiples recherches ont montré l'effet bénéfique d'une diminution du rapport E/C sur le développement des résistances mécaniques du béton.

I.7.5.2. Influence du volume en gros granulats

Le volume en gros granulats est un facteur de deuxième importance quant à la résistance à la traction. Pour une quantité de pâte de ciment donnée, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20%, il y a une diminution graduelle de la résistance à la traction alors que, entre 40 et 80%, on constate une augmentation de celle-ci.

L'explication la plus probable de ce comportement provient du fait qu'une plus forte teneur en granulat contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulats et pâte de ciment. De même le pourcentage de vides par rapport au volume total est plus faible et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.[13]

I.7.5.3. Influence du type de granulats

L'influence de la minéralogie et des propriétés mécaniques (résistance à la traction, résistance à la compression, énergie de rupture et module d'élasticité) d'un certain nombre de gros granulats sur la résistance mécanique et les propriétés élastiques des bétons.

Concernant la nature minéralogique des granulats, les auteurs apportent que les bétons qui contenaient du granite et du quartz avaient des résistances en compression et en traction plus importantes que les bétons qui contenaient du calcaire et du marbre.

L'utilisation des granulats de basalte dans le béton à hautes performances améliore la résistance à la traction par fendage de 10% par rapport à leurs homologues calcaires. Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il faut porter une attention particulière à la nature du gros granulat lors de sa sélection. Ainsi ces études favorisent l'utilisation de granulats durs et résistants pour l'obtention des BHP.

I.8 Avantages des BHP

I.8.1 Les BHP présentent des avantages en comparaison au béton traditionnel :

- En termes de résistance

Résistance élevée à la compression, ce qui permet de réduire les quantités de béton nécessaires

Résistance élevée à l'état frais, ce qui permet d'augmenter la vitesse des travaux

- En termes de durabilité

La durabilité de ce matériau permet son utilisation dans des environnements hostiles (Résistance aux agressions extérieures)

La durabilité permet de limiter l'entretien et les frais de maintenance

I.8.2. Avantage pour l'environnement d'utiliser un BHP

Chaque fois que l'on utilise un BHP à la place d'un béton usuel, il est facile de démontrer que l'on utilise de façon beaucoup plus efficace le pouvoir liant du ciment portland. Le rapport eau/liant élevé des bétons usuels conduit à fabriquer un matériau poreux ayant une microstructure et une durabilité particulièrement faible. Puisque la production du ciment portland consomme beaucoup d'énergie et dégage pratiquement autant de CO₂ que de ciment produit, fabriquer et utiliser un béton de rapport E/C élevé est un geste de gaspillage d'une matière première à très haut contenu énergétique.

Pour s'en convaincre, il suffit de comparer le coût de tous les matériaux nécessaires pour supporter une certaine charge dans un élément structural en béton usuel ou en BHP. En construisant avec un BHP, on utilise finalement beaucoup moins de ciment et moins de granulats pour reprendre les mêmes efforts structuraux.

I.8.3. Autres avantages

Rapidité de la rotation des coffrages (résistance élevée au jeune âge).

- Diminution des délais de mise en charge des structures (précontrainte accélérée).
- Diminution des sections et des densités de ferrailage et augmentation des portées (Résistance finale élevée).
- Mise en œuvre facilitée grâce à la fluidité (zones fortement ferrillées, pompage sur grande distance, Amélioration des parements). Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Élévation du module d'élasticité avec diminution du fluage

I.9. Domaines d'application :

Les caractéristiques du béton et sa souplesse permettent de répondre aux diverses exigences qu'imposent tous les types d'ouvrage.

Le BHP offre un certain nombre de nouvelles possibilités, notamment la possibilité de réaliser des constructions plus élancées. C'est un atout qui est déjà matérialisé dans les ouvrages d'art tels que les ponts, les tunnels, les monuments mais également les ouvrages ayant une envergure conséquente comme les buildings et les échangeurs autoroutiers.

Du fait de leur résistance aux agressions chimiques, les ouvrages d'assainissement et les ouvrages situés dans les milieux agricoles ou industriels sont réalisables en BHP.

Le BHP peut tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. Les espaces intérieurs pourront être alors agrandis puisque la portée des poutres qui est généralement limitée à 6 m pourra être portée à 7 ou 8 m. Cette évolution changera bien évidemment les façades usuelles ainsi que la disposition des pièces.

I.10. Conclusion :

Les différentes caractéristiques des BHP offrent plusieurs avantages par rapport aux bétons usuels, les BHP, comme tous les autres matériaux, ont encore des points faibles. En outre, il existe et il va toujours exister de nombreux cas où un béton de 20 à 30MPa sera le béton idéal. Influencent leurs propriétés mécaniques pour répondre à des besoins particuliers : le développement des BHP n'éliminera pas l'utilisation des bétons usuels. Du point de vue du matériau, un BHP est simplement un béton qui a une très faible porosité, cette dernière s'obtient en utilisant beaucoup moins d'eau de gâchage que dans les bétons usuels, de telle sorte que, dans la partie liante du béton, les particules de ciment et d'ajouts cimentaires sont plus rapprochées les unes des autres que dans un béton usuel.

Les propriétés mécaniques des BHP ne peuvent pas être déduites de la connaissance de la résistance à la compression comme c'est le cas pour les bétons usuels. En un sens, chaque BHP est unique, cette unicité provient de la composition du liant, du rapport eau/liant utilisé et des caractéristiques mécaniques des granulats, spécialement celles des gros granulats. Étant donné que les BHP agissent comme de véritables matériaux composites, il est normal que les caractéristiques de la pâte de ciment hydraté, de la zone de transition et des granulats. De nombreuses découvertes et de nombreux développements se produiront sûrement dans le domaine du béton ; ils seront la conséquence d'un effort de recherche qui tentera de lier la science et la technologie du béton, parce que, en dépit de sa complexité, le béton est un matériau qui, comme tous les autres matériaux, obéit aux lois de la physique, de la chimie et de la thermodynamique, mais aussi aux lois du marché.

CHAPITRE II

Le béton des granulats recyclés

CHAPITRE II : Le béton des Granulats recyclés**II.1 Introduction :**

L'accroissement de la population sur la planète et l'augmentation générale du niveau de vie moyen des habitants entraînent une augmentation de la production des biens de consommation, engendrant parallèlement un flux de déchets de plus en plus important.

L'accumulation de ces déchets, dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, pose de grands problèmes à nos sociétés de consommation car ces derniers polluent l'environnement et occasionnellement créent des dégâts dans les milieux vivants. Par ailleurs, cette activité débordante de production, consomme des ressources naturelles et de l'énergie et met donc en danger l'économie de certains pays. En effet, la réduction des réserves exploitables de granulats naturels et la prévision d'une diminution de la production de ces granulats ont pour conséquence la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton.

Depuis des années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de rebuts de fabrication de produits en béton et de déchets divers ne sont pas ou très peu utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil.

Toutefois, leur perspective d'utilisation dans des produits de résistance mécanique peu élevée est grande moyennant quelques précautions d'emploi. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Notre objectif, dans ce premier chapitre, est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur les granulats qui ont fait l'objet de recherche comme substitut de granulats naturels. Cette synthèse met en avant l'origine de ces granulats et aussi présente les performances des bétons confectionnés avec ces granulats recyclés. [8]

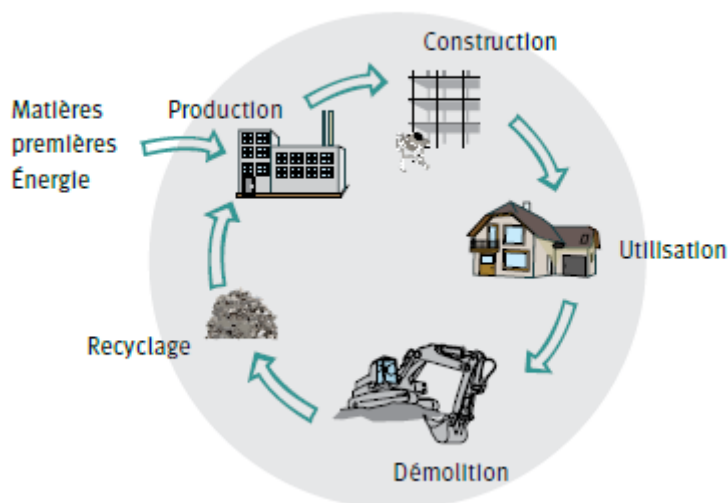


Figure (II. 1) Différentes phases du cycle d'un matériau de construction ou d'un bâtiment. [74]

II.2 Granulats recyclés :

II.2.1 Déchets de la démolition

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.



Figure (II. 2) Déchets de la démolition

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres 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. Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron.

Différents déchets récupérer de chantiers :

II.2.2.1 Déchets de béton

Les déchets de béton générés par la fabrication ont plusieurs origines : déchets de béton frais, déchets de béton durci, rebuts de fabrication et retours de chantiers. Ils peuvent être réintégrés in situ (usine de préfabrication ou unité de production de béton prêt à l'emploi) pour la fabrication de nouveaux produits, ou recyclés une fois durcis, sans nécessité de tri complémentaire, dans des installations de concassage. [9]

Le tri, une étape obligée

Un tri est indispensable pour séparer les bétons des autres matériaux (plâtre, PVC, armatures, ...) lors de la déconstruction de bâtiments ou d'infrastructures, puis lors du traitement des déchets sur les plateformes de tri et de regroupement. Les techniques de tri s'améliorent régulièrement et les démarches de déconstruction sélectives devraient se systématiser toujours davantage. Le diagnostic déchets avant déconstruction, désormais obligatoire pour les bâtiments importants, participe à cette optimisation de la qualité du tri. [10]

II.2.2.2 Déchets de bois (des bâtiments)

Le bois manufacturé représente la plus grande partie du bois que nous utilisons et qui se termine toujours en déchet. Il n'est pas réutilisable principalement en raison des produits de protection, de conservation ou d'habillage (peinture et vernis...) qui sont utilisés pendant toute sa vie. Ses seules réutilisations, de façon marginale, sont les panneaux de particules que l'on obtient la aussi avec de la colle et des produits injectés.

Le bois en fin de vie devrait être pour destruction, en centrale spécifique comme le demande certains textes officiels, mais ce n'est qu'un rêve de le croire. Il est très souvent brûlé soit dans vos cheminées soit dans les centrales où les produits nocifs sont soit éjectés dans l'atmosphère, soit stockés sans réutilisation en décharge (sauvage ...) et cela rarement pour le bien de notre santé.



Figure (II. 3) Déchets de bois

II.2.2.3 Déchets d'asphalte (provenant des routes et des bardeaux de toiture)

Le terme générique « Déchets d'asphalte ou déchets bitumineux » est consacré pour désigner les déchets de démolition routière parmi lesquels se trouvent des enrobés, revêtements et liants hydrocarbonés.



Figure (II. 5) Déchets de routes



Figure (II. 4) Déchets des bardeaux de toiture

II.2.2.4 Déchets de gypse (le composant principal des cloisons sèches)

Dans le domaine de la construction durable, l'utilisation de matériaux issus du recyclage est un atout précieux que l'industrie du plâtre s'efforce de promouvoir efficacement. Grâce à un processus maîtrisé de calcination, tout matériau à base de plâtre peut réintégrer la chaîne de production sous forme de matière première pour la fabrication de plaques ou de blocs de plâtre. Ce processus, aussi appelé recyclage en boucle fermée, peut se répéter de manière infinie sans altération de la qualité des produits finis, car le plâtre est un matériau recyclable à 100%.



Figure (II. 6) Déchets de gypse

II.2.2.5 Déchets de métaux

Les déchets métalliques suivent un long chemin pour finalement revenir à un aspect « utile ». Triés avec soin par le consommateur et déposés dans le site stockage, nos déchets en acier et en aluminium sont promis à une seconde vie. Ses déchets sont ensuite collectés auprès des particuliers puis acheminés vers un centre de tri de collecte sélective, où ils vont être de nouveaux triés. Les déchets métalliques sont séparés du flux de déchets grâce à un overband électromagnétique ou à aimant permanent pour les déchets en acier et grâce à un courant de Foucault pour les déchets en aluminium.

Une fois séparés les déchets en acier et en aluminium sont broyés puis passent dans un four à basse température pour éliminer les impuretés, laque, vernis, étiquettes.



Figure (II. 7) Déchets de métaux (acier et aluminium)

II.2.2.6 Déchets de briques

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel. Figure (II. 8)



Figure (II. 8) Déchets de briques

II.2.2.7 Déchets de verre

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m^3 par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C .

Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours.

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulats pour le béton.

Les additifs font varier les propriétés physiques et mécaniques du verre. Néanmoins, il garde tout de même des caractéristiques générales : isolant (très faible conductivité thermique et électrique), dur (difficile à percer et à rayer), étanche aux gaz, aux liquides, résistant à la chaleur, facilement stérilisable, inerte chimiquement, transparent.

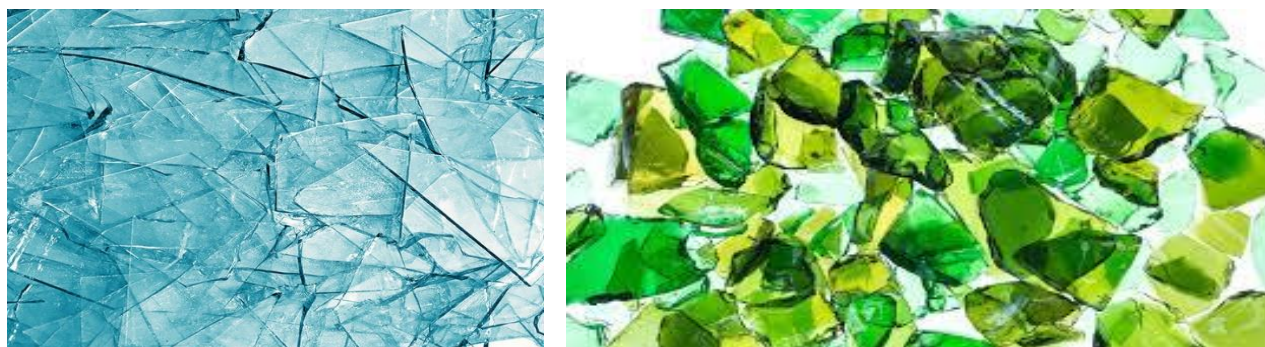


Figure (II. 9) Déchets de verre

II.2.2.8 Déchets de plastiques

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets fins (principalement trouvé dans la filière de la plasturgie).

Les déchets de production : ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisations, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PS, PVC).

Les déchets de transformation : ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage...).

On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine.fig.2



Figure (II. 10) Déchets de plastiques

II.2.2 Classification [11]

On peut classer les déchets résultants des vieux bâtis en deux classes :

- Déchets non inertes
- Déchets inertes

III.2.2.1 Déchets inertes

Ce sont des déchets minéraux non pollués et non dangereux : bétons, tuiles et céramiques, briques, déchets de verres, terres et granulats non pollués et sans mélange, enrobés bitumeux sans goudron... Ces déchets sont recyclés ou réutilisés.

III.2.2.2 Déchets non inertes (non dangereux)

Ce sont des déchets assimilables aux ordures ménagères en nature, mais en proportions différentes (papier, plastique, bois, verre, textile...) et des déchets minéraux non inertes (plâtre, matériaux d'isolation). La moitié de ces déchets est recyclée, récupérée, incinérée ou mise en décharge.

II.3 Déchets de béton recyclé

Le recyclage du béton de ciment est un groupe de technologies utilisées pour récupérer les déchets inertes du béton, par exemple, lors de la démolition de structures en béton. Le recyclage du béton, auparavant transporté par camion vers des décharges, est une alternative de plus en plus précieuse. Il présente de nombreux avantages environnementaux à l'heure où les problèmes environnementaux approchent.

Chaque année, le secteur de la construction génère 300 millions de tonnes de déchets peu ou pas valorisés, le recyclage des déchets est donc une bonne alternative à la mise en décharge.

II.3.1 Travaux de recherches sur les granulats recyclé et béton à haute performance :

Nous dépendons dans cette étude des nombreux travaux comme béton à haute performance des granulats recyclés et propriétés des effets secondaires sur les caractéristiques sur le béton à haut performance....

Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons. Les résultats obtenus justifient une analyse fine de l'adaptation des méthodes de formulation pour obtenir des bétons de granulats recyclés de propriétés équivalentes à celles des bétons de granulats naturels. Par la suite, il sera nécessaire à la mise en œuvre des bétons de granulats recyclés formulés avec des adjuvants. En particulier le recours systématique à la suppression des éléments fins pourra être évité par l'ajout de superplastifiants et permettre ainsi de conserver ces fines qui peuvent avoir un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques. [8]

Utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton Préfabriqué : comparaison des exigences réglementaires et Techniques en Europe, L'utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton préfabriqué est encore peu fréquente sur le plan industriel, et ce malgré les nombreuses recherches menées sur ce sujet. Dans l'Union Européenne, les déchets générés par le secteur de la construction constituent environ un tiers de l'ensemble des déchets produits et représentent le flux principal de déchets en termes de volume.

La norme européenne EN 13369 :2018 relatives aux produits préfabriqués en béton limite également le taux de substitution à 50% lorsque la source des granulats recyclés n'est pas connue. Par contre, cette norme permet un taux de substitution de 100% lorsque les granulats recyclés proviennent de la même usine de produits préfabriqués, moyennant la vérification des caractéristiques du béton et de la résistance mécanique du produit par des essais en laboratoire et grandeur nature. [12]

Analyse d'images par réseaux de neurones profonds appliquée à la détermination de la composition de granulats recyclés, D'ici 2020, les états membres de l'Union Européenne devront recycler au moins 70% de leurs déchets inertes et non-dangereux issus du BTP. Les granulats issus

du concassage de ces déchets sont de différentes natures (béton, granulats bitumineux, pierres naturelles, terre cuite, verre, bois, plastique, etc.).

Une méthode d'analyse d'images par réseau de neurones profond (RNP) a été mise au point afin de déterminer la composition des granulats recyclés (GR). Après apprentissage sur une base de données de plus de 18000 images de granulats, notre réseau atteint une performance de plus de 95%. À l'avenir, ces méthodes de caractérisation des GR permettront d'améliorer leur qualité et leur réemploi. [13]

- Influence de la nature des granulats recyclés sur les propriétés des bétons, L'objectif de ce travail expérimental est l'étude de l'influence de la nature des granulats recyclés (fins et grossiers) sur les propriétés des bétons ordinaires sans adjuvants, en substituant les granulats naturels par les granulats recyclés avec différents pourcentages volumiques de : 0, 15, 30, 50 et 100 %.

Les résistances caractéristiques des différents bétons recyclés sont généralement satisfaisantes, elles remplissent donc les exigences de l'Eurocode 2 pour le béton ordinaire. La substitution des granulats naturels par les recyclés, à un pourcentage de 30%, limite trouvée dans la littérature, dans la composition du béton n'a pas influencé ces propriétés mécaniques et le taux de substitution du gravier recyclé peut atteindre les 50%. [14]

- Impact de la présence de granulats et de sables recyclés sur le développement des propriétés du béton depuis la prise. Les granulats constituent le squelette des bétons et sont, de ce fait, intensivement utilisés pour la fabrication de béton. Cependant, cette ressource est loin d'être inépuisable et est inégalement réparties à travers le monde. Une solution à ce problème est l'utilisation de granulats recyclés au lieu de granulats naturels.

La présence de granulats ou sable recyclé induit une forte réduction des déformations endogènes, du module d'élasticité et de la résistance durant le durcissement des bétons. Un calcul élastique de l'entrave des déformations libres montre que l'utilisation de gravier et de sable recyclé diminue le risque de fissuration de structure en béton (et plus particulièrement avec des graviers recyclés) ce qui souligne l'intérêt de l'utilisation des granulats recyclés pour les bétons de masse. [15]

II.3.2 Techniques d'amélioration de la qualité des granulats recyclés

En synthèse des travaux examinés à la section précédente, il est observé que la pâte de ciment est le point faible dans les granulats recyclés de béton. Pour améliorer les granulats recyclés de béton, il faut d'es lors, réduire la quantité de pâte de ciment ou améliorer ses propriétés. Cette partie explique différentes solutions pour améliorer la qualité des granulats recyclés.

Différentes méthodes de séparation entre les granulats naturels et la pâte de ciment existant et se basent sur des principes soit mécanique, soit chimique, soit physique. Ces méthodes se fondent sur la différence de propriétés entre les granulats naturels et la pâte de ciment ou sur la zone de transition interfaciale qui présente une grande porosité [8]. Pour commencer, les méthodes de séparation entre les deux constituants des granulats recyclés de béton sont expliquées et, ensuite, une méthode améliorant les caractéristiques de la pâte de ciment.

II.3.2.1 Méthodes mécaniques

II.3.2.1.1 Séparation par chocs

La méthode de séparation par chocs se base sur l'essai Los Angeles qui consiste à étudier la résistance des granulats en les fragmentant dans un cylindre contenant des boulets en acier. L'efficacité de cette méthode dépend de la quantité de granulats à traiter, du nombre de boulets utilisés, de la vitesse de rotation du cylindre et de la durée du traitement. Pour avoir une séparation efficace, il suffit d'augmenter le temps de traitement mais cette méthode est fortement "énergivore" [1].

II.3.2.1.2 Séparation par abrasion

La méthode de séparation par abrasion se base sur l'essai micro-Deval qui consiste à mesurer l'abrasion des granulats en mettant le matériau dans un récipient rempli d'eau et de billes d'acier. Le récipient est, ensuite, mis en rotation pour abraser le matériau teste. Cette méthode dépend également de la durée de traitement mais est moins efficace que la séparation par chocs. Malgré cela, la séparation par abrasion a pour avantage de garder les granulats naturels non fragmentés [8].

II.3.2.2 Méthode chimique

La méthode chimique se base sur la différence de résistance à l'acide des granulés naturels et de la pâte de ciment. Le traitement consiste à plonger les granulats recyclés de béton dans une solution acide afin de dissoudre au moyen d'une réaction acide-base la pâte de ciment et de rincer les granulats obtenus après traitement pour enlever toute trace d'acide. Néanmoins, il est nécessaire de faire attention à la nature de l'acide utilisé et à la nature des granulats naturels car ces derniers, pouvant être calcaires, peuvent également être détériorés si l'acide utilisé est puissant. Il est conseillé d'utiliser l'acide salicylique lorsque les granulats naturels sont calcaires [59].

II.3.2.3 Méthodes thermiques**II.3.2.3.1 Haute température**

La méthode de traitement à haute température consiste à chauffer les granulats afin que trois phénomènes permettent la séparation entre la pâte de ciment et les granulats naturels [8]. Les trois phénomènes sont les suivants :

Écaillage par gradient thermique : La température de la surface des granulats recyclés de béton est à haute température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus basse ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

Écaillage par pression interne L'eau présente dans les pores des granulats recyclés passe sous forme gazeuse grâce à l'augmentation de température. Une partie de cette vapeur d'eau ne pouvant s'échapper, monte en pression et induit des pressions internes qui fissurent la pâte de ciment.

Perte des propriétés mécaniques de la pâte de ciment La pâte de ciment perd ses propriétés mécaniques à haute température et se détériore ce qui libère les granulats naturels.

II.3.2.3.2 Basse température

La méthode de traitement à basse température repose sur les actions liées au cycle gel-dégel. Les granulats recyclés de béton sont d'abord saturés puis sont exposés à plusieurs cycles gel-dégel [8]. Les cycles gel-dégel vont mettre à contribution deux phénomènes qui sont :

Écaillage par gradient thermique La température de la surface des granulats recyclés de béton est à basse température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus élevée ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

Augmentation de volume de l'eau L'eau en présence dans les pores passe de la phase liquide à la phase solide. L'eau est le seul élément qui, en passant de sa forme à sa forme solide, augmente son volume. Le volume des pores étant fixe, l'augmentation de volume de l'eau engendrent des contraintes internes qui provoquent l'éclatement de la pâte de ciment.

II.3.2.4 Autres méthodes

II.3.2.4.1 Traitement par vibrations ultra-sonores

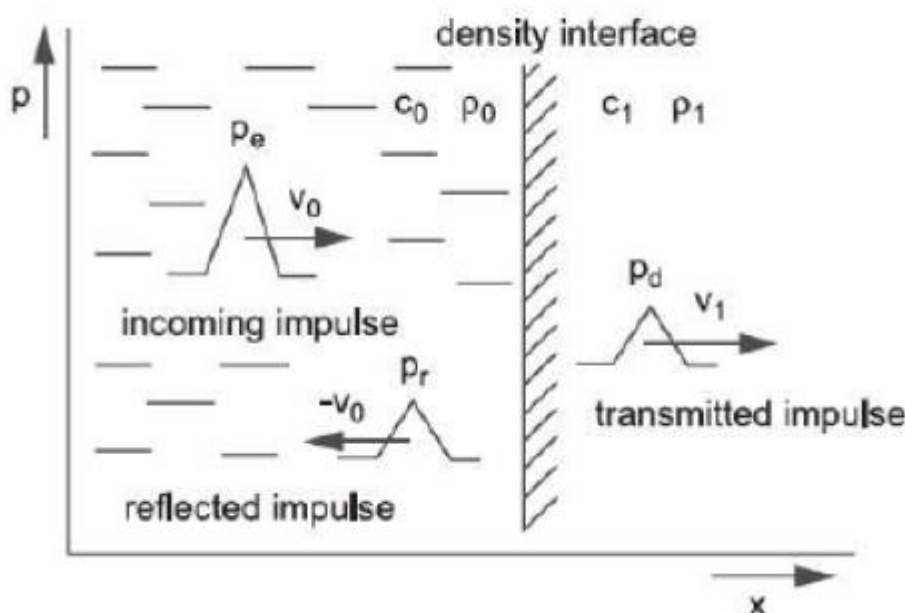


fig.2. 1 Principe du traitement par vibrations ultra-sonores [16]

Le traitement par vibrations ultra-sonores se base sur la propagation des ondes sonores a haute fréquence et aux interférences se créant à l'interface de deux matériaux de natures différentes . Au niveau de la zone de transition interfaciale c'est-à-dire la zone de transition entre le granulat naturel et la pâte de ciment, une partie des ondes est réfléchi et des interférences se créent. Ces interférences créent des pressions et, d'es lors, des contraintes qui fissurent la plaque de ciment au niveau de la zone de transition ce qui permet d'enlever la plaque de ciment. La **Error! Reference source not found.** illustre le principe de ce traitement.

Pour optimiser cette méthode, il est conseillé d'avoir une répartition régulière des ondes autour des granulats recyclés ce qui permet d'améliorer l'efficacité du traitement et a rendre la d'gradation des granulats naturels d'origine. Cette technique donne de meilleurs résultats que les méthodes de concassage au moyen de broyeur mais dépend fortement de la taille des granulats traites. Par contre, cette méthode consomme une quantité très importante d'énergie [16].

II.3.2.4.2 Traitement par micro-ondes

Le traitement par micro-ondes est plus a considérer comme un pré-traitement qu'un traitement en lui-même car il est a` relui avant le concassage traditionnel. Le principe de cette méthode se base sur la différence de sensibilité aux micro-ondes de la pâte de ciment et des granulats naturels constituant les granulats recyclés de béton. Il y a alors des gradients de température qui se créent dans les granulats recyclés qui vont engendrer des contraintes et créer des micro-fissures dans la pâte de ciment. De plus, si de l'eau est présente dans les pores des granulats recyclés de béton, This eau va chauffer et passer de sa phase liquide `sa phase gazeuse qui créera des contraintes supplémentaires puisque la vapeur d'eau a` une masse volumique plus grande que l'eau liquide. L'avantage de ce traitement est qu'il dégrade moins les granulats naturels comparé au traitement a` haute température classique puisque la durée du traitement est plus courte et la température est moins élevée. Il faut noter que ce traitement est plus efficace en présence de granulats grossiers que de granulats recyclés fin [16].

II.3.2.4.3 Traitement par jet hydraulique

Le traitement par jet hydraulique se base sur la technique de l'hydrodémolition qui consiste à l'utilisation d'un jet d'eau sous pression dans le but de détacher le béton des armatures d'acier du béton Armé. La pression du jet d'eau varie normalement entre 200 et 3000 bars [8]. Cette méthode repose sur deux principes :

Impact Le jet d'eau sous haute pression entre en contact avec les matériaux ce qui libère une grande quantité d'énergie sur une petite zone. Cette énergie provoque de grandes contraintes sur les matériaux qui se désagrègent.

Pression dans les pores Lorsque le matériau traité est poreux, l'eau sous pression s'engouffre dans les pores et crée des contraintes au sein de ce dernier. Ces contraintes vont entraîner la destruction du matériau. *fig.2. 2 Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité*

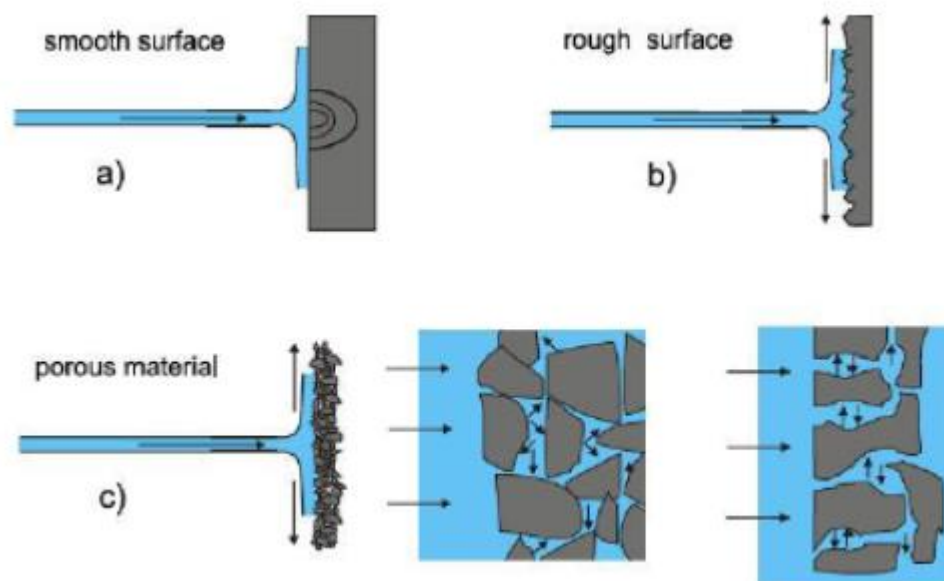


fig.2. 2 Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité [16]

Ce traitement dépend de la pression utilisée ainsi que la distance entre le matériau traité et la buse. Il est nécessaire de bien régler ces paramètres afin de ne pas endommager les granulats naturels si l'énergie à dissiper est trop grande.

II.3.2.4.4 Électro-fragmentation

L'électro-fragmentation consiste à faire passer un courant électrique dans un matériau multiphasique. Le courant électrique, en passant à travers le matériau, polarise les différents constituants. La polarisation dépend de la nature des constituants. Un déséquilibre entre les charges positives et négatives se crée à l'interface entre les granulats naturels et la pâte de ciment et provoque la création locale de plasma. Cette création de plasma est accompagnée d'une dilatation thermique qui provoque une onde de choc radial et libère les granulats naturels de la pâte de ciment [16].

II.3.2.5 Carbonatation forcée

La carbonatation forcée est une technique qui permet d'améliorer les propriétés de la pâte de ciment constituant les granulats recyclés de béton. Elle se base sur une réaction naturelle se trouve

entre la matrice cimentaire du béton et le CO₂ présent dans l'air. La concentration en CO₂ dans l'atmosphère varie généralement entre 0,03% et 1%. La limite basse est d'application dans les milieux ruraux et la limite haute peut être atteinte dans des villes fortement polluées. L'augmentation des rejets en CO₂ ne fait qu'augmenter les valeurs de concentration vers la hausse [17].

Les différentes étapes de la réaction chimique entre le CO₂ et la pâte de ciment du béton sont expliquées ci-dessous [17]

La carbonatation a pour conséquence sur le béton de diminuer son PH de 13 à 8 à cause de la diminution de portlandite et de diminuer la porosité. La première conséquence a un effet néfaste sur les bétons armés et précontraints car la diminution du PH détruit la couche protectrice d'oxyde de fer créée autour des armatures d'acier lorsque le PH était élevé et empêchait ceux-ci de se corroder en présence d'oxygène et d'eau. Par contre, la seconde conséquence a un effet bénéfique pour le béton puisqu'elle diminue la porosité de ce dernier. En effet, les produits de la réaction de carbonatation ont un plus grand volume molaire que les réactifs ce qui entraîne une réduction des pores dans le béton. Il a donné le volume molaire de la portlandite et du carbonate de calcium. Cette diminution de porosité entraîne une augmentation de la résistance mécanique.

Dans le cadre des granulats recyclés de béton, seule la seconde conséquence a un impact puisque les armatures sont éparées du béton pour le processus de recyclage. Dès lors, la carbonatation a un impact uniquement positif sur les granulats recyclés de béton puisqu'elle permet de diminuer la porosité de la pâte de ciment et d'améliorer ses propriétés mécaniques. Afin d'accélérer le processus de carbonatation, il faut contrôler l'humidité relative des granulats traités et augmenter le temps de traitement et la concentration en CO₂.

II.4 Techniques et matériaux de démolition :

Les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique... Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable.

Le Projet National RECYBETON n'a pas engagé de recherches spécifiques sur les différentes techniques de démolition, ni sur leur incidence vis-à-vis des propriétés des granulats. Il a cependant prévu un état de l'art portant sur les règlements et les types de démolition en vigueur. Il a également réalisé une étude sur la variabilité des propriétés des GBR actuellement produits en France, à la fois sous les aspects géographiques (comparaison de 16 plateformes de recyclage) et temporels (suivi de 2 plateformes pendant 24 mois).

II.4.1 Techniques de démolition :

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition :

- la surface de travail disponible ;
- l'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;
- l'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- l'emplacement du chantier de démolition ;
- le volume de démolition ;
- le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en oeuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage.

II.4.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main :

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lente et coûteuse, mais elle permet un bon tri si elle est bien faite. [18]



Figure (II. 11) Démolition à l'aide d'une tenaille

II.4.1.2 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés :

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, BRH sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent. [18]

II.4.1.3 Démolition par dynamitage :

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets inertes pouvant être recyclés. Cette étape est primordiale, car si le tri n'a pas été fait avant le foudroyage, tous les déchets seront mélangés. Ces techniques nécessitent également une expertise et une bonne connaissance en matière de structure des bâtiments. Elle est généralement utilisée pour les bâtiments où les techniques de démolition classiques ne peuvent être appliquées en raison de la taille du bâtiment, du niveau de risque ou du manque d'efficacité des techniques classiques. [18]



Figure (II. 12) Démolition par dynamitage

II.4.1.4 Autres procédés de démolition :

D'autres techniques de démolition peuvent impliquer des procédés plus anciens comme le perçage, le forage ou l'abattage par câbles, mais aussi plus récents comme les méthodes thermiques où les matériaux sont fusionnés pour être séparés les uns des autres, ou encore des procédés électriques ou chimiques.



Figure (II. 13) démolition manuelle

II.4.2 Statistique matériaux produits :

Les volumes de Déchets de Construction et de Démolition produits en France en 2014 sont présentés par nature dans le Tableau 2-3-1, établi à partir des indicateurs du Service de l'Observation et des Statistiques [SOeS, 2017] [19] .

Tableau (II. 1) Volume des différents types de Déchets de Construction et de Démolition [18]

DCD inertes 2017 (données de l' enquête S0eS de 2014)		
Nature des déchets	Quantité totale de Déchets produits ($\times 10^6$ t)	Pourcentage %
Béton	19.1	9.0%
Briques, tuiles, céramique et ardoise	4.2	2.0%
Verre	0.2	0.1%
Mélanges bitumineux dépourvus de goudron	11.2	5.3%
Pierres et terre non polluées	114.8	54.4%
Autres matériaux de démolition de chaussées	37.5	17.8%
Ballast de voie non polluées	2.2	1.0%
Déblais de dragage non pollués	2.8	1.3%
Autres déchets inertes	1.1	0.5%
Mélanges de déchets inertes	18.1	8.6%
Total déchets inertes	211.2	100%

II.4.3 Élaboration des granulats de béton recyclé

II.4.3.1 Concassage :

Selon la taille, les GBR sont plus ou moins formés de grains qui contiennent du granulat naturel mélangé à du mortier. Belin et al., 2014 [20] ont montré que la quantité de pâte de ciment résiduelle dépendait notamment de la teneur en pâte initiale et de sa porosité, ainsi que de la qualité mécanique de l'interface entre le granulat naturel et la pâte de ciment initiale. Haase et Dahms, 1998 [21] ont montré que, pour une même taille de grains, les GBR issus d'un béton parent peu résistant contiennent une plus faible teneur en mortier résiduel. Ils ont expliqué ce fait par la présence d'une auréole de transition de moindre qualité, qui favorise la séparation du granulat et du mortier pendant le concassage, en laissant les grains rocheux plus propres. Toutefois, pour un béton parent de bonne qualité, l'impact négatif du mortier peut être partiellement compensé par une meilleure résistance et une plus forte compacité du mortier, ainsi que par une (ancienne) auréole de transition de meilleure qualité. Ce constat a été confirmé par les valeurs Los Angeles obtenues avec des GBR de différentes masses volumiques.

Un certain nombre d'études ont montré également que, d'une manière générale, la quantité de mortier présent dans les gravillons de GBR diminue avec l'augmentation du nombre de concassage Fleischer et Rubby, 1999 [22]; de Juan et Gutierrez, 2009 [23]; Florea et Brouwers, 2013 [24]; Akbarnezhad et al., 2013b [25]. L'effet d'un second concassage sur la réduction de la teneur en mortier des GBR semblent être plus important pour les coupures de grandes tailles que pour la fraction 4/8 mm. Akbarnezhad et al., 2013b [25] ont observé que, quel que soit le nombre de

concassage, la teneur en mortier des GBR augmente en général concomitamment à la résistance à la compression du béton parent.

L'absorption d'eau diminue significativement aussi, et linéairement avec le nombre de concassage. Noguchi et al., 2011 [26] ont publié des résultats où l'absorption d'eau des GBR de granularité 5/10 mm passe de 8 à 4 % entre 0 (aucune) et 3 concassages, et de 6 à 3 % pour des GBR de tailles supérieures à 10 mm. Nagataki et al., 2004 [27] ont utilisé une combinaison de concasseurs à mâchoires et à percussion, suivie de deux broyages mécaniques, afin de minimiser le mortier adhérent de trois formules de béton de résistance à la compression de 28, 49 et 61 MPa à 28 jours respectivement. Après deux concassages, l'absorption d'eau des GBR de classe 5/20 mm passe alors de 6,3, 5,6 et 4,9 % respectivement à 3,8, 3,2 et 3,1 % respectivement. En comparant le comportement de bétons formulés avec deux classes de GBR à un béton formulé avec des granulats naturels, Pedro et al., 2014 [28] ont observé une perte de performances liée à la durabilité, plus importante que la perte de performances mécaniques. Cependant, les GBR produits en deux concassages.

Concasseur à mâchoires puis concasseur à marteaux – donnent de meilleurs résultats que lorsque les GBR sont obtenus par un concassage à mâchoires uniquement, car le mortier adhérent est réduit par le double concassage.

Il convient de noter que le mortier adhérent n'est pas toujours le principal paramètre qui détermine la qualité des gravillons de GBR Nagataki et al., 2004. [27] Un gravillon gréseux utilisé dans le béton parent présente des défauts (fissures, pores et vides) qui disparaissent après deux concassages. Les propriétés des GBR augmentent par conséquent. Ce fait a été confirmé par Ogawa et Nawa, 2012, [29] qui ont observé que les concasseurs à mâchoires diminuaient peu le taux de défauts du granulat, alors que des modifications plus significatives sont observées lors d'un traitement avec un broyeur à boulets ou un granulateur. En outre, les caractéristiques géométriques sont faiblement modifiées après plusieurs concassages répétés dans un concasseur à mâchoire, alors que les grains sont plus arrondis dans un broyeur à boulets et dans un granulateur.

Akbarnezhad et al., 2013 [25] ont constaté que la teneur en mortier du béton de GBR dépendait de la taille du granulat naturel dans le béton parent. Ils ont montré que le concassage du béton jusqu'à une taille maximale proche de celle du granulat d'origine conduit à une teneur en mortier plus faible. Belin et al., 2014 [20] ont observé qu'un béton parent à base de granulats arrondis produit des GBR à plus faible teneur en pâte résiduelle qu'un béton parent à base de granulats concassés. Ceci s'explique par une auréole de transition un peu plus faible mécaniquement lorsque les granulats naturels sont lisses et arrondis de Larrard, 1999). [30]

Si les traitements répétés des gravillons de GBR diminuent leur teneur en mortier adhérent, ils réduisent considérablement aussi leur taux de récupération et, donc, augmentent la proportion de sable et de fines de GBR. Noguchi et al., 2011 [17] estiment que la proportion de gravillons dans le produit élaboré passe de 50 % à 20 % lorsque le nombre de concassages passe de 0 à 3. Parallèlement, la proportion de fines qui en résultent passe de 5 % à 12 % environ.

Enfin, des études récentes plus fondamentales sur le concassage du béton sont proposées dans la littérature. Il s'agit par exemple d'expériences avec des sphères Tomas, 1999 [31] ou des disques Neveu, 2016 [32] de bétons modèles soumis à des impacts et étudiés individuellement par simulations numériques selon la méthode des éléments finis (MEF) Takahashi et Ando, 2009 [33]. [18]



Figure (II. 15) Concassage [73]



Figure (II. 14) Concasseur

II.4.3.2 Criblage :

Peu d'informations sont données dans la littérature sur les particularités liées au criblage des GBR. On peut noter cependant que l'élimination des fractions les plus fines ou les plus grosses permet d'améliorer la concentration en granulats de béton dans la fraction restante. En effet, la distribution des différents composants d'un GBR peut varier. Un exemple industriel est donné par Asakura et al., 2010 [34]. Ils ont analysé la fraction 0/5,6 mm d'un mélange de DCD après plusieurs étapes de traitement, dans 5 usines de recyclage au Japon. Dans cette coupure, les particules de bois sont plus grosses que les grains inertes denses, alors que les matières organiques et le gypse sont plus fins. Comme le gypse est principalement présent dans la fraction fine des DCD, la quantité de gypse peut alors être réduite en éliminant la fraction fine des DCD (Montero et al., 2010 [35]).

Les GBR sont plus sensibles à la fragmentation que les granulats naturels (voir chapitre 3). Ainsi, le criblage des GBR peut produire de la fragmentation. Schouenborg et al., 2004 [36] ont montré que la quantité de matériau passant au tamis de 8 mm augmentait avec l'énergie de tamisage des GBR. Ils ont comparé l'effet d'un criblage manuel et d'un criblage mécanique après 2, 5 et 10 min.

La quantité de passant a augmenté de 3, 4,5, 6,5 et 8,5 % respectivement.

L'augmentation était négligeable pour un granulats naturel de référence (0,2 %).



Figure (II. 16) criblage des granulats

II.4.3.3 Dépoussiérage :

Le recyclage des GBR obtenus par broyage/criblage peut être amélioré si les éléments fins sont éliminés Huang et al., 2002 [37]. La composition de cette fraction est difficile à contrôler et, entre autres artefacts induits, elle contient un pourcentage plus élevé de contaminants Asakura et al., 2010 [34]. La méthode de dépoussiérage la plus courante est le traitement par voie humide. Cependant, le lavage génère des eaux polluées et des boues, qu'il est difficile de recycler davantage. L'alternative peut être le recours à un procédé de dépoussiérage à sec après concassage, si l'humidité des GBR le permet.

Les contraintes techniques du dépoussiérage des GBR secs sont proches de celles des granulats naturels concassés. La séparation des fractions les plus fines du sable alluvial bénéficie du contraste de taille entre les fines (inférieures à 0,1 mm) et la dimension inférieure de la coupure. Cet avantage n'existe pas (ou peu) pour les granulats concassés car leur granularité présente une certaine continuité autour de la dimension basse de la coupure Champeau et Potin, 2003 [38]. Par ailleurs, la technologie sèche est confrontée à plusieurs difficultés supplémentaires : la dimension basse de la coupure est fixée généralement à une valeur un peu supérieure à celle du produit élaboré, en raison d'une moindre efficacité par rapport à la voie humide ; les fines s'agglomèrent, ce qui crée un effet parasite néfaste. Néanmoins, nombre d'informations tirées de la littérature montrent qu'il est possible de procéder au dépoussiérage par voie sèche Cazacliu et Huchet, 2016 [39]. Les technologies adaptées sont soit le criblage mécanique Pettingell, 2008 [40]; Meinel, 2010 [41] soit la séparation à l'air qui fonctionne en introduisant le matériau dans une chambre où circule un flux d'air ascendant Johansson, 2014 [42].

Il faut toutefois noter que le cas des sables de GBR n'est pas complètement similaire à celui des sables naturels concassés. En effet, les grains de GBR ont une minéralogie mixte (roche, béton, brique, etc.) et une composition hétérogène (pâte de ciment et éléments rocheux pour les grains de béton concassés, par exemple). Pour certains systèmes, ces différences peuvent améliorer l'efficacité du procédé de dépoussiérage, alors qu'elles peuvent la réduire pour d'autres.

L'un des rares équipements bien adaptés, spécialement conçu pour les granulats recyclés, est présenté dans Lotfi et al., 2014 [43]. Il combine un concasseur par attrition et un système de soufflerie capable de séparer les GBR humides en fraction fine et en fraction grenue (technologie ADR). Dans l'exemple présenté, la récupération des fractions inférieures à 4 mm dans la fraction 4/16 mm est proche de 20 %.



Figure (II. 17) Dépoussiérage

II.5 Propriétés du béton recyclé durci :

Les questions abordées dans cette partie pour chaque propriété à l'état durci sont les suivantes :

- les GBR jouent-ils un rôle spécifique ?
- quels sont les mécanismes impliqués ?
- les méthodologies et les essais habituels, utilisés pour les bétons de granulats naturels, sont-ils adaptés au béton de GBR ?
- quelles sont les conditions requises pour produire des bétons de GBR ayant des propriétés similaires à celles des bétons de granulats naturels ?

II.5.1 Microstructure du béton recyclé :

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés d'un mélange de granulats naturels plus ou moins recouverts de pâte de ciment ou de mortier durcis. Dans un béton de résistance normale, la présence de cette ancienne pâte carbonatée et poreuse peut modifier les mécanismes régissant la formation de l'auréole de transition (AT) existant à l'interface entre le granulat et la pâte de ciment.

La conséquence peut être alors l'apparition d'une microstructure spécifique entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment.

L'auréole de transition est la zone située à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment dense. Plusieurs auteurs ont étudié en détail la microstructure de l'auréole de transition et les mécanismes de sa formation. Cette zone est caractérisée par un gradient de microstructure : la porosité augmente progressivement, en allant de la pâte de ciment compacte jusqu'à la paroi des grains. Cette microstructure résulte principalement de « l'effet de paroi » exercé par le granulat (gros) sur les particules de ciment (fines). En raison de cet effet, à la périphérie du granulat, dans la pâte de ciment, la teneur initiale en eau augmente et la teneur initiale en ciment diminue. L'épaisseur initiale de la zone perturbée par « l'effet de paroi » est de l'ordre de plusieurs dizaines microns (épaisseur initiale de l'auréole de transition). Durant le durcissement, en raison d'un remplissage de la porosité par les produits d'hydratation, l'épaisseur de l'auréole de transition diminue généralement. Durant cette période, un mécanisme de transfert des produits hydratés (Portlandite notamment) s'instaure entre les zones riches et pauvres du ciment. Il induit la formation d'un « film duplex » riche en Portlandite, de quelques microns d'épaisseur, qui peut s'observer à la surface des grains.

Le béton recyclé, en termes de microstructure, se distingue des bétons de granulats naturels par la présence de deux générations de pâte de ciment : celle, adhérente aux GR, qui provient de l'ancien béton dont le concassage a produit les granulats recyclés, et celle qui provient de l'hydratation du nouveau ciment ajouté aux GR pour constituer le béton de seconde génération. La figure (Figure I.5) ci-dessous montre la co-existence de ces deux pâtes, et leur bonne liaison mécanique.

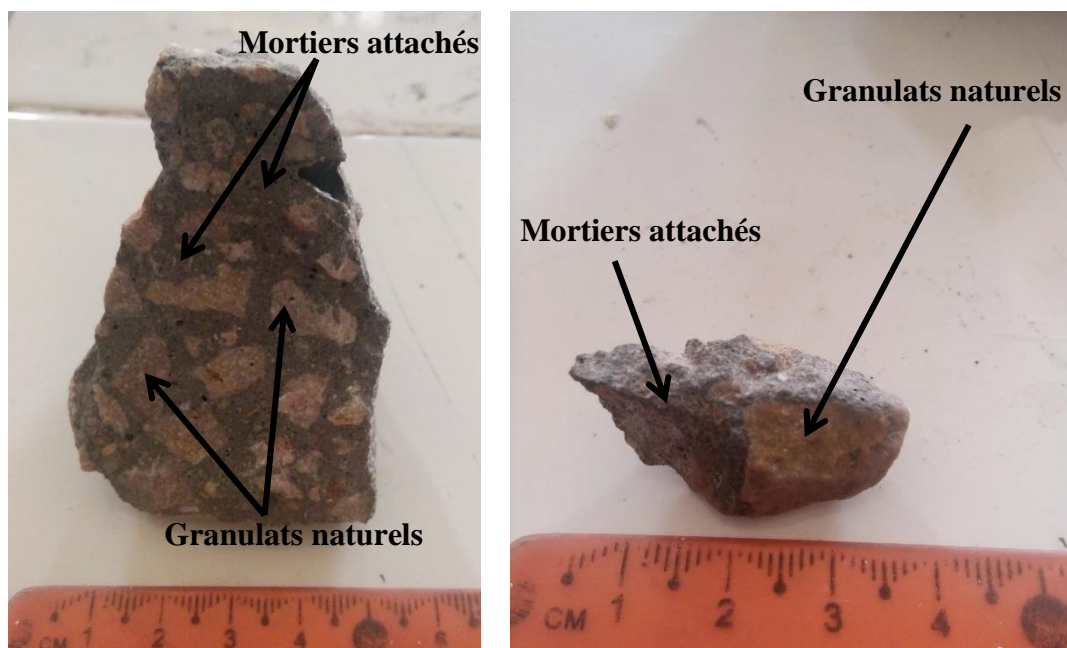


Figure (II. 18) Mortiers attachés

II.5.2 Résistance à la compression :

En raison de leur nature composite, les granulats de béton recyclé (GBR) présentent des propriétés mécaniques différentes, souvent, mais pas toujours, inférieures à celles des granulats naturels (GN). Les propriétés mécaniques des bétons sont alors influencées lorsque les granulats naturels sont substitués par des GBR.

De nombreux articles décrivant l'influence de l'incorporation des granulats de béton recyclé (GBR) sur la résistance à la compression des bétons sont disponibles dans la littérature. Pourtant, il est difficile d'en tirer des conclusions univoques, pour différentes raisons :

- les bétons de GBR sont toujours comparés à des bétons de référence à base de granulats naturels, mais le choix du granulats naturel peut relativiser l'influence du GBR. En d'autres termes, le même GBR aura un impact différent si le granulats naturel qu'il remplace possède d'excellentes ou de moyennes qualités mécaniques ;
- différentes stratégies sont adoptées pour comparer le béton avec différents taux de recyclage : elles considèrent soit le même rapport eau totale/ciment (E_{tot}/C), soit le même rapport eau efficace/ciment (E_{eff}/C), soit encore la même maniabilité ce qui mène à différents rapports E_{eff}/C ;
- enfin, l'influence du GBR, de même que celle du granulats naturel, dépend de sa forme, de sa taille, de ses propriétés mécaniques, etc.

L'effet attendu d'un GBR sur la résistance à la compression :

- l'augmentation du taux de GBR conduit généralement à une diminution de la résistance à la compression, à même E_{eff}/C .
- La diminution peut être amplifiée si l'on garde le même dosage en ciment et la même maniabilité, car l'introduction de GBR peut également entraîner une augmentation de la demande en eau ;

• la moindre qualité mécanique des GBR, par rapport aux granulats naturels, explique l'essentiel de la diminution des performances. Effectivement, les granulats naturels sont produits à partir de

roches dont la résistance à la compression dépasse généralement 50 MPa, alors que les GBR sont généralement obtenus par concassage de bétons dont la résistance est inférieure à cette valeur. Pour un taux de recyclage donné, la diminution de la résistance à la compression est toutefois moindre si les GBR proviennent d'un béton parent ayant une résistance à la compression importante. Par exemple, les GBR provenant de bétons à ultra hautes performances (BUHP) peuvent être recyclés dans des BUHP, sans différences significatives par rapport à des granulats naturels. [18]

II.5.3 Résistance à la traction par flexion et par fendage :

Les études réalisées concernant la résistance en traction des bétons recyclés présentent des résultats légèrement différents les uns des autres. Si toutes indiquent une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard, certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% [Rao 2005] et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours Ajdu 2002 [44]. Ces auteurs ont également constaté que l'utilisation de divers adjuvants, tels que la fumée de silice par exemple, permet d'améliorer les performances du béton recyclé.

De la même manière que pour la résistance à la compression, il a été constaté que sur le long terme (5 ans), le gain de performance en traction d'un béton recyclé est clairement meilleur que celui d'un béton naturel. [Gomez 2002] [45]

II.5.4 Module d'élasticité :

Différents auteurs se sont intéressés à la question du module d'élasticité, et tous sont d'accord pour dire qu'il se situe entre 50 et 70% du module d'élasticité d'un béton naturel, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais il a été montré que cette porosité diminue avec le temps [Gomez 2002] [45] et donc que la différence de module d'élasticité s'amenuise. [18]

II.6 Propriétés mécaniques différées :

Les déformations différées du béton sont réputées induire un risque important de fissuration et de déformation des ouvrages. Les déformations différées sont principalement le retrait et le fluage. Dans le cadre du Projet National RECYBETON, des essais dédiés ont été effectués sur béton pour deux taux de substitution des granulats naturels par des granulats de béton recyclé (GBR) (30 % et 100 %). Les résultats obtenus, complétés par ceux de la littérature, montrent que le retrait et le fluage sont généralement plus importants lorsque des GBR sont incorporés au béton, en raison de la présence d'un plus grand volume de pâte de ciment. Des différences dans la microfissuration de peau ont été observées très localement, mais les essais de fluage en flexion trois points montrent que les comportements sont similaires entre les différents bétons. Il est donc difficile de distinguer le béton naturel du béton de GBR à l'échelle macroscopique. Deux types de modélisation ont été développés pour décrire les mécanismes associés au retrait et au fluage. Pour le retrait, la modélisation a été menée à l'échelle macroscopique sur matériau homogène ; elle montre que les dommages les plus sévères apparaissent au niveau de la peau des bétons soumis à la dessiccation. Pour le fluage, les simulations ont été réalisées à l'échelle mésoscopique en prenant en compte la présence de l'ancien mortier adhérent ; elles ont permis de mieux comprendre l'influence des GBR sur la localisation des microfissures. Des essais de fatigue ont également été réalisés. Ils montrent que l'endurance du béton diminue légèrement lorsque des GBR y sont introduits.

II.6.1 Influence du taux de substitution des GBR sur le retrait :

L'influence du taux de substitution des granulats naturels par des GBR sur le retrait à long terme du béton a déjà fait l'objet de nombreux travaux Hansen et Boegh, 1985 [46]; Tavakoli et Soroushian, 1996b [47] ; Sagoe-Crentsil et al., 2001 [48]; Gomez-Soberon, 2003 [49]; Katz, 2003 [50]; Domingo-Cabo et al., 2009 [51]; Fathifazl et al., 2011b [52]; Dao, 2012 [53]; Manzi et al., 2013 [54]; Pedro et al., 2014 [28]. Les résultats montrent que les bétons de GBR présentent un retrait augmenté de 15 à 60 %, selon le taux de substitution. Toutefois, la plupart des études n'ont pris en compte que la substitution des gravillons.

Ce phénomène s'explique par l'absorption d'eau élevée des gravillons de GBR, qui sont des matériaux très poreux en raison de la présence de l'ancien mortier adhérent (aux grains du granulats d'origine), et dont le taux a été estimé par Domingo-Cabo et al., 2009 [51] à 31,5 % et 18 % pour les classes 4/8 et 8/20 respectivement. À 28 jours, pour les bétons ayant un taux de substitution de 20 %, la différence avec le béton à base de granulats naturels est faible, alors qu'après 6 mois, elle atteint 4 %. En revanche, pour des taux de substitution de 50 % et 100 %, l'augmentation du retrait est de 12 % et 70 %, respectivement.

II.6.2 Influence du taux de substitution des granulats recyclés sur le fluage :

Pour une charge permanente égale à 40 % de la résistance à la compression de l'éprouvette, la déformation de fluage du béton de GBR, pour des taux de substitution compris entre 20 à 100 %, est supérieure de 35 à 51 % respectivement à celle du béton de granulats naturels témoin. Le fluage conduit à la relaxation des contraintes élastiques et, par la suite, à la diminution des contraintes de traction en cas de retrait empêché ACI 224R-01, 2001. [55] Fan et al., 2014 [56] ont étudié l'effet de l'ancien mortier adhérent aux granulats sur les caractéristiques de fluage des bétons de GBR. La teneur en GBR, le module d'élasticité et les caractéristiques de l'ancien mortier sont responsables de cette différence. Sur la base de ces paramètres, les auteurs ont adapté le modèle de Neville Neville et al., 1983 [57] pour prédire le fluage du béton recyclé.

Selon l'étude de Gomez-Soberon, 2002 [45], les caractéristiques et la composition des bétons de GBR influent sur le comportement mécanique à court et à long terme des bétons. En particulier, le fluage de dessiccation est significativement affecté, comparativement à celui du béton de granulats naturels, du moins lorsque le taux de substitution dépasse 30 %.

II.7 Propriétés liées à la durabilité :

La durabilité est aussi un des aspects essentiels de la réutilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans un nouveau béton.

De nombreuses études antérieures ont montré que les GBR sont plus poreux que les granulats naturels et qu'ils peuvent, de ce fait, altérer les propriétés de durabilité des bétons.

Les propriétés de durabilité étudiées sont celles liées aux risques de corrosion des armatures (carbonatation, migration des chlorures, perméabilité à l'air, porosité), à la résistance aux cycles de gel/dégel, à la réaction alcali-silice et à la présence de sulfates.

Les résultats montrent que la porosité accessible à l'eau n'est pas un indicateur de durabilité suffisant à lui seul pour caractériser le risque de corrosion. Il est plus pertinent de considérer aussi le coefficient de diffusion des chlorures et la résistance du béton à la carbonatation.

De façon prévisible, les GBR modifient les propriétés de transfert du béton, selon leur porosité, le taux de substitution et la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton. En optimisant la formulation (diminution du rapport E/L notamment), on peut cependant obtenir des bétons aussi résistants que les bétons constitués uniquement de granulats naturels.

La résistance au gel des GBR dépend des caractéristiques du béton parent. Les bétons de GBR résistent donc aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçats dès lors que les GBR sont intrinsèquement résistants au gel et que les règles de formulation habituelles (teneur en liant, rapport E/L, teneur en air entraîné, etc.)

II.8 Comportement au feu :

L'incorporation de granulats de béton recyclé (GBR) dans le béton est l'une des voies pour obtenir des bâtiments plus durables. Aujourd'hui, les diverses propriétés des bétons de GBR sont mieux caractérisées, ce qui contribue à leur utilisation dans les projets de construction. Cependant, leur comportement au feu n'a fait l'objet que de recherches limitées.

Jusqu'à présent, peu de travaux se sont intéressés aux performances des bétons à base de granulats de béton recyclé (GBR) soumis à des températures élevées Cree et al., 2013 [58]. Lorsque le béton est chauffé, divers phénomènes apparaissent, telle la dilatation des granulats, le retrait de la pâte de ciment, l'augmentation de la pression de vapeur d'eau, la fissuration ou l'écaillage...

Les GBR contiennent non seulement des granulats naturels de différentes minéralogies, mais aussi du mortier qui leur confère des propriétés différentes de celles des granulats naturels : ils sont plus poreux, leur coefficient d'absorption d'eau est plus élevé et ils contiennent des hydrates. De plus, les bétons de GBR possèdent en général deux auréoles de transition, l'une située entre le mortier et le granulats naturels originels, l'autre située entre le GBR et la nouvelle pâte de ciment Liu et al., 2011 [59]. Ces auréoles de transition sont réputées être des zones de faiblesse, en termes de propriétés mécaniques notamment Behera et al., 2014 [60]; Scrivener et al., 2004 [61].

Les travaux recensés concernant les bétons de GBR soumis à des températures élevées proposent des conclusions variées Zega et Di Maio, 2006 [62]; Sarhat et Sherwood, 2013 [63]; Vieira et al., 2011 [64]; Eguchi et al., 2007 [65]; Zega et Di Maio, 2009 [66]; Xiao et Zhang, 2007 [67]; Liu et al., 2016 [68]. Comme pour les bétons de granulats naturels exposés à de fortes chaleurs, les bétons de GBR présentent eux aussi une altération de leurs propriétés mécaniques, par rapport à leurs propriétés initiales :

- selon les études, les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de granulats naturels et des bétons de GBR sont souvent différentes ;
- comme pour les granulats naturels, les GBR provenant de bétons de granulats calcaires présentent de meilleures résistances résiduelles que les GBR provenant de bétons de granulats de silice.

II.9 Adhérence entre armatures et bétons de GBR :

L'adhérence acier/béton est une propriété importante qui contrôle les performances des ouvrages armés. Les premières recherches concernant l'effet des granulats de béton recyclé (GBR) sur l'adhérence acier/béton ont été publiées par Xiao et Falkner Xiao et Falkner, 2007 [69]. À l'aide d'essais d'arrachement direct, les auteurs ont étudié deux types d'armatures (lisses ou HA) et trois taux de substitution des gravillons naturels par des gravillons de GBR (0 %, 50 % et 100 %). Ils ont constaté qu'à mêmes quantités de ciment et de sable, et à même rapport eau/ciment, l'adhérence entre armatures lisses et bétons de GBR diminue lorsque le pourcentage de substitution en gravillons

augmente, alors qu'il est invariant pour les armatures HA, malgré la plus faible résistance à la compression des bétons de GBR.

Ont aussi étudié l'influence de la substitution des gravillons naturels par des gravillons de GBR sur l'adhérence acier-béton. Comme précédemment, ils ont conclu qu'il n'y a pas de différence significative d'adhérence entre bétons traditionnels et bétons de GBR.

Prince et Singh, 2013 [70]; Prince et Singh, 2014 [71] ont étudié l'adhérence à l'aide de 90 essais d'arrachement direct réalisés avec des barres d'acier crénelées de diamètre 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm et 25 mm, encastrées au centre d'éprouvettes de béton de GBR. Les mêmes formules de béton ont été utilisées avec des taux de substitution en gravillons de GBR de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. Les auteurs ont observé une légère augmentation de l'adhérence, proportionnelle au taux de substitution, en expliquant que ce résultat pouvait être dû à une cure interne apportée par les GBR. Ils ont proposé que la longueur d'ancrage des barres crénelées soit la même, tant pour les bétons de GBR que pour les bétons de granulats naturels.

II.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les différents processus de recyclage des déchets de construction et de démolition, en mettant l'accent sur les déchets de béton. Nous avons rappelé l'impact des différentes méthodes de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclés dans la fabrication de nouveaux bétons. Nous comprenons les critères qui limitent l'incorporation de granulats recyclés. Ensuite, nous avons examiné l'effet de la carbonisation sur les granulats de béton recyclés.

Les propriétés physiques et chimiques du granulat de béton recyclé sont importantes pour connaître son effet et son interaction avec le nouveau béton recyclé.

Les études sur les résidus de démolition ont commencé après la Seconde Guerre mondiale. Actuellement, la valorisation de ces déchets a dépassé le stade expérimental et connaît un développement assez important dans certains pays, notamment dans le secteur routier. Le type et la qualité des déchets de construction et de démolition varient d'un pays à l'autre et leur recyclage est plus environnemental qu'économique.

La meilleure méthode de démolition est le démantèlement sélectif, plus coûteux, mais garantissant un gravier de bonne qualité.

L'absorption d'eau et la résistance mécanique extrêmement élevées des granulats recyclés ont entravé leur utilisation dans le béton structurel, et on pense qu'elles ont des conséquences négatives sur la durabilité, des études insuffisantes et un manque de normes spécifiques.

Les granulats recyclés préparés au niveau du laboratoire sont meilleurs que les granulats naturels envoyés de la carrière, selon la finesse du grain ou la continuité des courbes granulaires.

Les granulats recyclés se caractérisent principalement par la présence hétérogène de vieux mortier de ciment associé au granulat. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécaniques de ces agrégats dépendent du volume et de la qualité de cette suspension. Cela a compliqué la caractérisation précise de ces agrégats.

Les propriétés intrinsèques et mécaniques des granulats recyclés dans cette recherche sont nettement inférieures à celles des granulats naturels, ils peuvent être classés en qualité moyenne. Ceci est dû à la présence de pâte de ciment fixée sur des granulats recyclés, qui est poreuse et friable, et à la nature des granulats naturels précédemment utilisés, d'une part, et à la décomposition du béton détruit du fait de maladies comme la carbonatation.

CHAPITRE III :

Caractéristiques des matériaux

CHAPITRE III : Caractéristiques des matériaux**III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, on va présenter les matériaux utilisés, et les techniques expérimentales pour la détermination des caractéristiques (physique, mécanique et chimique) ainsi que la formulation des bétons.

L'étude de la composition d'un béton à haute performance consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et fumée de silice et l'eau, afin de réaliser un béton répondant aux qualités recherchées.

Avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est recommandé de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants le béton (granulats, ciment et adjuvant), en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés.

Ce chapitre est composé de trois parties :

- La première partie expose les modes opératoires des essais réalisés ;
- La deuxième partie traite les caractéristiques des matériaux utilisés ;
- La troisième partie détermine la préparation et la formulation des bétons.

III.2 Les essais sur les matériaux utilisés :**III.2.1 Les essais physiques :****Les granulats :**

Dans cette étude, on a utilisé trois types de granulats :

- Sable naturel, GUELLET SIDI SAÂD.
- Granulats naturels (concassés) (graviers 3/8 et 8/15), RECHAÏGA, TIARET ;
- Granulats recyclé (concassé de bétons à haute performance utilisé).



Figure (III. 1) les granulats (1-sable, 2-graviers 3/8, 3 -graviers 8/15)

III.2.1.1 Échantillonnage :

Les prélèvements des granulats naturels sont effectués en cours d'écoulement des matériaux, directement à partir de la trémie au niveau de la carrière. Et dans le laboratoire on a prélevé les matériaux sur le tas, en haut et en bas au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Le passage de l'échantillon total à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, a été fait selon les deux procédés d'échantillonnage :

Le quartage ou à l'aide d'échantillonneur. Et la quantité du matériau soumise à l'essai "la prise" est indiquée dans les modes opératoires [F P 18-553], [EN 932-1].

$$M \geq 9 \cdot \sqrt{D_{\max}} \quad (M \text{ en Kg et } D_{\max} \text{ en mm}) ; (D_{\max} = 20 \text{ mm}, M = 40 \text{ Kg}). \quad \text{Eq (III. 1)}$$

On appelle prélèvement une fraction constituant l'échantillon global. La masse doit être telle que max

$$M \geq 0.1 \cdot D_{\max} \quad (M \text{ en Kg et } D_{\max} \text{ en mm}) ; (D_{\max} = 20 \text{ mm}, M = 2.0 \text{ Kg}). \quad \text{Eq (III. 2)}$$

III.2.1.2 Analyse granulométrique : [NF P18-560]

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560, elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ($200D < M < 600D$) préalablement séché dans une étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat suivant :

- Pour le sable naturel : 5 – 4 – 2.5 – 2 – 1.25 – 0.63 – 0.315 – 0.16 – 0.125 – 0.08 – 0.063 mm. Le sable utilisé dans la confection des bétons HP et BHP recyclés est un sable naturel d'ELGUELTA
- Pour les graviers 3/8 : 10 – 8 – 6.3 – 5 – 4 – 2 – 1 – 0.5 mm.
- Pour les graviers 8/15 : 20 - 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 – 2 mm.



Figure (III. 2) Analyse granulométrique des granulats

III.2.1.3 Mesure du coefficient d'aplatissement : [NF P18-561]

Exécution de l'essai

- Tamisage sur tamis à mailles carrées :

Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis en se basant aux prescriptions de la norme P 18-560.

Recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0,1 %.

- Tamisage sur grilles à fentes :

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Tableau (III. 1) Dimensions des granulats en millimètres :

Classe granulaire d/D	Écartement E
> 50	31.5
40 – 50	25
31.5 – 40	20
20 – 25	16
16 – 20	12.5
12.5 – 16	10
10 – 12.5	8
8 – 10	6.3
6.3 - 8	5

Le tamisage sur les grilles se fait manuellement.

Peser avec une précision relative de 0,1 % le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/D.

- Expression des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai dont un exemple est donné en annexe A. Les notations suivantes sont utilisées :

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$M = \sum M_g$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à M_0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par le **Tableau (III. 1)** .

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$A_i = \frac{M_e}{M_g} \cdot 100 \quad \text{Eq (III. 3)}$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\sum M_e}{M} \cdot 100 \quad \text{Eq (III. 4)}$$

III.2.1.4 Modules de finesse : [NF P 18-540] :

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (MF). Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis de la série suivante :

0.16-0.315-0.63- 1.25- 2.5- 5.

Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

III.2.1.5 Équivalent de sable : [P18-598] :

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution floculant dans un cylindre gradué et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution floculant afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20

min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

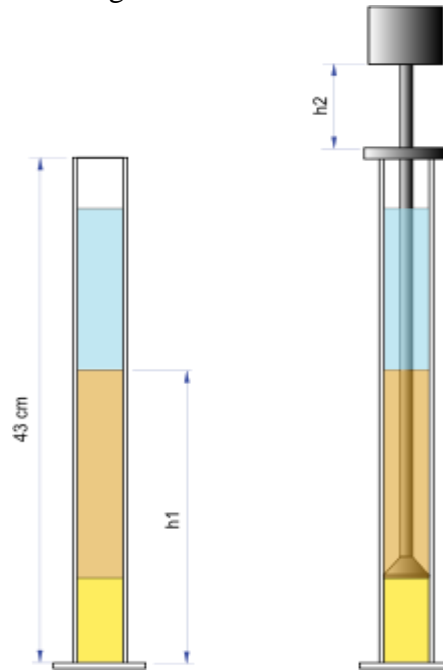


Figure (III.2): Définition de l'équivalent de sable

Sachons que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide du piston on détermine :

L'équivalent de sable par la formule :

$$E_S = \frac{h_2}{h_1} \tag{Eq (III. 5)}$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_{Sv} = \frac{h'2}{h_1} \tag{Eq (III. 6)}$$



Figure (III. 3) Éprouvette de mesure pour l'essai d'équivalent de sable

III.2.1.6 Masse volumique apparente :

Elle est déterminée selon les normes [NF P 18-554] pour les graviers et [NF P 18-555], pour les sables. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume (V) du matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité (M), pour en déduire la masse volumique selon la formule suivante:

$$Mv_{app} = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Eq (III. 7)

M en (g) : La masse sèche du matériau.

V en (L) : représente le volume du récipient.



Figure (III. 4) Détermination des masses volumiques des granulats

III.2.1.7 Masse volumique absolue :

Elle est déterminée selon les normes [NF P 18-554] pour les graviers et [NF P 18-555] pour les sables. La méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée. Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue. La masse volumique est calculée selon la formule suivante :

$$Mv_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq (III. 8)}$$

M en (g) : La masse sèche du matériau.

V_1 en (L) : représente le volume du récipient.

V_2 en (L) : représente le volume du récipient plus matériau.

III.2.1.8 Coefficient d'absorption :

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes [NF P 18-554] et [NF P 18-555] par la formule suivante:

$$A_b = \frac{(M_a - M_s)}{M'_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Eq (III. 9)}$$

M_a en (g) : la masse du l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant l'eau à la surface des granulats ou plus connue sous le nom SSS (Saturé à Surface Sèche) ;

M_s en (g) : la masse de l'échantillon séché à 105°C.



Figure (III. 5) Préparation des échantillons pour la détermination du coefficient d'absorption et la propreté superficielle

III.2.1.9 Mesure de la propreté superficielle : [NF P18-591]

Elle est caractérisée par la teneur d'éléments fins indésirables, hydrophiles ou non. Ce sont soit des fines d'argile, soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches. La propreté des graviers est déterminée à partir de l'essai de propreté superficielle NFP18-591, l'essai est effectué par lavage d'une quantité de gravier (200D<M<600D) sur le tamis 0,5 mm en déduisant la différence de masse après séchage. Elle est déterminée d'après la formule suivante :

$$P = \frac{(M_s - m')}{M_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Eq (III. 10)}$$

M_s en (g) : la masse du dernier échantillon immergé pendant 24h dans l'eau après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant ;

m' en (g) : la masse de l'échantillon séché à 105°C.

III.2.2 Les essais mécaniques :

III.2.2.1 Essais Los Angeles : [P18-573]

La résistance à la fragmentation (au choc) est déterminée par l'essai Los-Angeles selon la norme NF P 18-573, l'essai consiste à mesurer la masse (m) d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los-Angeles en 500 rotations à une vitesse régulière.

L'essai Los-Angeles est pratiqué sur deux fractions 6,3-10 et 10-14 mm et le nombre de boulets est 9 et 11, d'une masse totale 3 960 et 4 840 grammes respectivement. Les matériaux sont lavés, tamisés et séchés à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. Le coefficient Los-Angeles est déterminé par la formule :

$$L_A = \left(\frac{m}{M} \right) * 100 \quad \text{Eq (III. 11)}$$

m : représente le passant du matériau au tamis 1,6 mm après essai en (g) ;

M : la masse initiale en (g), $M = 5000 \pm 5$ g.

III.2.2.2 Essai d'usure Micro-Deval : [P18-572]

La résistance à l'usure est déterminée selon l'essai Micro-Deval en présence d'eau, selon la norme NF P 18-572, deux fractions 4-6,3 et 6,3-10 mm ont été testés pour chaque type de granulats avec une charge abrasive de 2000 ± 5 et 4000 ± 5 g respectivement.

Le coefficient Micro-Deval est déterminé par la formule suivante :

$$M_{DE} = \left(\frac{M-m'}{m} \right) \cdot 100 = \left(\frac{M}{m} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq (III. 12)}$$

m : représente la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm, en (g) ;

m' : représente la masse sèche du refus au tamis 1,6 mm, en (g) ;

M : la masse initiale sèche de l'échantillon en (g), $M = 500 \pm 2$ g.



Figure (III. 6) Essai Micro-Deval

III.2.3 Les essais chimique :

III.2.3.1 Essai au bleu de méthylène : [P18-592]

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène prouvent être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité direct à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre ce qui provoque la création d'une tache.

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tâche.

$$VBS = \left(\frac{V}{q} \right) \quad \text{Eq (III. 13)}$$

V : Volume de bleu négatif en ml ;

q : La masse qui est passé d'un tamis de 0,08 mm (échantillons de 300 g) .

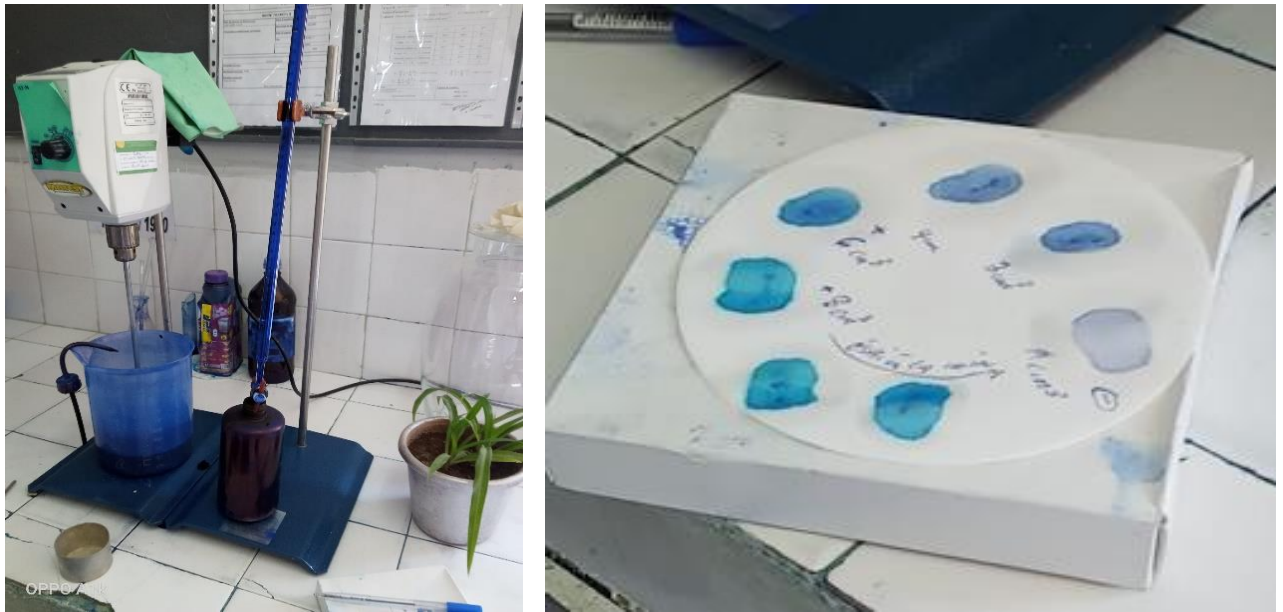


Figure (III. 7) Essai au bleu de méthylène

III.2.3.2 Essai de carbonatation accélérée : [XP P18-458]

cette opération est réalisée à l'aide d'un appareil (calcimètre) son mode opératoire consiste tout d'abord à régler le zéro dans le grand tube en verre gradué puis pesés 0.5g, introduire dans un flacon en verre , ajouter 10 ml de (HCL10%) boucher le flacon avec le tube de calcimètre ce dernier possède un bouchon en caoutchouc à l'une de ses extrémités à ce moment on prend note du niveau d'eau dans le grand tube gradué (A) ,(V) puis agiter bien le contenu du flacon .ensuite il faut régler l'appareil de telle façon à avoir au même niveau l'eau qui contient le grand flacon en verre (B) et le tube en verre gradué (A) , une fois cette tâche faite, lire sur le tube en verre gradué (A) le niveau d'eau (V2),d'où le volume finale à retenir sera ($V=V2-V1$) .

III.2.4 Ciment :**III.2.4.1 Les propriétés de ciment :**

Le ciment utilisé dans la confection des différents bétons est conforme aux normes NF P 15-301 et ENV 197-1. C'est un ciment portland composé de classe CEM I 42,5 N-LH SR5, fabriqué à la carrière de GUELLET SIDI SAÂD, EL-BEIDHA, 20 Km de la Wilaya de LAGHOUT.



Figure (III. 8) Ciment AL ESSES

➤ Essais de Prise :

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des liants hydrauliques afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des bétons.

Les essais de prise se font à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille, Norme EN 196-3. Le but est de déterminer le temps de début de prise, qui correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, et la fin de prise qui est le moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide.

➤ Essai de Consistance Normale :

Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une sonde de diamètre de 10 mm, selon la norme NF EN 196-3. Le but est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour le ciment. La consistance normale est atteinte lorsque la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule atteint 6 ± 1 mm.

La finesse de mouture du ciment :

➤ La finesse de mouture est obtenue à partir du refus sur le tamis $80\mu\text{m}$, qui doit être inférieur à 15%, norme NF EN 196-6.

➤ La masse volumique apparente :

L'essai consiste à remplir en matériau sec (ciment) un récipient vide de volume (V) du matériau sec (ciment) sans le tasser et le peser ensuite (M), pour en déduire la masse volumique. Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 1097-3.

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{V} \cdot 1000 \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq (III. 14)}$$

M : La masse sèche du matériau, en (g) ;

V : représente le volume du récipient, en (ml).

➤ La masse volumique absolue :

Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains, on a appliqué la méthode de l'éprouvette graduée selon la norme NF P 18-558. L'essai consiste à verser une quantité connue de la poudre dans un liquide inerte(mazoute), la différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique selon la formule suivante.

$$M_{v_{app}} = \frac{M}{(V_2 - V_1)} \cdot 1000 \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq (III. 15)}$$

M : La masse sèche du matériau, en (g) ;

V1 et V2 : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du ciment, en (ml).

La porosité :

La porosité est déduite à partir des masses volumiques, qui est définie par la formule suivante:

$$P = \left[1 - \left(\frac{M_{v_{app}}}{M_{v_{abs}}} \right) \right] \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Eq (III. 16)}$$

III.2.4.2 Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5:

La composition chimique et minéralogique du **CEM I 42,5 N-LH SR5** utilisé pour la confection des bétons sont résumés dans **Error! Reference source not found.** et (III. 3), qui sont élaborés à la base de la fiche technique fournie par le laboratoire de l'usine "AMODA", en Annexe 03.

Tableau (III. 2) Composition chimique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé

Éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl	PAF (NA235)	CaOL	Résidus insolubles
Teneur %	21.45	5	5	64	1.25	0.4	0.05	2	<0.1	3.5	0.9	<5

Tableau (III. 3) Composition minéralogique du ciment CEM I 42,5 N-LH SR5 utilisé

Éléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
%	59	16	4.5	12

Tableau (III. 4) Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé pour la confection des bétons

Caractéristiques	Unité	Valeur
Masse volumique apparente	Kg/m ³	1100
Masse volumique absolue	Kg/m ³	3150
Porosité	%	64.51
Consistance normale	%H ₂ O	26
Début de prise	min	130
Fin de prise	min	250
Classe de résistance	MPa	42.5
Résistance vraie	MPa	50
Finesse de mouture	cm ² /g	3300
Refus sur tamis 45 µ	%	14

III.2.5 Fumée de silice :

III.2.5.1 Fumées de silice de Granitex (MEDAPLAST HP) :

Description :

Le **MEDAPLASTHP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Annexe 1

Il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées ;
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.

Tableau (III. 5) Caractéristiques de la fumée de silice de Granitex:

Aspect	Poudre
Densité	0,5
Densité absolu	2.3 ± 0.1
Composants	SiO ₂ > 85(%) SO ₃ < 2,5 (%) Cl ⁻ < 0,2 (%)
Surface spécifique	> 15 (m ² /gr)
Humidité par étuve à 105°C	< 1 (%)
Taille des particules	< 0,1 (microns)



Figure (III. 9) Fumées de silice Granitex (MEDAPLAST HP)

III.2.5.2 Fumées de silice de Sika (Condensil S-95 DP) :

➤ Informations sur le produit :

Condensil S-95 DP est une fumée de silice ultra fine densifiée pneumatiquement issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

➤ Caractéristiques / avantages

Ultrafine et dotée d'un fort pouvoir pouzzolanique, la fumée de silice Condensil S-95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction, module d'élasticité, le fluage, la résistance à l'abrasion et à l'érosion ;
- Améliore la durabilité en milieux agressifs en diminuant la porosité et la perméabilité aux gaz et aux liquides : carbonatation, sulfate, chlorure, acides, eaux pures ;
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes de réaction sulfonique interne et d'alcali-réaction ;
- Réduit les risques de ségrégation et de ressuage, facilite le pompage des bétons y compris ceux qui sont peu dosés en ciment.



Figure (III. 10) Fumée de silice Sika (Condensil S-95 DP)

III.2.6 Les adjuvants :

A travers des tests préliminaires et pour déterminer l'efficacité de l'adjuvant, nous avons testé un type de superplastifiant, "MEDAFLOW RE 25", qui est un adjuvant sous forme liquide, selon EN 934-2 (voir annexes 3). Les principales propriétés physiques et chimiques données par le fabricant (société GRANITEX d'Alger) sont présentées dans le **Tableau (III. 5)**. Il a donné de bons résultats en améliorant significativement la maniabilité du béton même avec un pourcentage minimum (0,6% du poids de liant).

Ces composés sont souvent organiques, conçus spécifiquement pour des applications concrètes, et sont disponibles dans le commerce sous forme de solutions aqueuses. Il vise à améliorer certaines propriétés du matériau tel que :

- Augmenter la viscosité du béton ;
- Réduction du rapport E/L.



Figure (III. 11) Adjuvant MEDAFLOW RE 25

Les caractéristiques de l'adjuvant MEDAFLOW RE 25 sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau (III. 5) Caractéristiques de l'adjuvant utilisé (MEDAFLOW RE 25) :

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité (t/m ³)	1,06 + 0,01
PH	7
Teneur en ions chlorures	<0,1 g/l
Extrait sec	25%
Dosage recommandé par rapport du poids de ciment	1.0 à 2.5%

Les super plastifiants sont les plus importants des adjuvants dans le sens où ils donnent accès à des catégories particulières de béton, comme les bétons à hautes performances, les bétons fluides et les bétons autoplaçants. On les utilise soit pour fluidifier un mélange, soit pour conserver une certaine maniabilité, tout en diminuant la quantité d'eau. Dans notre étude, nous l'utilisons pour garder une maniabilité souhaitable à tous les mélanges.

III.2.6.1 Informations sur le produit :

Le MEDAFLOW RE 25 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la société GRANITEX d'Alger. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas. Le MEDAFLOW RE 25 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

III.2.6.2 Caractéristiques / avantages

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW RE 25 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas ;
- Amélioration considérable de la fluidité ;
- Faciliter la mise en œuvre du béton ;
- Décoffrage rapide.

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge ;
- Diminuer la porosité ;
- Augmenter la durabilité ;
- Diminuer le retrait.

III.2.6.3 Domaines D'application

- Bétons à hautes performances ;
- Réduction du temps de décoffrage ;
- Accélération de la rotation des moules.
- Bétons précontraints et architecturaux

III.2.7 Compatibilité (ciment/ superplastifiant) et Formulation**III.2.7.1 Introduction :**

La difficulté majeure rencontrée dans la formulation des bétons à base de super plastifiants est de choisir le couple Ciment-Superplastifiant le plus efficace qui permet d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant la mise en œuvre. En effet, lors de l'utilisation des superplastifiants dans la confection des bétons, certains ciments peuvent présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment- superplastifiant : irrégularité des affaissements au cône d'Abrams et des temps de prise, ainsi qu'une perte rapide de maniabilité après fabrication.

III.2.7.2 Méthode des coulis :

La méthode de coulis a été utilisée de façon pratique pour l'étude du comportement rhéologique d'un ciment avec les superplastifiants, elle permet : de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, d'optimiser le choix et le dosage en super plastifiant pour chaque ciment, et de détecter les risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre ciment et superplastifiant. Un grand avantage de cette méthode est sa simplicité, ce qui permet d'alléger grandement le travail de formulation des bétons à haute performance.

L'étude de la compatibilité ciment /superplastifiant peut se faire sur coulis en utilisant un essai d'écoulement de type cône de Marsh figure (III-12)

La préparation de l'échantillon comprend les étapes suivantes :

- Mettre dans le bol du malaxeur le mélange 2/3 eau +1/3 superplastifiant ;
- Verser la quantité de ciment et malaxer 1 min.30 sec. à petite vitesse;
- Arrêter le malaxeur pour écraser les grumeaux qui peuvent rester collés sur les parois du bol, sans que cette opération dépasse 30 sec.;
- Ajouter la quantité 1/3 eau + 2/3 superplastifiant et malaxer dans 1 minute à petite vitesse et dans 2 min à grande vitesse.

La première mesure de la fluidité est faite à 5 minutes après le début du malaxage. Ensuite, le coulis est placé dans un récipient recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau. On effectue une deuxième mesure de l'écoulement 60 minutes après, en prenant le soin de malaxer le coulis une minute avant l'essai.

En général, l'essai est réalisé pour un rapport eau / ciment inférieur à 0,4% de façon que le ciment et le superplastifiant sont utilisés dans des conditions assez semblables à celle de la pâte d'un BHP.

III.2.7.3 Appareillage :

- Un cône de Marsh avec un ajustage de 10 mm, figure (III-12) ;
- Un chronomètre au dixième ;
- Des éprouvettes pour mesurer l'eau ;
- Une spatule pour racler la paroi du bol du malaxeur ;
- Une balance ;
- Un malaxeur avec axe et palette.



Figure (III. 12) Procédé de détermination de la dose de saturation par le cône de March

Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification de coulis, environ 75% de l'eau de gâchage, ou fractionné dans le cas d'eau E/C très bas :

- 1/3 dans l'eau de gâchage ;
- 2/3 vers la fin de malaxage.

Le temps optimal d'addition du Superplastifiant dans le coulis est 2 minutes après le malaxage ciment- additions- eau. À ce moment, le Superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C3S et C2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité.

III.2.7.4 Méthodes d'optimisation des coulis de ciment

On présente ici les règles de formulation des coulis de ciment en fonction des propriétés rhéologiques et mécaniques visées. Dans la pratique, la formulation doit répondre à un cahier des charges dont le plus simple est composé de quatre spécifications dans les domaines suivants :

Fluidité ;

Stabilité à l'état frais ;

Résistance mécanique.

Parmi les essais développés pour la caractérisation des fluidités des coulis on retrouve l'essai au Cône de Marsh. Ce dernier qui présente une approche simple pour la caractérisation de la fluidité de pâte de ciment contenant des additions minérales et des adjuvants ou non.

Pour les coulis fluidifiés, il existe toujours un dosage en adjuvant dit « Dosage de saturation », au-dessus duquel aucune augmentation significative de la fluidité de la pâte ne se produit. Ce dosage peut être exploité pour le choix du type du superplastifiant et son dosage.

En se basant sur l'approche au Cône de Marsh, nous avons étudié l'influence du rapport eau/liant, du type et du dosage en additions minérale ainsi que celui de l'adjuvant sur la fluidité des pâtes de ciments. Les résultats obtenus vont dans le sens de la mise au point des coulis et leur formulation pour leurs utilisations comme matériau indépendant, ou pour les introduire dans une composition de béton en tant que phase suspendant.

III.2.7.5 Programme expérimental adopté

Nous envisageons dans cette partie de travailler sur la rhéologie des coulis avec additions (Fines de fumée de silice de SIKA et GRANITEX) disponibles.

Ce travail de caractérisation et d'optimisation consiste à mesurer le temps d'écoulement sur des pâtes fluidifiées dans un cône, ensuite on teste l'efficacité des superplastifiants disponibles et ce pour déterminer la composition optimale du coulis plastifié vis-à-vis de l'ouvrabilité.

Nous avons fixé :

- Le rapport E/L et la teneur des additions (fines) ; et Nous avons varié ;
- Le type des additions (fines) ;
- Le dosage en Superplastifiant ;

III.2.7.6 Méthode du cône de Marsh

Différents cônes de Marsh sont utilisés depuis longtemps dans plusieurs secteurs industriels pour apprécier la fluidité de différents types de coulis. Cette méthode consiste à préparer un certain volume de coulis et à mesurer son temps d'écoulement. Les cônes peuvent avoir des caractéristiques géométriques légèrement différentes les unes des autres et le diamètre de l'orifice inférieur peut varier de 5 mm à 12.5 mm. Différentes versions de la méthode du cône Marsh ont été présentées par différents auteurs. La méthode présentée est celle qui est utilisée à l'Université de Sherbrooke depuis plusieurs années.

Le cône utilisé est un cône de plastique normalisé pour mesurer l'écoulement des pâtes (Figure III.12). Ce cône particulier a été sélectionné par ce qu'il est commercialement disponible et qu'il est bien adapté aux besoins des études portant sur la compatibilité entre les ciments et les superplastifiants [02].

III.2.7.6.1 Préparation des coulis

Les coulis ont été préparés dans un malaxeur de marque {FORM+TEST SEIDNER} de capacité 5 litres, en utilisant deux vitesses ; la vitesse rapide 120 tours/mn et une autre lente 60 tours/mn.

Les pesées des constituants ont été effectuées dans une balance électrique de précision ± 0.1 gr.

- La préparation de l'échantillon comprend les étapes suivantes :
- Peser l'eau et le superplastifiant dans le contenant où sera effectué le malaxage ;
- Démarrer le système de malaxage tout en introduisant progressivement la quantité du ciment ; en moins de 1 minute jusqu'à et 90 secondes ;
- Arrêter le malaxage pendant 15 secondes de façon à nettoyer avec une spatule le ciment qui reste collé les bords du contenant ;
- Malaxer pendant 60 secondes ;
- Mesurer la température ;
- Mesurer le temps qu'il faut pour remplir de coulis un vase gradué de 1 litre ;
- Mesurer le temps d'écoulement à différents instants. À chaque fois, on mesure la température du coulis.

III.2.7.6.2 Détermination du temps d'écoulement au cône de Marsh

Le Super plastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification de coulis, environ 75% de l'eau de gâchage, ou fractionné dans le cas de E/C est très bas :

1/3 dans l'eau de gâchage ;

2/3 vers la fin de malaxage.

Le temps optimal d'addition du superplastifiant dans le coulis est 2 minutes après le malaxage de ciment, additions et eau. A ce moment, le superplastifiant reste suffisamment disponible pour jouer son rôle de dispersant du C3S et C2S, et ce qui explique l'augmentation de la fluidité

III. 2.7.6.3 Point de saturation

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en superplastifiants à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le superplastifiant par rapport à la masse se ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la Figure (III. 9).

Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaires est ce que l'on appelle le « point de saturation », c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en superplastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

III.2.7.6.4 Résultats des essais effectués sur coulis

Le tableau (III-8) présente le dosage de saturation et le temps d'écoulement à 5 et 60 minutes, des différents couples ciment- superplastifiant.

Tableau (III. 6) Détermination de la dose de saturation en fonction du pourcentage de superplastifiant et le temps d'écoulement après 5 et 60 minutes

Pourcentage en superplastifiant (% SP)	temps d'écoulement T(s) après 5min	temps d'écoulement T(s) après 1h
0.5	55	56.73
0.6	53	59.79
0.7	50	57.47
0.8	45	50.83
0.9	44.5	45.96
1	30	46.3
1.1	24	29.17
1.2	23	24.3
1.3	21	24.3
1.4	19	24.3
1.5	18	24.3

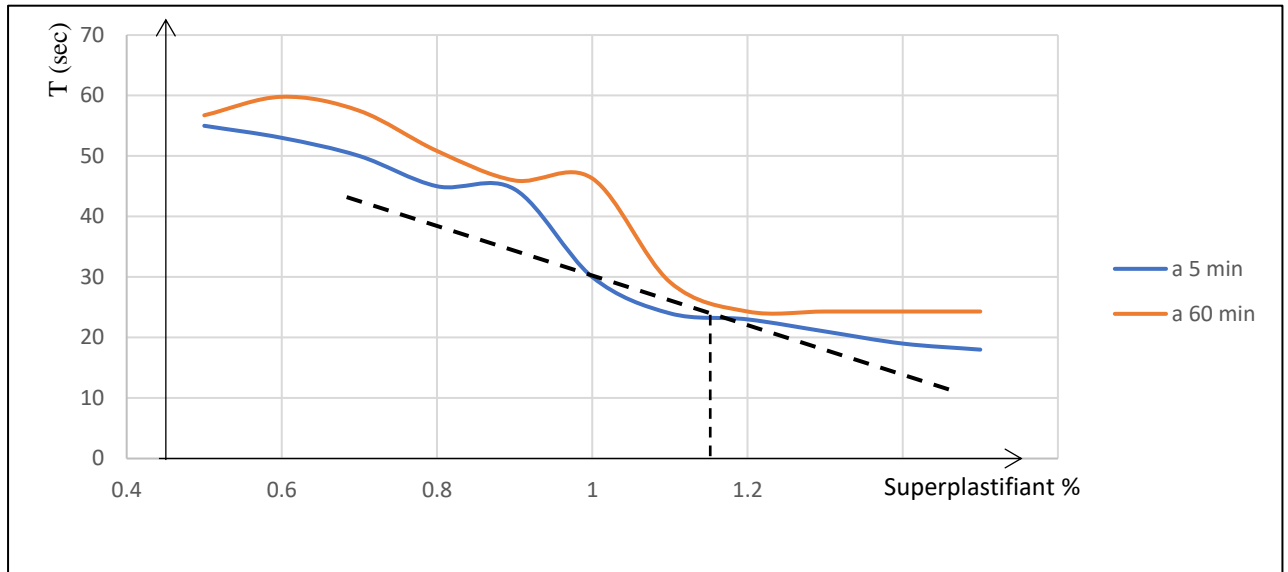


Figure (III. 9) Représentation de la dose de saturation

III.2.8 Formulation des bétons

La formulation des bétons à haute performance est basée sur les essais de convenances, on a utilisé une méthode de composition empirique de Faury, en prenant comme données de base :

- Une classe de résistance de béton ciblée C 50/55 ;
- Un dosage en ciment constant pour tous les mélanges, 450 kg pour 1m^3 de béton ;
- Un même squelette granulaire de compacité constante ($c = 0,790$).

Pour comparer les résultats des BHP recyclés, un béton à hautes performances naturel (béton témoin BHPT) est fabriqué à base de 100% de granulats naturels, les graviers recyclés ont subi un pré-mouillage pendant 30 min avant gâchage pour s'affranchir d'une probable absorption par les granulats recyclés de l'eau de gâchage ; Ils sont introduits dans le malaxeur à l'état saturé à surface sèche (SSS) et les granulats naturels n'ont subi aucun pré-mouillage.

L'étude porte sur huit bétons BHP de compositions différentes (naturels et recyclés), et avec différentes fumées de silice (Granitex et Sika) avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier), **Tableau (III. 8)**

III.2.8.1 Composition des bétons à hautes performances dans 1m^3 de béton :

Le poids des constituants du béton à hautes performances est récapitulé dans le tableau suivant, cette formulation est déterminée à partir de la formulation empirique de FAURY, et la méthode des coulis et ensuite l'ajustement de cette dernière (les constituants) par les essais de convenances au laboratoire.

Tableau (III. 7) Composants des constituants dans 1m³ de béton à haute performance BHP

Composants	Ciment	Fumée de silice (G,S)	Sable	G(3/8)	G(8/15)	Eau	Adj (1.2%)
Composants en masse kg	450	36	759	420	624	166	6.3

III.2.8.2 Composition des BHP recyclés dans 1m³ de béton à différents taux de remplacement:

Les bétons à hautes performances recyclés ont été confectionnés à partir des granulats recyclés de béton déjà préparé au laboratoire de Génie Civil du département, différents échantillons écrasés. On a utilisé les mêmes matériaux, ciment et sable, et on a remplacé les granulats naturels par des granulats recyclés avec substitution de 25%, 50% et 75 %.

L'élaboration des granulats recyclés est passée par plusieurs étapes :

Fragmentation des blocs du béton de démolition (éprouvettes cylindriques et prismatiques de béton compressés), et à l'aide d'un marteau, on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires 3/8 et 8/15.



Figure (III. 10) préparation des granulats recyclés

Tableau (III. 8) Composition des BHP recyclés dans 1m³ de béton:

Type de béton	Granulats recyclés			
	GR Granitex		GR Sika	
	(3/8)	(8/15)	(3/8)	(8/15)
B 25%R G	25%	25%		
B 50%R G	50%	50%		
B 75%R G	75%	75%		
B 25%R S			25%	25%
B 50%R S			50%	50%
B 75%R S			75%	75%

III.2.9 Fabrication des bétons :

Dans ce programme expérimental, deux types de moules ont été utilisés, des éprouvettes de forme cylindrique (16 x 32) cm et prismatique (10x10x40)cm



Figure (III. 11) Éprouvettes prismatiques (10x10x40)cm et cylindre (16x32)cm

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés conformément aux normes en vigueur.

III.2.10 Mise en œuvre et Malaxage

La réaction entre les différents composants, est d'autant plus complète que le mélange est homogène. Trois étapes constituent le mode de fabrication des bétons :

- l'homogénéisation du mélange à sec (ciment, sable et addition) pendant deux minutes environ à vitesse lente
- introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage, ce qui a pour but de mouiller le mélange et de faciliter la mise en place, ceci pendant deux minutes à vitesse rapide. Le superplastifiant est ajouté dans l'eau de gâchage après que 50 à 70 % de l'eau a été introduite.
- L'homogénéisation est réalisée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 40 litres, pour les essais de formulation et de caractérisation.



Figure (III. 12) Malaxage à sec des différents constituants de béton



Figure (II. 19) Malaxage des différents constituants de béton

III.2.10.1 Préparation des mélanges :

La préparation du béton à hautes performances (BHP) demande plus de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer des essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie ; le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatiques et cylindriques nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage ;
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais ;
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve ;
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage. Le superplastifiant est ajouté à un 1/3 de l'eau de gâchage ;
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumée de silice) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec ;
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première part d'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) ;
- Ajouter les 2/3 d'eau ;
- Effectuer immédiatement les essais de consistance après arrêt du malaxage, ils sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues ;
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches avec vibration.

III.2.10.2 Essais de consistance au cône d'Abrams

La maniabilité, capacité de la mise en œuvre du béton dans les moules ou les coffrages, dont les formes sont parfois complexes, dans le béton armé (béton + acier), elle doit permettre d'assurer la compacité du béton dans l'ouvrage, et le bon enrobage des armatures, elle influe sur les moyens de mise en œuvre du chantier : un béton de consistance très ferme nécessite des moyens de vibration appropriés.

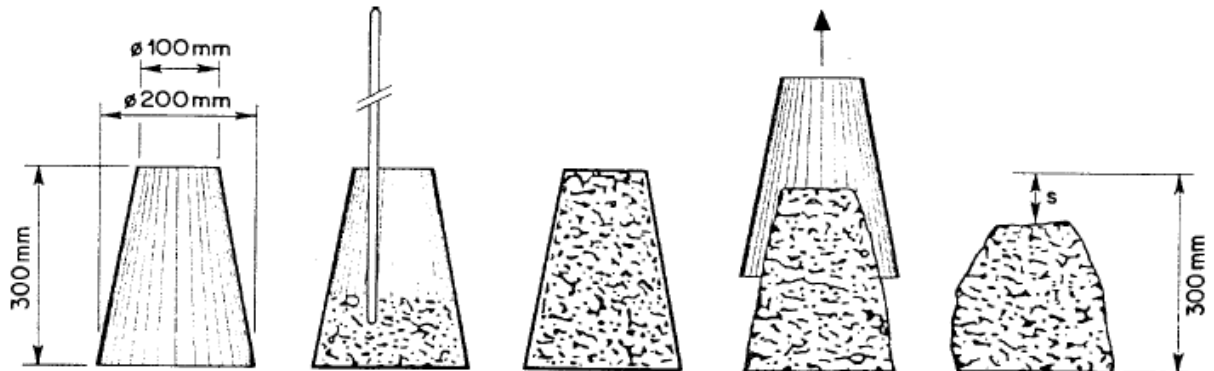


Figure (III. 13) Principe essais de consistance au cône d'Abrams



Figure (III. 14) Essais de consistance au cône d'Abrams

Les classes de consistance au cône d'Abrams sont exprimées dans le suivant les deux normes XP P18-305 et NF EN 206-1

Tableau (III. 9) Classes de consistance (au cône d'Abrams)

Affaissement (mm)	XP P18-305	NF EN 206-1	Champs d'application
De 10 à 40	Béton ferme F	S1	Escalier, accès avec fortes pentes (garage, Sous-sol), glissière en coffrage coulissant
De 50 à 90	Béton plastique P	S2	Dalle pleine vibrée
De 100 à 150	Béton très plastique TP	S3	Fondations, dalles, voiles courants
De 160 à 210	Béton fluide FL	S4	Fondations, dalles, voiles avec forte densité ferrailage
>220	Béton très fluide TFL	S5	Voiles complexes, dalles, fondations

Le choix du mode de serrage est déterminé en fonction de l'affaissement obtenu au cône d'Abrams selon le tableau (III.12)

Tableau (III. 10) les Mode de serrage pour la confection des éprouvettes

Affaissement au cône d'Abrams	Mode de serrage pour la confection des éprouvettes. (FN P18 457)
$A \leq 10 \text{ mm}$	Table vibrante Temps 20 s
$10 \text{ mm} \leq A \leq 90 \text{ mm}$	Aiguille vibrante Temps 10 s par couche Table vibrante Temps 10 s par couche
$A \geq 100 \text{ mm}$	Si $E/C > 0.5$ Tige de piquage (25 coups par couche) Si $E/C < 0.5$ Table vibrante ou aiguille vibrante Temps $\geq 5 \text{ s}$

III.2.10.3 Coulage et vibration du béton des éprouvettes cylindriques et prismatiques :

Le mélange préparé est mis en place par coulage et vibration. Le coulage se fait en deux temps. Le moule est rempli aux trois quarts et il est soumis à une vibration jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage. Ensuite, le moule est rempli totalement et la vibration reprend pendant une minute environ.



Figure (III. 15) Coulage et vibration du béton des éprouvettes cylindriques et prismatiques

III.2.10.4 Mode de conservation :

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules sans être déplacées pendant les premières 24 heures dans une température ambiante. Après le démoulage, elles sont conservées dans le même milieu ambiant de conservation immergés dans l'eau jusqu'au moment de la réalisation des essais d'écrasement et de flexion à 7, 14, 21 et 28 jours . EN 12390-2

III.2.10.5 Préparation des éprouvettes et essai de compression

Figure (III. 16) Mode de conservation des éprouvettes cylindriques et prismatiques

Les surface sur laquelle on applique les forces de compression doivent être plane et rectiligne. Pour répondre à ce problème, il existe plusieurs procédés, les plus utilisées sont :

- **Surfaçage** : on utilise un mélange de soufre et de sable fin 0.25
- **Rectification de l'éprouvette**: Il consiste à gratter une couche mince de béton sur les deux surfaces de pose de l'éprouvette à l'aide d'une rectifieuse.



Figure (III. 17) rectifieuse des surfaces des éprouvettes cylindriques de béton

- **Les plaque de compression** : sont fabriqués à partir de matériau élastomère dur qui couvre la surface d'application de la charge et distribue cette dernière uniformément pour assurer une rupture cohérente.



Figure (III. 20) Les plaque de compression des éprouvettes cylindriques de béton

III.3 Essai d'écrasement :**III.3.1 Résistance en compression :**

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisées et d'élanement 2 (16x32 cm ; norme NF P 18-406, NA 427). La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 KN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression, l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 16x32 cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN/s \pm 4 KN/s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.



Figure (III. 21) Chargement des éprouvettes cylindriques



Figure (III. 22) Rupture des éprouvettes cylindriques

III.3.2 Résistance en traction**III.3.2.1 Résistance en traction par flexion**

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 10 x 10 x 40 cm, ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-411 et NF 18- 41, munie d'un banc de flexion 3 points. Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 (NA 428).

Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur 4a (10 x 10 x 40). Pour une charge totale P,

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cj} = \frac{3.F.l}{2.a^3} \quad \text{Eq (III. 17)}$$

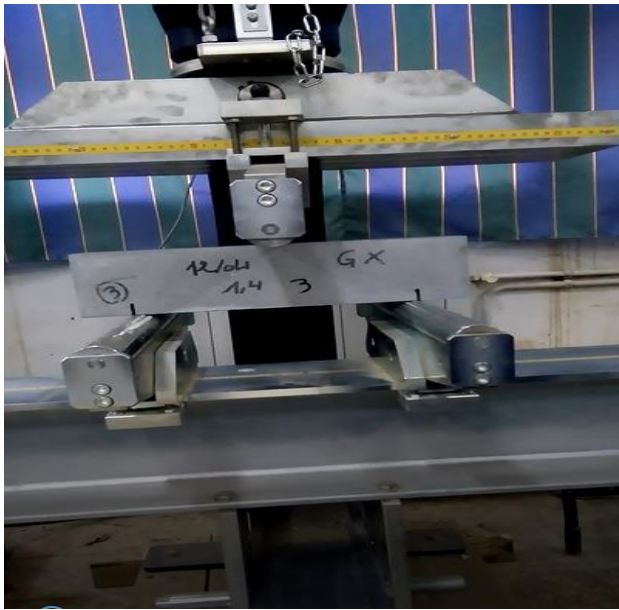


Figure (III. 23) Chargement des éprouvettes prismatiques

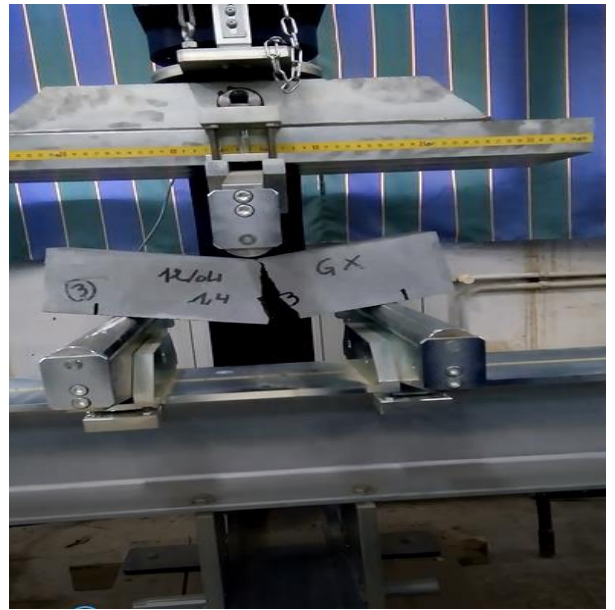


Figure (III. 24) Rupture des éprouvettes prismatiques

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques des classes granulaires (sable 0/4, graviers 3/8 et 8/15 naturel et recyclé) sont présentées. La méthode de formulation a été développée et le calcul de la proportion des constituants a été fait. L'essai au cône d'Abrams nous a permis de déterminer la consistance des bétons étudiés. Les essais à la compression et à la traction par flexion sont décrits. Ils seront utilisés dans le chapitre suivant pour obtenir les valeurs des résistances à la compression et à la traction de tous les mélanges (BHP, BHPR).

CHAPITRE IV :

Résultats et Discussion

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.1 Introduction :

La synthèse bibliographique présentée dans le premier et deuxième chapitre a mis en exergue le rôle et l’impact du paramètre granulats et additions minérales au niveau de la formulation et le comportement mécanique des BHP. Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des bétons testés, ainsi que les propriétés physico-mécaniques. Pour cela nous avons établi un programme expérimental : Quatre mélanges de bétons à hautes performances ont été préparés avec deux types de granulats et deux types d’additions minérales de nature différente. L’ensemble de formulations de ce programme sont présentées dans le chapitre III. Ces BHP et BHPR se caractérisent par un rapport E/L inférieur à 0.4. On se propose dans ce chapitre d’étudier la variation de la résistance mécanique en compression et en traction par flexion

IV.2 Les granulats :

IV.2.1 Analyse granulométrique par tamisage

L’essai d’analyse granulométrique permet essentiellement de déterminer et répartir la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains d’un échantillon.

Le but de l’essai se matérialise par :

- Le dimensionnement des particules qui varie entre 10-6mm à 100 mm.
- La classification utilisée pour caractériser les grains de différentes dimensions.
- L’établissement de la courbe granulométrique qui donne des informations très précises sur les granulats étudiés.

Les résultats des différentes analyses (sable, gravier) sont résumés dans les tableaux (IV.1), (IV.2), (IV.3) et (IV.4) qui suivent :

IV.2.1.1 Sable :

Tableau (IV. 1) Résultats du tamisage de sable

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus Mi(g)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M) 100$	Pourcentage des tamisas cumulés $Pt=100-P$
500				
5	1	1	0.20	99.80
4	3	4	0.80	99.20
2.5	21	25	5.00	95.00
2	13	38	7.60	92.40
1.25	19	57	11.40	88.60
0.63	74	131	26.20	73.80
0.315	251	382	76.40	23.60
0.16	99	481	96.20	3.80
0.125	11	492	98.40	1.60
0.08	4	496	99.20	0.80
0.063	1	497	99.40	0.60
fond	3	500	100.0	0.00

IV.2.1.2 Graviers naturels (3/8 et 8/15):

Tableau (IV. 2) Résultats de tamisage de gravier Naturel (3/8 et 8/15)

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus M_i (g)	Masse des Refus cumulés M_c (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M) 100$	Pourcentage des tamis cumulés $P_t=100-P$
1600				
12.5	0	0	0.00	100.00
10	0	0	0.00	100.00
8	21	21	1.31	98.69
6.3	278	299	18.69	81.31
5	437	736	46.00	54.00
4	447	1183	73.94	26.06
2	394	1577	98.56	1.44
1	18	1595	99.69	0.31
0.5	4	1599	99.94	0.06
fond	1	1600	100.00	0.00

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus M_i (g)	Masse des Refus cumulés M_c (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M) 100$	Pourcentage des tamis cumulés $P_t=100-P$
3000				
20	0	0	0	100
16	24	24	0.80	99.20
12.5	397	421	14.03	85.97
10	1012	1433	47.77	52.23
8	849	2282	76.07	23.93
6.3	501	2783	92.77	7.23
5	148	2931	97.70	2.30
4	64	2995	99.83	0.17
2	4	2999	99.97	0.03
fond	1	3000	100.00	0.00

IV.2.1.3 Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Granitex) (3/8 et 8/15)

Tableau (IV. 3) Résultats du tamisage des Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Granitex) (3/8 et 8/15)

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés M_c (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M) 100$	Pourcentage des tamis cumulés $P_t=100-P$
1600			
10	0	0.00	100.00
8	15	0.94	99.06
6.3	609	38.06	61.94
5	1153	72.06	27.94
4	1413	88.31	11.69
2	1593	99.56	0.44
1	1598	99.88	0.13
0.5	1599	99.94	0.06
fond	1600	100.00	0.00

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés M_c (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M) 100$	Pourcentage des tamis cumulés $P_t=100-P$
3000			
20	0	0	100
16	11	0.37	99.63
12.5	276	9.20	90.80
10	911	30.37	69.63
8	1866	62.20	37.80
6.3	2906	96.87	3.13
5	2967	98.90	1.10
4	2998	99.93	0.07
2	2999	99.97	0.03
fond	3000	100.00	0.00

IV.2.1.4 Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Sika) (3/8 et 8/15)

Tableau (IV. 4) Résultats du tamisage des Graviers recyclés (béton à base de fumée de silice Sika) (3/8 et 8/15)

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M)/100$	Pourcentage des tamisas cumulés $Pt=100-P$
1600			
10	0	0.00	100.00
8	5	0.31	99.69
6.3	300	18.75	81.25
5	850	53.13	46.88
4	1364	85.25	14.75
2	1597	99.81	0.19
1	1598	99.88	0.13
0.5	1599	99.94	0.06
fond	1600	100.00	0.00

Ouverture des tamis (mm)	Masse des Refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M)/100$	Pourcentage des tamisas cumulés $Pt=100-P$
3000			
20	0	0	100
16	86	2.87	97.13
12.5	1201	40.03	59.97
10	2061	68.70	31.30
8	2541	84.70	15.30
6.3	2926	97.53	2.47
5	2977	99.23	0.77
4	2998	99.93	0.07
2	2999	99.97	0.03
fond	3000	100.00	0.00

IV.2.2 Courbes granulométriques

L’obtention d’un béton résistant, étanche et durable est l’objectif principal de tous les utilisateurs de béton. Afin d’atteindre cet objectif, les courbes d’analyse granulométrique sont utilisées pour nous permettre d’acquérir la meilleure compacité dans un mélange de granulats. Sa connaissance permet d’établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi augmenter sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L’analyse granulométrique permet également d’évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse, la continuité et la régularité de la granularité.

Les pourcentages de passant cumulé sont représentés sous la forme de courbes granulométriques dans les figures (IV.1), (IV.2) et (IV.3).

IV.2.2.1 Sable naturel et Gravier naturels :

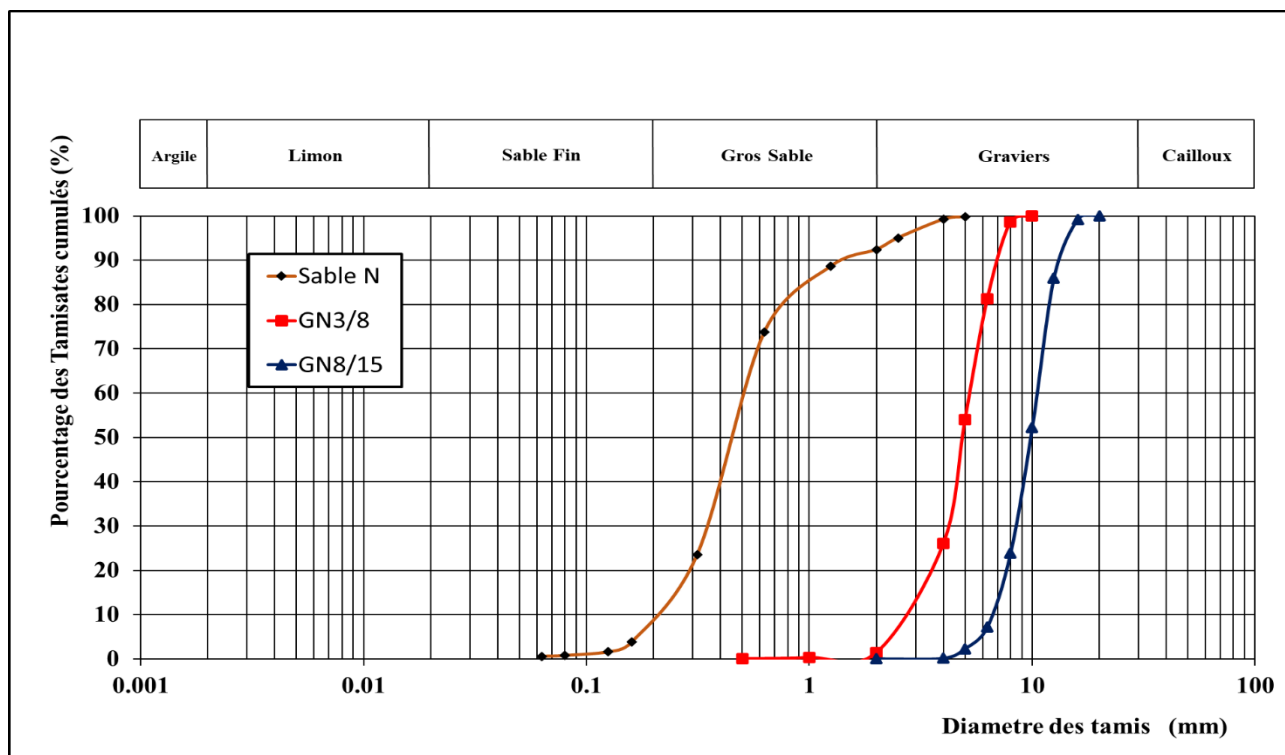


Figure (IV. 1) Courbes granulométriques de sable (0/5) et graviers (3/8 et 8/15)

IV.2.2.2 Gravier recyclés (béton à base de fumée de silice Granitex) :

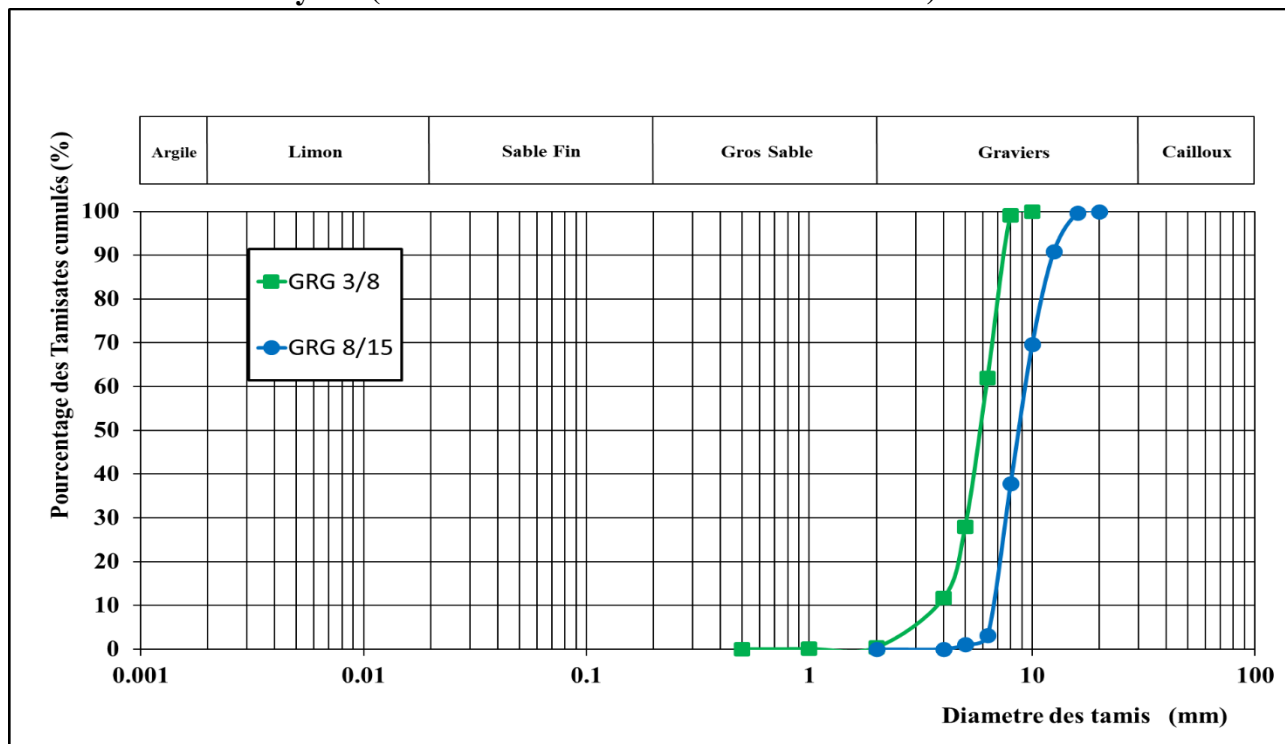


Figure (IV. 2) Courbes granulométriques des graviers recyclés (3/8 et 8/15) (béton à base de fumée de silice Granitex)

IV.2.2.3 Grapiers recyclés (béton à base de fumée de silice Sika) :

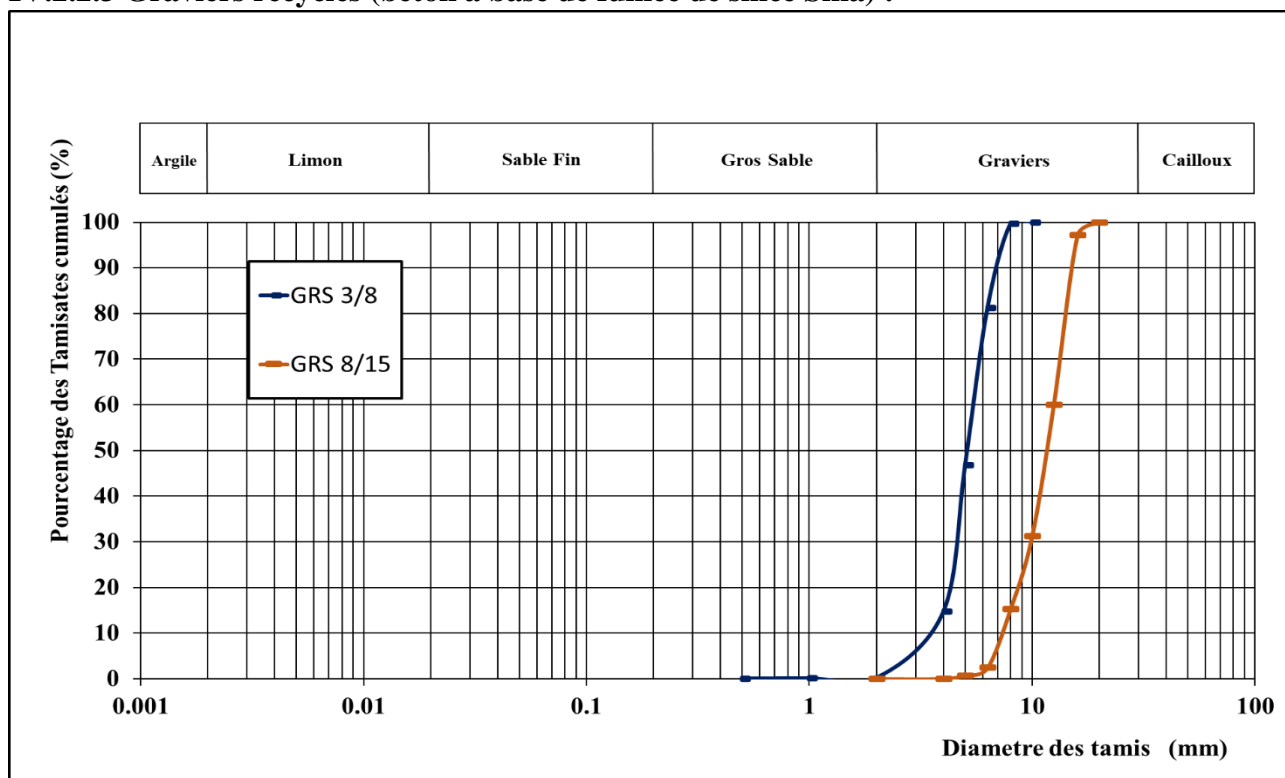


Figure (IV. 3) Courbes granulométriques des graviers recyclés (3/8 et 8/15) (béton à base de fumée de silice Sika)

Les résultats de l'analyse granulométriques apportent les renseignements suivants :

- Les gravillons des deux fractions (3/8 - 8/15) des différents granulats utilisés, que ce soit naturels ou recyclés, ont des distributions granulométriques relativement comparables.
- Les fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

Module de finesse :

$$\sum \text{refus cumulé en \% des tamis } \{5 - 0,1\} = 215$$

$$Mf = 1 / 100 \times 215 = 2,15$$

Le module de finesse est de (Mf=2,15) montre que l'échantillon de sable s'inscrit dans le fuseau de sable moyen (1,8<Mf< 2,2), Le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

IV.2.3 Caractéristiques

IV.2.3.1 Coefficient d'Aplatissement (A)

Tableau (IV. 5) Résultats des Coefficients d'Aplatissements (A)

Échantillon	Coefficient d'aplatissement
Gravier naturel 8/15	4%
Gravier recyclé Granitex 8/15	8%
Gravier recyclé Sika 8/15	11%

D’après le résultat obtenu la valeur de CA de gravier 8/15 naturel et recyclé est inférieur à 12%, ont conclu que le matériau est angulaire cette caractéristique est indispensable pour les agrégats sachant que la spécification de CA ($CA \leq 30\%$).

IV.2.3.2 Essai Los-Angeles (LA)

Tableau (IV. 6) Résultats des Essais Los-Angeles (LA)

	Classe	L.A (%)
Granulats Naturel	(3/8)	27
	(8/15)	26
Granulats Recyclé Granitex	(3/8)	37
	(8/15)	30.5
Granulats Recyclé Sika	(3/8)	27.8
	(8/15)	35

D’après les résultats obtenus les graviers se classent comme suit :

- Le gravier naturel (3/8) : c’est un gravier assez dure (LA=27 %) / (LA entre 25 à 30),
- Le gravier naturel (8/15) :c’est un gravier assez dure (LA=26 %) / (LA entre 25 à 30),
- Le gravier recyclé Granitex (3/8) :c’est un gravier mis dure (LA=37 %) / (LA entre 30 à 40)
- Le gravier recyclé Granitex (8/15) :c’est un gravier mis dure (LA=30.50)/ (LA entre 30 à 40).
- Le gravier recyclé Sika (3/8) :c’est un gravier assez dure (LA=27.80)/ (LA entre 30 à 40).
- Le gravier recyclé Sika (8/15) :c’est un gravier mis dure (LA=35)/ (La entre 30 à 40).

Les granulats naturels sont mécaniquement plus résistants que les autres types de granulats recyclés.

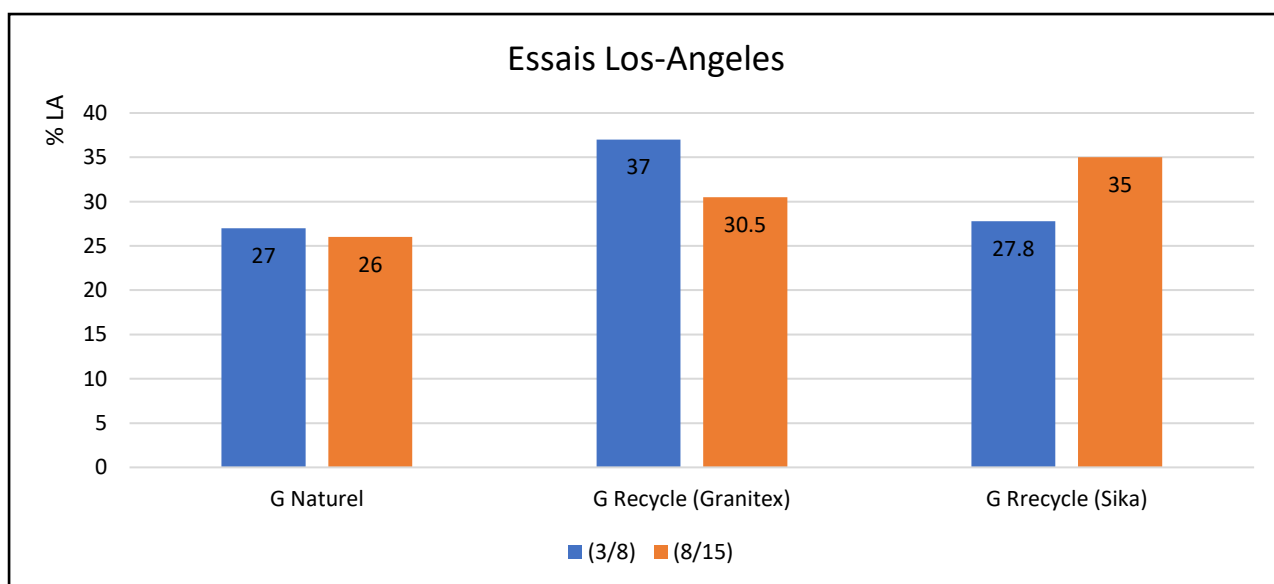


Figure (IV. 4) Résultats des essais Los-Angeles

IV.2.3.3 Essai Micro-Deval (MDE)

Tableau (IV. 7) Résultats des Essais Micro-Deval (MDE)

	Classe	MDE
Granulats Naturel	(3/8)	4
	(8/15)	12
Granulats Recyclé Granitex	(3/8)	16.58
	(8/15)	27.98
Granulats Recyclé Sika	(3/8)	15.31
	(8/15)	25.31

Les coefficients MDE des agrégats utilisés dans notre béton varie de 4 à 16.58% pour les granulats naturels 3/8 et 8/15 et les granulats recyclés de fraction 3/8 de (Sika et Granitex) inférieur à la valeur spécifiques supérieurs (Vss) demandée par ce genre de béton (20%) confirmant une bonne résistance à l'usure sous l'eau, tandis que les granulats obtenus à partir des bétons recyclés de fraction 8/15 de (Sika et Granitex) présentent de faibles résistances de 25.31 à 27.98% , ceci est probablement la conséquence de la quantité de mortier que le béton recyclé contient.

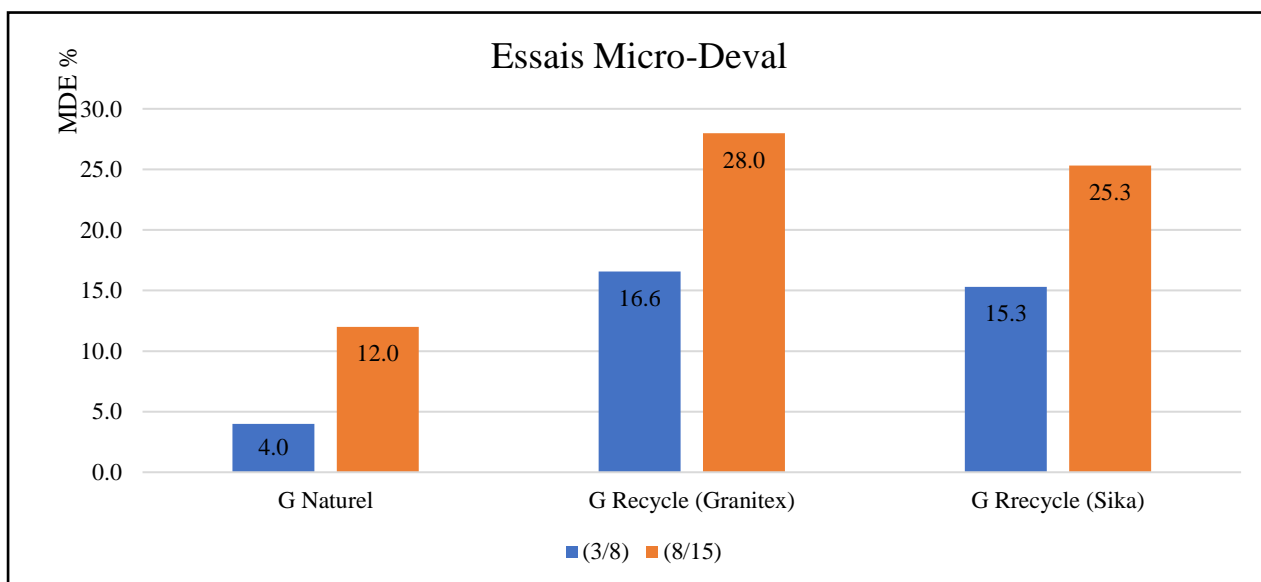


Figure (IV. 5) Résultats de Essai Micro-Deval (MDE)

IV.2.3.4 Masse volumique apparente (Mvapp)

Tableau (IV. 8) Résultats des Masses volumiques apparentes (Mvapp)

	Classe	Mv app Kg/m ³
Granulats Naturel	(0/5)	1390
	(3/8)	1470
	(8/15)	1480
Granulats Recyclé Granitex	(3/8)	1235
	(8/15)	1282
Granulats Recyclé Sika	(3/8)	1480
	(8/15)	1190

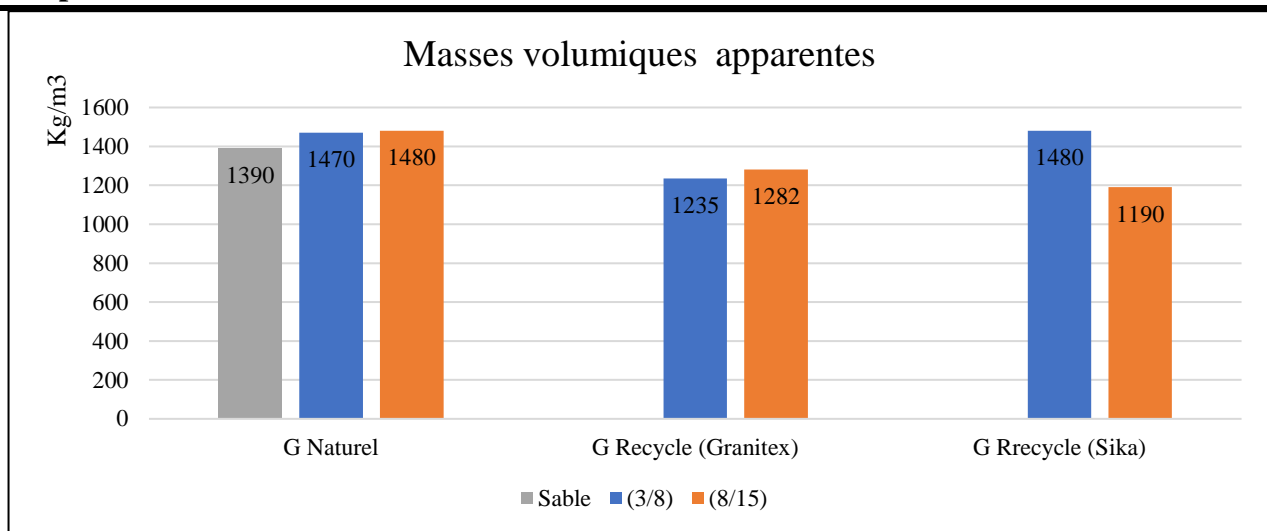


Figure (IV. 6) Résultats des Masses volumiques apparentes (Mvapp)

IV.2.3.5 Masse volumique absolue (Mvabs)

Tableau (IV. 9) Résultats des Masses volumiques absolues (Mvabs)

	Classe	Mv abs Kg/m ³
Granulats Naturel	(0/5)	2538
	(3/8)	2800
	(8/15)	2770
Granulats Recyclé Granitex	(3/8)	2560
	(8/15)	2510
Granulats Recyclé Sika	(3/8)	2512
	(8/15)	2440

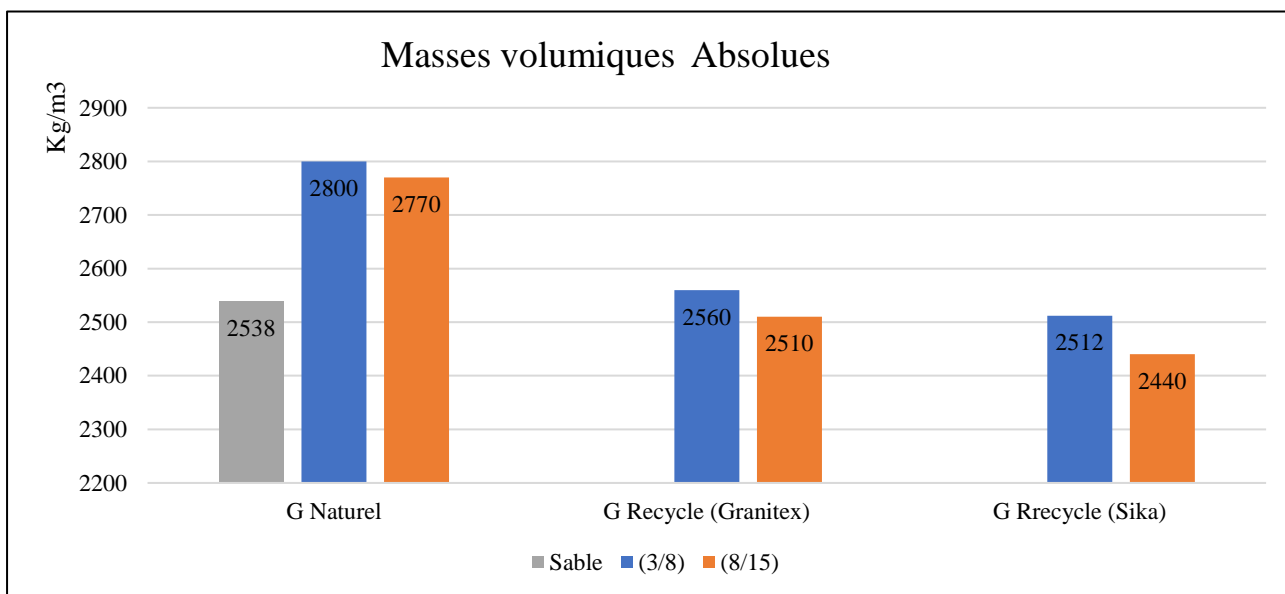


Figure (IV. 7) Résultats des Masses volumiques absolues (Mvabs)

Les masses volumiques des granulats recyclés que ce soit apparentes (Mvapp) ou absolues (Mv abs) sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels. Ceci peut être expliqué par l’existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse d’une part et la nature (densité) des roches sources de ces granulats d’autre part.

IV.2.3.6 Taux d’absorption d’eau (Ab %)

Tableau (IV. 10) Taux d’absorption d’eau (Ab %) des granulats naturels et recyclés

	Classe	Absorption (%)
Granulats Naturel	(3/8)	1
	(8/15)	0.8
Granulats Recyclé Granitex	(3/8)	3.3
	(8/15)	3.2
Granulats Recyclé Sika	(3/8)	3.1
	(8/15)	2.3

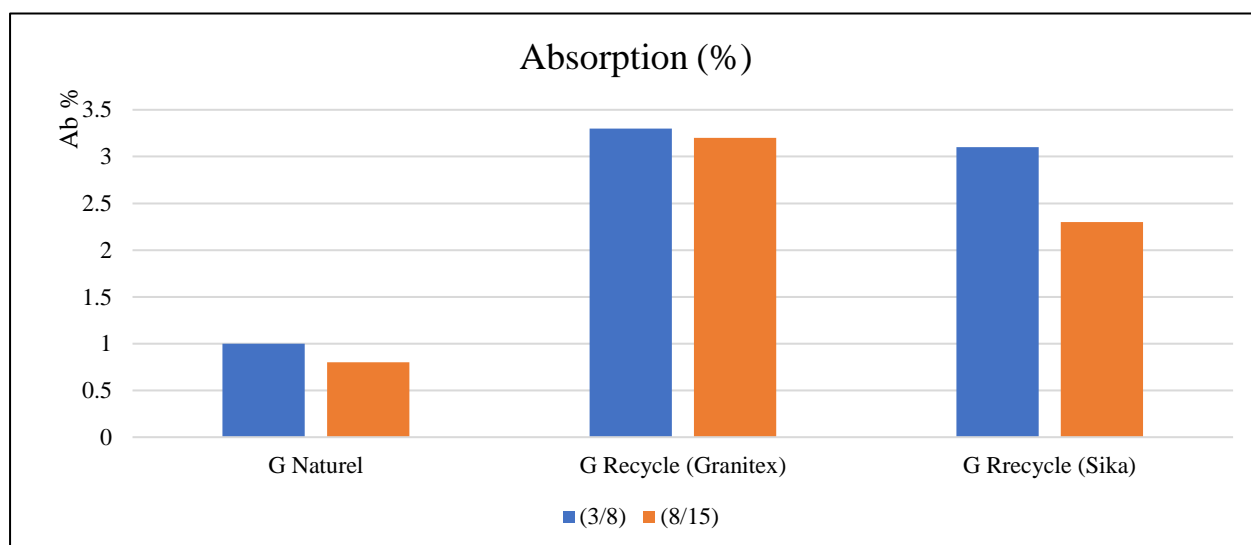


Figure (IV. 8) Taux d’absorption d’eau (Ab %) des granulats naturels et recyclés

D’après le tableau (IV.10) et la figure (IV.8) on peut conclure que les valeurs du coefficient d’absorption d’eau pour les granulats naturels sont très faibles ce qui confirme la bonne compacité de ces granulats. Par contre les granulats recyclés présentent des coefficients d’absorptions plus élevées, cela est dû essentiellement à leur nature minéralogique et morphologique qui se diffère de celle des granulats naturels.

IV.2.2.7 La propreté des sables (ES, VB)

Tableau (IV. 11) Équivalent de sable avant le lavage

	Ech 1	Ech2
Mesurer h1	19.4	19.7
Mesurer h2	8.7	9.1
Mesurer h'2	9.3	9.4
ES (PISTON)= $100 \cdot h2/h1$	44.8	46.2
Es moyen (PISTON)	45.5	
ES (VISUEL)= $100 \cdot h'2/h1$	47.9	47.7
ES moyen (VISUEL)	47.8	

Tableau (IV. 12) Équivalent de sable après lavage

	Ech 1	Ech2
Mesurer h1	11.9	11.4
Mesurer h2	9.5	9
Mesurer h'2	9.7	9.7
ES (PISTON)= $100 \cdot h2/h1$	79.8	78.9
Es moyen (PISTON)	79.4	
ES (VISUEL)= $100 \cdot h'2/h1$	81.5	85.1
Es moyen (VISUEL)	83.3	

La lecture $ES_v = 83.3 \%$ indique une valeur qui est entre 75 et 85 % et $ES_p = 79.4 \%$ valeur compris entre 70 et 80 % présentent un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

IV.2.2.8 Résultats d'essai de carbonate

Tableau (IV. 13) Essai de carbonate

	(3/8)	(8/15)
Sable	9	
G Naturel	18	18
G Recycle (Granitex)	22	22
G Rrecycle (Sika)	22	22

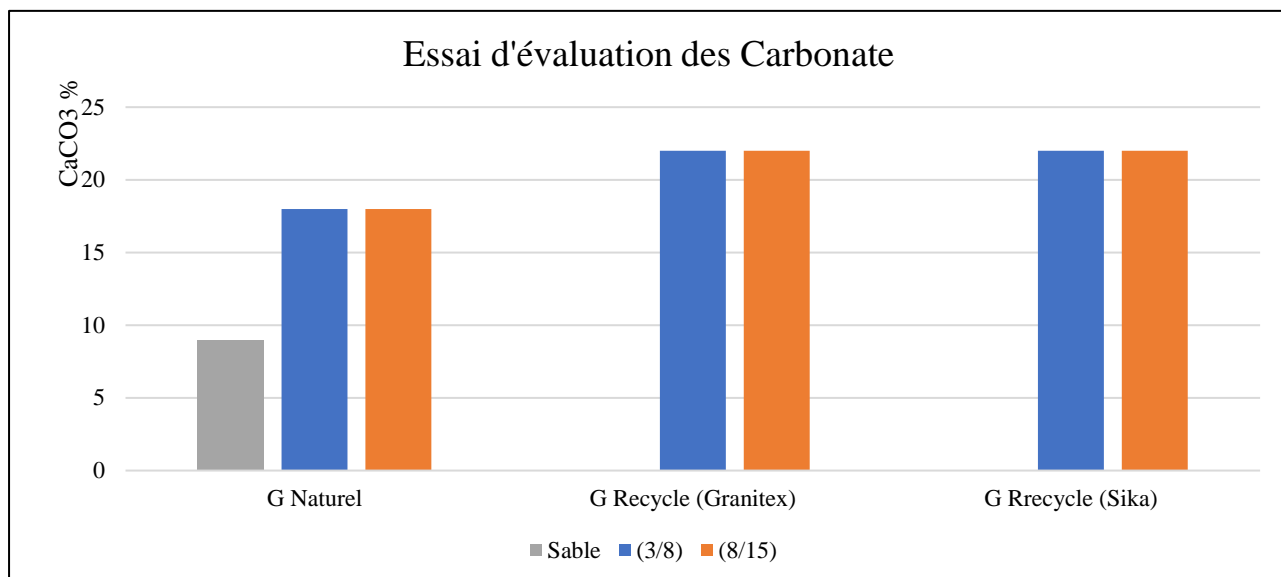


Figure (IV. 9) Résultats d’essai de carbonate

IV.2.2.9 Essai d’affaissement au cône d’Abrams

L’ouvrabilité du béton présente une caractéristique essentielle dans la fabrication de béton. Dans notre cas l’ouvrabilité est caractérisée par l’essai de l’affaissement au cône d’Abrams réalisé selon la norme [NF EN 12350-2 1999]. Il permet de déterminer la consistance d’un béton frais en mesurant l’affaissement qui n’est autre que la différence entre la hauteur du moule tronconique utilisé et le point le plus haut du corps d’épreuve affaissé.

Les valeurs de mesure de l’affaissement au cône d’Abrams sont données au tableau (IV.14) et représenté par la figure (IV.10).

Tableau (IV. 14) Valeurs de l’affaissement (en cm) au cône d’Abrams des BHP et BHPR

	Granitex	SIKA
0%	20	19
25%	17	17
50%	18	17
75%	19	16

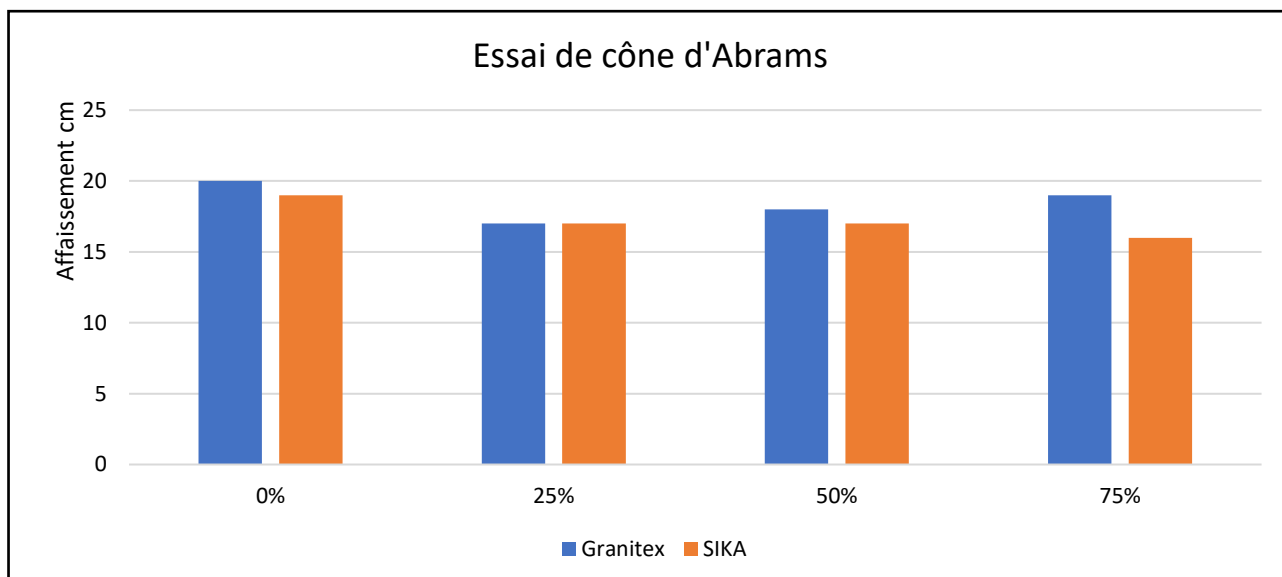


Figure (IV. 10) Maniabilité des différents BHP et BHPR

Selon les résultats obtenus on peut constater que :

- L'ensemble des mélanges des BHP et BHPR présentent des bétons très plastiques ou fluides avec des valeurs d'affaissements aux alentours de 16 cm à 20 cm. Par leur nature poreuse et absorbante, les granulats recyclés n'affectent pas la maniabilité des BHP en comparaison avec celle des BHP avec granulats naturels.

- Les BHP à base de la fumée de silice Granitex sont légèrement plus maniable par rapport à ceux de Sila. Cela est dû principalement à la finesse des particules de la fumée de silice Granitex qui offre au BHP une certaine viscosité et un écoulement supérieur à celui des BHP de fumée de silice Sika qui ne présentent pas cette finesse.

IV.3 Essais physico-mécaniques

IV.3.1 Masse Volumique à l'états durci

La masse volumique du béton à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2011]. Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique de dimensions (16×32) cm.

Tableau (IV. 15) Détermination de la masse volumique des BHP et BHPR

Remplacement %	Masse volumique (kg/m3) Granitex	Masse volumique (kg/m3) Sika
0%	2426	2387
25%	2406	2344
50%	2367	2309
75%	2354	2296

La variation de la masse volumique des BHP à l'état durci en fonction de différents paramètres de formulation à savoir la nature des granulats et le type de l'addition minérale utilisés est illustrée par la Figure (IV. 11)

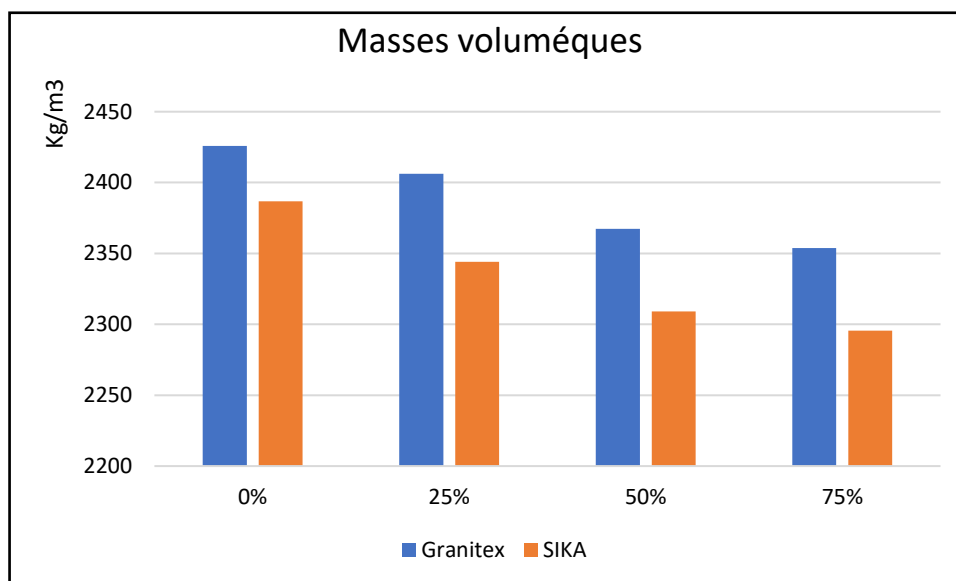


Figure (IV. 11) Masses volumiques des BHP et BHPR

On peut constater que :

- Pour les formulations avec le même type de granulat, la masse volumique des BHPR avec la fumée de silice de Granitex est légèrement supérieure à celle des BHP avec fumée de silice Sika. Cela est dû essentiellement à la différence de densité intrinsèque de deux additions minérales utilisées ;

- Et que les masses volumiques des BHP avec granulats naturels sont nettement supérieures à celle des BHP avec granulats recyclés. Cela est dû à l'existence de la pâte cimentaire attachée aux granulats recyclés qui est poreuse et friable.

IV.3.2 Résistances mécaniques en compression

Les essais de compression ont été effectués dans le but de mettre en évidence l'effet de deux paramètres à savoir : la nature des granulats et des additions minérales sur la résistance mécanique en compression. Afin d'étudier l'effet de ces deux paramètres

Le but est d'étudier et d'éclaircir l'influence du paramètre granulat sur l'évolution des résistances mécaniques dans le temps. La figure (IV.12), représente les résultats de l'évolution de la résistance en compression de quatre séries BHP et BHPR formulés avec trois fractions de remplacement de granulats recyclés. La fumée de silice est utilisée comme addition minérale (Sika et Granitex).

Les résultats des essais de compression à 7 et 28 jours de durcissement sont donnés dans les tableaux (IV.16) et (IV.17) :

Tableau (IV. 16) Résistance en compression des BHP et BHPR

Âge	FS	P% GR	mi	ma	n	(mi-ma) ²	S	fcj	v		
7 j	Granitex	0%	45.5	47.246	3	3.048516	2.79	42.68	5.9		
			51.758			20.35814					
			44.48			7.650756					
		25%	37.901	37.928	2	0.000729	0.04	37.87	0.1		
			37.955			0.000729					
		50%	37.776	38.1065	2	0.10923	0.47	37.34	1.2		
			38.437			0.10923					
		75%	37.901	33.98	2	15.37424	5.55	24.89	16.3		
			30.059			15.37424					
		7 j	Sika	0%	43.67	41.4433	3	4.958044	1.38	39.18	3.3
					40.64			0.645344			
					40.02			2.025878			
25%	39.279			41.202	2	3.697929	2.72	36.74	6.6		
	43.125					3.697929					
50%	39.699			37.118	2	6.661561	3.65	31.13	9.8		
	34.537					6.661561					
75%	43.717			38.795	2	24.22608	6.96	27.38	17.9		
	33.873					24.22608					
28 j	Granitex			0%	52.848	51.2627	3	2.513282	4.07	44.59	7.9
					44.883			40.70015			
					56.057			22.98563			
		25%	41.73	42.909	2	1.390041	1.67	40.17	3.9		
			44.088			1.390041					
		50%	24.855	23.3745	2	2.19188	2.09	19.94	9.0		
			21.894			2.19188					
		75%	16.218	17.094	2	0.767376	1.24	15.06	7.2		
			17.97			0.767376					
		28 j	Sika	0%	58.604	53.8593	3	22.51186	5.74	44.45	10.7
					58.483			21.37829			
					44.491			87.76567			
25%	51.03			52.1685	2	1.296182	1.61	49.53	3.1		
	53.307					1.296182					
50%	45.261			50.593	2	28.43022	7.54	38.23	14.9		
	55.925					28.43022					
75%	15.429			31.093	2	245.3609	22.15	-5.24	71.2		
	46.757					245.3609					

Tableau (IV. 17) Récap des résultats obtenus pour la détermination de la résistance en compression des BHP et BHPR

Âge	FS	P% GR	E/L	Affaissment	Pois	Mv kg/m3	Mv kg/m3	Force	moy force	Fc	moy fc
7 j	Granitex	0%	0.36	20	15.55	2418	2439	914.83	949.96	45.5	47.25
					15.75	2449		1040.65		51.758	
					15.75	2449		894.40		44.48	
		25%	0.37	18	15.40	2395	2402	762.05	762.59	37.901	37.93
					15.50	2410		763.13		37.955	
		50%	0.38	19	15.20	2364	2364	759.54	766.18	37.776	38.11
					15.20	2364		772.81		38.437	
		75%	0.39	19	15.05	2340	2348	760.47	682.42	37.901	33.98
15.15	2356				604.38	30.059					
7 j	Sika	0%	0.33	17	15.5	2410	2389	878.12	833.31	43.67	41.44
					15.25	2371		817.15		40.64	
					15.35	2387		804.66		40.02	
		25%	0.34	18	15.10	2348	2356	789.75	828.41	39.279	41.20
					15.20	2364		867.07		43.125	
		50%	0.36	19	14.80	2301	2301	798.14	746.27	39.699	37.12
					14.80	2301		694.41		34.537	
		75%	0.37	17	14.80	2301	2297	879.98	780.52	43.717	38.80
14.75	2294				681.06	33.873					
28 j	Granitex	0%	0.36	20	15.55	2418	2413	1062.57	1030.68	52.848	51.26
					15.55	2418		902.44		44.883	
					15.45	2402		1127.05		56.057	
		25%	0.37	16	15.5	2410	2410	839.02	862.73	41.73	42.91
					15.5	2410		886.44		44.088	
		50%	0.38	17	15.3	2379	2371	499.66	469.90	24.855	23.37
					15.2	2364		440.14		21.894	
		75%	0.39	18	15.2	2364	2360	326.08	343.70	16.218	17.09
15.15	2356				361.32	17.97					
28 j	Sika	0%	0.33	23	15.4	2395	2384	1178.30	1082.90	58.604	53.86
					15.2	2364		1175.87		58.483	
					15.4	2395		894.55		44.491	
		25%	0.34	11	15.00	2332	2332	1026.02	1048.91	51.03	52.17
					15.00	2332		1071.81		53.307	
		50%	0.35	15	14.90	2317	2317	910.03	1017.24	45.261	50.59
					14.90	2317		1124.45		55.925	
		75%	0.36	16	14.70	2286	2294	310.22	625.16	15.429	31.09
14.80	2301				940.11	46.757					

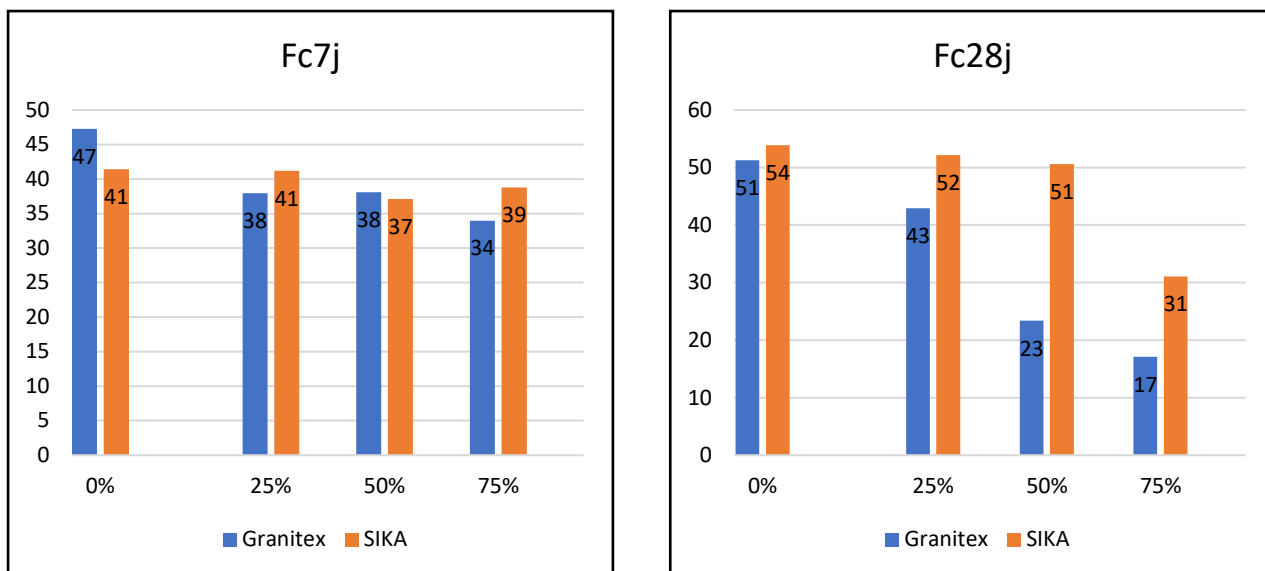


Figure (IV. 12) Résistance en compression des BHP et BHPR à 7 et 28 jours de durcissement

Dès 7 jours, on observe des niveaux des résistances variables selon le type de granulat utilisé. Les valeurs de résistance en compression des BHP avec granulats naturels sont de l'ordre de 45 MPa avec fumée de silice Granitex et 41 MPa avec fumée de silice Sika, dans le cas d'utilisation de granulats recyclés avec différent taux de remplacement ces valeurs sont inférieures soit avec fumée de silice Granitex ou avec fumée de silice Sika.

Selon les valeurs de l'évolution des résistances de 7 à 28 jours, les BHP à base de granulats naturels présentent les meilleures résistances en compression par rapport à celles des BHP à base de granulats recyclés. Cela est attribué aux caractéristiques mécaniques des granulats utilisés et à l'effet du mortier attaché, les agrégats recyclés sont subis déjà aux charges (la charge de compression de béton avant le concassage, la charge de concassage, la nouvelle charge de compression).

IV.3.3 Résistance de traction par flexion :

L'essai de flexion trois points a été effectué sur des éprouvettes prismatiques. Les résultats des essais de traction par flexion des différents bétons étudiés sont récapitulés dans les tableaux (IV.18) et (IV.19) :

Tableau (IV. 18) Résistance de traction par flexion des BHP et BHPR

Âge	Fumées s	P% GR	mi	ma	n	(mi-ma) ²	S	ftj	v		
7 j	Granitex	0%	1.52	1.51767	3	4.44E-07	0.001	1.52	0.10		
			1.52			2.78E-06					
			1.52			5.44E-06					
		25%	1.32	1.3445	2	0.00087	0.042	1.28	3.10		
			1.37			0.00087					
		50%	1.24	1.2085	2	0.00087	0.042	1.14	3.45		
			1.18			0.00087					
		75%	1.07	1.1155	2	0.00198	0.063	1.01	5.64		
			1.16			0.00198					
		7 j	Sika	0%	1.50	1.45	3	0.0025	0.049	1.37	3.41
					1.37			0.0064			
					1.48			0.0009			
25%	1.29			1.2105	2	0.006006	0.110	1.03	9.05		
	1.13					0.006006					
50%	1.19			1.1655	2	0.000462	0.030	1.12	2.61		
	1.14					0.000462					
75%	1.07			1.072	2	1E-06	0.001	1.07	0.13		
	1.07					1E-06					
28 j	Granitex			0%	1.36	1.32667	3	0.001394	0.034	1.27	2.58
					1.34			0.0003			
					1.27			0.002988			
		25%	1.48	1.519	2	0.001296	0.051	1.44	3.35		
			1.56			0.001296					
		50%	1.70	1.494	2	0.041616	0.288	1.02	19.31		
			1.29			0.041616					
		75%	1.41	1.3365	2	0.0057	0.107	1.16	7.99		
			1.26			0.0057					
		28 j	Sika	0%	1.78	1.669	3	0.012544	0.076	1.55	4.53
					1.66			0.000121			
					1.57			0.010201			
25%	1.47			1.4745	2	2.02E-05	0.006	1.46	0.43		
	1.48					2.03E-05					
50%	1.54			1.481	2	0.003136	0.079	1.35	5.35		
	1.43					0.003136					
75%	1.65			1.605	2	0.002116	0.065	1.50	4.05		
	1.56					0.002116					

L'analyse globale des valeurs moyennes de la résistance en traction par flexion montre que les BHP à base de granulats naturels et de fumée de silice Sika ont des valeurs légèrement supérieures

à celles des BHP à base de granulats recyclés avec fumée de silice Granitex, cela est le résultat de l'amélioration de la zone d'interface granulat matrice cimentaire qui est obtenue grâce aux réactions pouzzolanique.

Tableau (IV. 19) Récap des résultats obtenus pour la détermination de la résistance de traction par flexion des BHP et BHPR

Âge	Fumées	P% GR		Affaissment	Pois	Mv Kg/m3		Force	Moy force	Ft	Moy ft		
7 j	Granitex	0%	0.36	20	9.75	243750	244583	15.17	15.18	1.52	1.52		
					9.75	243750		15.16		1.52			
					9.85	246250		15.21		1.52			
		25%	0.37	18	9.70	242500	241250	13.15	13.45	1.32	1.34		
					9.60	240000		13.74		1.37			
		50%	0.38	19	9.30	232500	233750	12.38	12.08	1.24	1.21		
					9.40	235000		11.79		1.18			
		75%	0.39	19	9.30	232500	233750	10.71	11.16	1.07	1.12		
					9.40	235000		11.61		1.16			
		7 j	Sika	0%	0.33	17	9.5	237500	237500	15.04	14.55	1.50	1.45
							9.5	237500		13.79		1.37	
							9.5	237500		14.81		1.48	
25%	0.34			18	9.50	237500	237500	12.88	12.10	1.29	1.21		
					9.50	237500		11.33		1.13			
50%	0.36			19	9.40	235000	235000	11.87	11.65	1.19	1.17		
					9.40	235000		11.44		1.14			
75%	0.37			17	9.30	232500	232500	10.73	10.72	1.07	1.07		
					9.30	232500		10.71		1.07			
28 j	Granitex			0%	0.36	20	9.8	245000	244583	13.64	13.27	1.36	1.33
							9.75	243750		13.44		1.34	
							9.8	245000		12.72		1.27	
		25%	0.37	16	9.7	242500	242500	14.83	15.19	1.48	1.52		
					9.7	242500		15.55		1.56			
		50%	0.38	17	9.7	242500	240000	16.98	15.64	1.70	1.49		
					9.5	237500		14.29		1.29			
		75%	0.39	18	9.6	240000	236250	14.12	13.37	1.41	1.34		
					9.3	232500		12.61		1.26			
		28 j	Sika	0%	0.33	23	9.6	240000	239167	17.81	16.69	1.78	1.67
							9.5	237500		16.58		1.66	
							9.6	240000		15.68		1.57	
25%	0.34			11	9.30	232500	231250	14.70	14.74	1.47	1.47		
					9.20	230000		14.79		1.48			
50%	0.35			15	9.40	235000	233750	15.37	14.81	1.54	1.48		
					9.30	232500		14.25		1.43			
75%	0.36			16	9.30	232500	232500	16.51	16.05	1.65	1.61		
					9.30	232500		15.59		1.56			

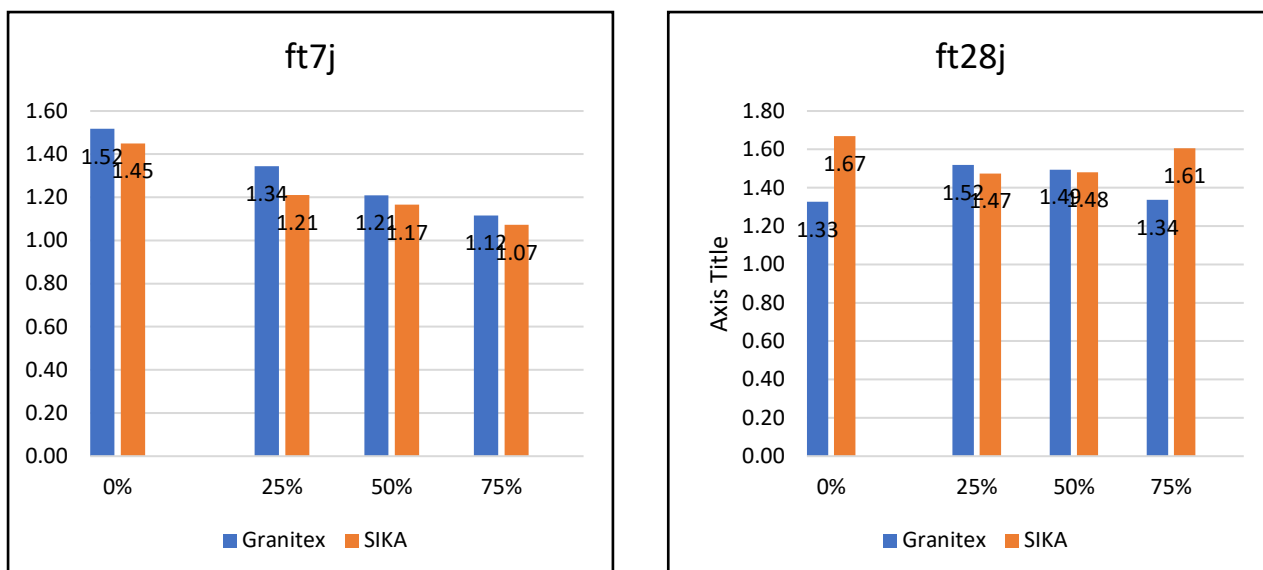


Figure (IV. 13) Résistance en traction par flexion des BHP et BHPR à 7 et 28 jours de durcissement

L'analyse globale des valeurs moyennes de la résistance en traction par flexion montre que les BHP à base de granulats naturels et de fumée de silice Sika ont des valeurs légèrement supérieures à celles des BHP à base de granulats recyclés avec fumée de silice Granitex, cela est le résultat de l'amélioration de la zone d'interface granulat matrice cimentaire d'une part et par leur rugosité et état de surface qui favorise l'adhérence pâte hydratée-granulat contribuant ainsi à l'amélioration de la résistance d'autre part.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le but de ce travail expérimental est d'étudier l'effet des granulats recyclés sur les propriétés du béton à hautes performances en présence d'additifs (Granitex, Sika), en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés avec des taux de : 25, 50 et 75%. Les propriétés du béton de quatre compositions ont été étudiées.

Un granulats recyclés a été considéré « granulats recyclés » (GR) issus d'un béton à hautes performances naturel concassé au laboratoire (déchets des bétons). Les propriétés des bétons qui les contiennent (béton recyclé) sont comparées à celles de bétons à hautes performances de granulats naturels (béton témoin).

Les granulats étudiés ont été incorporés dans des bétons à matrice cimentaire avec additifs, et un rapport E/L inférieur à 0,4.

L'étude des caractéristiques des granulats recyclés a montré dans quelle mesure la présence de mortier attaché au granulats d'origine modifiait les propriétés physiques des granulats recyclés. Leur densité est en effet plus faible de près de 10% que celles des granulats naturels et une augmentation de la capacité d'absorption d'eau par rapport au béton naturel.

Les caractéristiques particulières des granulats recyclés (présence de mortier et de zones de transition interfaciales) confèrent aux bétons HP recyclés une plus grande porosité que celle des bétons HP. La porosité des granulats recyclés a un impact important sur la résistance en compression du béton recyclé.

Cette étude consacrée au comportement mécanique des bétons à hautes performances, a mis en évidence l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés physiques et l'évolution des résistances mécaniques. A l'issue de l'analyse des différents résultats obtenus les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- Les masses volumiques absolues des trois types de granulats recyclés sont très proches et qui présentent des valeurs inférieures à celles des granulats naturels. Cela est dû essentiellement à leurs natures minéralogiques qui se différencient de celle des granulats naturels.
- Les valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats naturels sont très faibles ce qui confirme la bonne compacité de ces granulats. Par contre les granulats recyclés présentent des coefficients d'absorption plus élevés et par conséquent plus poreux et moins compacts.
- L'essai de Los Angeles montre que les granulats naturels sont mécaniquement plus résistants que les autres types de granulats recyclés.
- La masse volumique des BHP avec granulats naturels (Granitex) est plus élevée par rapport à celle des BHP avec granulats recyclés (Sika). Les BHP à base de granulats naturels présentent les meilleures caractéristiques de compacité et de résistance mécanique et ceux avec granulats recyclés présentent les plus faibles résistances. On peut justifier ça aux propriétés des granulats de qui présentent les plus fortes liaisons avec la matrice cimentaire.
- On peut constater que l'introduction des granulats recyclés en substitution aux granulats naturels influence considérablement les propriétés des BHP à l'état durci. Les masses volumiques des BHP avec granulats recyclés sont nettement inférieures lorsque le taux de remplacement augmente. Cela est dû à la densité des granulats naturels qui est plus élevée par rapport aux granulats recyclés
- Les valeurs des résistances en compression à 28 jours des BHP avec la fumée de silice (Sika) sont légèrement supérieures à celles des BHP contenant la fumée de silice

(Granitex). Ceci présente un avantage pour l'utilisation des fumées de silice (Sika) qui peut apparaître intéressant du point de vue résistance mécanique.

Ce travail de recherche a conduit à l'élaboration d'une base de données utiles sur le comportement des bétons à hautes performances et l'intérêt de l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons à hautes performances et les possibilités d'utilisation de ce nouveau matériau dans les différents types d'ouvrages de génie civil en Algérie.

Références bibliographiques

- [1] D. Georges et . F. Jean, Nouveau guide de béton, 1976.
- [2] Coure de matériaux de construction.
- [3] O. OLFA, Durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques., Université Laval, 2011.
- [4] G. a. J. A. De Schutter, Le béton à hautes performances, Dossier Cement (Febelcem) 40 , 2007.
- [5] Benarima, Zine El Abidine. Etude du comportement thermique des Ciments lors du durcissement par analyse calorimétrique. Diss. 2019..
- [6] Méthode BARON-OLLIVIER avancée Nous sommes -Pages similaires.
- [7] Neville et Adam N, Propriétés des bétons. Eyrolles,, Eyrolles, 2000.
- [8] M. SERIFOU, Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2014.
- [9] «<https://www.infociments.fr/favoriser-leconomie-circulaire/le-beton-un-materiau-recyclable-et-recycle>,» [En ligne].
- [10] Courard, Luc. Utilisation des matières-Problématique 15: Le cycle de vie des matières–matériaux de construction. DGRNE, 2006..
- [11] BOUABDALLAH, Moulai Abdellah, Kada HAMOU, and Amel BOUABDALLAH. "LES VIEUX BATI ENTRE LA REHABILITATION ET LE RECYCLAGE."
- [12] D. Simon , M. Frédéric , Z. Zengfeng et C. Luc , UTILISATION DES SABLES ET GRANULATS RECYCLÉS DANS LE BÉTON PRÉFABRIQUÉ : COMPARAISON DES EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES ET TECHNIQUES EN EUROPE, 2018.
- [13] L. H. H. Jean David , M. Pierre-Yves , L. Jérôme et T. Philippe , Analyse d'images par réseaux de neurones profonds appliquée à la détermination de la composition de granulats recyclés, 2019.
- [14] L. Berredjem , N. Arabi et M. Laurent, Influence de la nature des granulats recyclés sur les propriétés des bétons, 2020.
- [15] D. Brice et . S. Stéphanie, IMPACT DE LA PRESENCE DE GRANULATS ET DE SABLES RECYCLES SUR LE DEVELOPPEMENT DES PROPRIETES DU BETON DEPUIS LA PRISE, 2018.
- [16] H. Simon, Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers, 2019.
- [17] T. V. Ngoc , Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste, 2011.

- [18] H. C. François DE LARRARD, Le béton recyclé, 2018.
- [19] von Bülow, Anna, et al. "The level of diagnostic assessment in severe asthma: a nationwide real-life study." *Respiratory medicine* 124 (2017): 21-29..
- [20] H. G. T. M. R. N. Belin P, Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates, *Materials and Structures*,47, 1451-1465,, 2014.
- [21] D. J. Haase R, Material cycles on the example of concrete in the northern parts of Germany, *Beton*, 48(6), 350-355,, 1998.
- [22] R. M. Fleischer W, Recycled aggregates from old concrete highway pavements, *Proc., Int. Seminar Exploiting Wastes in Concrete*, Thomas Telford, London, 151-161,, 1999.
- [23] G. P. A. Juan M. S, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materterials*, 23(2), 872-877,, 2009.
- [24] B. H. Florea M.V.A, Properties of various size fractions of crushed concrete related to process conditions and re-use, *Cement and Concrete Research*, 52, 11-21,, 2013.
- [25] O. K. T. C. Z. M. Akbarnezhad A, Effects of the Parent Concrete Properties and Crushing Procedure on the Properties of Coarse Recycled Concrete Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*,25, 1795-1802,, 2013.
- [26] K. R. T. M. Noguchi T, Minimizing environmental impact and maximizing performance in concrete recycling, *Structural Concrete*, 12,36-46,, 2011.
- [27] G. A. S. T. H. M. Nagataki S, Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34, 6, 965-971,, 2004.
- [28] d. B. J. E. L. Pedro D, Influence of the Use of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources on Structural Concrete, *Construction and Building Materials*, 71, 141-151, 2014.
- [29] N. T. Ogawa H, Improving the Quality of Recycled Fine Aggregate by Selective Removal of Brittle Defects, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(12), 395-410,, 2012.
- [30] François De Larrard, *Concrete Mixture-Proportioning: a scientific approach*, Modern Concrete Technology, series No. 9, A. Bentur and S. Mindness editors, E & FN SPON, ISBN 0-419-23500-0,, 1999.
- [31] S. M. G. T. E. S. Tomas J, Impact crushing of concrete for liberation and recycling, *Powder Technology*, 105, 39-51,, 1999.
- [32] Neveu A, *Simulation numérique de la fragmentation des granulats*, thèse de doctorat de l'Ecole doctorale SPIGA,, 2016.
- [33] A. M. Takahashi H, DEM Simulation of Crushing for Concrete Blocks by Mobile Crusher, in: Nakagawa, M., Luding, S. (Eds.), *Powders and Grains*, American Institut of Physics, Melville, 843-846,, 2009.

- [34] W. Y. O. Y. Y. M. I. Y. A. A. Asakura H, Characteristics of fine processed construction and demolition waste in Japan and method to obtain fines having low gypsum component and wood contents, *Waste Management and Research*, 28, 634-646,, 2010.
- [35] T. Y. M. T. M. T. Y. M. A. H. O. Y. Montero A, Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs, *Journal of Hazardous Materials*, 175, 747-753,, 2010.
- [36] A. J. P. P. Schouenborg B, Test methods adapted to alternative aggregates. In: Vázquez E, Hendriks ChF, Janssen GMT (eds) *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona, 1154-1162,, 2004.
- [37] L. D.-H. C. N.-B. L. K.-S. Huang W.-L, Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process, *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 23-37, 2002.
- [38] P. J.-N. Champeau B, Valorisation des sables, *Mines et Carrières*, 207, 41-49,, 2003.
- [39] H. F. Cazacliu B, Technologies de séparation à sec des sables et des fines de recyclage – Étude bibliographique, *Rapport RECYBETON n° R15RECY019*, 62p,, 2016.
- [40] Pettingell H, An effective dry sand manufacturing process from japan; potential to replace natural sand entirely in concrete, *Quarry Management Magazine*,, 2008.
- [41] Meinel A, Fine and Very Fine Screening, *Mineral Processing*, 51, 2-8,, 2010.
- [42] Johansson R., *Air Classification of Fine Aggregates. Doktorsavhandlingar Vid Chalmers Tekniska Högskola, N.S., 3817, Göteborg: Chalmers Univ. of Technology*,, 2014.
- [43] D. J. R. P. M. R. v. R. E. v. d. S. H. Lotfi S, Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates, *Resources*,, 2014.
- [44] K. A. Ajdukiewicz A, Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement Concrete Composite*,24(2), 269-279,, 2002.
- [45] Gomez-Soberon J. M, Creep of Concrete with Substitution of Normal Aggregate by Recycled Concrete Aggregate, *ACI Material Journal*, 209,461-474,, 2002.
- [46] B. E. Hansen T. C, Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete, *ACI Journal*, 82 (82), 648-652,, 1985.
- [47] S. P. Tavakoli M, Drying Shrinkage Behavior of Recycled Aggregate Concrete, *Concrete International*, 58-61,, 1996.
- [48] B. T. T. A. H. Sagoe-Crentsil K. K., Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 31, 707-712,, 2001.
- [49] Gómez-Soberón J. M, Relationship between Gas Adsorption and the Shrinkage and Creep of Recycled Aggregate Concrete, *Cement and Concrete Aggregates*, 25, 42-48, 2003.

- [50] Katz A, Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 703-711,, 2003.
- [51] L. C. L.-G. F. S.-L. M. A. S. P. C.-T. J. O. Domingo-Cabo A., Creep and Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2545-2553,, 2009.
- [52] G. R. A. B. I. O. A. A. B. F. S. Fathifazl G, Creep and Drying Shrinkage Characteristics of Concrete, 2011.
- [53] Dao D.T, (Multi-) Recyclage Du Béton Hydraulique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes,, 2012.
- [54] M. C. B. M. C. Manzi S, Short and Long-Term Behavior of Structural Concrete with Recycled Concrete Aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 37, 312-318,, 2013.
- [55] ACI 224R-01, "Control of Cracking in Concrete Structures Reported by ACI Committee 224,," 2001.
- [56] X. J. T. V. W. Fan Y, Effect of old attached mortar on the creep of recycled aggregate concrete, *Structural Concrete*, 15(2), 169-178,, 2014.
- [57] D. W. B. J. Neville A, Creep of plain and structural concrete, Construction Press,, 1983.
- [58] G. M. N. A. Cree D, Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review, *Construction and Building Materials*, 45, 208-223,, 2013.
- [59] X. J. S. Z. Liu Q, Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete, *Cement and Concrete Research*, 41 (10), 1050-1057,, 2011.
- [60] B. S. M. A. D. R. M. S. Behera M, Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Construction and Building Materials*,, 2014.
- [61] C. A. L. P. Scrivener K.L, The Interfacial Transition Zone (ITZ) between cement past and aggregate in concrete, *Interface Science*, 12, 411-421,, 2004.
- [62] D. M. A. Zega CJ, Recycled concrete exposed to high temperatures, *Magazine of Concrete Research*, 58 (10), 675-682,, 2006.
- [63] Sarhat S. Sherwood E, Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperature, *Journal of Material in Civil Engineering*, 25, 1721-1730,, 2013.
- [64] C. J. B. J. Vieira JPB, Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates, *Cement Concrete Research*, 41, 533-541,, 2011.
- [65] T. K. A. N. H. K. K. S. M. N. Eguchi K, Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction, *Construction and Building Materials*, 21, 1542-1551,, 2007.

- [66] D. M. A. Zega CJ, Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature, *Construction and Building Materials*, 23, 2047-2052,, 2009.
- [67] Z. C. Xiao J.Z, Fire damage and residual strengths of recycled aggregate concrete, *Key Engineering Materails*, 348-349, 937-940,, 2007.
- [68] Y. J. H. Q. S. Y. Z. C. Liu K, Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 106, 264-273,, 2016.
- [69] F. H. Xiao J, Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars, *Construction and Building Materials*, 21(2), 395-401,, 2007.
- [70] S. B. Prince M. J. R, Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 49,852-862,, 2013.
- [71] S. B. Prince M. J. R., Bond strength of deformed steel bars in high-strength recycled aggregate concrete, *Materials and Structures*,, 2014.
- [72] <https://fr.dreamstime.com/photo-stock-dessous-d-grand-pont-dessus-baie-image53519226>.
- [73] «<https://www.rubblemaster.com/fr/rapports/recyclage/beton/rubble-master-has-changed-my-business/>,» En ligne, consulté le 17 June 2021. [En ligne].
- [74] L. D. B. Jeroen Vrijders, *Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton*, 2019.
- [75] B. Sandrine , D. Kunwufine , R. Sébastien et . F. Christophe, *Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons*, 2014.

Annexe A

Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable Esv et Esp

Esv	Esp	Noté
Es<65	Es<60	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bitons de qualité.
65<Es<75	65<Es<70	Sable légèrement argileux : de propriétés admissibles convient parfaitement pour des bétons de qualité courate quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75<Es<85	70<ES<80	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
Es>85	Es>85	Sable très propre : l'absence totale de fines argileux risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Classification des sables en fonction du module de finesse

Quality du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

Annexe B

Normes des essais sur différents constituants de béton

Essai		Fraction	Poids (g)	La norme
Analyse granulométrique	Sable	(0/6.3)	500	NA 2607
	Gravier 3/8	(2/10)	1600	
	Gravier 8/15	(6.3/20)	3000	
Coefficient d'Aplatissement	Gravier 8/15	(5/20)	3000	NA 256
Los-Angeles	Gravier 3/8	(4/6.3)	5000	NA 458
	Gravier 8/15	(10/14)	5000	
Micro-Deval	Gravier 3/8	(4/6.3)	500	NA 457
	Gravier 8/15	(10/14)	500	
Masse volumique Apparente	Sable	(0/5)	2000	NA 255
	Gravier 3/8	(3/8)	5000	
	Gravier 8/15	(8/15)	5000	
Masse volumique Absolue	Sable	(0/5)	50	NA 255
	Gravier 3/8	(3/8)	500	
	Gravier 8/15	(8/15)	500	
Teneur en l'eau	Sable	(0/5)	1000	NA 255
	Gravier 3/8	(3/8)	1600	
	Gravier 8/15	(8/15)	3000	
Absorption d'eau	Sable	(0/5)	1000	NA 255
	Gravier 3/8	(3/8)	1600	
	Gravier 8/15	(8/15)	3000	
Propreté de sable	ES	(0/5)	120	NF P 18-598
	VB	(0/0.080)	300	NFP 18-592
Propreté des gros granulats	Gravier 3/8	(3/8)	1600	NF P 18-591
	Gravier 8/15	(8/15)	3000	
Carbonate	Sable	(0/0.2)	20	NA 2789
	Gravier 3/8	(0/0.2)	20	
	Gravier 8/15	(0/0.2)	20	

Annexe C

Méthode de composition de béton



**Laboratoire des Travaux
Publics de l'Ouest**

Entreprise Publique Economique Au capital social de 22500000 DA
RC: 9890103524 / Mat. Fisc. 09901010015039 / Art Impo. 3101 6145011

Unité de iaret

Adresse: Cité 248 logis B.P 498 14000 - Iaret
Art Imposition: 1401 6801515
Téléphone: 048 42.81.11
Télécopie: 048 42.81.11

Département technique:

Note Technique

E							
Feuille de paillassa							
N° dossier: <u>TIM/888</u>							
Intitulé: <u>COMPOSITION DE BETON</u>							
Clien : <u>HYDRONEUF</u>							
Date: <u>22/02/2021</u>							
1	<u>Calcul de la dimension maximale (D_{max}):</u>						
	$D_{max} = d_1 + (d_1 - d_2) \times y$			13.53 mm			
2	$D_{max} / 2$			6.76 mm			
3	<u>Calcul de l'ordonnée Y:</u>						
	$Y = A + 17 \sqrt{D_{max}}$			57.62			
4	<u>Calcul de I (indice des vides):</u>						
	$I = K / \sqrt[3]{D_{max}}$			182 L			
5	<u>Calcul du volume matériaux secs:</u>						
	$V_{mat} = 1000 - I$			818 L			
6	<u>volume absolu de ciment :</u>						
	$V_{ac} = P_c / D_c$			145 L	PC =	450 kg / m3	
7	<u>Calcul en %age du volume absolu de ciment:</u>						
	$V_c = V_{ac} / V_{mat}$			18 %			
composant	%	(1000- eau)/100	volume absolu (L)	masse volumique absolue (kg/m3)	composants en masse (kg)	masse volumique apparente (kg/m3)	composants en volume (L)
1	2	3	4	5	6	7	8
			2 *3		4*5		6/7
Ciment	18	8.18	145	3.10	450	1	450
Sable	36	8.18	290	2.53	735	1.39	529
0/3	0	0.00	0	0	0	0.00	0
3/8	18	8.18	143	2.80	401	1.47	273
8/15	28	8.18	229	2.77	635	1.48	429
15/25	0	0.00	0	0.00	0	0	0
Eau	182	/	182	1	182	1	182
Totaux	100	/	/	/	2402	/	1862

Date
2021-03-21

L'opérateur
A.MOUAR

Le chef de service
S.HAMRELAINE

FL2

Annexe D

Fiche technique ciment EL ESSAS

**CONFORMITÉ PRODUIT****CLASSE SR5**

NA 442 : 2013 – EN 197-1 : 2012.

DESIGNATION NORMALISEE

NA 442-CEM I 42.5 N-LH/SR 5.

OUVRAGES EN MILIEUX AGRESSIFS

Eau, Sol, Air.

OUVRAGES MASSIFS

FABRICATION

-PRODUIT 100% ALGERIEN

-Fabrication exclusive à l'usine Amouda Ciment sise à El Beida Laghout.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES**PROPRIETES CHIMIQUES**

Bogue : C3A <= 5%.

NA 5042 (EN 196-2) : SO3 <= 3%.

NA 5042 (EN 196-2) : Chlorure <= 0.1%

PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUE

NA 230 (EN 196-3) : DP > 60 mm

NA 234 (EN 196-1) :

- Résistance à la compression (2 jours) > 10 MPa

- Résistance à la compression (28 jours) > 42.5 MPa

EMPLOIS ET USAGES CONFORME À VOS PROJETS

- Tunnels et travaux souterrains.
- Terrains gypseux, eaux pures, eaux usées et industrielles.
- Milieux sulfatés.
- Fondations et structures à réaliser dans des milieux agressifs.
- Injections.
- Ouvrages massifs.
- Travaux à la mer.

**NOS PRODUITS AUSSI****AL IMRAN**

NA 442-CEM II / B-L 32.5 R.

Ciment pour les professionnels de la construction

**AWTED**

NA 442-CEM I/A-L 42.5 N

Ciment aux performances élevées, (super structure).

POUR PLUS D'INFORMATION VEUILLEZ CONSULTER NOTRE SITE WEB :

www.amoudaciment.comEmail : service.clients@amoudaciment.com**Direction commerciale**

Lotissement 200, Section 4, Zone d'activités Azzara, Chéraga, Alger.

Tél. : 020 305 915
Fax : 020 30 55 14Région Nord : 0655 626 226
Région Sud : 0658 263 453**Coordonnées usine**

Commune El Beïcha, Quartier Sidi Saïd, village de LAGHOUAT

Tél. : 020 173 480
Fax : 020 17 34 91

Spécialité Qualité : 0658 403 772



Annexe E

Fiche technique SUPERPLASTIFIANT MEDAFLOW RE 25

MEDAFLOW RE 25

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

**Super plastifiant–Haut réducteur d'eau
Pour travaux de préfabrications****Description**

Le MEDAFLOW RE 25 est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas.

Le MEDAFLOW RE 25 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules
- Bétons précontraints et architecturaux

Propriétés

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW RE 25 permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

DESIGNATION	Rc (MPA)	
Jours	1J	28J
Témoin	5,4	28,0
MEDAFLOW RE25 (%)	13,2	39,5

Ciments CPJ = 42.5 = 350Kg/m³
E/C = 0.38

Caractéristiques :

- Aspect..... liquide
- Couleur..... Brun clair
- pH..... 7
- Densité..... 1,06 + 0,01
- Teneur en chlore..... < 0,1 g/l
- Extrait sec..... 25%

Mode D'emploi :

Il est recommandé d'ajouter le MEDAFLOW RE 25 dans le béton après introduction des ¾ de l'eau de gâchage. Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage adéquat pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m³.

Par temps chaud, le MEDAFLOW SR25 peut être combiné à un retardataire de prise (MEDARETARD GR).

Dosage :

Plage de dosage recommandée :

1.0 à 2.5% du poids de ciment soit 0,93 litres à 2,36 litres.

Pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Conditionnement Et Stockage :

Le MEDAFLOW RE 25 est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 240 kg et cubétenaire 1100 kg.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

Précautions D'emploi :**Manipulation non dangereuse.**

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

NB : Les produits à base de Poly carboxylates d'Ether (PCE), exposés aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en 06 FEV 2012

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenue pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
شركة الجرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

TW : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Annexe F

Fiche technique fumé de silice Granitex

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice**Description**

Le MEDAPLAST HP est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP).

Il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

Propriétés :

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP permet :

Sur béton frais :

- Améliorer la cohésion
- Éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques
- Obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- Augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- Obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- Augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (MEDAPLAST SP, SP40) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

Caractéristiques :

- Aspect Poudre
- Densité 0,5
- Densité absolue $2,3 \pm 0,1$
- Composants :
 - SiO₂ > 85(%)
 - SO₃ < 2,5 (%)
 - Cl- < 0,2 (%)
- Surface spécifique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

Mode D'emploi

Le MEDAPLAST HP est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (MEDACURE) surtout par temps chaud ou en présence de vents.

Dosage:

Le dosage du MEDAPLAST HP varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

Conditionnement Et Stockage :

Le MEDAPLAST HP est conditionné en sacs de 2 kg et 25 kg. Disponible aussi en Big bag.

Durée de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tel : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Annexe G

Fiche technique fumé de silice Sika



NOTICE PRODUIT

Condensil S-95 DP

FUMÉE DE SILICE DENSIFIÉE POUR BÉTONS HAUTES PERFORMANCES ET HAUTE DURABILITÉ

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Condensil S-95 DP est une fumée de silice ultra fine densifiée pneumatiquement issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

DOMAINES D'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP permet de fabriquer des :

- BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Bétons résistants aux milieux agressifs : domaines agricoles (ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation), milieu industriel (chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, stations services, stations d'épuration, égouts), milieu marin (digue, aménagement portuaire, ...), zone de montagne (présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage).
- Bétons pompables
- Bétons projetés

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Ultrafine et dotée d'un fort pouvoir pouzzolanique, la fumée de silice Condensil S-95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes : améliore les performances mécaniques à longs termes :

- résistances en compression, flexion et traction, module d'élasticité, le fluage, la résistance à l'abrasion et à l'érosion, ...
- améliore la durabilité en milieux agressifs en diminuant la porosité et la perméabilité aux gaz et aux liquides: carbonatation, sulfate, chlorure, acides, eaux pures, ...
- diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes de réaction sulfatique interne et d'alcali-réaction,
- réduit les risques de ségrégation et de ressuage, facilite le pompage des bétons y compris ceux qui sont peu dosés en ciment.

Notice produit
Condensil S-95 DP
Octobre 2020, Version 01.01
021403031000000012

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE selon la norme NF EN 12607-1 & 2.

Caractéristiques	Exigences normatives	Valeurs observées
Densité apparente	~ 0,65 (0,55 à 0,75)	0,64 ± 0,03
Densité réelle	2,24	F
Surface spécifique BET (m ² /g)	Entre 15 et 35	22,5 ± 2
Teneur en SiO ₂	≥ 85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤ 0,4 %	0,14 % ± 0,05
Teneur en Na ₂ O eq.	≤ 1,0 %	0,50 % ± 0,1
Teneur en SO ₃	≤ 2,0 %	0,27 % ± 0,30
Teneur en Cl ⁻	≤ 0,1 %	0,01 % ± 0,01
Indice d'activité à 28j	≥ 100 %	≥ 101 %
Perte au feu	≤ 4,0 %	2 % ± 0,5
Teneur CaO	≤ 1,0 %	< 0,1 %

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Vrac Big-Bag de 1000 kg et 1250 kg
Aspect / Couleur	Poudre grise
Durée de Conservation	En respectant les conditions de stockage, le produit se conserve 3 ans.
Conditions de Stockage	En silo (spécialement équipé, nous contacter) ou dans son emballage intact dans un local à l'abri de l'humidité.

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP doit être introduite avec le ciment.
Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice Condensil S-95 DP, il est indispensable de déflouter complètement les micro-particules de silice.
Pour cela, la fumée de silice Condensil S-95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant /haut réducteur d'eau de type Sika ViscoCrete

RESTRICTIONS LOCALES

Veillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
22,33 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél : 0 21 50 26 92 à 95
Fax : 0 21 50 22 08
dza.sika.com

Notice produit
Condensil S-95 DP
Octobre 2020, Version 01.01
021432002000000012

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. 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 soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Condensil S-95 DP-0-00 (10-2020)-1-L.pdf

