

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** : Travaux Publics

**Option** : VOA

Présenté par :

KOBOUCHE RAHMA

BELHADJ SALIMA

*Sujet du mémoire*

**LES GRANULATS RECYCLÉS (SABLE  
RECYCLÉ) D'UN BETON A HAUTES  
PERFORMANCES, ETUDE DE LA RÉSISTANCE  
MÉCANIQUE**

*Soutenu publiquement le ... /06/2022 devant le jury composé de :*

Mr H. BEKKI

Président

Mlle Z. RENNAK

Rapporteur

Mr B. SERBAH

Examineur

Mme A. DRAOUI

Examineur

PROMOTION : 2021/2022

## REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements :

- A notre dame de mémoire, Madame RENNAK ZOHRA, pour sa disponibilité ;
  - A nos parents pour l'effort qu'ils ont fait pour nous
  - Aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail ;
- A tous les enseignants de voie et ouvrage d'Arte en général, à ceux du département de Génie civil en particulier.
- A tous les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette œuvre intellectuelle

# **RESUMES**

## Résumé

Le béton à Hautes Performances (BHP) est un béton innovant qui trouve sa place dans les constructions modernes. Les nouvelles techniques de formulation et de conception du béton à hautes performances ont permis d'améliorer la durabilité et d'acquérir des propriétés mécaniques remarquables par rapport aux bétons conventionnels, grâce à l'amélioration de ses qualités rhéologiques et à sa porosité très limitée.

Ceci a permis d'élargir son domaine d'emploi en particulier dans les milieux agressifs. Les granulats naturels, fréquemment utilisés, représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue de façon continue.

La valorisation des déchets de béton à hautes performances (BHP) sous forme de granulats recyclés dans la fabrication d'une nouvelle gamme de bétons à hautes performances recyclés avec des propriétés améliorées conduira à rechercher un arrangement entre les performances et le coût dans le but de réaliser un matériau résistant avec une durabilité accrue.

Le but de cette étude est d'identifier et d'analyser les caractéristiques des granulats recyclés de béton à hautes performances à base de deux types d'additions minérales (fumée de silice, laitier) qui influencent les propriétés des bétons à l'état frais et durci.

Cette étude met en évidence les effets de la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés (sable 30% et gravier 50%, 100%) sur les résistances mécaniques du béton à hautes performances recyclés.

L'examen des résultats obtenus a permis d'établir les corrélations entre les granulats naturels et recyclés et sur les caractéristiques physico-mécaniques.

L'analyse de ces résultats a montré aussi l'intérêt de la substitution totale ou partielle des granulats recyclés à base fumée de silice par rapport au granulats recyclés à base de laitier algérien dans la formulation des BHPR du point de vue performances mécaniques (résistances).

**Mots clés :** Béton à Hautes Performances, Béton à Hautes Performances Recyclés, Granulats Naturels, Granulats Recyclés, Résistance Mécanique, Additions Minérales, Fumée de silice, laitier.

## Abstract

High Performance Concrete (BHP) is an innovative concrete that finds its place in modern constructions. New techniques for formulating and designing high-performance concrete have improved durability and achieved outstanding mechanical properties compared to conventional concrete, thanks to the improvement of its rheological qualities and its very limited porosity.

This has allowed to expand his field of employment especially in aggressive environments. Natural aggregates, frequently used, are now a non-renewable resource whose accessibility is continually declining.

Recovery of high-performance concrete waste (BHP) in the form of recycled aggregates in the manufacture of a new range of high-performance recycled concrete with improved properties will lead to an understanding between performance and cost in order to achieve a resistant material with durability increased.

The aim of this study is to identify and analyse the characteristics of high-performance recycled concrete aggregates based on two types of mineral additions (silica smoke, slag) that influence the properties of fresh and cured concrete.

This study highlights the effects of the substitution of natural aggregates by recycled aggregates (sand 30% and gravel, 50%, 100%) on the mechanical resistance of high-performance recycled concrete.

Examination of the results obtained has made it possible to establish the correlations between natural and recycled aggregates and on the physico-mechanical characteristics.

The analysis of these results also showed the interest of total or partial substitution of recycled silica smoke-based aggregates compared with recycled Algerian slag aggregates in the formulation of BHPR from the point of view of mechanical performance (resistance).

**Keywords:** High Performance Concrete, Recycled High Performance Concrete, Natural

Aggregates, Recycled Aggregates, Mechanical Resistance, Mineral Additions,

Silica smoke, Slag.

## ملخص

الخرسانة عالية الأداء (خ ع أ) هي خرسانة مبتكرة تجد مكانها في المنشآت الحديثة. أدت التقنيات الجديدة لصياغة وتصميم الخرسانة عالية الأداء إلى تحسين المتانة وحقق خصائص ميكانيكية بارزة مقارنة بالخرسانة التقليدية، وذلك بفضل تحسين صفاتها الريولوجية ومساميتها المحدودة للغاية.

وقد سمح ذلك بتوسيع مجال عملها خاصة في البيئات العدوانية. الحصى الطبيعي، الذي كثيرا ما يستخدم، أصبح الآن موردا غير متجدد تتناقص إمكانية الوصول إليه باستمرار.

سيؤدي استعادة نفايات الخرسانة عالية الأداء (خ ع أ) في شكل حصى معاد تدويره في تصنيع مجموعة جديدة من الخرسانة المعاد تدويرها عالية الأداء بخصائص محسنة إلى البحث في التوافق بين الأداء والتكلفة من أجل الحصول على مادة مقاومة مع زيادة المتانة.

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد وتحليل خصائص الحصى المعاد تدويره للخرسانة العالية الأداء بإضافة نوعين من الإضافات المعدنية (دخان السيليكا والخبث) التي تؤثر على خصائص الخرسانة السائلة والصلبة.

تسلط هذه الدراسة الضوء على تأثيرات استبدال الحصى الطبيعية بالحصى المعاد تدويره (الرمال 30% والحصى 50%، 100%) على المقاومة الميكانيكية للخرسانة المعاد تدويرها عالية الأداء.

وقد أتاح فحص النتائج التي تم الحصول عليها تحديد الارتباطات بين الحصى الطبيعي والمعاد تدويره وعلى الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية.

كما بين تحليل هذه النتائج فائدة الاستبدال الكلي أو الجزئي للحصى المعاد تدويره المصنوع من دخان السيليكا مقارنة بالحصى المعاد تدويره المصنوع من الخبث الجزائري في تركيبة خ ع أ م ت من وجهة نظر الأداء الميكانيكي (المقاومة).

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة عالية الأداء، الخرسانة عالية الأداء المعاد تدويرها، الحصى الطبيعي، الحصى المعاد تدويره،

المقاومة، الإضافات المعدنية، دخان السيليكا، الخبث.

# **TABLE DES MATIERES**

# TABLE DE MATIERES

TABLE DE MATIERES.....	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES NOTATIONS.....	IV
RESUME.....	V
INTRODUCYION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE I : LE BETON A HAUTE PERFORMANCE</b>	
I-1 Historique .....	5
I-2 Introduction .....	5
I-3 Définition.....	6
I-4 Classe de béton à haute performance.....	7
I-5 Fabrication du béton à haute performance.....	7.
I-6 Composition.....	8
I-6-1 Le ciment .....	8
I-6-1-1 Définition .....	8
I-6-1- 2 la résistance au ciment dans le BHP .....	10
I-6-2 Les granulats.....	10
I-6-2-2 Les choix de granulat .....	11
I-6-2-3 Le gravier .....	11
I-6-2-4 Le sable.....	11
I-6-2-5 Les adjuvants .....	12
I-6-2-5-1 Les 3 grandes catégories d’adjuvants.....	13
I-6-2-6 Super plastifiants .....	13

## TABLE DE MATIERES

I-6-2-7 Les ajouts minéraux.....	15
I-6-2-7-1 Fumée de silice.....	15
I-6-2-7-2 Le Laitier .....	16
I-6-2-8 l'eau de gâchage .....	18
I-7 Choix des matériaux pour les BHP.....	18
I-8 Spécification sur les BHP .....	19
I-9 Les propriétés de béton à haute performance .....	19
I-9-1 Manœuvrabilité .....	19
I-9-2 Durabilité.....	19
I-9-3 Le retrait .....	20
I-9-3-1 Retrait endogène .....	20
I-9-3-2 Retrait de dessiccation .....	21
I-9-4 Fluage .....	22
I-9-5 Imperméabilité .....	24
I-9-6 Résistance aux agents agressifs .....	24
I-9-7 Effet de température sur le béton en cours de durcissement .....	25
I-9-8 Comportement en compression .....	25
I-9-9 Comportement en traction .....	27
I-9-10 Résistance au feu.....	28
I-9-11 Tenue aux attaques gel/dégel .....	28
I-9-12 Rigidité .....	28
I-10 Qualités essentielles .....	29
I-10-1 A l'état frais .....	29

## TABLE DE MATIERES

I-10-1-1 La maniabilité .....	30
I-10-1-2 Méthodes de mesure de la consistance (maniabilité) .....	33
I-10-1-3 Classe de consistance .....	33
I-10-1-4 Contrôle de la consistance .....	33
I-10-1-5 Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance .....	34
I-10-2 Al 'état durci .....	35
I-11 La Formulations de BHP .....	36
I-11-1 Loi de féret .....	37
I-11-2 La méthode ERNTROY et SHACKLOCK B.W .....	38
I-11-3 Méthode de formulation des B.H.P de l'institut Américaine du béton (A.C.I) .....	40
I-11-4 Méthode de DELARRARD (méthode dite des coulis) .....	40
I-11-4-1 Le principe de la méthode de coulis .....	40
I-11-4-2 Conditions opératoires .....	41
I-11-4-3 Appareillage .....	41
I-11-4-4 Composition du coulis .....	42
I-11-4-5 Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh .....	42
I-11-5 La méthode de PEDECHES .....	43
I-11-5-1 Les étapes de cette méthode .....	43
I-11-6 La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke .....	45
I-12 Optimisation de la formulation des BHP .....	45
I-13 Le BHP en Algérie .....	46

## TABLE DE MATIERES

I-14 Utilisation des bétons à hautes performance .....	47
I-15 Les avantages de BHP .....	48
I-16 Conclusion .....	48

## CHAPITRE II : LES GRANULATS RECYCLE

II-1 Introduction .....	51
II-2 Recyclage .....	52
II-3 Cycle de vie des matériaux.....	52
II-4 Intérêt du recyclage dans le génie civil .....	54
II-5 Déchets et environnement .....	55
II-5-1 Déchets en Algérie .....	55
II-5-2 Lois Algériennes concernant les déchets .....	56
II-6 Les granulats recyclés .....	56
II-6-1 Définition .....	56
II-6-2 Granulats recyclés exigences de la norme .....	57
II-6-3 Production des granulats recyclés .....	58
II-6-4 Description de granulats recyclés .....	61
II-6-5 Caractéristiques des granulats recyclés.....	62
II-6-5-1 L'interface pate granulats .....	63
II-6-5-2 Les propriétés mécaniques des granulats recyclés.....	66
II-6-5-2-1 Résistance à la compression.....	67
II-6-5-2-2 Résistance à la traction par fendage .....	69
II-6-5-2-3 Module d'élasticité.....	71
II-6-5-3 Les propriétés physiques .....	71

## TABLE DE MATIERES

II-6-5-3-1 La porosité .....	71
II-6-5-3-2 La granulométrie et le module de finesse.....	72
II-6-5-3-3 L'absorption d'eau par les granulats recyclés .....	73
II-6-5-3-4 La perméabilité à l'eau du béton recyclé.....	74
II-6-5-3-4-1 Perméabilité au gaz .....	74
II-6-5-3-5 Le retrait .....	76.
II-6-6 Les avantages de granulats recyclés.....	77
II-6-7 Sable recyclé .....	77
II-6-7-1 Du sable en circuit court .....	78
II-6-7-2 Jusqu'à 30% du sable recyclé.....	78
II-6-7-3 Utilisation de sable recyclé dans béton.....	79
II-6-7-4 Le sable, un produit normalisé et à fort granulométrie.....	79
II-6-7-5 Le contenu des granulats fins recyclés .....	80
II-6-8 Le gravier recyclé.....	82
II-6-8-1 Utilisation .....	83
II-7 Les bétons de granulats recyclés .....	83
II-7-1 Fabrication du béton recyclé .....	85
II-7-2 Spécificité des bétons de granulats recyclés .....	86.
II-7-3 L'utilisation de granulats recyclés dans les bâtiments et les travaux publics..	87
II-7-4 Ecaillage de bétons recyclé... ..	87
II-8 Conclusion.....	89

# TABLE DE MATIERES

## CHAPITRE III : PROTOCOL EXPÉRIMENTAL

III-1 Introduction.....	91
III-2 Matériels, matériaux et méthodes .....	91.
III-2-1 Le Ciment .....	92
III-2-2 Les granulats .....	92
III-2-2-1 Gravier et sable naturel .....	93
III-2-2-2 Gravier et le sable recyclé .....	93
III-2-3 L'eau de gâchage .....	94
III-3 Les différents essais effectués .....	95
III-3-1 Les analyses mécaniques .....	95
III-3-1-1 Essai Los Angeles.....	95
III-3-1-2 Essai Micro Deval.....	95
III-3-1-3 L'analyse granulométrique .....	96
III-3-1-3-1 Module de finesse .....	97
III- 3-2 Les analyses physiques .....	97
III-3-2-1 Essai d'équivalent de sable .....	97
III-3-2-2 Masse volumiques apparents .....	100
III-3-2-2-1 Sable naturel et recyclé .....	100
III-3-2-2-2 Gravier (3/8) (8/15) naturel et recyclé .....	101
III-3-2-2-3 Fumée de silice .....	201
III-3-2-2-4 Laitier .....	103
III-3-2-3 Masse volumique absolue .....	104
III-3-2-3-1 Sable et gravier naturel et recyclé .....	105

## **TABLE DE MATIERES**

III-3-2-4 Coefficient d'absorption .....	106
III-3-2-5 Super plastifiant .....	107.
III-4 Formulation des BHP .....	108
III-4-1 Les étapes de méthode de coulis .....	109
III-5 Composition de BHP .....	109
III-6 Malaxage de BHP .....	111.
III-7 Essai des bétons à l'état frais .....	113
III-7-1 L'ouvrabilité .....	113
III-7-2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	113
III-8 Essai des bétons à l'état durci .....	116
III-8-1 Résistance en compression .....	116
III-9 Conclusion .....	120

## **CHAPITRE IV : RESULTAT**

IV-1 Introduction.....	122
IV-2 Analyse mécaniques .....	122
IV-2-1 Essai de l'ose Angeles .....	122
IV-2-2 Essai de micro-Derval .....	123
IV-3 Analyse physique.....	123
IV-3-1 Essai analyse granulométriques .....	123
IV-3-1-1 Gravier et sable recyclé.....	124
IV-3-1-2 Sable naturel et recyclé .....	126
IV-3-1-3 Module de fines .....	127

## TABLE DE MATIERES

IV-3-1-4 Equivalent de sable .....	128
IV-3-1-5 La masse volumique apparente et absolue .....	129
IV-3-6-1 L'absorption .....	132.
IV-4 Détermination de la dose de saturation de superplastifiant .....	133
IV-4-1 Compatibilité de superplastifiant dans les BHP .....	133
IV-4-2 Dosage de superplastifiant dans le BHP .....	133
IV-5 L'affaissement .....	135
IV-6 La masse volumique BHP .....	136
IV-7 Résistance de compression .....	139
IV-8 Conclusion .....	144
RERANCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	148
ANNEXE .....	160

# **LISTE DES TABLEAUX**

# **LISTES DES FIGURES**

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I :

Tab (I.1) : Caractéristique de résistance et déformation du béton.....	22
Tab (I.2) : Les différents types de béton selon la résistance à la compression .....	27
Tab (I.3) : Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton .....	33
Tab (I.4) : Classe de consistance .....	34
Tab (I.5) : Influence des paramètres de formulation sur la consistance.....	34

## CHAPITRE II :

Tab (II.1) : Classification des granulats recyclés selon la norme.....	58
Tab (II.2) : Energie utilisé pour la production de 1 tonne de granulats naturels et recyclé	60
Tab (II.3) : Valeur moyennes d'absorption d'eau, teneur en sulfates et masse volumique réelle des granulats naturels et recyclé .....	62
Tab (II.4) : Propriétés de bétons de granulats recyclés .....	66
Tab (II.5) : Pourcentage admis dans la norme pour la substitution des granulats recyclés.	84
Tab (II.6) : Pourcentage de substitution admis selon l'origine de matériaux recyclé et la classe du béton.....	85

## CHAPITRE III :

Tab (III.1) : Caractéristique du fumé de silice de granitex .....	102
Tab (III.2) : Caractéristique du fumé de silice de sika .....	103
Tab (III.3) : Composition chimique du laitier .....	103
Tab (III.4) : Caractéristique techniques du superplastifiant.....	107
Tab (III.5) : Composition d'un m <sup>2</sup> de béton BHP .....	110
Tab (III.6) : Composition d'un m <sup>2</sup> de béton BHPR .....	110

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPIYRE IV :

Tab (IV.1) : Résultats d’essai los angles .....	122
Tab (IV.2) : Résultats d’essai de Micro-Derval .....	123
Tab (IV.3) : Analyse granulométrique gravier naturel et recyclé (3/8) .....	124
Tab (IV.4) : Analyse granulométrique gravier naturel et recyclé (8/15) .....	125
Tab (IV.5) : Analyse granulométrique sable naturel et recyclé (0/4).....	126
Tab (IV.6) : Résultats d’équivalent de sable naturel et recyclé.....	128
Tab (IV.7) : Résultats de la masse volumique apparent (sable naturel et recyclé, laitier, fumée de silice.) .....	129
Tab (IV.8) : Résultats de la masse volumique apparente (gravier naturel et recyclé (3/8) (8/15) .....	130
Tab (IV.9) : Résultats de la masse volumique absolue (sable naturel et recyclé, gravier naturel et recyclé (3/8) (8/15).....	131
Tab (IV.10) : Résultats d’absorption de sable naturel et recyclé .....	132
Tab (IV.11) : détermination de la dose de saturation en fonction de pourcentage en superplastifiant et le temps d’écoulement du coulis après 5 min (cône de marche) .....	134
Tab (IV-12) : l’affaissement de BHP .....	135
Tab (IV.13) : La masse volumique de BHP .....	137
Tab (IV.14) : Résultats de la résistance de la compression.....	139

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I :

Figure (I-1) : Influence minérale sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps.....	16
Figure (I-2) : Comparaison des déformations différée du béton en air sec et dans l'eau.....	24
Figure (I-3) : Résistance au jeune âge d'un BHP.....	25
Figure (I-4) : Fissures d'adhérence et fissures dans les mortiers.....	26
Figure (I-5) : béton à hautes performances les granulats sont également fissurés.....	26
Figure (I-6) : Diagramme contraintes-déformation.....	27
Figure (I-7) : L'évolution du temps d'écoulement au maniabilité et l'affaissement au con D'Abrams du béton THP pendant l'heure qui suit.....	31
Figure (I-8) : Béton à l'état frais.....	32
Figure (I-9) : Test à l'aide du cône d'Abrams.....	32
Figure (I-10) : Nombre de référence du BHP en fonction de la résistance.....	39
Figure (I-11) : Nombre de référence du BHP en fonction E/C.....	39
Figure (I-12) : Détermination de la dose de saturation par le cône de Marsh.....	41
Figure (I-13) : Cône de Marsh.....	42
Figure (I-14) : Détermination des mélanges selon DREUX6GORISE.....	44
Figure (I-15) : Pont en BHP.....	47

## CHAPITRE II

Figure (II-1) : Recyclage des matériaux.....	52
Figure (II-2) : Différentes phase du cycle d'un matériau de construction ou d'un bâtiment.....	53
Figure (II-3) : Production de béton entre 2001 et 2015.(Données ERMCO).....	59

## LISTE DES FIGURES

Figure (II-4) : Production des déchets et destruction des ressources naturelles pour la production de 1m <sup>3</sup> de béton avec granulats naturels (NAC) et recyclé (RAC).....	60
Figure (II-5) : Schématisation d'un granulats recyclé .....	61
Figure (II-6) : Les types des gros granulats de béton recyclé, selon la forme structural. Le contenu du mortier résiduel est partiel (a) et (b) ; est presque en totalité (c).....	61
Figure (II-7) : Coefficients de Los Angeles (L.A) pour les granulats recyclés et naturels, en fonction de nombre de tours .....	63
Figure (II-8) : Représentation schématique de la zone interfaciale.....	64
Figure (II-9) : Représentation schématique de la double ITZ dans le béton de granulats recyclé .....	65
Figure (II-10) : ITZ des "matériaux flottants" .....	67
Figure (II-11) : Évolution de résistance en compression dans le béton avec granulats recyclés .....	69
Figure (II-12) : Mécanisme de rupture du béton recyclé lors d'essai de fendage pour la détermination de la résistance à la traction .....	70
Figure (II-13) : Ancien mortier présent dans les granulats recyclé, les taches blanches représentent l'air contenu dans le mortier attaché.....	72
Figure (II-14) : Interface granulats naturel /pâte de ciment d'un granulats recyclé de béton.....	73
Figure (II-15) : Evolution de la perméabilité intrinsèque des avec différents pourcentages de granulats recyclé .....	74
Figure (II-16) : Perméabilité à l'oxygène des bétons avec différents pourcentage de granulats recyclés et différents dosage en ciment .....	75
Figure (II-17) : Evolution de la perméabilité aux gaz dans le temps et avec différents pourcentage de granulats recyclé .....	76
Figure (II-18) : Sable recyclé .....	78

## LISTE DES FIGURES

Figure (II-19) : Influence des GGR sur la résistance à la compression des bétons à GGR (taux des GR : 100%).....	80
Figure (II-20) : Influence des GR sur la résistance à la compression des bétons à GR (taux des GR = 100%).....	81
Figure (II-21) : Gravier recyclé .....	82
Figure (II-22) : Représentation schématique de la production des granulats recyclés.....	86
Figure (II-23) : Sensibilité à l'écaillage de bétons à hautes performances avec granulats naturels et recyclé .....	88
<b>CHAPITRE III :</b>	
Figure (III-1) : Ciment utilisé de type CEMI 425R BISKRIA.....	92
Figure (III-2) : Concasseur, préparation des granulats recyclés .....	93
Figure (III-3) : Les granulats utilisés.....	94
Figure (III-4) : L'appareil los Anglos.....	95
Figure (III-5) : La machine Micro Deval .....	96
Figure (III-6) : Charges abrasives de MDE.....	96
Figure (III-7) : Matériau d'essai l'analyse granulométrique .....	97
Figure (III-8) : Précision des hauteurs h1 et h2 pour l'essai d'équivalent de sable .....	98
Figure (III-9) : Matériels utilisés pour l'essai d'équivalent de sable .....	99
Figure (III-10) : Détermination de la masse volumique des granulats.....	100
Figure (III-11) : Gravier (3/8) (8/15) naturels et recyclés .....	101
Figure (III-12) : Fumé de silice (sika, granitex).....	102
Figure (III-13) : Laitier d'El _Hadjar (Annaba).....	103
Figure (III-14) : Détermination de la masse volumique absolue de sable naturel .....	104
Figure (III-15) : Détermination de la masse absolue de sable recyclé .....	105

## LISTE DES FIGURES

Figure (III-16) : Détermination du Coefficient d'absorption des granulats (gravier, sable) naturels et recyclé .....	106
Figure (III-17) : Superplastifiant MEDAFLOW RE 25 (GRANTEX) .....	107
Figure (III-18) : Matériaux pou Composition de BHP.....	109
Figure (III-19) : Préparation des ingrédients pour la fabrication du béton .....	111
Figure (III-20) : Préparation du béton BHP et BHPR .....	111
Figure (III-21) : Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	112
Figure (III-22) : Vibration, remplissage des moules et mode de mise en place .....	113
Figure (III-23) : Eprouvette après démoulage .....	114
Figure (III-24) : Conservation des éprouvettes dans l'eau .....	115
Figure (III-25) : Chargement de l'éprouvette cylindrique pour essai de compression .....	117
Figure (III-26) : Mode de rupture des éprouvettes après écrasement.....	118
<b>CHAPITRE IV :</b>	
Figure (IV-1) : Courbe granulométrique de gravier naturel et recyclé (3/8) (8/15).....	125
Figure (IV-2) : Courbe granulométrique de sable naturel et recyclé (0/4).....	127
Figure (IV-3) : détermination de la dose de saturation .....	134
Figure (IV-4) : L'affaissement en fonction de pourcentage de granulats recyclés (0%, 50%, 100% gravier) et 30% sable.....	136
Figure (IV-5) : La masse volumique de BHP.....	138
Figure (IV-6) : Résultats de la résistance de la comprissions .....	140

# **LISTES DES NOTATIONS**

## LISTE DES NOTATIONS

BHP	Béton à hautes performances
BFUP	Béton fibres ultra performances
H.P.R	H.P classe de haute performance R sous-classe
E/C	eau/ciment
BTHP	béton à très hautes performances
THP	très haute pression
BPE	béton prêt à l'emploi
CET	Centres d'Enfouissements Techniques
C.S.T.C	le centre scientifique et technique de construction
MATET	Ministère de l'aménagement du territoire et l'environnement
PIB	Produit intérieur brut
ECO-JEM	système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages
GBC	gros granulats de béton concassé
SBC	sable de béton concassé
SSS	Saturé d'eau Surface Sèche
NF	norme française
CSA	Association canadienne de normalisation
Rc	béton, mortier, élément de maçonnerie en béton
Ru hydrauliques	granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants
Rcu	Rc+Ru
Rg	verres
Ra	matériaux bitumineux
Rb flottant	éléments en argile cuite (brique, tuiles), éléments en cellulaire non

## LISTE DES NOTATIONS

X	argile, sols, matériaux, bois, plastiques, caoutchouc, bois
Fl	matériaux flottant
XRg	X+Rg
ERMCO	European Ready Mixed Concrete Organization
UNI	la norme Italiano
MJ	Méga joule
NAC ou BGN	béton de granulats naturels
RAC ou BGR	béton de granulats recyclés
GGR	les gros granulats de béton recyclé
PN	projet national
LA	Los Angeles
ITZ	Inter facial Transition Zone
BTP	Bâtiment et travaux public
MS	Microsoft
GFR	granulats fins recyclés
CE	Conformité européenne
ISDI	Installation de stockage de déchets inertes
RILEM	Réunion International des Laboratoires et Expert des Matériaux
Mt	Million tonne MDE
Micro-Deval	
Gx	Granitex
L	Laitier
SK	Sika
SN	Sable naturel
SR	Sable recyclé
GN/GN	Gravier naturel/Granulats naturel
GR	Gravier recyclé
BN	Béton naturel

## LISTE DES NOTATIONS

BR	Béton recyclé
V	Volume
MPa	Méga pascalle
$\rho$	La masse volumique
ESv	Équivalent de sable visuelle
Esp	Equivalent de sable à l'aide de piston
BHPL	Béton à hauts performances à base de laitier
BHPFS	Béton à hauts performances à base de fumée de silice
BHPR	Béton à hauts performances recyclés
BHPN	Béton à hauts performances naturel
$f_{cj}$	Résistance à la compression en Méga Pascal (MPa)
P	charges de rupture en newton (N)
S	section en mm <sup>2</sup> .
$M_a$	la masse du l'échantillon immergé pendant 24h dans l'eau
$M_s$	la masse de l'échantillon séché à 105°C.
Ab	Le taux d'absorption d'eau
$M_1$	Le poids du récipient vide ;
$M_2$	Le poids du récipient avec le matériau ;
V	le volume du récipient.
$h_1$	sable propre+éléments fins.
$h_2$	sable propre seulement.
C2S	le silicate bicalcique

## LISTE DES NOTATIONS

C3S                    le silicate tricalcique

# **INTRODUCTION**

## **GANARALE**

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est parmi les matériaux les plus utilisés dans le monde. Cependant, les constructions en béton ne sont pas éternelles. Chaque année, des ouvrages sont démolis pour faire place à de nouvelles structures, en produisant des tonnes de déchets, appelés des déchets de C&D (construction et démolition). Un rapport de l'Union Européenne [1] estime qu'on 3 milliards de tonne de déchets de construction et démolition sont produite chaque année en Europe.

Les déchets qui autrefois ne suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude, ont commencé à constituer un problème économique et écologique. Les quantités énormes des déchets qui sont générée sans cesse immobilisent de plus en plus de grande surface pour stockage et réduisent ainsi les disponibilités des terrains sans compter la pollution. La production des granulats recyclés répond au besoin d'une source de granulats et à la réduction des volumes de déchets.

Afin de réduire le volume ces déchets, ainsi que de préserver les ressources naturelles (les granulats naturels), L'Union Européenne [1] incite à utilisés les déchets de C&D dans de nouvelles formulations bétons en les substituant à partie des granulats d'origine naturelle. Vue la constitution variée de matériaux de ces granulats issus de recyclage. Le pourcentage de substitution des granulats recyclés type 1 selon la norme NF EN 206 [2] pour un béton structurel est actuellement limite à 30% pour les classes d'environnement XC1 et XC2.

L'activité du bâtiment et des ouvrages d'art consomme des ressources naturelles et génère des quantités non négligeables de déchets, le besoin en bétons nouveaux pour répondre à la demande des grands projets d'aménagement nécessite de puiser davantage dans les carrières de granulats alluvionnaires, Ceci peut entrainer comme conséquence la pollution de nappes d'eau souterraines et la transformation des sites naturels, de plus la réglementation sur l'ouverture de nouvelles carrières, oblige à chercher des solutions dans le domaine du recyclage.

L'utilisation de granulats recyclés, bien qu'ils ne représentent qu'une faible part de la production, ne cesse de progresser. Leur réemploi dans le mortier et le béton conduit à une économie de granulats alluvionnaires. Le recyclage paraît d'autant plus intéressant qu'il génère un secteur d'activité nouveau pris en charge par l'ensemble « activités locales et industriels ».

L'évolution actuelle de la réglementation en matière d'environnement conduit les producteurs de déchets à les valoriser ou les réutiliser en particulier dans différents domaines de la construction et par voie de conséquence de limiter la mise en décharge uniquement des déchets ultimes après stabilisation.

Les voix actuelles de valorisation des granulats recyclés sont des applications qui n'exigent pas de performances très élevées, telles que les blocs préfabriqués de construction, le béton de fondation, le béton de propreté. Ces granulats sont également réutilisés comme fond de forme dans les constructions routières, comme remblai et comme fond de tranchée ou drainage de plate-forme.

Valoriser ces granulats issus des bétons de démolition ou d'autres déchets pour la fabrication d'un béton hydraulique peut étendre leur domaine d'utilisation actuel. Malgré plusieurs études de recherche pour une éventuelle utilisation avec des liants hydrauliques pour

## INTRODUCTION GENERALE

la construction d'ouvrages ou de bâtiments, les granulats recyclés trouvent peu d'application en tant que granulats de béton. Néanmoins des Pays comme la Suisse ou encore le Danemark ont adopté des normes pour la fabrication de béton de granulats recyclés.

Cette valorisation présente un intérêt d'ordre économique. En effet, le réemploi des matériaux de démolition pourrait être envisagé directement sur site ou sur les plateformes de recyclage chargées du traitement. Ces plateformes pourraient alors s'occuper de la fabrication de béton à base de ces granulats recyclés. La diminution des coûts de transports des granulats et des déchets de démolition constitue l'enjeu économique principal de ce projet, les granulats n'étant pas toujours disponibles à proximité des chantiers de construction. Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci diminuerait l'épuisement des ressources naturelles.

La condition fondamentale pour la valorisation de ces granulats est qu'ils remplissent la fonction requise dans la position qu'ils occupent et qu'ils continuent à remplir celle-ci durant toute l'existence de la construction sans manifester d'effets secondaires négatifs qui conduisent à des désordres dans l'ouvrage. [3]

L'étude de béton de résistance supérieure à 50Mpa de granulats recyclés reste modeste et répond ainsi pleinement aux enjeux futurs limitant l'impact environnemental de l'ensemble des bétons par ailleurs, l'importance et l'utilisation de BHP est très vaste ; elle recouvre tous les aspects qui lui rend différent du béton traditionnel, c.-à-d. des changements relatifs tant aux constituants, à la composition, et à la mise en œuvre qu'aux propriétés, il été surtout utilisé dans des applications mettant en valeur leur résistance élevée, il est inévitable que, dans un avenir très proche, le BHP sera de plus en plus utilisé pour sa durabilité plutôt que pour sa résistance.

Durant ces dernières décennies, plusieurs travaux de recherche ont été élaborés dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton à l'état frais et durci. Des études et des découvertes n'ont pas cessées de lui conférer des performances et des aptitudes nouvelles dans le but de trouver un compromis entre l'ouvrabilité et la résistance. Les soucis des constructeurs sont d'aboutir à des hautes performances avec un choix judicieux des matériaux et l'adjonction de nouveaux produits, telle que les adjuvants et les additions minérales fines.

L'utilisation des sous-produits sidérurgique en tant qu'ajouts cimentaires ou sous forme de granulats dans le mélange du béton est très bénéfique du point de vue économique et écologique. L'usine sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba) présente une bonne source de sous-produits sous forme de granulats de laitier cristallisé et de scorie ou sous forme d'ajout cimentaire de laitier granulé broyé.

Le laitier granulé d'El-Hadjar (Annaba) est utilisé par la cimenterie de Hdjar-Soud pour la production du CEM II 42,5 mais avec un faible taux de laitier qui est de l'ordre de 15% en moyenne à cause de son faible pouvoir hydraulique. A l'heure actuelle, l'utilisation des laitiers dans les BHP est relativement limitée, Jusqu'à présent les laitiers ont été utilisés en parallèle avec la fumée de silice pour fabriquer des BHP de classe I, II et III. En Algérie la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes/an. L'utilisation des laitiers de hauts fourneaux dans la fabrication des BHP constitue une nouvelle avancée pour une construction durable et offre des avantages d'ordre économique, technique et écologique.

## INTRODUCTION GENERALE

Le laitier granulé présente non seulement un intérêt du point de vue des performances, mais aussi un intérêt économique par le prix compétitif et un intérêt écologique par une limitation des émissions de CO<sub>2</sub> associées à la fabrication du ciment et par réduction des stocks sur site. L'incorporation de la fumée de silice et filler de laitier dans les formulations des BHP a largement été étudiée par plusieurs auteurs. Devant les besoins croissants en granulats naturels et suite aux exigences environnementales, l'utilisation des granulats recyclés (gravier et sable) de laitier cristallisé dans les bétons et les bétons à hautes performances présente plusieurs avantages technico-économiques et écologiques, car ces granulats sont utilisés uniquement sous forme d'agrégats dans la construction des routes et leur future utilisation dans le béton pourrait être intéressante. [4]

Notre projet a deux objectifs, le premier concerne l'effet des granulats recyclés sur le comportement physico-mécanique des BHP à base de laitier de haut fourneau d'El- Hadjar en remplacement total de la fumée de silice. Le deuxième objectif est la valorisation des granulats recyclés (laitier) afin de fabriquer une nouvelle gamme de BHPR qui répond aux exigences de résistance et de durabilité.

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations, une étude expérimentale concernant l'évolution de propriétés mécaniques et physiques du matériau dans le temps a été élaborée et présentée dans ce manuscrit qui comprend quatre chapitres : Le premier et deuxième chapitre de ce mémoire sont consacrés à l'étude bibliographique dans lequel il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail. Le premier décrit en détail la caractérisation physique et mécanique du BHP. Le deuxième est une description générale des granulats recyclés.

Le troisième chapitre traite le protocole expérimental pour fabriquer les BHP et BHPR et déterminer leurs propriétés à l'état frais et durci dans laquelle on a mis en évidence l'effet de la substitution des granulats naturels par les granulats recyclés (gravier et sable) sur les résistances mécaniques en compression des BHPR. À partir des résultats obtenus à travers ce chapitre, Le quatrième présente les résultats d'essais liés à la caractérisation des différents types des BHP et BHPR.

Le manuscrit s'achève par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus sur la comparaison entre les différents types de BHP et BHPR formulés du point de vue mécanique et mis en évidence la valorisation des granulats recyclés dans la fabrication des nouvelles gammes des bétons.

**CHAPITRE I BETON  
A HAUTES  
PERFORMANCES**

## I-1 HISTOIRIQUE :

Les lois du béton liant la résistance à la compression sont énoncées dès la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, avec en particulier l'ingénieur français Féret [5], mais ne sont pas exploitées immédiatement, 800 litres de gravillons, 400 litres de sable, 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance, cette recette ne devait pas correspondre toujours exactement à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes.

Dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton, il faut minimiser le pourcentage de vides. M. Duriez [6] précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton qui, mis en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau nécessaire au mouillage de tous les grains, ciment compris, forme un ensemble homogène sans vide [7].

Dans les années 1980, on découvre le moyen de réduire ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons hautes performances.

## I-2 Introduction :

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 [08]. Elle est passée de 30/35 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibres à ultra hautes performances, BFUP).

Les gains de résistances ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

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, de réaliser des ouvrages soumis à des marées, effets du gel, attaques acides, etc.) [08]

Haute performance signifie aussi facilité 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. [08]

Les clefs de ces performances sont :

- a/ la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants.
- b/ l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

### I-3 Définition :

Le béton à haute performance (BHP) est un béton exceptionnel tant en termes de résistance mécanique que de durabilité.

Il est caractérisé par une très forte résistance à la compression puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais à court ou long terme.

L'utilisation des bétons à hautes performances est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil. Notamment dans la construction des ouvrages d'art.

Ils peuvent supporter des charges supérieures et permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées. [09]

L'emploi des superplastifiants /haut réducteur d'eau permet de réduire l'eau du béton à consistance égale à entrainant la suppression d'un volume important non mobilisé par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment.

Le rapport eau/ciment est ainsi de 0.30 à 0.40 alors qu'il est habituellement de 0.45 à 0.60 pour un béton ordinaire. [08]

## 1-4 Classe de béton à haute performances :

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours  $f_{C28}$  en MPa.

Les BHP nécessitent l'emploi du ciment choisi, type HPR. Dosé à environ 400kg/m<sup>3</sup>, leur fabrication suppose l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau qui permettent de maintenir le rapport E/C à des valeurs comprises entre 0.35 et 0.40 tout en garantissant une bonne maniabilité et n'est pas utile d'utiliser des granulats spéciaux à condition que ceux-ci soit propres.

Les BHP sont obtenus en réduisant le rapport E/C à des valeurs de l'ordre de 0.20 à 0.35, ceci implique l'emploi de superplastifiants hauts réducteurs d'eau à dosage élevé. Tous les composants du béton doivent être de bonne qualité.

Il devient nécessaire d'utiliser des ultrafines telles que les fumées de silice, laitier, centre volante, fillers calcaires, les granulats doivent être résistants de forme cubique ou sphérique, et ils présentent un module d'élasticité proche de celui de la pâte durci pour réduire les déformations différentielles entre granulats et matrice de béton.

Il semble préférable de retenir des granulats de 10 à 12 mm de dimension maximale.  
[10]

## I-5 Fabrication du béton à haute performance :

Avant d'aborder la fabrication du béton, il n'est pas inutile de rappeler qu'il s'agit d'un matériau obtenu en mélangeant un ensemble de constituants présentant des états et des caractéristiques très différents [11] :

- ❖ un liant : le ciment, poudre d'une très grande finesse ;
- ❖ des granulats de forme et de densité variée ;
- ❖ un liquide : l'eau de gâchage ;
- ❖ éventuellement des adjuvants soit liquides, soit en poudre ;
- ❖ les ajouts minéraux (fumée de silice, laitier, cendres volantes, fillers calcaires) ;
- ❖ L'air qui se trouve enfermé dans le béton frais lors de sa fabrication, joue un rôle non seulement ; sur sa plasticité, mais également sur ses déformations et ses propriétés finales ;

- ❖ Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE, dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.

## **I-6 Composition de BHP :**

Le béton à haute résistance, ou plus généralement le béton à hautes performances, se compose de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant, et éventuellement d'une addition (fumée de silice, laitier, ... ). Un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en œuvre. Le superplastifiant et le retardateur doivent être réciproquement compatibles, ainsi qu'avec le ciment utilisé. [12]

La composition des bétons hautes performances est généralement la suivante : 1000 à 1100 kg de gravillons, 700 kg de sable et 400 à 500 kg de ciment.

L'ajout d'un superplastifiant de 1 à 2% du poids de ciment sert à diminuer le poids en eau indispensable à une valeur de 140 à 160 litres. Pour perfectionner les performances d'un béton, il convient d'en diminuer la porosité soit en agissant sur la granulométrie en ajoutant des particules ultrafines, soit en ajoutant un adjuvant de type super plastifiant, soit le plus fréquemment les deux.

### **I-6-1-Le ciment :**

#### **I-6-1-1 Définition :**

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et par cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un pratiquement insoluble dans l'eau

La finesse du ciment et sa composition chimique peuvent affecter le comportement du super plastifiant. Il est nécessaire de faire des essais sur coulis ou sur mortier pour le choix du super plastifiant. Les ciments à temps de prise très longue sont à éviter, des dosages élevés en super plastifiant ne permettent pas le démoulage même après 24 heures.

L'obtention de bonnes résistances mécaniques dépend de la finesse de mouture du clinker. On augmente ainsi la proportion d'hydrates dans le ciment durci.

La finesse du ciment confère au béton une résistance précoce. La surface spécifique. Blaine doit être de l'ordre de 3500 à 4000 cm<sup>2</sup> [13]

Cependant, l'augmentation de cette surface conduit à l'obtention d'un ciment à très forte teneur en fines donc à forte chaleur d'hydratation et par suite il y a risque de prise instantanée.

Ce phénomène induit des contraintes d'origine thermique et donc des fissurations de peau dans des pièces massives. En outre, du point de vue de l'obtention d'une forte compacité dans les BHP, les particules les plus fines du ciment ont des interactions granulaires néfastes avec les grains d'ultrafines.

En règle générale, il est recommandé de limiter la taille inférieure des grains de ciment à 1µm. Certaines études [14] avaient préconisé l'utilisation des laitiers ultrafins et des ciments au laitier pour diminuer la chaleur d'hydratation, maintenir la maniabilité et améliorer la durabilité.

Les dosages préconisés pour les BHP sont compris entre 350 et 600 kg/m<sup>3</sup>

Suivant la résistance projetée et le coût comparé de l'ultrafine. Le dosage en eau conduit à des rapports eau/ (ciment + ultrafine) compris entre 0,2 et 0,3. Si on veut atteindre des résistances élevées, il est important de réduire au plus bas rapport tout en gardant une maniabilité convenable.

Un rapport E/C de 0,35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Ce qui signifie qu'un volume assez important de grains de ciment reste anhydre dans un BHP et ceci même à long terme. Le ciment en plus de sa fonction liante joue aussi le rôle d'un granulat inerte de petite dimension [14].

Le choix du ciment fait intervenir à la fois des critères rhéologiques et des critères de résistance mécanique.

D'après certains chercheurs [14] ont constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcique donne la meilleure maniabilité et les ciments ayant le plus grand pourcentage de C<sub>2</sub>S C<sub>3</sub>S donnent la plus grande résistance au béton.

Dans la pratique, on est toujours obligé de faire des essais de vérification sur mortiers et coulis en laboratoire pour sélectionner le meilleur ciment. [13]

**I-6-1-2 La résistance au ciment dans le BHP :**

La résistance du béton dépend bien évidemment aussi de la résistance du ciment, un ciment de 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. [13]

**I-6-2- Les granulats :**

**Conforme à la norme NF EN 12620 « Granulat pour béton » et à la norme XP P 18-545 (article 10 : « granulat pour béton hydraulique »).** [15]

Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent en principe également pour un béton à haute résistance. Si une résistance supérieure est souhaitée, la résistance mécanique du granulat est d'autant plus importante. C'est ainsi que des résistances supérieures à 100 MPa peuvent difficilement être obtenues avec des calcaire, mais peuvent l'être avec du porphyre ou du gravier.

La forme joue également un rôle : les granulats concassés permettent d'obtenir un gain de résistance supérieure à 10 MPa. En outre, le diamètre maximal du grain ne peut pas être trop grand.

En règle générale, le module d'élasticité des granulats est en effet supérieur à celui de la pâte de ciment durcie, de telle sorte que des concentrations de contraintes apparaissent au niveau des granulats. Le choix d'un grain de plus petite dimension permet pics.

Dans le même temps, l'effet d'adhérence moyen entre les granulats et la pâte de ciment durcie diminue, car la surface spécifique et la quantité de mortier nécessaire à l'enveloppement de tous les grains ne peut pas se réduire trop fortement, car, à défaut, la quantité d'eau nécessaire à l'hydrations des granulats augmentera trop fortement.

La plupart du temps, le diamètre maximal des grains sera compris entre 10 et 20 mm [15]

## I-6-2-2 Le choix de granulats :

Les granulats occupent environ 70 % du volume du matériau et, à ce titre interviennent directement sur les propriétés du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ils semblent même plus sollicités dans les BHP que dans les bétons classiques.

D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des BHP concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique. [16]

## I-6-2-3 Le gravier :

Le gravier est un granulats composé d'un mélange de sable et de gravillons. Il est utilisée principalement dans la construction des bétons durés pour les structures, l'exécution des corps de chaussées (routes et autoroutes), de plateformes (parcs de stationnement, aires de stockage...), de pistes d'aérodromes.

Dans toutes ces réalisations, quelques décimètres d'épaisseur de gravier sont utilisées sous la couche de finition (enrobé bitumineux de couverture, dallage béton, enduit superficiel d'usure...). Les graviers peuvent être naturels, reconstitués en centrale, traités aux liants hydrauliques (ciment, laitier...), à la chaux, ou aux liants hydrocarbonés (bitume).

Les graviers sont des granulats dont la granulométrie est de type  $d/D$  (d'étant le diamètre du plus petit grain et  $D$  du plus gros).

Traditionnellement en France (repris par les normes NF) [17], les granulométries typiques des graviers sont : 0/14 mm, 0/20 mm, 0/31.5 mm et 0/63 mm, voire 0/80 et 0/150 mm [18]

## I-6-2-4 Le sable :

Le sable est une matière solide granulaire constituée de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths, etc.) ainsi que des débris calcaires.

Le sable a de nombreuses applications en tant que matériau granulaire, dont le principal est la fabrication du béton. C'est une ressource non renouvelable. [18]

Le sable est généralement issu de la désagrégation des roches, sous l'action des intempéries et de l'érosion. Les roches descendent les rivières et les ruisseaux, se décomposant constamment en cours de route [18]

Le sable est la deuxième ressource la plus utilisée de la planète après l'eau. A quoi sert-il exactement ? Le champ d'utilisation du sable est stupéfiant : il est présent en grande quantité dans les microprocesseurs, la construction de nos bâtiments, mais on l'utilise aussi pour le verre et même dans les pneus [18]

Les sables sont des grains de roches ou de minéraux ayant un diamètre compris entre 0,625mm et 2 mm [18]

### **I-6-2-5 Les adjuvants :**

L'adjuvant est un produit ajouté en très faible quantité aux bétons, avant ou pendant le malaxage. La dose est inférieure à 5 % du poids du ciment.

Le but est d'améliorer certaines propriétés du béton ou mortier, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou à l'état durci.

Chaque adjuvant est défini par sa fonction principale (la ou les modifications majeures apportées aux bétons ou mortier, telles l'état frais et/ou durci), même s'il a plusieurs actions secondaires.

Techniquement parlant, ce sont des substances chimiques organiques ou inorganiques qui, ajoutées aux bétons, mortiers ou coulis, modifient :

- ❖ La rhéologie ;
- ❖ La cinétique d'hydratation (temps de prise et de durcissement) ;
- ❖ Les performances mécaniques.

L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés [19].

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides, mais certains adjuvants existent en poudre afin de réduire leur coût de transport (cas des chantiers à l'export), dans dernier cas il faut généralement les

diluer avant l'emploi (la dispersion homogène d'une petite quantité de poudre dans un malaxeur de centrale à béton est en effet moins certaine que celle d'un liquide).

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a pas une mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de substituer les règles de la bonne technique.

## **I-6-2-5-1 Les 3 grandes catégories d'adjuvants :**

### **Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton :**

- ❖ plastifiants réducteurs d'eau ;
- ❖ superplastifiants hauts réducteurs d'eau.

### **Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :**

- ❖ accélérateurs de prise ;
- ❖ accélérateurs de durcissement ;
- ❖ retardateurs de prise.

### **Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton :**

- ❖ entraîneurs d'air ;
- ❖ hydrofuges de masse ;
- ❖ rétenteurs.

## **I-6-2-6 Superplastifiants :**

Les superplastifiants ont la propriété de défouler les particules fines et les grains de ciment et d'améliorer leur répartition dans la matrice cimentaire.

Ils permettent aussi de supprimer le seuil de cisaillement dans la pâte de ciment à l'état frais. Ainsi, les BHP bien qu'ayant un aspect visqueux et collant s'écoulent facilement. Ils sont en général dosés entre 1 et 3 % de la masse de ciment.

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à défloculation des grains de ciments, une consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment).

Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci. [08]

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite ; à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

Les BHP sont définis par trois critères : résistance, durabilité et ouvrabilité. Aitcin et al [10] ont pensé que les aspects les plus importants à développer sont la fluidité et la capacité de mise en œuvre.

Ces suggestions nécessitent l'utilisation des superplastifiants qui peuvent procurer au béton d'excellentes fluidité et résistance à la ségrégation grâce à leur propriété dispersante. Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau.

Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment.

Les trois propriétés des BHP citées ci-dessus sont encore améliorées lorsque les superplastifiants sont associés à d'autres produits tels que la fumée de silice, le métakaolin, les cendres volantes, le laitier.

La résistance des bétons a longtemps été limitée car on ne peut pas augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des superplastifiants, on va pouvoir baisser considérablement la teneur en eau des bétons tout en hydratant mieux le ciment disponible ; le résultat est une augmentation des résistances finales.

Le béton d'enrobage qui est la surface de contact avec le milieu extérieur doit faire l'objet d'une grande attention, car cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs tels que : le manque de compacité, la perméabilité, les facteurs climatiques ou les agressions chimiques tel que le CO<sub>2</sub>.

Les superplastifiants sont là pour limiter grandement ces risques, notamment en augmentant la compacité des bétons et en protégeant les armatures pour un meilleur enrobage.

### **I-6-2-7 Les ajouts minéraux**

Les ajouts minéraux sont des poudres d'une finesse supérieure à celle du ciment, ils peuvent être substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajouté directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton.

Ils permettent ainsi d'améliorer notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques.

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.

Les aspects économiques et environnementaux ne sont pas à négliger non plus : dans le cas d'une substitution, le coût de l'ajout est généralement inférieur à celui du ciment et les ajouts présentent généralement des bilans carbone meilleurs que ceux du clinker.

#### **I-6-2-7-1 Fumée de silice :**

**Conforme à la norme (EN 13 263-1 et NF P 18-502) [20] :**

Également appelées « fumées de silice condensée » ou « poussières de silice » ou encore « Micro silice », sont un sous-produit de l'électrométallurgie du silicium et de ses alliages.

On charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de métal. L'ensemble est porté à une très haute température (1500-2000°C) par des arcs électriques. On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part des gaz chargés de poussières dont certains s'oxydent à l'air libre pour donner des fumées de silice.

En tant que sous-produits industriels leur nature ne fait l'objet d'aucun contrôle lors de sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication.

La fumée de silice est un matériau très variable. [20]

## I-6-2-7-2 Le laitier :

## Conforme à la norme NF EN 15 167-1 [20]

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau à partir de minerai de fer (les oxydes  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en proportions variables), de coke et éventuellement d'un fondant. On le recueille liquide vers  $1550^\circ\text{C}$  au-dessus de la fonte (gravitation de la fonte en fusion).

Le laitier et les cendres volantes entraînent un accroissement de la porosité et de la taille aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratations Figure (I-1). A plus long terme, sous l'effet de la réactivité hydraulique du laitier ou de l'activité pouzzolanique des cendres, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés ce qui conduit à une porosité du même ordre mais à une diminution de la taille des plus gros pores. Ces résultats positifs ne sont obtenus que si l'humidité de conservation est suffisamment élevée pour permettre la réaction des additions minérales

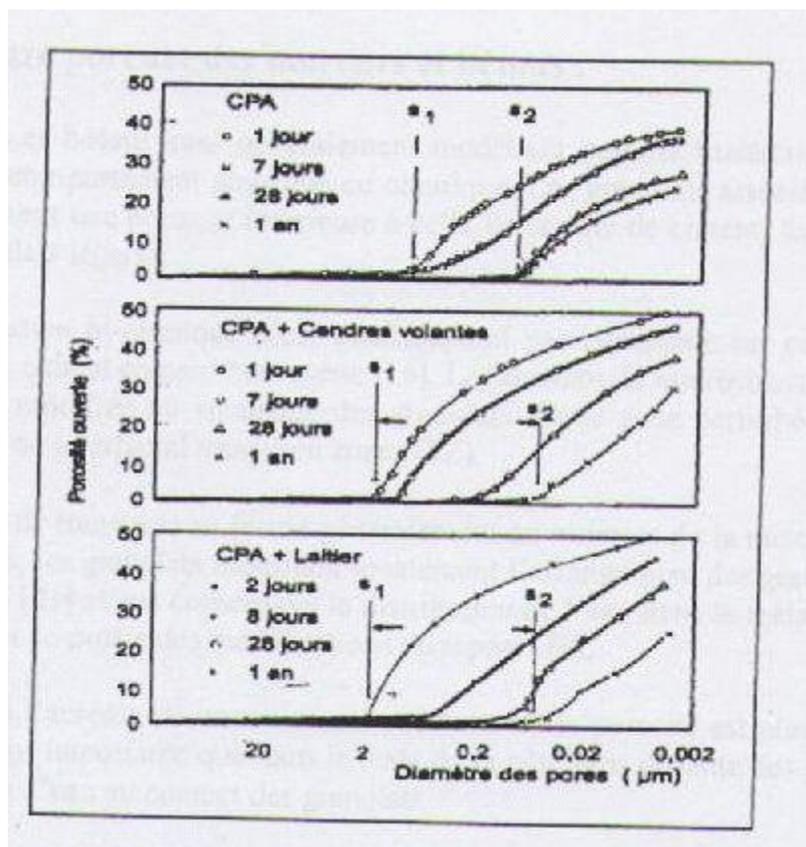


Figure I.1 Influence minérale sur l'évolution de la structure poreuse des pâtes de ciment au cours du temps [21].

Contrairement au ciment qui est soluble dans l'eau et s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier vitrifié n'est soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant.

L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés qui fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution. [21]

Ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produits jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés. C'est cette répétition du cycle dissolution – concentration – précipitation, qui constitue la prise et le durcissement du laitier vitrifié.

Les précipitations résultantes sont normalement destinées à obturer les grands pores ; cependant les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des ciments Portland ne le sont pas.

Par conséquent le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier [10]. Sarkar et al. [22] avaient montré qu'avec un laitier broyé à une finesse de 800 m<sup>2</sup>/kg, on obtient une réduction significative de la chaleur d'hydratation du ciment, un béton à haute résistance et à structure plus compacte. Péra et al. [23] ont montré que plus la finesse de mouture du laitier est élevée, meilleures sont ses performances.

La réduction des contraintes thermiques causées par la chaleur d'hydratation est un facteur important pour la production des BHP. En utilisant 75% de laitier finement broyé, Dron et al. [24] ont montré que les contraintes thermiques étaient réduites de 60%.

L'utilisation de 40% de laitier finement broyé a obtenu un béton à ouvrabilité améliorée, une augmentation des résistances même dans le cas de cure sous température élevée, et une bonne résistance à la diffusion de l'ion chlore.

La microstructure du ciment avec ajout de laitier est caractérisée par une matrice dense avec une croissance des C-H-S sur la surface des particules du laitier.

Comparé au ciment, les produits d'hydratations du mélange ciment-laitier ont également un faible rapport Ca/Si mais riche en magnésie et en alumine. Cependant, le laitier ne réagit pas promptement que la fumée de silice.

Son hydraulicité latente s'étend sur plusieurs mois voire des années. Plusieurs grains restent donc anhydres même à long terme.

De nos jours, l'utilisation du laitier devient de plus en plus fréquente. Les résultats sont très peu différents sinon similaires : une chute importante de dégagement de chaleur

d'hydratation ; une prise lente ; une bonne ouvrabilité avec réduction du dosage en eau ; une faible résistance au jeune âge ; un accroissement des résistances au-delà de 28 jour [25]

## **I-6-2-8 L'eau de gâchage :**

**Confirmée à la norme NF P 18-303 [07].** «L'eau de 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-7 Choix des matériaux pour les BHP :**

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 [26].

## **I-8-Spécification sur les BHP :**

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes :

1/- ciment : conformes à la norme NF EN197-1 de type CEM1 ou CEM2 ou CEM3 et de classes de résistance conseillées 42.5 ou 52.5 (N ou R).

2/-Granulats : conformes à la norme NF EN 12620 « granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article10 : «granulats pour béton hydraulique »).

3/-addition : conformes aux diverses normes à leur normes respectives ; laitier [NF EN 150167-1] et fumée de silice [EN 13263-1 et NF P 18-502]

4/- adjuvants : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conforme à la norme NF EN 934-2. [08]

## **I-9 Les propriétés de béton à haute performance :**

Une résistance à la compression rapide et importante ; le béton à hante résistance offre une résistance à la compression remarquable dès son plus jeune âge (une résistance à la compression de 55 à 100 MPa à 28 jours au lieu d'une résistance de 20 à 50 MPa pour un béton ordinaire). [27]

### **I 9-1 manœuvrabilités :**

Du fait de la présence de superplastifiants, le béton à hautes performances est très facilement manœuvrable.

Les valeurs d'affaissement sont mesurées au cône ou à la table à chocs pour une classe S4 ou F5 (fluide) dans la plupart des cas [28].

La fluidité d'un tel béton permet une facilité de mise en œuvre avec en particulier un bon remplissage des coffrages et un enrobage complet des armatures. Y compris dans les zones ou le ferrailage est très dense cette facilité de mise en œuvre permet en outre de réduire les délais d'exécution et autorise des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles. [29]

### **I-9-2 Durabilité :**

La porosité et la perméabilité de ces bétons améliorent par ailleurs la durabilité. Il en est même pour la résistance aux agressions chimiques comme celles que peuvent subir les bétons en milieu marin ou en milieu agressif et la résistance au gel [30]la résistance aux

agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides...), le faible risque de corrosion des armatures, la forte résistance au cycle gel-dégel et à l'écaillage ainsi que la faible perméabilité sont autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant durable [31].

Toutefois du fait de sa composition spécifique utilisant en particulier des matériaux comme les fumées de silice, il est difficile de prévoir sa durée de vie.

Le programme européen Lifecon [33] a permis de la comparaison de différentes structures construites dans des environnements bien spécifiques et de leurs données théoriques associées, d'élaborer différents modèles de dégradation. Des directives sur l'évaluation de la durée de vie, la classification EN 206 ont également été rédigées ainsi que des recommandations au secteur pour les applications du BHP [32].

### **I-9-3 le retrait :**

#### **Selon la norme 1992-1-1-2004 [15]**

Le retrait est complètement identique à celui d'un béton traditionnel. La seule différence se situe sur le fait que pour les BHP, le retrait se produit plus tôt puisqu'il se développe

Immédiatement quelques jours après le coulage.

#### **I-9-3-1 Retrait endogène :**

Le ciment réagit avec quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10%. Au début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée.

Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus chimique et un processus physique.

Dans un béton ordinaire, caractérisé  $100 \cdot 10^{-6}$ . En ce qui concerne le béton à haute résistance, ou la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant de la sorte au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Plusieurs valeurs sont précisées au tableau I.I.

Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton.

De toute évidence, le retrait endogène du béton à haute performance requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais [15].

### **I-9-3-2 Retrait de dessiccation :**

Le retrait de dessiccation dans un environnement n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume.

Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton.

Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation.

L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est caractéristique typique du béton à haute résistance.

Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance.

Le retrait d'un béton de 90 MPa dans un environnement affichant une humidité relative de 50% est de moitié inférieur au retrait observé pour un béton de 30 MPa.

L'addition de fumée de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme.

L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques. [15]

Tableau I .1 Caractéristique de résistance et déformation du béton suivant la norme EN 1992-1- ; 2004 [15]

	Classe de résistance								Béton à haute résistance					
$f_{ck}$ résistance à la compression sur cylindre MPa	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck}$ résistance à la compression sur cube MPa	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ résistance moyen en compression MPa	20	24	28	33	38	43	48	48	58	63	68	78	88	98
$f_{ct}$ résistance moyen en traction MPa	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
$E_{cm}$ module d'élasticité	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
Sécant GPa	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.25	2.3	2.4	2.45	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8

#### I-9-4 Fluage :

Le fluage du béton à haute performance est la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante –est fréquentions 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 béton plus âgé. Il en va de même pour le béton conventionnel [15].

**La norme EN 1992-1-1.2004 [15]** définit les formules nécessaires au calcul de fluage, le tableau 3 mentionne quelque résultat. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance ce C25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C90/115 pour une humidité relative de 50%.

Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieur à celle inhérentes au béton conventionnel.

Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes- en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple.

Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait.

En cas de construction en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

La déformation différée sous chargement permanent est plus faible comparée à un béton classique. Pour un BHP, le fluage augmente instantanément mais le fluage total est inférieur d'environ 40à50% à celui d'un béton usuel.

Le fluage est très inférieur à celui d'un béton usuel. Le coefficient de fluage, égale au rapport de la déformation différée sur la déformation instantanée est compris entre 1 et 1.5 pour les BHP alors qu'il est de 2 pour les bétons ordinaires. [15]

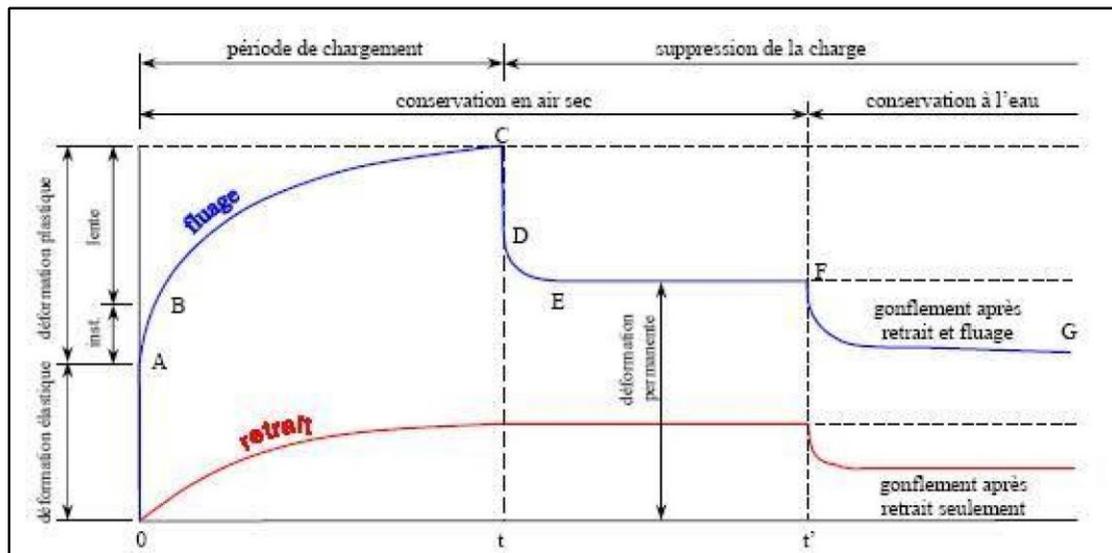


Figure. I. 2 comparaison de déformations différentes du béton en air sec et dans l'eau [33]

#### I-9-5 Imperméabilité :

Il a une très grande imperméabilité à l'air et à l'eau du fait de sa compacité plus élevée. [13]

#### I-9-6 Résistance aux agents agressifs :

L'imperméabilité du BHP du fait de leur octroi d'une résistance élevée au transfert et à la pénétration des eaux sulfatées, du dioxyde de carbone, des chlorures, etc. [34].

Les caractéristiques physico-chimiques et la vitesse spécifique de durcissement des BHP, leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (15 MPa à 12 heures, 30MPa à 24 heures, 60 MPa à 60MPa à 7 jours).

Des coffrages rapides et une accélération et une optimisation des cycles de coffrage/décoffrage

Des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis.

Une accélération et une optimisation des cadences de fabrication.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages. [35]



**Figure. I. 3 Résistance au jeune âge [35]**

#### **I-9-7 Effet de la température sur le béton en cours de durcissement :**

En raison de la teneur élevée en ciment et l'utilisation du ciment fin (classe 52.5), la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton à haute performance par rapport au béton ordinaire.

Ce phénomène peut dès lors induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de 'massif', des contraintes thermiques relativement élevée. Même si le béton à haute performance absorbe mieux les contraintes de traction, le risque de fissuration est cependant nettement supérieur.

Lors de la conception et de l'exécution, il convient donc d'accorder à ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à exclure au maximum le retrait empêché s'imposent dès lors. [15]

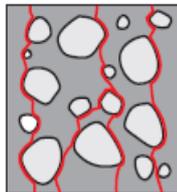
#### **I-9-8 Comportement en compression :**

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérences entre la matrice de mortier et le granulats se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérences se propageront à

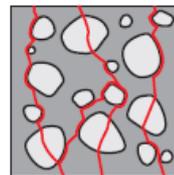
toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cédera sous l'effet de tout un réseau de fissure ininterrompue dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (figure I.4).

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 se pratiquement égale à la résistance des granulats.

Dès lors, l'apparition et le développement de fissure d'adhérence ou de microfissures sont retardés [15]. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (figure I. 5)



**Figure 1.4. béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier [15]**



**Figure 1.5 béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés [15]**

Sur le diagramme contrainte-déformation (figure I.6), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle.

De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle [15].

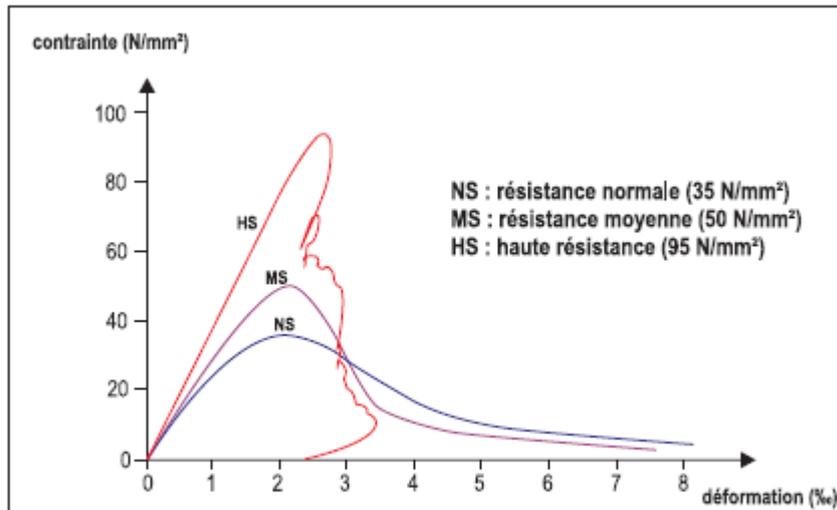


Figure.1.6 diagramme contraintes-déformation [15]

Une conséquence heureuse de la proximité initiale des grains de ciment est l'accroissement très rapide de la résistance en compression, une fois dépassé la période dormante. On atteint à 28 jours des valeurs comprises couramment entre 60 et 130 MPa, et souvent beaucoup plus élevées.

Les spécialistes distinguent le BHP par rapport au béton ordinaire, le tableau suivant donne les différents types de béton selon la résistance à la compression :

Tableau I. 2 Les différents types de béton selon la résistance à la compression [16]

classe	Résistance à la compression à 28 j (en MPa)
Béton ordinaire	20 à 50
Béton à haute performances	60 à 100
Béton à très hautes performances	100 à 150
Béton exceptionnel	>150

**I-9-9 Comportement 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 [15], une formule différente est proposée pour le béton à haute performance par rapport au béton conventionnel tableau(I.1).

Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. [15]

### **I-9-10 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 excédant 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 [15].

### **I-9-11 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 [36].

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.

Le BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/ dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraineur d'air.

Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraineur d'air est généralement nécessaire si l'E/C est supérieur à 0.32. [08]

### **I-9-12 Rigidité :**

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera généralement une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton

à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression (tableau I.1). [15]

## **I-10-Qualités essentielles d'un béton :**

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. [36]

### **I-10-1 A l'état frais :**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés.

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures de nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité.

Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

- ❖ la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- ❖ une porosité accrue ;
- ❖ un risque de ségrégation des constituants du béton ;
- ❖ un retrait augmenté ;
- ❖ un état de surface défectueux.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique [32].

### I-10-1-1 La Maniabilité

Malgré des dosages en eau très inférieurs aux dosages usuels, ces BHP présentent le plus souvent un affaissement au cône d'Abram d'environ 20 cm en sortie de malaxeur.

La séparation des particules permise par les superplastifiants supprime en effet le seuil de cisaillement de la pâte de ciment fraîche, d'où un béton qui s'écoule sous le seul effet de la pesanteur, avec cependant une vitesse dépendante de la viscosité du mélange, c'est-à-dire du degré de desserrement de l'empilement granulaire par l'eau de gâchage.

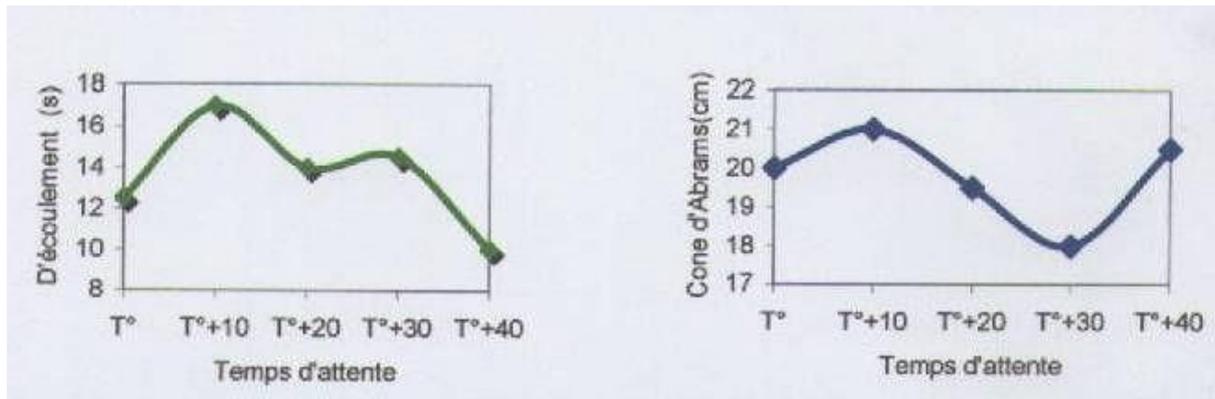
Pour des rapports eau/ciment inférieur à 0,30, la consistance, bien que fluide, est souvent visqueuse et « Collante ».

Le béton se met bien en place, mais nécessite pour cela une vibration comparable à celle de bétons courants de consistance dite « plastique ». Au décoffrage, un certain bullage apparaît parfois, conséquence de la viscosité du matériau frais.

Le maintien de la maniabilité peut être de courte durée, si on n'a pas anticipé sur ce problème lors de la formulation (De Larrard) [14].

L'obtention d'une durée pratique d'utilisation supérieure à une heure est cependant tout à fait possible figure (1-7), en utilisant éventuellement un retardateur de prise, lorsque, par exemple, le ciment contient des aluminates en proportion importante.

Signalons la relative inadaptation des moyens classiques pour l'appréciation du comportement rhéologique des BTHP à l'état frais : le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL donnent des résultats peu corrèles pour ces matériaux. Il est sage, en l'absence de moyen spécifique, il faut pratiquer les deux types d'essais, pour avoir une idée de la consistance des bétons testés.



**Figure 1.7 L'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre et l'affaissement au cône D'Abrams du béton THP pendant l'heure qui suit le coulage (essai à 20°C) [14]**

La formulation (à l'aide de superplastifiants) des BHP leur confère une grande fluidité, une ouvrabilité accrue (valeur d'affaissement au cône supérieure à 15 cm pendant plusieurs heures), une aptitude au pompage améliorée, un maintien plasticité de la dans le temps, Et une bonne stabilité à l'état frais, ce qui :

- ❖ garantit un bon remplissage des moules et coffrages et un enrobage total des armatures ;
- ❖ facilite la mise en œuvre, en particulier dans les zones très ferrillées et difficiles d'accès ;
- ❖ améliore le rendement de mise en place du béton, (Il en résulte une réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et un gain sur le coût de la main d'œuvre) ;
- ❖ permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles. [35]



Figure I.8 béton à l'état frais [35]

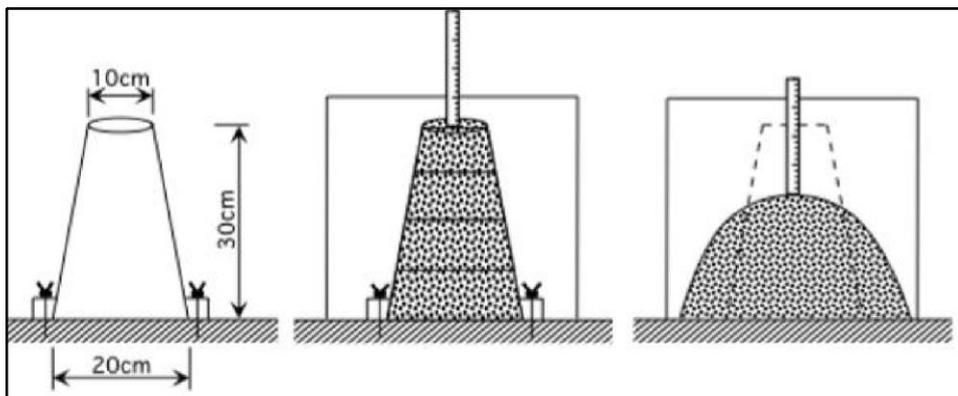


Figure. I.9 Test du cône d'Abrams [33]

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

Tableau I.3 Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton [33]

Affaissement	béton	Mise en œuvre
0 – 2cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9cm	Plastique	Vibration courante
10 – 13cm	Mou	Piquage
>13cm	Très mou	Leger piquage

### I-10-1-2 Méthodes de mesure de la consistance (maniabilité)

En Belgique, on utilise couramment deux méthodes pour évaluer la consistance du béton. Ce sont les mesures de l'affaissement ("slump") et de l'étalement ("flow"). Ces deux méthodes sont limitées à certains domaines de consistance [37].

### I-10-1-3 Classe de consistance

Le tableau I.2 donne les classes d'affaissement et d'étalement définies par la norme NBN EN 206 [39] et indique également la méthode de mesure la plus appropriée pour chaque domaine. Des indications détaillées pour la conduite de ces essais se trouvent dans les normes NBN EN 12350-2 et NBN EN 12350-5 [37].

### I-10-1-4 Contrôle de la consistance en début de bétonnage

Des valeurs de consistance semblables pour des bétons provenant d'installations différentes ne garantissent pas une ouvrabilité rigoureusement identique. Les résultats peuvent être influencés par le choix des constituants et par le malaxeur utilisé. Il est donc indiqué de vérifier l'ouvrabilité au début du bétonnage et de corriger la consistance si nécessaire. Par la suite, lors d'un éventuel changement dans la fourniture des granulats, il faudra contrôler la valeur de la consistance prescrite pour l'ouvrage en cours [37].

Tableau I.4 Classe de consistance [37]

Domaine de consistance	Affaissement (slump)-S	
	Classe	Mesure en mm
Rigide ou ferme	S1	10 a 40
Plastique	S3	100 à 150
fluide	S4	160 à 210
Très fluide	S5(1)	( $\leq 220$ )

#### I-10-1-5 Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance :

En dehors des adjuvants, d'autres facteurs ont une influence sur la consistance. La modification de l'un ou de plusieurs d'entre eux n'agit pas uniquement sur la consistance, mais également sur la résistance (et bien sûr d'autres propriétés) du béton, souvent en sens opposé. Le (tableau I.3) montre les effets auxquels on peut s'attendre sur la consistance et la résistance, lorsque l'on fait varier certains paramètres de base du béton [37].

**Tableau.I.5 .Influence des paramètres de formulation sur la consistance et les résistances [37]**

Variation	Effet sur la consistance	Effet sur la résistance à la compression
Amélioration de la continuité de la granulométrie	+	=
Augmentation de la teneur en granulat roulés	+	-
Augmentation de la teneur en granulat concassés	-	+
Augmentation de l'eau de gâchage (a constant)	++	-
Augmentation de l'eau de gâchage (a E/C constant)	++	=
Élévation de la température de béton frais	-	-
Utilisation d'un superplastifiant	++	+
Utilisation d'un entraîneur d'air	+	-
Utilisation d'un retardateur	=	+
++ effet très favorable      + effet favorable      - effet défavorable      = pas d'effet notable		

## I-10-2 A l'état durci :

Le béton durci est un matériau hétérogène : un 'squelette' de granulats gros et fins est enveloppé et lié par un 'tissu' de fibres d'hydrates de ciment. La qualité du béton à l'état durci dépend des caractéristiques du squelette pierreux, de la pâte de ciment durcie, et de l'adhérence entre les deux. L'obtention des performances théoriquement possibles du béton est déterminée en grande partie par une mise en œuvre correcte.

Après durcissement, la 'peau' du béton est composée principalement de ciment hydraté. Par rapport au noyau, la zone superficielle du béton fraîchement coulé contient moins de gros granulats, mais plus de sable, plus de grains de ciment et plus d'eau. La qualité de cette zone, dont l'épaisseur correspond à environ la moitié du D max, est essentielle pour la durabilité du béton.

Un béton compact c.-à-d. dont le rapport E/C est le plus bas possible et qui a été serré selon les règles de l'art, résistera le plus longtemps aux diverses agressions. Dans les processus chimiques et physiques qui influent sur la durabilité, le transport d'eau, de vapeur d'eau et de matières dissoutes (par ex. des sels) à l'intérieur du béton joue un rôle crucial.

La vitesse, l'ampleur et l'effet de ce transport dépendent surtout de la structure des pores capillaires de la pâte de ciment durcie. L'évaporation de l'eau des capillaires entraîne le retrait du béton (retrait hydraulique ou de dessiccation). L'humidification fait à nouveau gonfler le béton, mais sans qu'il n'atteigne son volume original. L'eau se trouvant dans les pores de gel et entre les lamelles des hydrates (eau interstitielle) n'est expulsée qu'à de hautes températures [38].

La résistance mécanique la plus importante pour le béton étant la résistance à la compression, elle est couramment mesurée sur des éprouvettes cylindriques 16x32cm (16cm de diamètre et 32cm de hauteur).

Le béton reste toujours avec leurs inconvénients tels que : Temps de durcissement relativement long, une exécution peu précise et difficulté de reprise des ouvrages en cas de transformations.

Le béton de ciment présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction, et donc aussi à la flexion a peu près 1/10 de sa valeur de compression.

## **I-11 La formulation de BHP :**

Il faut admettre que pendant longtemps les progrès réalisés dans le domaine des BHP ont été plutôt le fruit d'une approche empirique que d'une approche fondamentale et scientifique. Cependant, à l'heure actuelle, on peut quand même expliquer les meilleures performances des BHP en se basant sur des principes scientifiques établis, bien qu'il ne soit pas toujours possible d'expliquer toutes les propriétés des BHP dans leurs moindres détails.

En fait, tant et aussi longtemps que les BHP seront fabriqués avec des matériaux aussi simples et peu coûteux que ceux que l'on utilise pour faire des bétons usuels, il n'est pas évident qu'une recette magique simple puisse donner directement la composition optimale d'un BHP donné.

Il faudra donc toujours, en un endroit donné, rechercher la meilleure combinaison de matériaux locaux pour obtenir un BHP ayant un rapport eau/ciment désiré. 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 [39]

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

La formulation du béton consiste en général en la détermination des différentes proportions qui permettent d'obtenir une composition optimale. La combinaison la plus économique permette de satisfaire aux différentes exigences techniques liées aux critères de résistance, durabilité et de maniabilité. [40]

Les performances requises pour un béton impliquent :

Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l’affaissement au cône d’Abrams. Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ; on notera  $f_{c28}$  cette résistance, des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment  $C_{min}$  et un rapport E/C maximum  $(E/C)_{max}$ ,

La formulation du béton doit permettre de respecter des deux premières exigences au moindre cout, le plus souvent donc à partir d’un dosage en ciment  $C$  le plus faible possible tout en vérifiant  $C \geq C_{min}$ .

Il existe des logiciels efficaces qui permettent de traiter toute la partie non expérimentale du travail de formulation. Même avec des tels outils, il est indispensable de comprendre comment les différents paramètres influent sur les qualités du béton, car ces paramètres sont trop nombreux et trop variables pour qu’ils puissent être pris en compte dans toute leur complexité (sans compter que des produits comme des adjuvants sont en constante évolutions) [40]

Le problème de la formulation des BHP est plus complexe, où le nombre accru de paramètres (jusqu’à 4 ingrédients supplémentaires) qui sont susceptibles d’être introduits dans le matériau (adjuvant « super plastifiant », fumée de silice, et autres fines telles que cendres volantes, etc.). Pour une optimisation, il faudrait plusieurs gâchées [16]

On peut citer certaines méthodes utilisées sur un BHP

**I-11-1 Loi de féret**

René Féret [05] a proposé une formule empirique utilisée à notre époque, pour les B.H.P à base de ciment et de silice. (Baron et. Lesage ,1969) [40], ont proposé une extension de cette loi

$$f_{c28} = \frac{Kg.Rc28}{\left(1 + \frac{3.1EIC}{1.4 - 0.4e^{(-11s/c)}}\right)^2} \dots\dots\dots (Eq.1 .I)$$

$f_{c28}$  : Résistance maximale de compression à 28 jours.

E, c, s : les poids respectifs d'eau, de ciment et de silice au m3 de béton.

Kg : paramètre qui est en fonction des granulats.

Rc28 classe vraie du ciment.

Remarque :

Dans les B.H.P E/C <0.4, la précision de cette formule est de l'ordre de 5MPa.

## **I-11-2 La méthode ERNTROY et SHACKLOCK B. W.**

Cette méthode s'applique à des bétons de ciment portant de plus de 40 MPa à 28 jours, fabriqués avec du gravier de forme irrégulière et de sable naturel, ou avec du granite concassé et du sable naturel. [41]

Les auteurs de la méthode ont préparé des graphiques empiriques qui lient la résistance en compression simple à un nombre de référence arbitraire.

Les étapes de formulation d'un BHP sont :

- 1- On choisit le nombre de référence du BHP en fonction des performances, est indiqué sur la figure (2-8).
- 2 -Connaissant le nombre de référence du BHP, la grosseur maximale des granulats et l'ouvrabilité du béton, on détermine le rapport E/C requis sur la figure (I.10)
- 3- Sur le tableau (2-3) on détermine le rapport granulats/ciment, connaissant le rapport E/C, l'ouvrabilité du BHP, le type de gros granulats à utiliser et leur grosseur maximale.

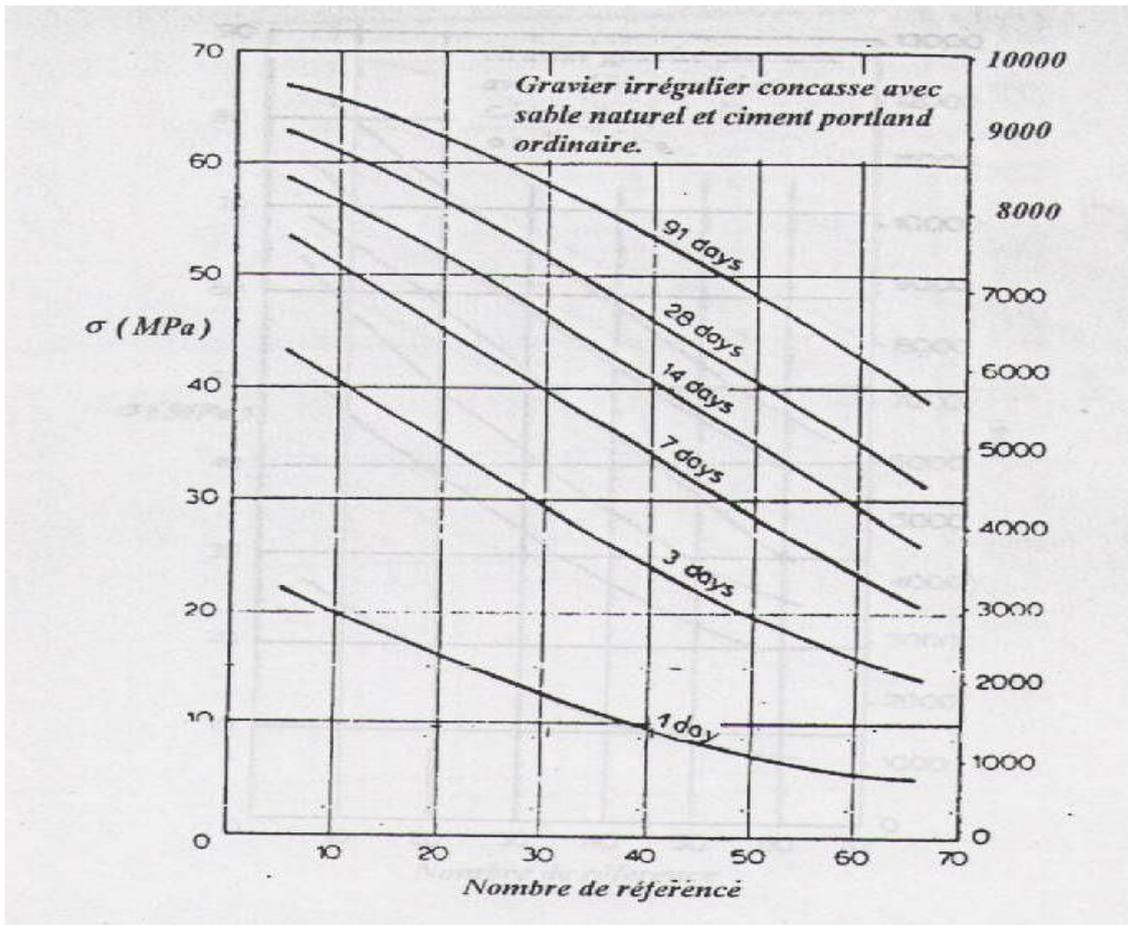


Figure I.10 Nombre de référence du BHP en fonction de la résistance. [42]

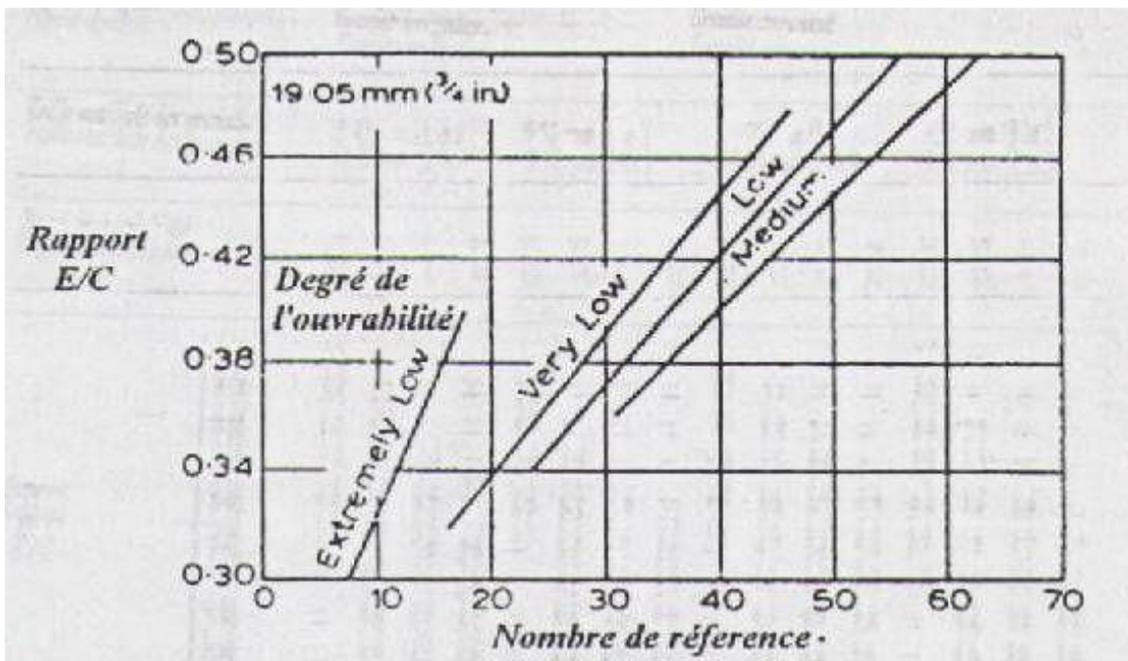


Figure I.11 Nombre de référence du BHP en fonction E/C. [42]

**I-11-3 Méthode de formulation des B.H.P de l'institut Américaine du béton (A.C.I)**

Cette méthode est très indicative, elle présente un mode opératoire pour sélectionner et mélanger dans des proportions données, les matériaux de base qui sont eux-mêmes de bonnes performances pour la réalisation d'un B.H.P. Cette méthode est applicable pour des gros granulats aux alentours de 10-14 mm

Etapas de détermination d'un B.H.P :

- ❖ La relation  $E/C = f_{tj}(f_{c28})$  conçue pour les bétons ordinaires reste valable pour les B.H.P, alors il faut choisir un rapport E/C nécessaire pour obtenir les performances désirées ;
- ❖ La quantité de ciment peut être établie par gâchée d'essai, cependant les quantités déjà utilisées varient entre 392 et 557 kg/m<sup>3</sup> de béton ;
- ❖ La proportion des granulats est importante du point de vue volume qu'ils occupent dans un B.H.P (jusqu'à 60% du volume absolu). Les granulats fins ont plus d'impact sur les B.H.P compte tenu de leur grande surface spécifique ;
- ❖ La quantité optimale d'eau et de ciment dépendra des proportions relatives du rapport gros granulats/granulats fins et ceci pour obtenir affaissement et maniabilité donnés. [43].

**I-11-4 Méthode de DELARRARD (Méthode dite des coulis) :**

C'est une méthode expérimentale de formulation de BHP, et elle s'appuie sur la loi de FERET [05] généralisée, qui permet d'évaluer la résistance moyenne à 28 jours.

La méthode s'appuie aussi sur le modèle classique de viscosité des suspensions de FARRIS [42] d'un mélange à une classe granulaire. (**Méthode des coulis**)

**I-11-4-1 Le principe de la méthode de coulis :**

Le point critique de la formulation d'un B.H.P consiste à associer un ciment et un superplastifiant afin d'obtenir un mélange fluide, mais de faible teneur en eau, tout en permettant une mise en œuvre aisée pendant un temps donné.

Un liant et un superplastifiant ayant été choisis à priori, on cherche la dose de saturation (au-delà de laquelle le superplastifiant n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire). Lorsque la dose de saturation a été trouvée, on vérifie qu'il n'y a pas de risque de perte d'ouvrabilité pour le couple [ciment-superplastifiant] utilisé avec le dosage déterminé. [43]

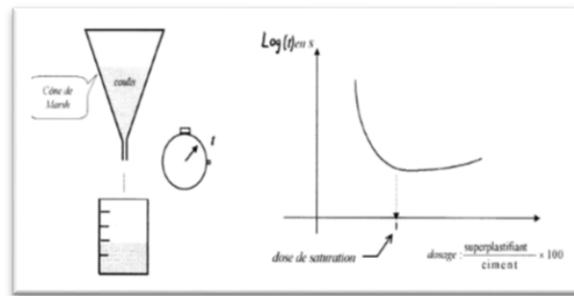


Figure I.12 Détermination de la dose de saturation par le cône de Marsh [43]

#### I-11-4-2 Conditions opératoires

Les conditions usuelles d'utilisation répondent aux impératifs suivants.

- ❖ Hygrométrie : > 65 % ;
- ❖ Température de la salle de fabrication et de mesure :  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  ;
- ❖ Température de l'eau et des matériaux :  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  (sauf dans les cas où l'on désire simuler des bétonnages par temps chaud ou par temps froid) [43] ;

#### I-11-4-3 Appareillage

- ❖ Un bêcher gradué d'un volume supérieur ou égal à 500 ml pour mesurer le volume écoulé de coulis ;
- ❖ .Un cône de Marsh (norme N F P 18-358) [43] ;
- ❖ Un chronomètre au dixième ;
- ❖ Un thermomètre pour contrôler la température de l'eau de gâchage et du coulis à la fin de l'essai ;
- ❖ Une éprouvette de 250 ou 500 ml pour mesurer l'eau ;
- ❖ Une spatule en caoutchouc pour racler la paroi du bol du malaxeur ;
- ❖ Une balance à 0,1 g ;
- ❖ Un malaxeur aux normes C E N (EN 196-1) [43] avec axe et palette en bon état.



**Figure I.13 Cône de Marsh [10]**

#### **I-11-4-4 Composition du coulis :**

Le béton de départ est formulé avec des quantités et qualités de liant(s) susceptibles de fournir la résistance recherchée, un squelette granulaire optimisé, une large dose de superplastifiant (par exemple, 1,5 % d'extrait sec par rapport au poids de ciment) et un dosage en eau ajusté pour donner la consistance recherchée (affaissement au cône d'Abrams généralement supérieur à 20 cm).

La formulation du coulis est déduite de celle du béton en enlevant tous les éléments supérieurs à 2 mm, ainsi que l'eau qu'ils absorbent. On prépare 1,5 l de coulis. [44]

#### **I-11-4-5 Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh**

- ❖ Choisir la buse de diamètre 12,5 millimètres ;
- ❖ Dès la fin du cycle de malaxage, verser 1 l de coulis dans le cône (le niveau du litre sera marqué dans le cône après étalonnage avec de l'eau) ;
- ❖ S'assurer, avant chaque mesure, que les parois internes du cône sont humides (après rinçage à l'eau, le cône est posé à l'envers sur la pailasse pendant environ 20 secondes) ;
- ❖ la première mesure de l'écoulement (retrait du bouchon de la buse) se fait à  $t_0 + 5$  min [44].

On mesure le temps d'écoulement des 500 premiers millilitres, puis la température du coulis.

Les résultats obtenus à la rhéopompe n'ont jamais été mis en défaut à chaque fois qu'il a été fait en parallèle avec des essais de perte d'affaissement sur béton.

Le premier avantage de la méthode est d'être économique en main d'œuvre et en matériaux, car la plupart des manipulations sont exécutés sur des coulis.

Elle permet de caractériser les interactions ciment-superplastifiant, d'optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour chaque ciment et de détecter les risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre ciment et superplastifiant.

La nécessité de modifier certains aspects de cet essai, traditionnellement appliqué au coulis d'injection de précontrainte qui provient des pâtes du BHP qui sont généralement plus visqueuses.

La gravité est alors souvent insuffisante pour vider complètement le cône, qui se bouche, alors qu'il contient encore du coulis. Par ailleurs, le rétrécissement de la surface libre entraine parfois la formation de "plis" qui perturbent l'écoulement. C'est pourquoi on a choisi de limiter le volume de pâte écoulé.

On cherche à aligner les temps mesurés de l'ensemble des coulis de référence en laissant le soin à l'opérateur de choisir l'ajutage et la contenance du flacon pour obtenir un temps de référence entre 5 et 15 secondes. On mesure dès la fin du malaxage le temps d'écoulement. Lorsqu'on désire voir son évolution en fonction du temps, on prendra le soin de remalaxer le mélange une minute avant chaque mesure.

Ce dernier est gardé au repos dans un récipient et recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau.

Le volume de coulis qui a été préparé doit être supérieur à celui du cône, car à chaque transvasement on perd une partie de la pâte [44].

#### **I-11-5 La méthode de PEDECHES :**

L'auteur de cette méthode propose des courbes de résistances en fonction des dosages E/C et du liant, et ceci en tenant compte du critère économique.

##### **I-11-5-1 Les étapes de cette méthode sont :**

1- Etablir différents mélanges granulaires à partir des cinq classes suivantes :

0/0.5 ; 0.5/1.25 ; 1.25/3 ; 2.5/5 et 4/10 mm, pour concevoir des BHP avec quatre dosages en liant 250, 350, 500 et 600 Kg/m<sup>3</sup>.

2- Avec la méthode DREUX-GORISE, on détermine le mélange dosé à 500 Kg/m<sup>3</sup> de liant dont le sable 0/5 mm, figure (2-10).

**Remarque :**

Le sable à un module de finesse impose égal à 3.

3- On trace la courbe granulométrique pour le BHP de composition pondérale

Fsc/C=10%, E/C=0.305.

4- On détermine le dosage en eau pour avoir une maniabilité (du BHP de référence) de 10 à 15s.

5- On détermine le dosage en eau avec 10% en fumée de silice.

6- On fait varier le dosage de fumée de silice tout en gardant la quantité d'eau constante.

7- La maniabilité des BHP obtenus est réalisée par dosage adéquat de fluidifiant

**Remarque**

- Le dosage en fluidifiant ne dépasse pas les 6 à 7 %.

- On rajoute parfois de l'eau pour obtenir la maniabilité désirée si on est à la limite d'utilisation du fluidifiant.

8- Une fois la composition théorique du BHP terminée, on réalise des gâchées d'essai on teste les propriétés rhéologiques et mécaniques et enfin, on détermine les proportions du mélange final. [45]

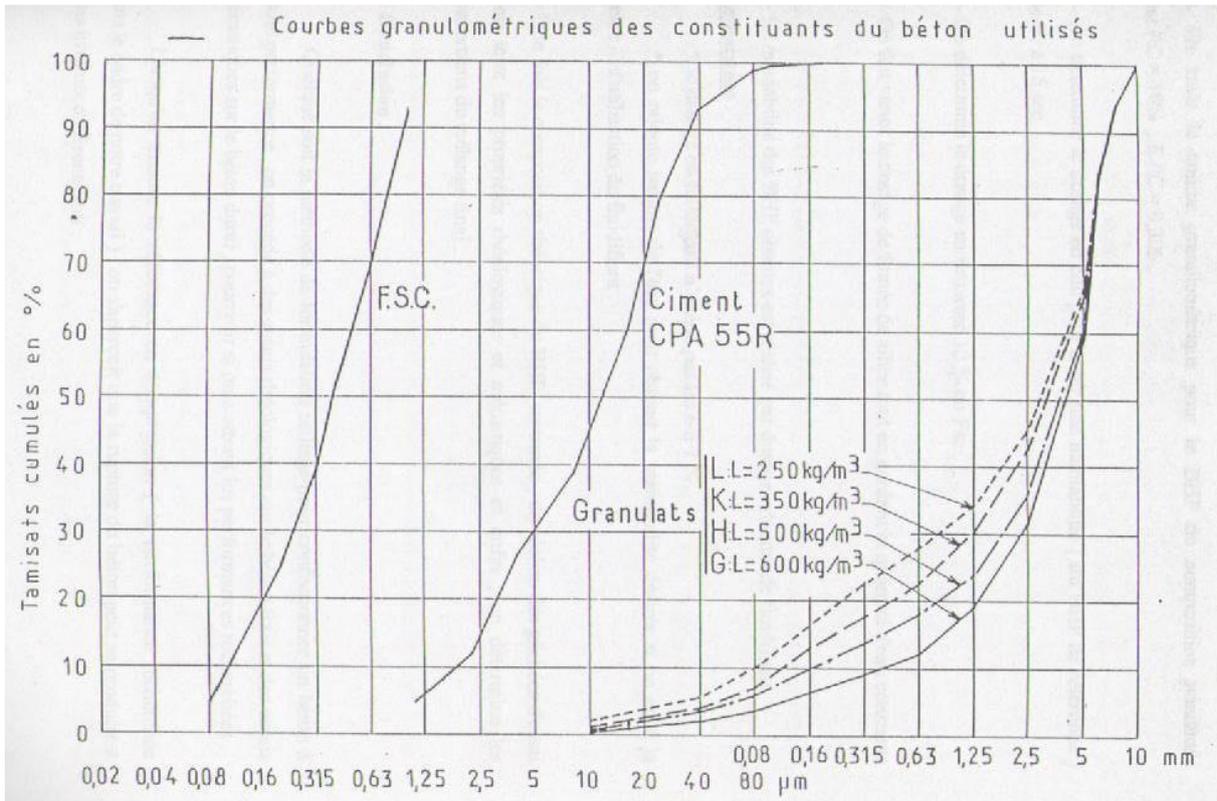


Figure I-14 Détermination des mélanges selon DREUX-GORISE [46]

**I-11-6 La méthode de formulation de l'Université de Sherbrooke :**

La méthode de formulation développée à l'Université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné : elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus (Aitcin et al, 2001). [10] La quantité contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage.

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

- ❖ Le rapport eau/liant ;
- ❖ Le dosage. En eau ;
- ❖ Le dosage en superplastifiant ;
- ❖ Le dosage en gros granulat ;
- ❖ La teneur en air.

**I-12 Optimisation de la formulation des BHP**

La résistance du béton est liée à sa porosité et à la distribution des pores capillaires. La recherche des hautes performances passe donc par la réduction de la porosité du béton.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste donc à :

- ❖ Diminuer la porosité (pourcentage de vide) de la matrice cimentaire ;
- ❖ Optimiser le squelette granulaire (granulométrie adaptée et ajouts d'éléments fins).

Pour diminuer la porosité, il faut :

- ❖ Réduire le rapport E/C (de l'ordre de 0,3 à 0,35) ;
- ❖ Fluidifier le mélange en défloculant ("en cassant les grumeaux") les grains de ciments à l'aide de superplastifiants (l'emploi de superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale).

Pour optimiser le squelette granulaire, il faut :

- ❖ Introduire des ultrafines qui comblent les microvides intergranulaires, et améliorent la fluidité à l'état frais ;

- ❖ Adapter chaque classe granulaire (4 niveaux de taille de grains) afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (granulométrie comprenant des éléments fins pour remplir les espaces entre les plus gros granulats) ;
- ❖ Déterminer la distribution de taille des grains, la forme et la résistance des grains les mieux adaptés. [35].

### **I-13 Le BHP en Algérie :**

Le béton à haute performance (BHP) est de plus en plus utilisé dans les pays industrialisés mais n'est pas très dans notre pays.

L'Algérie connaît depuis une décennie un développement intense et soutenu des secteurs du bâtiment et de la construction. Que ce soient pour les grands projets de l'Etat (1million de logement sociaux, équipements socio-éducatifs, administratifs,..) ou les grands projets immobiliers (résidentiels, tertiaires) et touristiques initiés par les promoteurs privés et publics.

Les exigences et normes internationales en matière de la performance des matériaux de construction n'est pas encore suffisamment intégrées aux processus de conception et de construction, malgré des dégâts subis lors du séisme de Boumerdes en 2003.

Les constructeurs utilisent toujours des bétons traditionnels avec des résistances d'environ 30MPa, et qui ne dépassent les 40MPa dans les meilleures conditions. Ceci conduit à de grandes pressions sur les ressources (aciers d'armature, ciment, ..) et des impacts importants sur la durabilité des constructions. Afin de répondre aux exigences d'une construction moderne et durable, l'Algérie doit obligatoirement utilisé les technologies innovantes dans le domaine d'élaboration des matériaux et bétons de construction.

Parmi les bétons innovants on trouve les BHP, dont l'utilisation à une double finalité : améliorer la résistance mécanique et la durabilité d'une part et économiser la consommation des matériaux de construction en réduisant les sections des éléments constructifs et en limitant le taux de ferrailage. Bien que ces nouveaux bétons sont largement utilisés à travers le monde depuis plus de deux décennies.

Leurs utilisation en Algérie, restent très limitées ou inexistantes. [47]

**I-14 utilisation des bétons à hautes performances :**

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

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 matérialiser 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. [48]



**Figure I .15 Pont en BHP [35]**

**I-15 Les avantages de BHP :**

Le BHP présente des avantages ‘technologique’ intéressants par rapport au béton traditionnel :

- ❖ Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l’armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution du risque de réaction alcali-silice, meilleure résistance au gel, ...etc.) ; Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d’entretien au long terme ;
- ❖ En règle générale, une fluidité très élevée à l’état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones p densités d’armature élevée ;
- ❖ Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d’accélérer la mise en contrainte. Des délais d’exécution raccourcis sont donc envisageables ;
- ❖ Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et, dès lors, la diminution du poids de la construction.
- ❖ Un module d’élasticité supérieur, susceptible d’améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés ;
- ❖ Un retrait réduit, qui s’avéré avantageux pour la maîtrise des déformations d’une construction, ainsi qu’en ce qui concerne les pertes de précontraintes. [07]

**I-16 Conclusion :**

L’emploi de bétons à hautes performances dans les structures d’ouvrages d’art reste pourtant indissociable du renforcement par des armatures d’aciers. Alliés à la précontrainte, ces bétons permettent de concevoir et de réaliser des pièces d’ouvrage d’art très élancées, fines, légères et encore plus durables que les bétons ordinaires. La réduction considérable de l’épaisseur des structures permet un gain économique important par rapport aux bétons ordinaires du fait de la restriction des matières. De plus, ces bétons présentent une très bonne qualité d’adhérence avec les armatures d’acier qui est une condition nécessaire au transfert des efforts internes. Ces bétons développent aussi des résistances accrues vis-à-vis de la fissuration, permettant ainsi de mieux répondre aux différents états limites et déformabilités.

L’utilisation des bétons à hautes performance considérer comme outil d’application de la durabilité et résistance des structures contre les conditions environnementales. Les BHP

sont des bétons qui reprennent toutes les exigences de la performance mécanique et l'homogénéisation qui nécessite des matériaux spéciaux

Le béton moderne est en train d'évoluer, un matériau ordinaire destiné au marché, de consommations habituelles vers un matériau de pointe destiné à des marchés niches. Cela ne veut pas dire que les bétons de 15 à 20 MPa sont condamnés à disparaître, car il existe de nombreuses applications où les concepteurs n'ont pas besoin de béton ayant une résistance à la compression plus élevées. Cependant, de plus en plus des bétons de pointe commencent à être utilisés dans des marchés niches ou leur utilisation conduit à une diminution significative des coûts initiaux et d'entretien. Il est aussi facile de démontrer que tels bétons sont beaucoup plus avantageux, non seulement du point de vue socioéconomique mais aussi environnemental.

L'objectif de ce travail est de fabriquer un BHP performant et économique à base de matériaux locaux. Un BHP ayant des propriétés (mécanique, physique, élastique, durabilité et de mise en œuvre) très élevées.

**CHAPITRE II**  
**LES GRANULATS**  
**RECYCLES**

**II-1 Introduction :**

Tout au long de son évolution, l'Homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux. Parmi ceux-ci et avec 1m<sup>3</sup> mis en œuvre par an et par habitant sur la planète [49], le béton est le matériau le plus utilisé au monde. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats stockés majoritairement dans les CET (Centres d'Enfouissements Techniques). Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre.

Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles ainsi que de désengorger les sites de stockage. Le développement durable est devenu un véritable enjeu stratégique dans ses différentes dimensions. Il touche de façon directe les matériaux de construction du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, de la consommation d'énergie et matières premières naturelles et la génération de déchets (au moment de la construction et lors de la déconstruction) [50]. A la fin de leur cycle de vie, les ouvrages et structures de génie civil constituent un gisement important pour la production de granulats recyclés, surtout qu'après déconstruction, le coût de la mise en décharge devient de plus en plus élevé.

Les granulats recyclés sont ainsi une solution au problème d'épuisement des ressources et de stockage de déchets. La récupération de la pâte de ciment potentiellement utilisable, après traitement, dans la production de nouveau ciment ou de tout autre type de liant hydraulique pourrait aussi conduire à minimiser l'impact CO<sub>2</sub> attribué à la fabrication du ciment. L'introduction des granulats recyclés dans le béton se fait déjà dans certains pays d'Europe tels que le Danemark, l'Angleterre, l'Allemagne et certains pays hors d'Europe comme l'Australie ou le Japon [51]. En Algérie, en plus du déficit (10 à 20%) en granulats, les déchets de construction et de démolition sont importants mais rarement valorisés [52]. Une tentative de valorisation dans ce domaine a été entreprise dans la région de Chlef après le séisme de 1982 en collaboration avec le centre scientifique et technique de construction (C.S.T.C) Belge [52].

L'utilisation de ces matériaux, nécessite la quantification de l'impact de ces granulats recyclés sur le comportement des bétons à l'état frais et durci à travers l'identification des

propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques. Aujourd'hui la norme EN206-1 [52] permet une réutilisation des granulats recyclés dans la production de béton frais mais dans une proportion maximale de 30% (en béton armé).

### II-2 Recyclage :

Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première naturelle. Il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse [53].

La brique, le béton et le mortier peuvent être concassés et utilisés comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications dans le domaine de la construction [54].

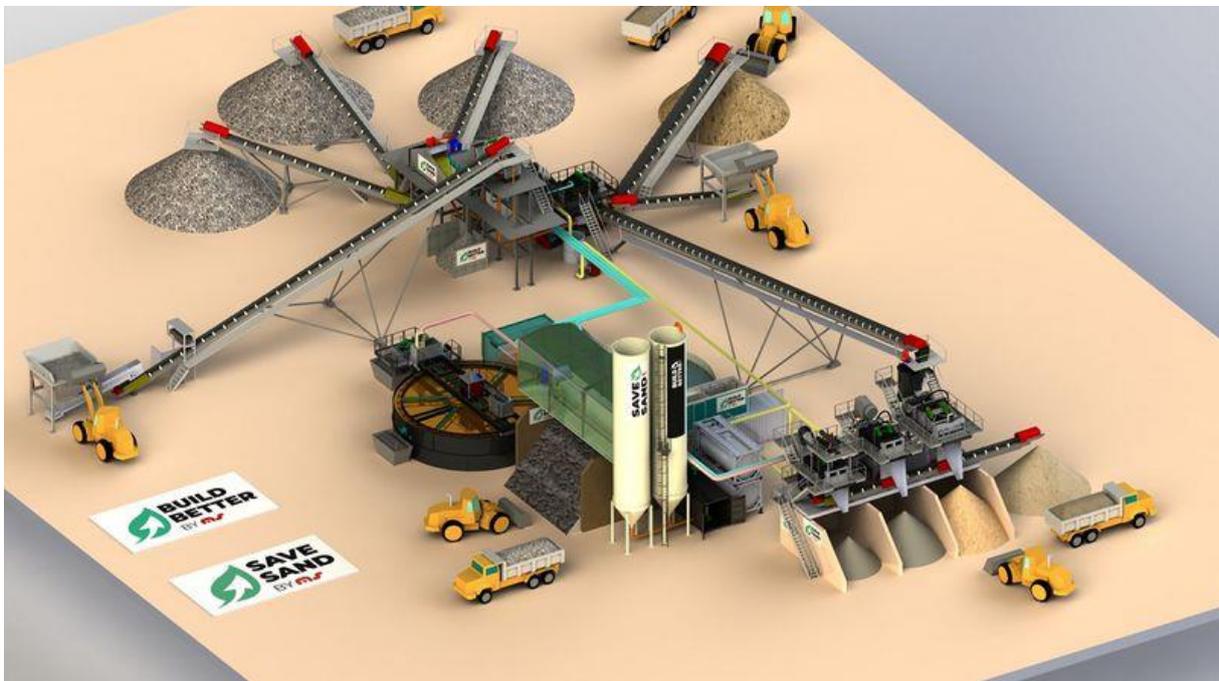


Figure II.1 Recyclage des matériaux [55]

### II-3 Cycle de vie des matériaux :

L'utilisation des granulats recyclés offre l'avantage de pouvoir approcher le travail en 'boucle fermée'

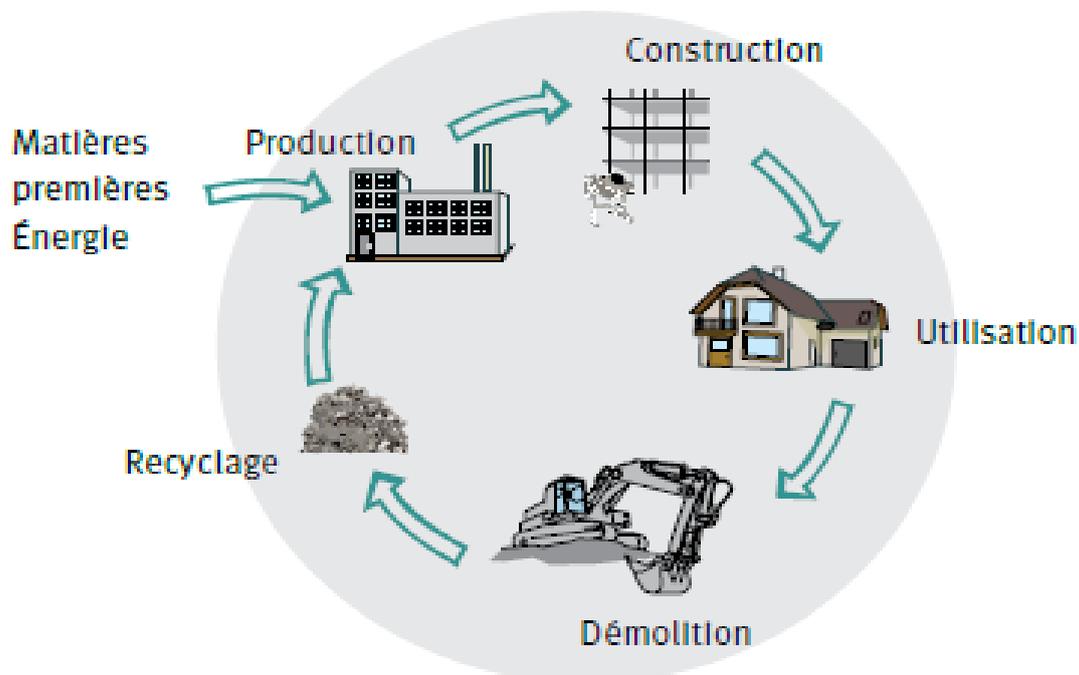
« cradle to cradle » un produit extrait = un produit utilisé = un produit recyclé = un produit réutilisé.

En Belgique, la quantité de granulats produite annuellement est de 43 millions de tonnes, la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes. Les granulats naturels offrent à terme le même potentiel de recyclage que les granulats recyclés, cependant

leur utilisation ‘systématique’ freine le développement du cycle vertueux du recyclage. Sachant que les granulats recyclés peuvent être constitués de différents types de matériaux pierreux inertes (blocs de béton / briques / tuiles...), déroger à leur utilisation implique de se priver d’un potentiel important de récupération de matière (déchets exploitables) alors même qu’un marché existe et que les décharges (CET : Centre d’Enfouissement Technique) arrivent à saturation.

Il est important de noter que le recyclage des matériaux en vue de la réalisation de granulats recyclés constitue également un avantage économique – ex : le dépôt des débris de béton propre (non mélangé à d’autres composants) chez les recycleurs est généralement gratuit alors qu’une mise en décharge coûte de 15 à 30 €/T ; l’asphalte déposé chez un recycleur sera aussi repris gratuitement alors que sa mise en décharge coutera entre 130 et 170 €/T.

De même, l’utilisation de granulats recyclés offre la plupart du temps une réduction significative sur le coût des matières premières. La variation moyenne des prix est de 20 à 25% en faveur des granulats recyclés (variable selon les quantités et le transport lié à l’origine géographique des produits). [56]



**Figure II.2** différentes phases du cycle d’un matériau de construction ou d’un bâtiment.

[57]

**II-4 Intérêt du recyclage dans le génie civil :**

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats [58].

Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage. Ainsi, en France le potentiel de matériaux recyclables est seulement de 10 à 15 millions de tonnes. En 2001[58], la quantité réelle issue du recyclage n'était cependant que de 5 millions de tonnes. Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 [59], le granulats recyclé de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels. Selon Charlot [60] en France, les déchets de démolition sont issus des friches industrielles (40 %), des logements (35 %) et des travaux publics (25 %).

Ces déchets sont composés de 50 % de maçonnerie, 30 % de béton, 5 % de bitume et 15 % de matériaux autres (bois, métal, papier, plastique, etc.). Le Recyclage des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet :

- ❖ Une économie de la ressource naturelle ;
- ❖ Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- ❖ Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants

La réduction des quantités de matériaux mis en décharge. Au niveau environnemental.

Le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO<sub>2</sub> du fait que :

- ❖ au transport de granulats ;
- ❖ Le béton concassé est susceptible de piéger le CO<sub>2</sub> en se carbonatant ;
- ❖ La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO<sub>2</sub> des cimenteries. [61] Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO<sub>2</sub> attribuée.

**II-5 Déchets et environnement :**

Un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. [62]

**II-5-1 Déchets en Algérie :**

Le gisement de déchets ménagers produit annuellement en Algérie comporte une fraction récupérable non négligeable que les services du MATET estiment les valeurs suivantes :

**Papiers** 385 000 tonnes/an

**Plastiques** 130 000 tonnes/an

**Métaux** 100 000 tonnes/an

**Verre** 50 000 tonnes/an

**Matière diverse** 95 000 tonnes/an

D'après les données nationales, on peut résumer ce qui suit : [63]

- ❖ L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions tonnes de déchets ménagers ;
- ❖ L'Algérie compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares ;
- ❖ La décharge coûte annuellement à l'Algérie 0,19 % du PIB en impacts sur la santé et 0,13 % du PIB en pertes économiques (potentiel de recyclage et de valorisation non réalisés) ;
- ❖ Chaque année 200 000 tonnes de déchets d'emballages sont rejetés en Algérie. Les plastiques constituent 95% de ces emballages et les métaux représentent les 5% restants ;
- ❖ Des 200 000 tonnes de déchets d'emballages rejetés annuellement, seulement 4000 tonnes sont récupérées soit 2% du gisement ;
- ❖ Chaque année, 22000 tonnes de déchets d'activité de soins sont produits en Algérie ;
- ❖ Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 1000 schémas directeurs de gestion des déchets solides urbains pour les différentes communes du pays ;
- ❖ Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 300 Centres d'enfouissement Technique et décharges contrôlées ;
- ❖ Il existe en Algérie 317 incinérateurs opérationnels pour la destruction des déchets d'activité de soins ;
- ❖ Chaque année, les algériens utilisent près de 300 millions de piles et accumulateurs, soit environ 12 unités par habitant. On estime que 70% de ces piles finissent dans la nature ou à la

décharge avec tous les risques de contamination de l'environnement par le mercure, le cadmium, le plomb, le zinc et le lithium.

### II-5-2 Lois Algériennes concernant les déchets :

- ❖ **Loi N°90-08 portant code communal ;**
  - ❖ **Loi N°01-19 du 12/12/2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des Déchets ;
  - ❖ **Loi N°03-10 du 19/07/2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;
  - ❖ **Décret exécutif n° 02-175 de la 20/05/2002** portant création de l'Agence Nationale des Déchets ;
  - ❖ **Décret exécutif n° 02-372 du 11/11/2002** relatif aux déchets d'emballages ;
  - ❖ **Décret exécutif n° 04-199 du 19/07/2004** fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages « ECO-JEM » ;
  - ❖ **Décret exécutif n° 04-410 du 14/12/2004** fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations ;
  - ❖ **Décret exécutif 07-205 du 30/06/2007** fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.
- [64]

### II-6 Les granulats recyclés :

#### II-6-1 Définition :

Les granulats constituent la matière première principale des bétons en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent plusieurs de leurs propriétés, notamment une absorption élevée et induisent la présence de fines en quantité élevée [2, 3]. Ces éléments peuvent se trouver sous forme broyée (éléments fins) ou concassée, accolés ou non au granulat du béton démolé (béton parent) [4, 5]. Les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées [5, 6, 7, 8, 9]. [65]

Les granulats de recyclage et artificiels Sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons, ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers ou d'autres déchets comme les

briques et le verre. Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours. [66]

Les gros granulats recyclés (GBC) et sable recyclé (SBC) sont obtenus par le concassage dans un concasseur à mâchoire de petite dalles (1\*1\*0.1m) de béton naturel, composé de gravier et sable, fabriqué en laboratoire. Les granulats recyclés sont utilisés à l'état humide (Saturé d'eau Surface Sèche-SSS). Ils sont prémouillés 24 avant chaque gâchage.

Les GR sont composés de gros granulats et de granulats fins. Le remplacement du GN par le granulats recyclés est effectué de la manière suivante : une proportion des granulats fins recyclés remplace le sable et une partie des gros granulats recyclés remplace les gros granulats naturels. Les proportions massiques des granulats naturels dans le mélange sont effectuées suite à une optimisation granulaire des matériaux par rapport à la courbe visée de Fuller et Thompson. [67]

Bien que certaines propriétés des bétons aux GR soient plus faibles, comparativement aux propriétés des bétons aux granulats naturels, il est possible d'obtenir la résistance à la compression minimale de 25 MPa à 28 jours, recommandée par la norme CSA A23.1-14 (bétons de classe F2), en optimisant le taux de remplacement des granulats recyclés de 15% pour un béton formulé avec du ciment et de 45% pour un béton formulé avec du ciment binaire au laitier. [67]

### II-6-2 Granulats recyclés exigences de la norme :

Les granulats recyclés doivent être conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF 7 18-545. [68]

Ils doivent être obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction et sont interdits pour les structures en béton

- ❖ **granulat recyclé** : granulats obtenus par traitement de matériaux auparavant utilisés en construction
- ❖ **granulats récupérés par lavage** : granulats obtenus par lavage du béton frais
- ❖ **granulats récupérés par concassage** : granulats obtenus par concassage du béton durci, qui n'a pas été précédemment utilisé en construction

La norme définit trois types de granulats recyclés à partir de leur classifications en :

- ❖ type1 : toutes les caractéristiques sont CR<sub>B</sub> ;
- ❖ type2 : toutes les caractéristiques sont CR<sub>B</sub> ou CR<sub>C</sub> ;
- ❖ type3 : toutes les caractéristiques sont CR<sub>B</sub> OU CR<sub>C</sub> ou CR<sub>D</sub>.

Tableau II.1 classification des granulats recyclés selon la norme NF 7 18-545. [68]

code	constituants secondaire				Type de fréquence d'essai	
	Catégorie NF EN 12620				temporelle	quantitative
<b>CRb</b>	Rcu <sub>45</sub>	Ra <sub>1</sub>	XRg <sub>0,5</sub>	Fl <sub>0,2</sub>	2/mois	1/2000tonnes
<b>CRc</b>	Rcu <sub>90</sub>	Rb <sub>10</sub>	XRg <sub>1</sub>	Fl <sub>2</sub>		
<b>CRd</b>	Rcu <sub>70</sub>	Rb <sub>30</sub>	XRg <sub>2</sub>	Fl <sub>2</sub>		

Rc : béton, mortier, élément de maçonnerie en béton

Ru : granulats non liés, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques

Rcu = Rc+Ru

Rg=verres

Ra= matériaux bitumineux

Rb=éléments en argile cuite (brique, tuiles), éléments en cellulaire non flottant

X= argile, sols, matériaux, bois, plastiques, caoutchouc, bois

Fl=matériaux flottant

XRg= X+Rg

### II-6-3 Production des granulats recyclés :

Dans la norme européenne EN 12620 [69], le granulat recyclé est défini comme un agrégat produit par le concassage de matériaux inorganiques ou minéraux précédemment utilisés dans la construction.

Durant ces dernières années [69], on peut remarquer figure II.5 que la production de béton comme matériau de construction est en forte augmentation.

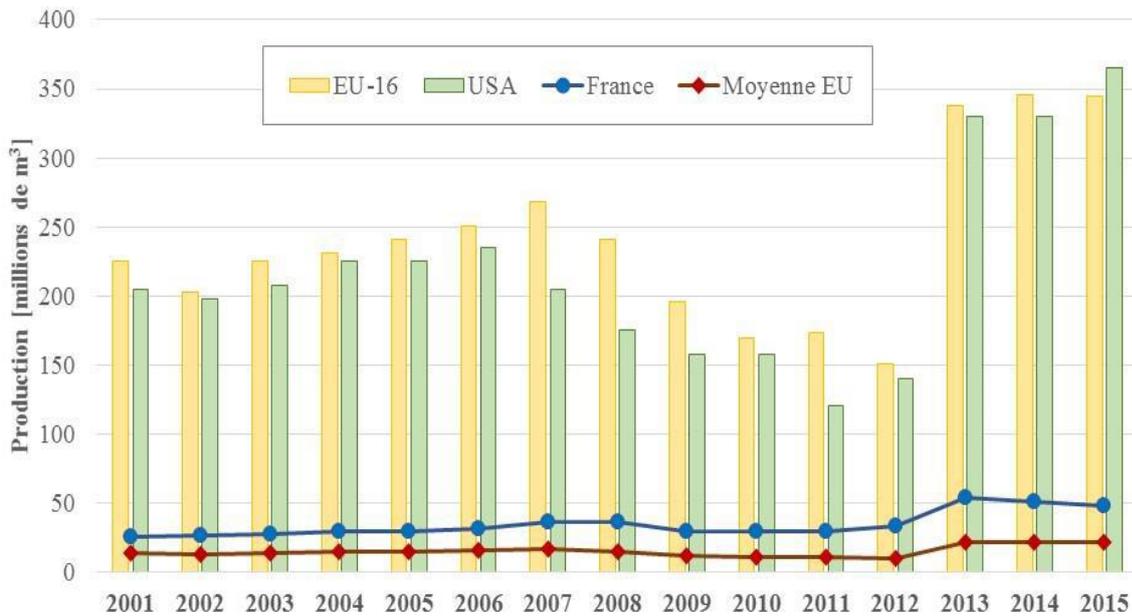


Figure II.3 Production de béton entre 2001 et 2015. (Données ERMCO) [69]

Le secteur de la construction est responsable d’une forte consommation d’énergie [70]. En outre, les constructions ont une durée de vie limitée : au bout d’un certain nombre d’années, elles sont démolies ; ce qui génère des déchets. Afin de pouvoir améliorer l’impact environnemental du béton, comme le prévoit la norme UNI EN ISO 14040 :2006 [70], les déchets de béton peuvent être réutilisés dans la fabrication de nouveau matériau de construction.

Cependant, la norme française NF EN 206 [70], annexe E.3 sur les recommandations pour l’utilisation des gravillons recyclés, impose un taux de substitution maximale de 30%. Cela restreint la valorisation des granulats recyclés dans le béton.

La production des granulats naturels et recyclés diffère en termes de prix et de consommation d’énergie. Les études [71–72] concernant la consommation d’énergie apportent des éléments contradictoires, comme illustré dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 Energie utilisée pour la production de 1 tonne de granulats naturels et recyclés.

	Granulats naturels		Granulats recyclés
	Par extraction	Par concassage	
Energie par combustion [MJ]	20	120	40
Energie électrique [MJ]	9	50	15
Energie totale [MJ]	29	170-27.77	29.15

En général, on remarque que la consommation d'énergie pour produire une tonne de granulats naturels est plus importante par rapport à celle utilisée pour produire l'équivalent de granulats recyclés. Toutefois, il faut aussi considérer l'avantage environnemental produit avec l'utilisation des granulats recyclés. Comme l'a montré Marinković [72], les bénéfices apportés par l'utilisation des granulats recyclés sont remarquables en termes de diminution de production de déchets et de préservation des ressources naturelles Figure II.4

**Production de déchets (tonne)**

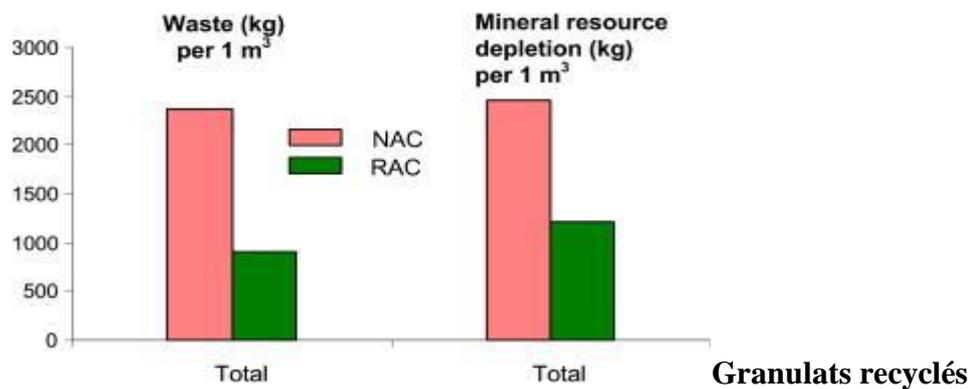


Figure II.4 Production des déchets et destruction des ressources naturelles pour la production de 1m³ de béton avec granulats naturels (NAC) et recyclés (RAC). [72]

**II-6-4 Description de granulats recyclés :**

Selon la taille, les gros granulats de béton recyclé (GGR) peuvent être composés d'un ou plusieurs gros granulats naturels (GN), entourés entièrement ou partiellement par une

couche de pâte de ciment ou du mortier résiduel figure II.5. Les GGR peuvent aussi apparaître essentiellement comme un fragment de mortier résiduel, avec des proportions variables de petits granulats naturels figure II.6 c. Une approche de classification selon la forme structurale a été adaptée par Akbarnezhad et coll., 2011 [73] figure II.6

- ❖ **Type I**, contient une ou plusieurs particules des GN entourés totalement ou partiellement par du mortier résiduel (a) et (b) ;
- ❖ **Type II**, contient presque en totalité du mortier résiduel (c) .

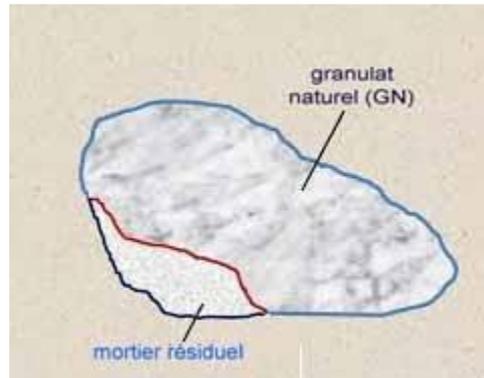


Figure II.5 Schématisation d'un granulat recyclé

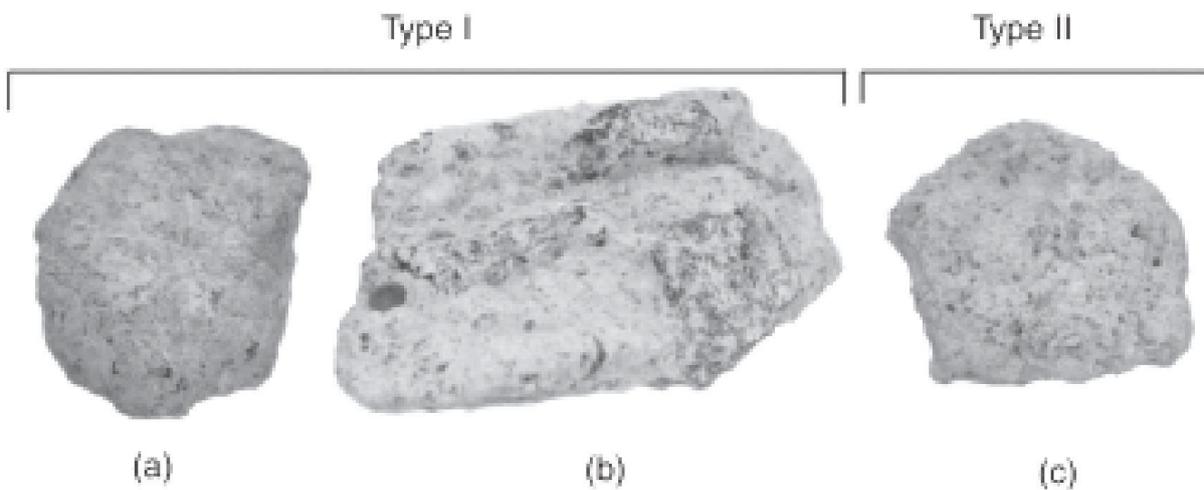


Figure II-6 Les types des gros granulats de béton recyclé, selon la forme structurale. Le contenu du mortier résiduel est partiel (a) et (b) ; est presque en totalité (c).

Il n'y a pas encore de méthodes pratiques pour séparer les morceaux du mortier résiduel et les GN intégrés du GGR dans une usine de recyclage et donc les échantillons de GGR comprennent habituellement des proportions variables des deux types [73].

**II-6-5 Caractéristiques des granulats recyclés :**

En général, les granulats de béton recyclé sont constitués de granulats naturels et d'une ancienne pâte de ciment durcie adhérente aux granulats. La pâte de ciment durcie contenue dans les granulats de béton recyclé présente une porosité plus élevée, ce qui fait que les granulats recyclés sont beaucoup plus poreux que les granulats naturels.

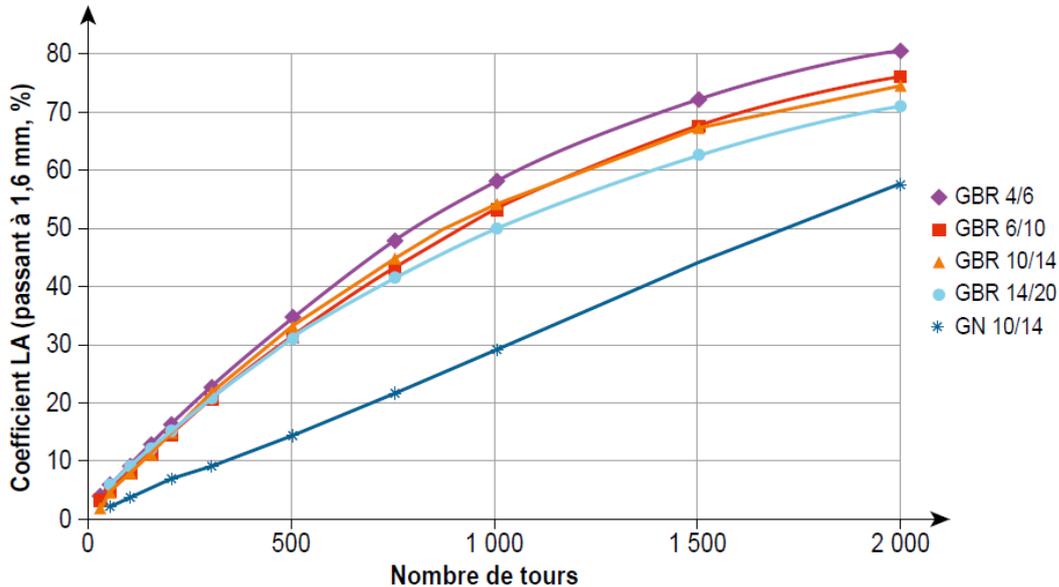
Les travaux du PN Recybéton présentent quelques propriétés physiques des granulats de béton recyclé Tableau II.3. Le sable de béton recyclé présente un coefficient d'absorption 4-12 fois plus élevé que celui du sable naturel. Cette forte différence d'absorption est moins remarquable en ce qui concerne les gravillons.

**Tableau II.3 Valeurs moyennes d'absorption d'eau, teneur en sulfates et masse volumique réelle des granulats naturels et recyclés. [74]– [75]**

	sable		Gravier	
	Naturel	recyclé	naturel	recyclé
<b>Absorption d'eau (%)</b>	0.5-2.0	6.3-9.5	2.75	4.7
<b>Sulfates solubles dans l'eau (%)</b>	<0.003-0.03	0.09-0.22	-	-
<b>Masse volumique réelle (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2627	2065	2392	2327

Pour ce qui concerne les propriétés mécaniques des granulats, la Figure II.7 montre la variation comparée du coefficient Los Angeles de granulats naturels et de granulats de béton recyclé suivant la classe granulaire. Ces résultats issus des travaux du PN Recybéton,

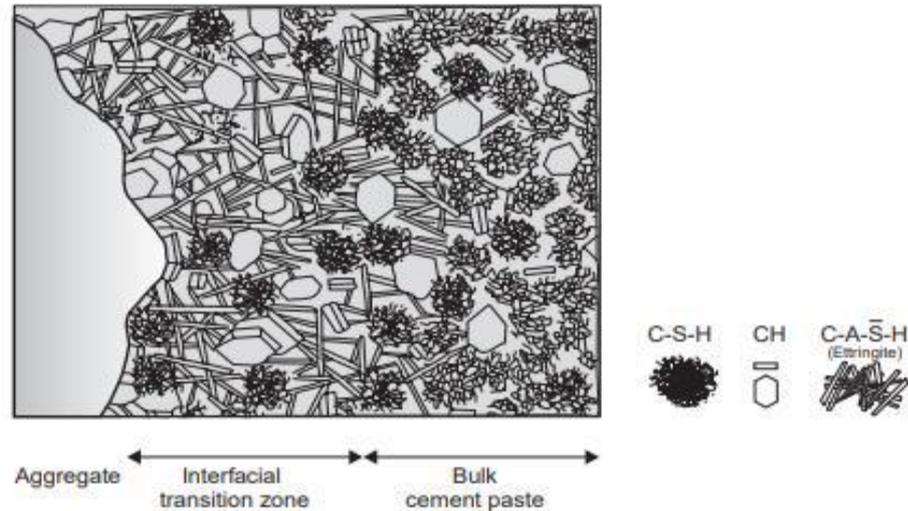
montrent un coefficient Los Angeles plus élevé avec les granulats de béton recyclé qui semble être lié à la présence de l'ancienne pâte cimentaire, contrairement aux granulats naturels.



**FigureII.7 Coefficients de Los Angeles (LA) pour les granulats recyclés et naturels, en fonction de nombre de tours. [74]**

**II-6-5-1 L'interface pâte-granulats**

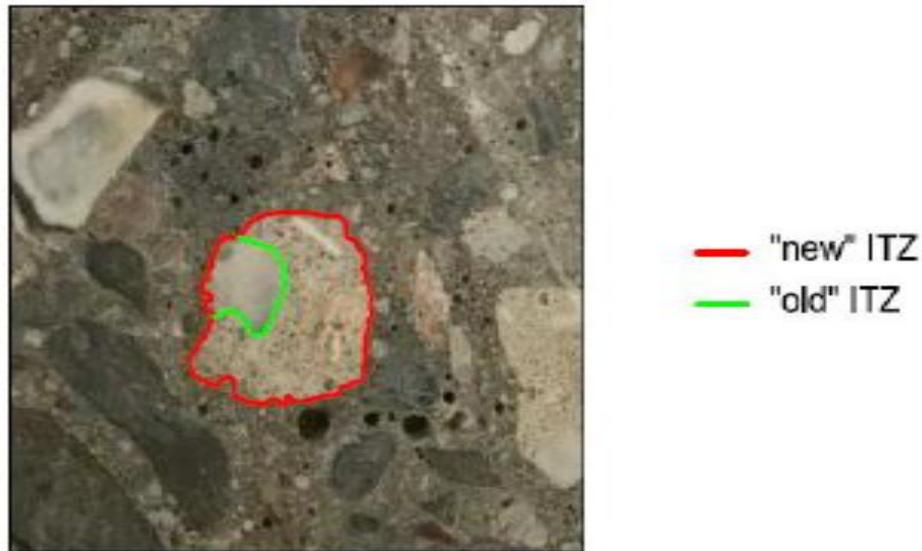
La liaison pâte / granulats joue un rôle prépondérant dans la résistance du béton. Elle représente le maillon faible du matériau composite qu'est le béton, là où s'initient les microfissures. La zone de contact entre la pâte cimentaire et les granulats naturels est connue sous le nom de Zone Interfaciale, souvent désignée par l'acronyme ITZ (« Inter facial Transition Zone » en anglais). Mehta et al. [76] ont montré que cette zone est caractérisée par des propriétés particulières, telles que la morphologie, la densité et la composition.



**Figure II.8 Représentation schématique de la zone interfaciale [75].**

Dans le cas du béton contenant des granulats recyclés, on trouve deux catégories d'ITZ, comme l'explique Tam et al. [77] :

- ❖ Une « new ITZ », constituée de la zone interfaciale entre le granulat recyclé et la nouvelle matrice cimentaire ;
- ❖ Une « old ITZ » constituée de la zone interfaciale entre le granulat d'origine et la vieille pâte cimentaire.
- ❖ Une représentation schématique est fournie dans la Figure II.9 où les deux zones mentionnées ci-dessus sont mises en évidence avec une ligne rouge continue pour la nouvelle ITZ et une ligne verte continue pour l'ancienne.



**Figure II.9 Représentation schématique de la double ITZ dans le béton de granulats recyclés.**

Cette double ITZ ajoute une zone de faiblesse supplémentaire dans laquelle peuvent se propager les fissures. De plus, l'augmentation de la porosité induite par ces multiples zones interfaciales peut affecter la résistance à la compression finale du béton.

Cependant, Etxeberria et al. [78] ont trouvé que la nouvelle ITZ peut avoir une influence favorable sur la résistance du béton. En effet, lorsque les granulats recyclés sont introduits dans un état humide mais pas saturé, l'eau pénètre dans les granulats recyclés plus poreux diminuant localement le rapport E/C de la zone interfaciale renforçant ainsi l'adhérence pâte-granulat. Cette affirmation est confirmée par les auteurs lors d'essais de traction où le plan de rupture passe au travers des granulats recyclés et non pas par l'ITZ, comme c'est le cas pour les granulats naturels. En accord avec cette étude, Otsuki et al. [79] ont remarqué que la présence d'une double ITZ dans le béton de granulats recyclés n'est pas préjudiciable, que le rapport eau/liant soit faible (égal à 0.25) ou élevé (égal à 0.55).

Dans le cas de granulats fins (sable), les études de Zhao et al. [80] ont montré une augmentation de la dimension de l'ITZ, suite à la migration de l'eau des granulats fins vers la nouvelle pâte cimentaire en causant une augmentation du rapport E/C sur la surface du granulat.

**II-6-5-2 Les Propriétés mécaniques des granulats recyclés :**

Les propriétés mécaniques des matériaux d'origine ont un impact significatif sur les performances mécaniques du béton fabriqué avec les GR [81]. Les exigences mécaniques spécifiées dans les normes des différents pays selon le type de GR se résument principalement à l'essai Los Angeles. Cet essai n'est effectué que sur la fraction grossière des granulats. La spécification mécanique la plus souvent incluse dans les normes de l'essai Los Angeles est le coefficient d'abrasion. Ce coefficient est inclus dans la plupart des normes. L'essai de rigidité est présent dans une moindre mesure dans les normes. [81].

En général, on observe une perte progressive des propriétés mécaniques avec le pourcentage de granulats recyclés [82]. Le Tableau II.4 comme proposé par Marinković [71], résume ces caractéristiques.

**Tableau II.4 Propriétés de bétons de granulats recyclés. [71]**

Propriétés	Effet de l'ajout de granulats recyclés
<b>Résistance à la compression</b>	Réduction jusqu'à le 25%
<b>Résistance à la traction par fendage</b>	Réduction jusqu'à le 10%
<b>Module dynamique</b>	Réduction jusqu'à le 45%

La variation des propriétés dépend de plusieurs paramètres, tels que le pourcentage de substitution [83] et la teneur en eau des granulats [83], [84].

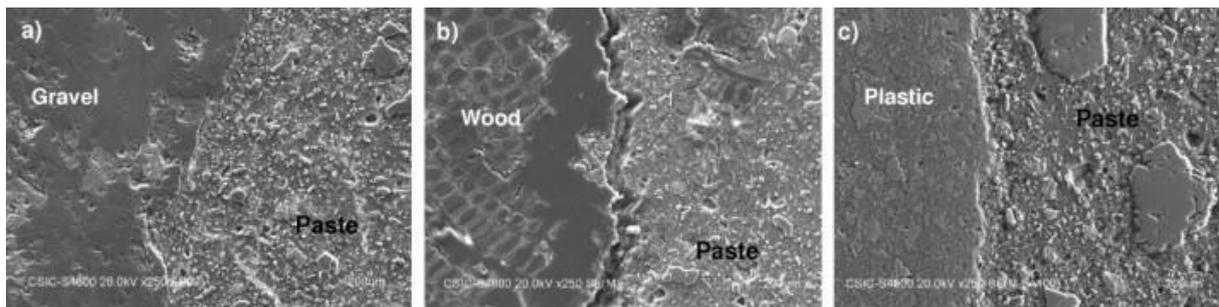
**II-6-5-2-1 Résistance à la compression :**

La résistance à la compression est un des paramètres les plus importants pour définir la qualité du béton. Dans le cas du béton de granulats recyclés, la résistance à la compression dépend fortement de la résistance à la compression du béton d'origine qui compose les

granulats recyclés [85]. Quand on ajoute des granulats recyclés, on a en général une réduction de la résistance à la compression par rapport au béton de référence. L'ampleur de cette réduction diffère selon plusieurs paramètres [86] :

Un faible dosage de granulats recyclés (jusqu'à 30 %) génère une perte marginale (inférieure à 5% de la résistance initiale) de résistance à la compression. Par contre, à partir de 50% de substitution, la perte de résistance est de l'ordre de 30% par rapport au béton de référence, mais des études de Kou et al. [87], et Alexandridou et al. [88] ont montré que cette perte peut être supérieure si le taux de substitution arrive à 100%.

La qualité des granulats et la présence des impuretés peuvent réduire ultérieurement la résistance à la compression. Comme présenté par Medina [87], si les granulats recyclés contiennent des « matériaux flottants » comme du verre ou du bois, l'ITZ entre ces matériaux et la pâte cimentaire est moins résistante Figure II.10.



**Figure II.10 ITZ des "matériaux flottants"[87].**

En général [88], les granulats recyclés sont caractérisés par une plus faible résistance à la compression par rapport aux granulats naturels (environ 50MPa), mais ils peuvent être utilisés pour améliorer la résistance à la compression des bétons de faible résistance. Padimni [89] a montré qu'il y a une relation entre la résistance à la compression du béton d'origine (le béton pare) et certaines propriétés des granulats.

L'état de saturation des granulats avant la formulation des bétons : en général on remarque que les granulats recyclés ont un coefficient d'absorption plus élevé que celui des granulats naturels [90], [91] (5-10% pour les granulats recyclés contre 1-2% pour les granulats naturels). A cause de cette caractéristique, une attention particulière est à apporter lors du malaxage, étant donné qu'il devient difficile de bien estimer l'eau efficace à ajouter. Une mauvaise estimation de l'eau efficace pourrait modifier l'affaissement et la résistance en compression du béton [88]. Les valeurs élevées du coefficient d'absorption sont liées à la

forte porosité de ce type de granulat [91] du fait de la forte proportion de pâte cimentaire attachée aux granulats ainsi que les fissurations des granulats qui sont liées à leur concassage. Un pré saturation de 24 heures des granulats recyclés avant le malaxage réduirait la résistance finale du béton. Pendant la phase de vibration du béton, l'eau migre et génère la création de zones dans laquelle le rapport E/C serait plus élevé. Cette variation de rapport E/C entrainerait des zones à faible résistance [84].

Cependant, à long terme, la résistance à la compression peut subir une amélioration suite à l'hydratation de l'ancienne pâte cimentaire qui continue dans le temps et augmente la force d'adhérence, apportant une amélioration de la microstructure de l'ITZ [92].

La taille des granulats recyclés utilisés joue un rôle important sur la résistance à la compression. L'ajout de granulats fins à un béton ordinaire peut entrainer une chute de la résistance à la compression entre 15% et le 30%, selon que les granulats fins sont de briques concassées ou du béton concassé. [92]

Cependant, les études d'Evangelista et al. [93] ont montré Figure II.10 que l'ajout de différents pourcentages (entre 10% et 100% de taux de substitution) de granulats recyclés fins a un faible impact sur la résistance à la compression à 28 jours d'un béton à hautes performances de résistance à la compression de 59.4 MPa, à cause de la présence d'une quantité supplémentaire de ciment dans ces granulats [84]. Les granulats fins contiennent des produits non hydratés qui réagissent et amènent à une résistance à la compression plus élevée (avec un gain compris entre 2.7 et 4.7% par rapport à la résistance du béton de référence) que le béton de granulats naturels après 28 jours.

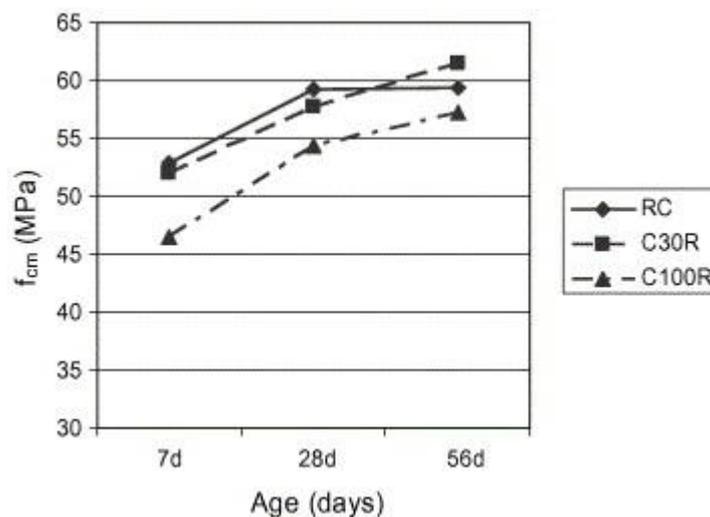


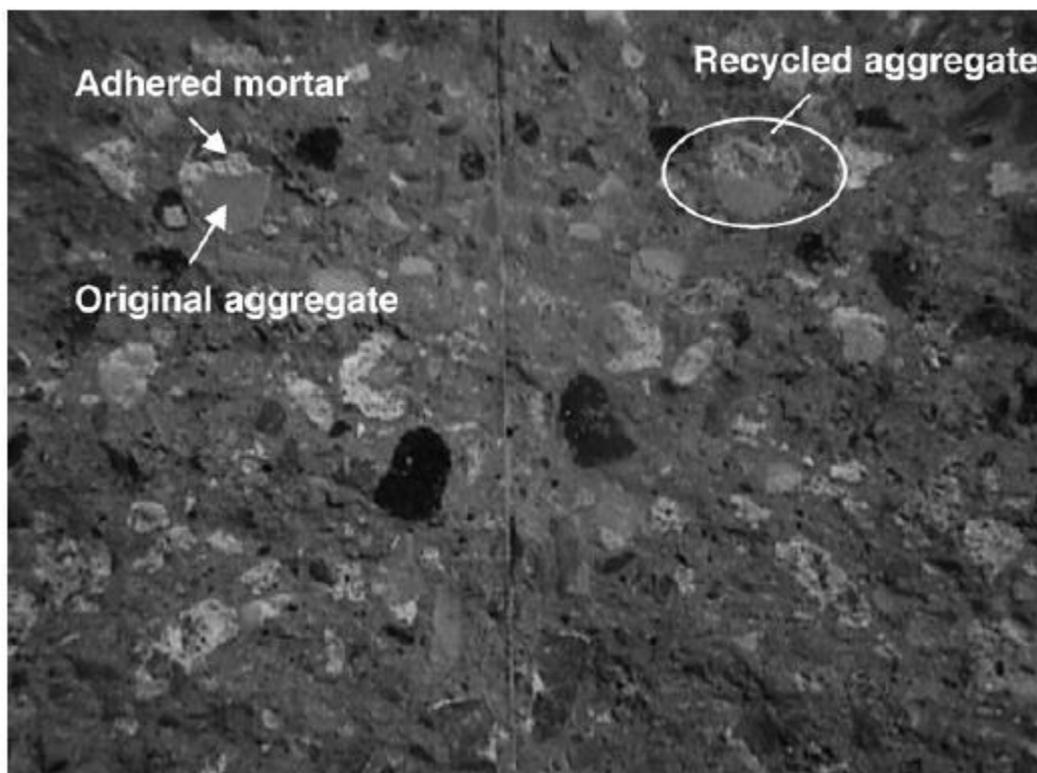
Figure II.11 Évolution de résistance en compression dans le temps de bétons avec granulats recyclés. [93]

**II-6-5-2-2 Résistance à la traction par fendage :**

Dans la littérature concernant l'effet de granulats recyclés sur la résistance à la traction par fendage, on trouve des résultats divergents.

En général, une diminution de la résistance à la traction est observée avec le pourcentage de substitution [94]. Les travaux de Ghorbel et al. Dans le cadre du PN Recybéton [74] montrent que l'ajout de granulats recyclés cause une perte de résistance à la traction. Cette diminution devient significative si le taux de substitution est supérieure à 33%, jusqu'à atteindre une perte entre 15 et 20% avec une substitution totale de granulats naturels par des granulats recyclés issus du concassage de béton [95]. Cette diminution est justifiée par Omary et al. [91] par la porosité « ouverte » qui caractérise ces granulats.

Les travaux d'Etxebeitra et al. [96] montrent que dans le mécanisme de rupture, lors des essais de fendage, le plan de rupture passe par le granulat recyclé Figure II.12. Les auteurs expliquent ce phénomène par la faible résistance du mortier attaché au granulat recyclé qui devient le maillon faible de la structure du béton.



**Figure II.12 Mécanisme de rupture du béton recyclé lors d'essai de fendage pour la détermination de la résistance à la traction. [96]**

Les fissures se développent dans les zones de faiblesse du béton, notamment sur l'interface pâte-granulat. Lorsque les granulats recyclés sont introduits dans la formulation, les surfaces de faiblesse augmentent fortement, vu que les bétons recyclés sont caractérisés par une double ITZ [89].

Quand les granulats recyclés comprennent des granulats fins, la résistance à la traction chute fortement avec le pourcentage de substitution, à cause de la grande porosité des granulats fins [93].

Toutefois, la résistance à la traction des bétons recyclés peut être supérieure à celle du béton de référence, ou très proche. Les travaux de Silva et al. [97] et d'Etcheberry et al. [96] montrent que les bétons de granulats recyclés, même avec des taux de substitution de plus de 30%, ont, après une année, une résistance à la traction supérieure ou très proche de celle du béton de référence. Silva et al. [97] expliquent ce phénomène par la porosité superficielle des granulats recyclés et sa capacité à se remplir de nouvelle pâte cimentaire, en produisant une augmentation des performances, surtout au niveau de l'ITZ.

#### **II-6-5-2-3 Module d'élasticité**

Comme les autres propriétés mécaniques, le module d'élasticité du béton diminue lorsque l'on substitue les granulats naturels par des granulats recyclés [94]. Les études de Rao et al. [95] sur des bétons contenant 100% de granulats recyclés montrent une baisse du module d'élasticité comprise entre 30 et 50%. La plus grande baisse est obtenue pour le béton avec un rapport E/C plus élevé (égal à 0.55).

De plus, les études d'Omary et al. [91] montrent une baisse du module d'élasticité entre 15% et 26% lorsque le taux de substitution varie de 30% à 100%. Cette diminution peut être due au fait que les granulats recyclés sont constitués partiellement de l'ancienne pâte qui a un module d'élasticité plus petit que celui des granulats [78].

Un comportement similaire est observé pour le module dynamique du béton recyclé [98], [99]. La perte de module dynamique est entre 12 et 26% [100]. La vitesse d'onde augmente avec le pourcentage de substitution, en causant une conséquente diminution du module dynamique [101].

**II-6-5-3 Les propriétés physiques :**

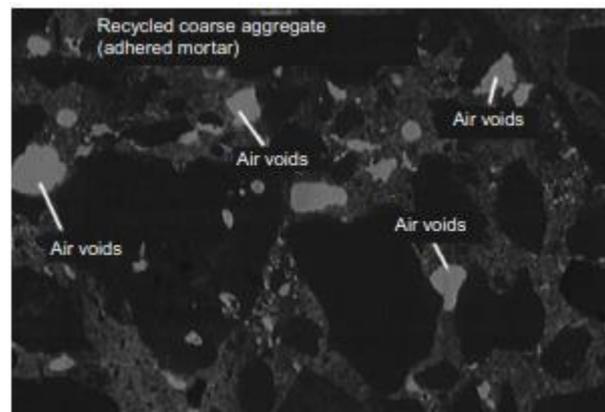
Le béton est un matériau polyphasique : phase solide, phase liquide et phase gazeuse. En particulier, dans la phase solide, on trouve les granulats, les hydrates et des parties de liant non hydraté.

**II-6-5-3-1 La porosité :**

La porosité est un facteur très important qui conduit à une première évaluation de la qualité du béton [85]. Le volume et la taille des pores influent sur les capacités de transfert au sein du béton [92].

En général, la porosité d'un béton ordinaire à 28 jours est de l'ordre de 15%, et pour un béton à hautes performances elle est de l'ordre de 10-12%. Elle se réduit à 7-9% pour un béton à très hautes performances [102].

La porosité dépend fortement des granulats utilisés dans la formulation. Dans le cas spécifique des granulats recyclés, elle est plus élevée : entre 13% et 15% avec un pourcentage de substitution de 30% de sable et gravillons de béton recyclé, mais on peut atteindre une porosité de 21% dans le cas de remplacement total de sable par du sable recyclé [74]. Ces valeurs élevées de porosité semblent être liées à la présence d'une quantité supérieure de pâte cimentaire dans les granulats de béton recyclé, en provoquant une teneur en air plus importante donc à une masse volumique réelle plus faible. Selon Etxebeitra et al. [78], la cause principale de cette différence de porosité entre les granulats naturels et les granulats recyclés est la présence de l'ancienne pâte cimentaire qui est caractérisée par une forte teneur en air, comme l'illustre l'image au microscope Figure II.13



**Figure II.13 Ancien mortier présent dans les granulats recyclés, les taches blanches représentent l'air contenu dans le mortier attaché. [78]**

La porosité est liée au taux de substitution : plus la proportion de granulats recyclés est importante, plus la porosité augmente. Par exemple, Gómez-Soberón [103] trouve que la porosité augmente avec le pourcentage de substitution, avec une valeur maximale lorsque le taux de substitution est de 100%.

### **II-6-5-3-2 La Granulométrie et le module de finesse :**

En général, les granulats recyclés se caractérisent par un fuseau granulaire homogène et continu, mais les sables recyclés sont sensiblement plus grossiers que les sables naturels utilisés dans les bétons ordinaires [104]

Un autre aspect important de la granulométrie est la teneur en fines. Les fines présentes dans les granulats recyclés sont essentiellement constituées de ciment ancien et peuvent influencer aussi bien les caractéristiques des bétons frais (demande en eau, maniabilité, délais de la prise), que celles des bétons durcis (adhérence nouvelle pâte de ciment- granulats)

La propreté des sables caractérise la teneur en fines argileuses dans le pourcentage global en fines, car les fines argileuses peuvent rendre la mise en place du béton plus difficile et peuvent altérer l'adhérence des grains à la pâte de ciment.

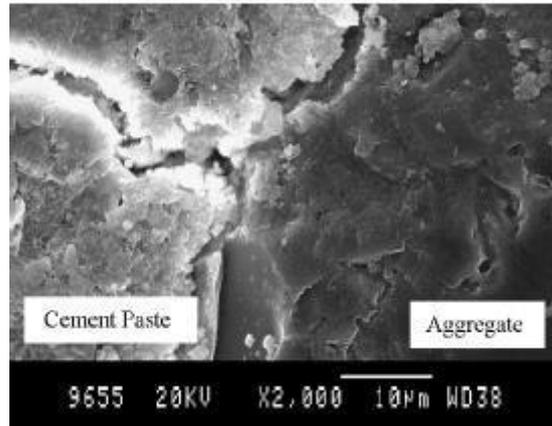
### **II-6-5-3-3 L'absorption d'eau par les granulats recyclés :**

Deux effets principaux de l'absorption d'eau par les granulats recyclés peuvent être considérés

- ❖ sur la plasticité et l'ouvrabilité du béton frais ;
- ❖ sur la formation du réseau poreux du béton et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci ;

Lors de la fabrication des granulats recyclés le concassage a deux effets :

- ❖ En créant des fissures, le concassage contribue à une augmentation de l'absorption d'eau ;
- ❖ Les fissures dans la partie hydratée du ciment primaire est responsable de la forte absorption d'eau [105]. figure II.14



**Figure II.14 Interface granulats naturel / pâte de ciment d'un granulats recyclés de béton**  
[90]

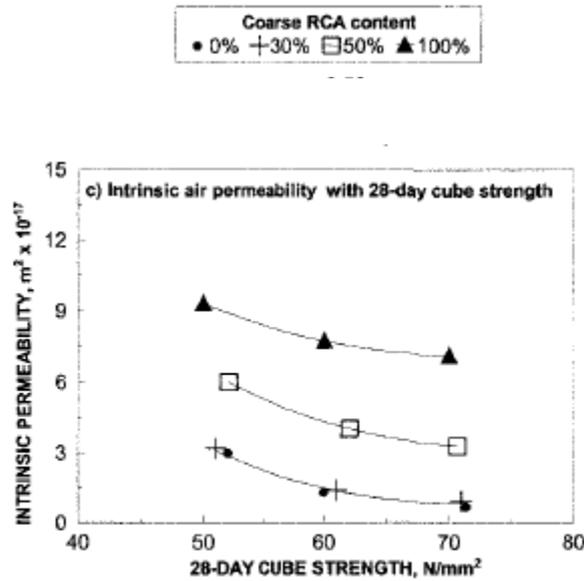
#### **II-6-5-3-4 La perméabilité à l'eau du béton recyclé :**

Augmente à en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Les bétons recyclés à base de granulats de brique concassés sont un peu plus perméables que les autres bétons recyclés. Ils présentent une préparation à l'eau qui peut atteindre le double de celle du béton de référence. La perméabilité à l'eau des bétons recyclés est fort influencée par la nature et le pourcentage des granulats recyclés.

##### **II-6-5-3-4-1 Perméabilité au gaz :**

La perméabilité d'un matériau est définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Elle est liée à la partie connectée de la porosité [107] [108].

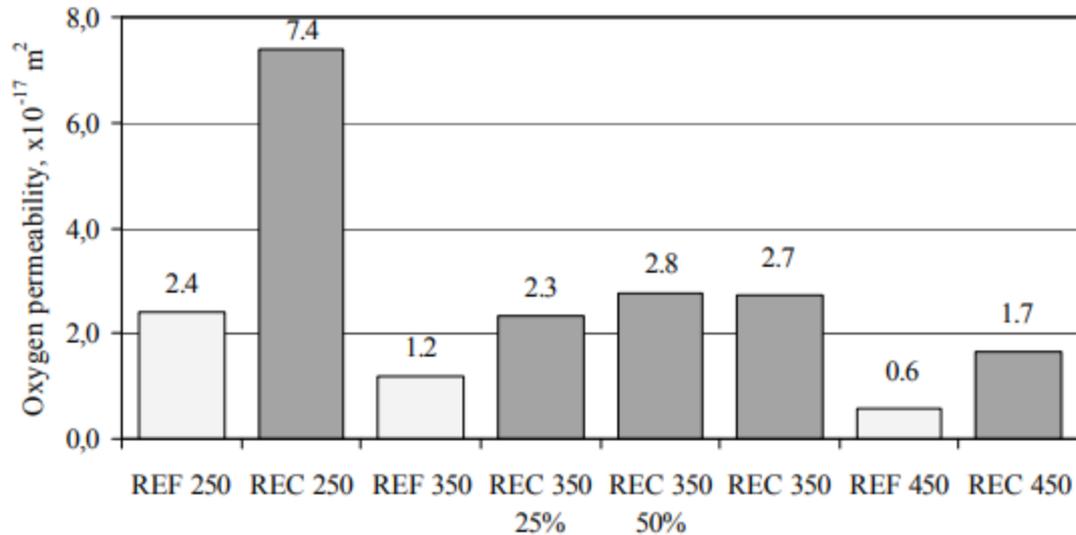
En général, on peut dire que la perméabilité dépend de la porosité du matériau, ainsi que de la connectivité des pores, l'éventuelle présence de fissures et la teneur en eau de bétons. Etant donné que les granulats recyclés sont très poreux et présentent souvent de fissures suite au processus de concassage, on peut déduire que leur ajout affecte la perméabilité du matériau. Nombreuses études [74], [109] – [110] ont montré que l'effet provoqué par l'ajout de granulats recyclés est celui d'augmenter la perméabilité Figure II.15.



**Figure II.15 Evolution de la perméabilité intrinsèque des bétons avec différents pourcentages de granulats recyclés. [111]**

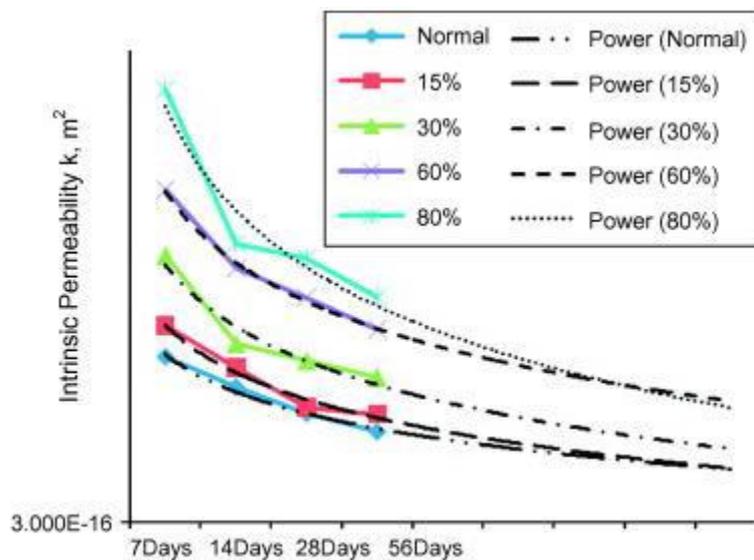
Les études de Limbachiya et al. [111] montrent clairement Figure II. 16 que la perméabilité intrinsèque des bétons augmente avec le taux de substitution des granulats. Elle peut arriver à être trois fois la perméabilité du béton de référence lorsque le taux de substitution est de 80%. Cette augmentation serait causée par une quantité de pâte cimentaire supplémentaire, sachant que les granulats recyclés sont partiellement constitués d'ancienne pâte cimentaire.

La différence entre béton naturel et béton recyclé se réduit pour de faibles rapports E/L [110] et lorsque la quantité de ciment est augmentée [109] Figure II.16. Dans le cas de béton fabriqué avec une teneur en ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$  (ou supérieure), une faible augmentation de la perméabilité au gaz est remarquable, même avec un taux de substitution de 100%. Ce comportement serait dû au fait que dans le cas d'une faible teneur en ciment, la matrice cimentaire résultante est plus poreuse et donc plus perméable, en amplifiant la grande porosité des granulats recyclés. Au contraire, en augmentant la quantité de ciment, la structure devient plus dense et de meilleure qualité, ce qui permettrait de réduire la perméabilité au gaz.



**Figure II.16 Perméabilité à l'oxygène des bétons avec différents pourcentages de granulats recyclés et différents dosages en ciment. [109]**

Enfin, un autre facteur qu'il faudrait prendre en compte lors de l'analyse de la perméabilité est l'âge auquel les éprouvettes sont testées. Kwan et al. [112] montrent que la perméabilité diminue avec le temps Figure II.17



**Figure II.17 Evolution de la perméabilité aux gaz dans le temps et avec différents pourcentages de granulats recyclés. [112]**

De plus, la différence entre bétons avec différents pourcentages de granulats recyclés se réduit avec l'âge du béton. Ce phénomène est expliqué par la poursuite dans le temps du processus d'hydratation du ciment. Dans le cas de faible E/C, la réaction d'hydratation amène à une auto- dessiccation de la pâte qui réduit les vides capillaires.

### **II-6-5-3-5 Le retrait :**

Les bétons recyclés présentent aussi un retrait élevé à jeune âge (2jours). A jeune âge, le risque de fissuration est élevé, car la résistance à la traction du béton est faible. Par conséquent, il est probablement préférable de limiter le pourcentage de substitution les granulats recyclés et en particulier les granulats fins. Le retrait du béton à base de gros granulats d'ancien béton concassé (BG/0) est plus grand de 30% que celui du béton témoin à 28 jours au-delà, il accélère pour arriver à une augmentation de 70% à 90 jours. Le retrait élevé est probablement dû à la porosité élevée des granulats recyclés, ainsi qu'au degré important d'absorption d'eau du mortier de l'ancien béton qui recouvre ces granulats. Au-delà, une augmentation brusque qui atteint les 80% à 90% jours est constatée. L'analyse de l'effet de l'utilisation de granulats recyclés contaminés par des sulfates, chlorures ou eaux de mer a montré que la nature de contamination n'a pas un effet sur la performance du béton, à l'exception de carbonatation. La perméabilité et le retrait sont aussi plus élevés par rapport au béton à base de granulats naturels. [68]

### **II-6-6 Les avantages de granulats recyclés :**

Le recyclage des granulats sur les chantiers routiers et la réutilisation des matériaux sur place dans les chantiers de démolition de bâtiments naturels permet : [113]

- ❖ Une économie de la ressource naturelle ;
- ❖ Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- ❖ Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- ❖ La réduction des quantités de matériaux mis en décharge .

### II-6-7 Sable recyclé :

Le sable est une ressource précieuse, mais à long terme, ce matériau essentiel à la construction de biens du quotidien viendra à manquer. Une entreprise de Veyre-Monton, dans le Puy-de-Dôme, a peut-être la solution. Grâce à un système de recyclage « Save Sand », du sable qui provient des déchets de chantiers du BTP peut être récupéré. « Chaque unité traitera des déblais issus de chantiers (ferrailles, argiles, plastiques, béton, bois...), d'excavations de routes, de curage ou de canaux. Outre le recyclage par filières, la technologie employée permettra de minimiser les besoins en eaux de lavage », peut-on lire dans un communiqué de la société. [114]

Le sable recyclé et artificiels, c'est un produit en concassé et recyclé des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons, ou en recyclant des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers ou d'autres déchets comme les briques et le verre. Après concassage, lavage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours

Le sable recyclé d'fonderie va devenir un produit industriel soumis comme d'autres à la loi de l'offre et de la demande ou la qualité du produit, son volume disponible va conditionner l'usage et les acheteurs potentiels (municipalités, acteurs du TP, ...). [115]

Les sables de fonderie peuvent être utilisés comme composant. Le compostage est la transformation, par décomposition de matières organiques (matières végétales) en un matériau de taupe humus appelés <<compost>>



**Figure II.18 sable recyclé [115]**

#### **II-6-7-1 Du sable en circuit court :**

Le sable récupéré est trié, lavé et réutilisé en matériaux de construction, comme l'explique Alexandre Guillaume, co-directeur de MS Société : « Aujourd'hui à partir d'un produit considéré commun déchet, on peut faire des sous-produits à très forte valeur ajoutée : le sable pour la construction et les argiles pour le ciment des carbonés de demain. On peut réellement associer protection de la planète et impact positif au niveau industriel ». D'ici peu, le système élaboré par cette société puydomoise sera installé sur des chantiers. Les entreprises pourront alors recycler leurs déblais et le réutiliser directement, comme un circuit court de ce matériau précieux et si recherché qu'est le sable. [116]

#### **II-6-7-2 Jusqu'à 30% du sable recyclé :**

Le secteur de la construction est responsable, à lui seul, de 50 % de l'exploitation mondiale des ressources non renouvelables. « On se retrouve avec un produit qui est surexploité, qui est pillé, qui est pris dans les rivières, dans les plages et qui engendre une problématique environnementale majeure. Commençons par nous servir dans le déblai et complétons avec l'utilisation de ressources naturelles dans les carrières et dans les sablières »,

suggère Alexandre Guillaume. Actuellement, seulement 10 % du sable est recyclé en France. L'objectif avec ce procédé est de passer à 30 % dans les prochaines années. [116]

### **II-6-7-3 Utilisation de sable recyclé dans le béton :**

L'utilisation des sables recyclés dans le béton est encore peu fréquente sur le plan industriel, et ce malgré les nombreuses recherches menées sur ce sujet. Dans un premier temps, des différents pays du nord-ouest de l'Europe en vue de favoriser le recyclage et la valorisation des sables et granulats recyclés issus des déchets de construction et de démolition. Ces pays disposent d'un cadre législatif et réglementaire développé leur permettant d'atteindre l'objectif fixé par la Directive Européenne 2008/98/CE visant à recycler et valoriser au moins 70% des déchets non dangereux de construction et de démolition en 2020. Le cadre normatif, en lien avec la production et l'utilisation de sables et granulats recyclés dans le béton. Les principales normes européennes concernées sont : EN 206/2013+A1/2016 (béton), EN 12620/2013 (granulat pour préfabriqués en bétons) et EN 12620/2013 (granulats pour béton). Ces normes ont été, selon les cas, complétées ou non par des annexes nationales. [118]

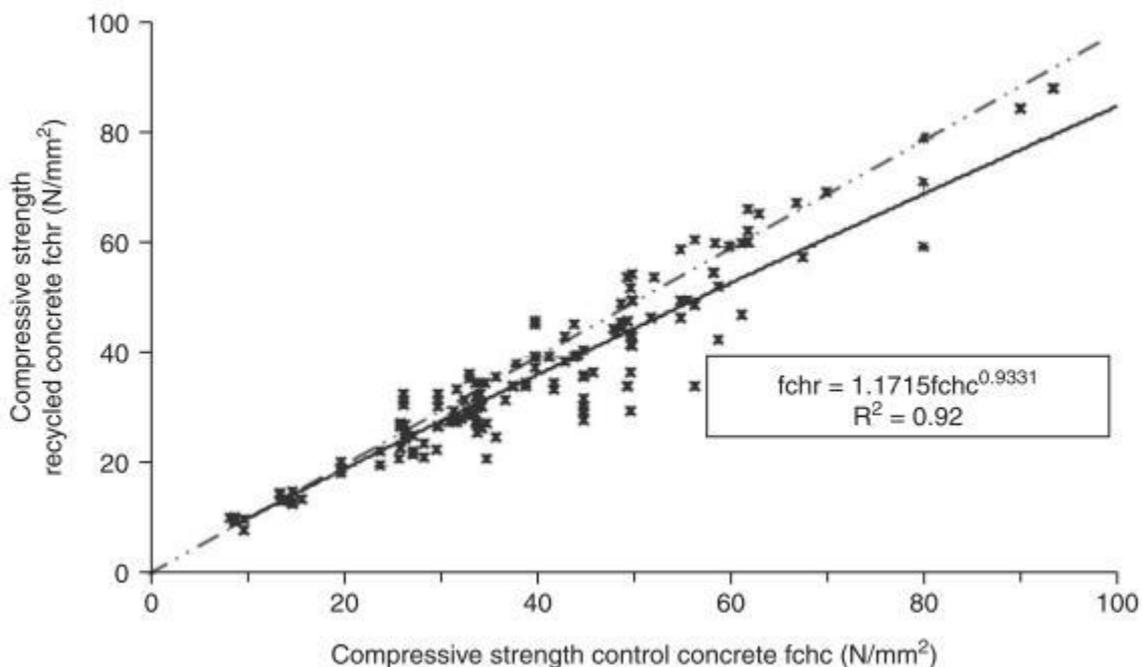
### **II-6-7-4 Le sable, un produit normalisé et à forte granulométrie :**

Contrairement à un déchet que l'on vend et où les filières de reprise sont déjà existantes, le sable recyclé devient un produit qui va devoir être normalisé et vendu selon la loi de l'offre et la demande, avec la particularité d'avoir en concerne du sable neuf à faible cout, déjà normalisé.

De plus, il va falloir que la filière mise en place respecte les impératifs de chaque partie prenante qui sont parfois antagonistes. Ainsi les fondeurs produisent du sable avec une granulométrie resserré et une production régulière de faible tonnage alors que les fabricants de route ont besoin d'un sable avec une large granulométrie (sous peine de devoir utiliser des liants couteux pour les stabiliser comme des goudrons ou ciments) en fort tonnage. La fonderie hexagonale ne produit par exemple que de l'ordre de 0.1% de la quantité de sable. [117]

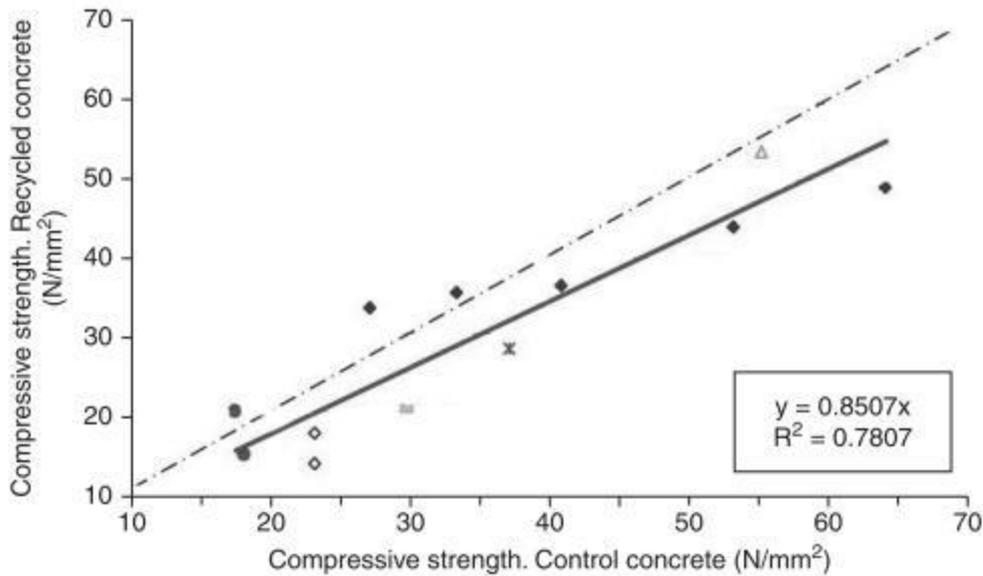
## II-6-7-5 Le contenu des granulats fins recyclés :

Le contenu des granulats fins recyclés (GFR) a une influence sur les propriétés des bétons aux GR non seulement quantitative, mais aussi qualitative. Une étude effectuée en 2004 par Sánchez Juan et Alaejos [119] qui rapporte une synthèse des recherches sur les bétons aux GR démontre que les bétons aux gros granulats recyclés (GGR) ont une résistance plus élevée que les bétons aux GR (GGR+GFR). La perte de résistance à la compression est d'environ 4 fois plus importante pour un béton aux GR qu'un béton à GGR ayant une résistance jusqu'à 30 MPa. Les figures II.19 et 8 mettent en évidence cet effet. [119]



**Figure II.19 Influence des GGR sur la résistance à la compression des bétons à GGR (taux des GR : 100%) [119]**

On observe que pour un béton aux GGR de 25 MPa la perte de résistance est de 5,5%. Pour un béton aux GR de 25 MPa, la perte de résistance est de 15%. La quantité de granulats fins est de 60%. Le calcul démontre que la perte de résistance due à la fraction du granulats fins est 3 fois plus importante. Du point de vue granulométrique, le contenu du sable de bonne qualité (non argileux) améliore la maniabilité et la cohésion du béton frais et donne une meilleure imperméabilité et durabilité au béton durci. En outre, cela peut permettre de diminuer la demande en eau et la teneur en ciment.



**Figure II.20 Influence des GR sur la résistance à la compression des bétons aux GR.  
(taux des GR = 100%) [119]**

Plusieurs normes Figure II.21 limitent la teneur en GFR, car ils peuvent réduire la résistance à la compression du béton [120]. La plupart des règlements ne permettent pas l'utilisation des GFR dans les bétons aux GR. Toutefois, dans certaines normes, le sable recyclé est permis figure.21. Le remplacement du sable naturel par une quantité minimale de GFR peut améliorer ou laisser les propriétés du béton recyclé invariables [81]. Selon Corinaldesi et Moriconi [121], un maximum de 30% de remplacement de sable naturel par le sable recyclé n'affecte pas significativement les propriétés mécaniques. La raison de cette conclusion est que la quantité de ciment, hydraté ou non hydraté, ne peut pas dépasser 25% du mélange.

Par conséquent, les normes et les recommandations limitent ou déconseillent l'utilisation des GGR en combinaison avec les GFR pour la fabrication du béton aux GR.

#### II-6-8 Le gravier recyclé :

Les graves recyclées sont issues de la déconstruction de bâtiment, d'ouvrage d'art ou de couches de chaussée. Les matériaux « qualifiés de mélangés » peuvent contenir des impuretés (métaux, plâtres, bois, plastiques, terres...) qui sont, idéalement triés en amont, ou lors du recyclage.

Les graves recyclées sont utilisées avantageusement en remblais ou assises de chaussées. Les graves recyclées ont pour intérêts. [122]

- ❖ de donner de la valeur à un produit qui serait envoyé en ISDI ;
- ❖ d'éviter de prélever dans l'environnement une nouvelle ressource ;
- ❖ de réduire les transports, ainsi que les impacts et les coûts associés.



**Figure II.21 gravier recyclé [115]**

### **II-6-8-1 Utilisation :**

Les graviers recyclés à l'état sec semblent donner des meilleures résistances en compression que s'ils étaient prémouillés ou saturés d'eau. Cette dernière option compromet les résistances si les mélanges sont à forts taux en recyclés et la résistance visée n'est pas atteinte la première se distingue par une franche désignation de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec comme meilleure pour la résistance avec une limite du taux à 40%, la seconde pour des taux supérieurs à 40% la supériorité de l'utilisation des graviers recyclés à l'état sec n'est pas mise en évidence de manière claire. Pour cette teneur et moins en graviers recyclés à l'état sec, l'excès d'eau de gâchage est absorbé par les granulats recyclés et les mélanges obtenus sont à tendance ferme en maniabilité et par conséquent une bonne

résistance. Cette dernière tend à chuter et plusieurs paramètres se conjuguent : forte présence de granulats recyclés de caractéristiques physiques et mécaniques moindres, chute de maniabilité pour les uns (granulats sec) et une quantité d'eau en excès pour les autres (granulats prémouillés et saturés). [123]

### **II-7 Les bétons de granulats recyclés**

Le sable et les gravillons peuvent provenir de déchets de béton et se substituer aux matériaux d'origine naturelle. Actuellement le secteur de la construction consomme une grande quantité de matériaux, tels quels les roches, les graviers et les sables naturels. Cependant ces ressources ne sont pas illimitées et peut créer des situations critiques localement [124]. En effet l'ouverture ou l'extension de carrières à proximité des villes est limitée compte tenu des contraintes environnementales. En même temps une grande quantité de matériaux de démolition est envoyée en décharge ou utilisée en voierie. De plus en plus les granulats recyclés rentrent dans la composition du béton. Aujourd'hui, 98% des granulats recyclés sont ainsi commercialisés sous forme de sous-couches routières, contre 2% dans la composition de bétons. Ce faible chiffre s'explique entre autres par des normes béton encore très restrictives.

La norme NF EN 206/CN [124] précise, pour chaque type de granulat recyclés (type 1, type2, type3), le taux de substitution de granulats naturels maximum autorisé (%) en fonction de la classe d'exposition à laquelle est soumis le béton.

Le Tableau II.5 présente le pourcentage de granulats recyclés autorisés selon les classes d'exposition.

Le Tableau II.6 précise les pourcentages de substitution autorisés selon l'origine du matériau recyclé et de la classe du béton envisagé.

**Tableau II.5 Pourcentage admis dans la norme pour la substitution des granulats recyclés. [124]**

Type de granulat recyclé (selon les matériaux qui les constituent)	Casse d'exposition selon la norme NF EN 206/CN			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XCF1, XD1, XS1	Toutes les autres classes
<b>Gravillon recyclé type1(%)</b>	60	30	20	0
<b>Gravillon recyclé type 2 (%)</b>	40	15	20	0
<b>Gravillon recyclé type 3(%)</b>	30	5	0	0
<b>Sable recyclé (%)</b>	30	0	0	0

**Tableau II.6 Pourcentage de substitution admis selon l'origine de matériaux recyclé et la classe du béton. [124]**

Origine de matériau recyclé	Classe du béton (en fonction de la résistance en compression)	Pourcentage admis
<b>démolition des bâtiments</b>	=C8/10	Jusqu'à 100%
<b>Béton armé (avec un pourcentage de béton <math>\geq 90\%</math>)</b>	$\leq C20/25$	Jusqu'à 60%
	$\leq C30/37$	$\leq 30\%$
	$\leq C45/55$	$\leq 20\%$
	Classe inférieure à celle du béton d'origine	Jusqu'à 15%
<b>Réutilisation de béton employé dans les établissements de préfabrication certifiée</b>	Même classe que celle du béton d'origine	Jusqu'à 10%

### II-7-1 Fabrication du béton recyclé :

Il existe plusieurs difficultés liées à l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans l'industrie du Béton Prêt à l'Emploi (BPE), parmi lesquelles la nécessité d'avoir un ou des silos supplémentaires.

Leur implantation n'est cependant pas toujours facile pour les centrales situées en milieu urbain, là où les GBR sont principalement disponibles. Un autre problème délicat est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la rhéologie du béton frais. Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR génère des difficultés pour un dosage précis de l'eau efficace de la formule. De même, l'eau absorbée par les GBR, entre la fin du malaxage et le coulage sur chantier, peut faire évoluer la consistance du béton durant le transport.

L'utilisation dans de nouveaux bétons des granulats issus de la déconstruction d'anciens bétons n'est pas récente. Le premier État de l'Art sur le sujet, publié par la RILEM, remonte à Nixon [125]. La première utilisation à grande échelle de matériaux provenant de la démolition des bâtiments, en tant que granulats dans le béton frais, date de la Seconde Guerre mondiale. Durant et après la guerre, les décombres issus des bombardements, surtout aériens,

ont été utilisées dans les bétons de la reconstruction des villes [126]. Aujourd’hui, dans de nombreux pays, les bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR) ont dépassé le stade de la recherche et sont devenus une réalité concrète. [127]

Une installation de génération moderne de production de granulats recyclés dont le schéma de fonctionnement est présenté dans la figure II.23 comprend des dispositifs qui procèdent au retrait de certaines de ses impuretés :

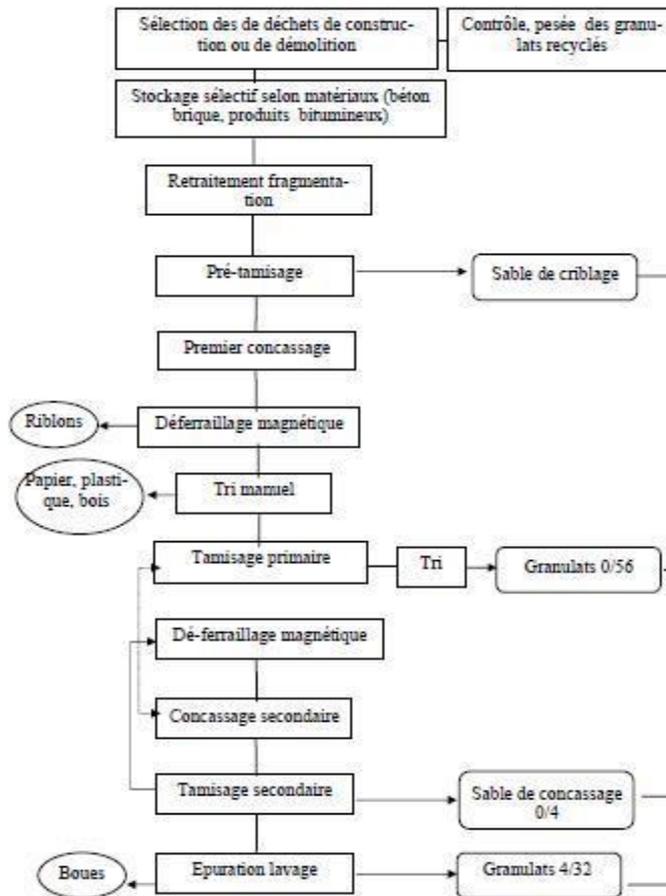


Figure II.22 Représentation schématique de la production des granulats recyclés. [127]

**II-7-2 Spécificité des bétons de granulats recyclés :**

La norme NF EN 206/CN [128] autorise l’utilisation de granulats recyclés issus de la déconstruction pour la formulation des bétons en précisant les conditions et les limites d’utilisation (article NA.5.1.3 Granulats).

Les granulats recyclés doivent être obtenus par traitement de matériaux minéraux auparavant utilisés en construction et être conformes aux normes relatives aux granulats (NF EN 12620+A1 et NF P 18-545). [128]

La norme définit 3 types de granulats recyclés à partir de leurs caractéristiques et précise pour chaque type de granulat recyclé le taux de substitution de granulats naturels maximum autorisé en fonction de la classe d'exposition à laquelle est soumise la partie d'ouvrage en béton. Les granulats recyclés ne sont pas autorisés pour les bétons précontraints.

Le Projet National RECYBETON a permis d'améliorer l'expertise et la connaissance sur l'utilisation des granulats recyclés pour la formulation des bétons.

Il a abouti à la rédaction de recommandations qui permettent d'augmenter significativement le taux d'incorporation des granulats recyclés dans les bétons, dans une logique de préservation des gisements naturels de granulats. Ces recommandations seront intégrées dans les textes normatifs lors de leur prochaine révision.

Le patrimoine d'ouvrages constitue donc un gisement potentiel important de granulats qui sera exploitable au gré des déconstructions, pour construire notre avenir.

### **II-7-3 L'utilisation de granulats recyclés dans les bâtiments et les travaux publics :**

Les bâtiments et les travaux publics ont besoin chaque année d'environ 440 millions de tonnes de granulats et de matériaux assimilés.

Les matériaux inertes issus de la déconstruction de bâtiments, routes et ouvrage d'art représentent un volume de 247 millions de tonnes. Ils sont valorisés de trois manières :

- ❖ 50Mt constituent un rapport de matière inerte nécessaire aux réaménagements ;
- ❖ Pour 114Mt, ils sont réemployés directement sur chantiers. Ils sont traités concassage, criblage, contrôle de la qualité et de la conformité aux normes. Ces granulats recyclés alimentent les chantiers routiers locaux ;
- ❖ 90Mt sont orientées vers les installations de stockage de déchets inertes. [129]

### **II-7-4 Ecaillage de bétons recyclés :**

La réponse thermique du béton dépend de plusieurs facteurs et aussi du type de béton : différents comportements peuvent être observés selon le type de béton, qu'il soit du béton ordinaire ou à hautes performances.

Pour ce qui concerne le béton avec granulats recyclés, le peu d'études menées montrent en général une bonne réponse thermique de ce matériau. Les premières études conduites par Xiao et Zhang. [130] sur les bétons avec différents pourcentages (notamment 30, 50, 70 et 100%) de granulats recyclés chauffés en suivant la courbe ISO-834 jusqu'à 800°C n'ont pas montré d'écaillage sur tous les bétons testés. D'après Saharat et al. [131], les bétons de granulats naturels (étant donné qu'ils contenaient un grand taux de quartzite) ont tous éclaté, contrairement aux bétons de granulats recyclés qui n'ont pas écaillé même s'ils ont présenté des fissures. Aucun écaillage n'a été remarqué par Laneyrie [132] pour les bétons de granulats recyclés, quelle que soit la forme des éprouvettes. Les bétons étudiés ont été chauffés à une vitesse « lente » de 0.5°C/min afin d'éviter le risque d'écaillage et pouvoir étudier les propriétés mécaniques résiduelles après chauffage. Les échantillons cylindriques de différentes dimensions n'ont pas écaillé même à un cycle de chauffage-refroidissement de 750°C. Cependant, sur des tranches de cylindre, une forte fissuration a été remarquée.

Dans le cas de béton à hautes performances incorporant des granulats recyclés, on remarque une faible sensibilité à l'écaillage par rapport aux bétons constitués seulement de granulats naturels [133]. Ce comportement semble être causé par la forte porosité des granulats recyclés qui permettent à l'eau de s'échapper plus facilement. A une forte vitesse de chauffage (i.e. 10°C/min), les bétons de granulats recyclés écaillent moins par rapport aux bétons de granulats naturels Figure II.24. A cet effet, les auteurs ont conclu que le risque d'écaillage diminue avec une augmentation du pourcentage de substitution des granulats recyclés

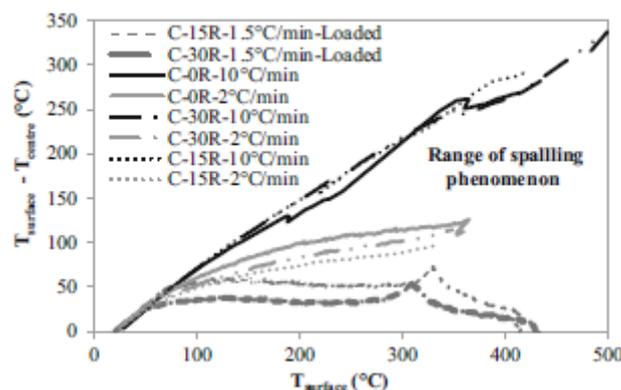


Figure II.23 Sensibilité à l'écaillage de bétons à hautes performances avec granulats naturels et recyclés. [133]

### II-8 Conclusion :

L'enjeu de cette étude n'est donc pas de subvenir à un manque actuel de granulats naturels mais plutôt de contribuer à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles pour l'avenir, point fort du Grenelle de l'environnement.

La valorisation de ces granulats issus du recyclage présente un intérêt d'ordre économique, technique et environnemental. Le réemploi de ces matériaux dans la fabrication des bétons contribuerait à la prolongation de la durée de vie des carrières existantes et au même temps à l'élimination des déchets dans les décharges.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci permet de résoudre dans l'avenir le manque de granulats naturels.

Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés de ces déchets (granulats recyclés) destinés pour bétons ou mortiers en fonction de leur origine, ce qui facilitera leur valorisation.

**CHAPITRE III**  
**PROTOCOLE**  
**EXPERIMENTAL**

### **III.1 Introduction :**

Nous présentons dans ce troisième chapitre, qui est partagé en deux parties, les caractéristiques des matériaux utilisés et les compositions des bétons testés. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons investigué l'impact du facteur granulats recyclés et additions minérales sur le comportement des bétons à hautes performances recyclés de formulations semblables. Ainsi, nous avons porté notre choix sur un sable naturel, deux sables obtenus par le concassage de deux types des BHP (à base de laitier, et de fumée de silice) et quatre types de gravillons de nature différentes dont un type granulats (sable, gravier) naturels et les trois autres types sont des granulats recyclés (laitier, fumée de silice SIKA et GRANITEX).

Avant de mener l'étude expérimentale, il est indispensable de caractériser et d'identifier avec rigueur tous les constituants entrant dans la formulation des BHP et BHPR d'études. Dans la première partie de ce chapitre en détail la campagne d'essais menée pour caractériser ces matériaux, à travers leurs propriétés granulométrique, mécaniques (résistance en fragmentation), physiques (masse volumique, et absorption d'eau). Les résultats de caractérisations obtenus et les analyses comparatives des différents granulats seront présentés. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous présenterons les méthodes de formulation utilisées, la procédure expérimentale de préparation et de conservation des différentes éprouvettes. Les résultats de l'influence de la nature des granulats et des additions minérales sur les propriétés des BHPR à l'état frais et à l'état durci sont discutés dans le chapitre IV.

### **III-2 Matériels, matériaux et méthodes :**

Il est bien connu que le béton est un matériau composite, ses propriétés à l'état frais (ouvrabilité) et à l'état durci (résistance) dépendent de la nature, la qualité et le dosage de ses composants, c'est pour cela qu'il est nécessaire de bien le caractériser.

Afin de formuler un béton qui doit répondre aux exigences demandées, il est préférable que ces constituants soient convenables aux normes.

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont des matériaux locaux. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux qui sont :

### III-2-1 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland au calcaire de la marque **BISKRIA** de type **NA 442-CEM I 42.5R Conforme à la norme 442** de la cimenterie de **BISKRIA CIMENT**. Voir la fiche technique en annexe.



Figure III.1 ciment utilisé de type CEM I 42.5R BISKRIA

### III-2-2 Les Granulats (NF P 18-541)

Les granulats à utiliser dans la fabrication du béton doivent permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Il faut en conséquence utiliser des granulats de toutes tailles pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros.

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats  $D_{max}$  ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage.

Les granulats utilisés dans la fabrication du béton doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

**III-2-2-1 gravier et sable naturel :**

Les graviers utilisés dans la confection des bétons sont de classes (3/8) et (8/15) proviennent de la carrière de « **Ben Brahim** » sise à **RECHAÏGA** située dans la région Sud de Tiaret. Tandis que le sable de classe (0/4) d'origine calcaire de la rivière « **GUETTET SIDI SAÁD** ».

**III-2-2-2 sable et gravier recyclé :**

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 50% ,100 % pour le gravier et 30% pour le sable.

L'élaboration des granulats recyclés est passée par plusieurs étapes : fragmentation des blocs du béton de démolition (éprouvettes cylindriques et prismatiques de béton déjà comprimés) et à l'aide d'un marteau, on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées. Et par concassage on a austénite des granulats recyclé (gravier et sable) ensuite on procédé à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires 3/8 et 8/15 et sable recyclé (0/4).



**Figure III.2 Concasseur, préparation des granulats recyclés**



a) Sable recyclé   b) Gravier recyclé (8/15)   c) Gravier recyclé (3/8)



d) Gravier naturel (8/15)   e) Gravier naturel (3/8)   f) Sable naturel

**Figure III. 3 Les granulats utilisés**

### III-2-3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, l'évolution des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion. Les eaux naturelles conviennent comme eaux de gâchage du béton, à moins qu'elles contiennent des substances qui gênent le durcissement comme certaines eaux usées ou des eaux marécageuses, en cas de doute, une analyse chimique s'impose.

En effet, l'eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton. L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable de robinet.

### III-3 Les différents essais effectués :

#### III.3.1 Les analyses mécaniques :

##### III-3-1-1 Essai Los Angeles (NF P186573)

L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Cet essai permet de savoir la dureté d'un matériau en calculant un coefficient Los Angeles, et de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats grâce à une charge de boulets.

Le coefficient Los Angeles LA est donné par le rapport

$$LA = \frac{(5000 - m_1)}{5000} \quad (\text{Eq III .1})$$

Le résultat est arrondi à l'unité la plus proche.



**Figure III.4 L'appareil Los Anglos**

### III-3-1-2 Essai Micro Deval (NFP 18-572) :

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats (l'attrition) et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient Micro-Deval n'est faible, le matériau est meilleur.

La résistance à l'usure est mesurée par la quantité, appelé coefficient Micro-Deval à l'absence d'eau (MDE), définie par :

MDE = Masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai x 100

Le coefficient Micro-Deval est donné par le rapport :

$$MED = \frac{100 \times (500 - m')}{500} \quad (\text{Eq.2 III})$$

$m'$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après tamisât à 1.6mm



**Figure III.5 la machine Micro-Deval**



**Figure III.6 charges abrasives de MDE**

### **III-3-1-3 L'analyse granulométrique (NA 2607)1992-08-01**

L'analyse granulométrique est une caractéristique particulière qui permet une classification des roches meubles afin d'obtenir la courbe granulométrique.

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et la précision attendue.



a) tamiseuse



b) balance électriques



c) série de tamis

**Figure III.7 matériels d'essai d'analyse granulométrique**

### III-3-1-3-1 Module de finesse [NFP18-540]

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse est égal au  $1/100^e$  de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 -0,315 -0,63 -1,25 -2,5 -5mm

$$MF = 1/100 \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis} \quad (\text{Eq III.3})$$

La masse des différent refus cumulés  $R_i$  sont rapportés à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec  $M_s$  et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus :

$$\% \text{refuscumulés} = \left( \frac{R_i}{M_s} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq III.4})$$

Les pourcentages des tamisât correspondants sont :

$$\% \text{tamisats cumulés} = \left( 100 \cdot \left( \frac{R_i}{M_s} \right) - 100 \right) \quad (\text{Eq III.5})$$

### III-3-2 Les analyses physiques :

#### III-3-2-1 Essai d'équivalent de sable (NF P18-598)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm Il rend compte globalement de la quantité étudié la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport

conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

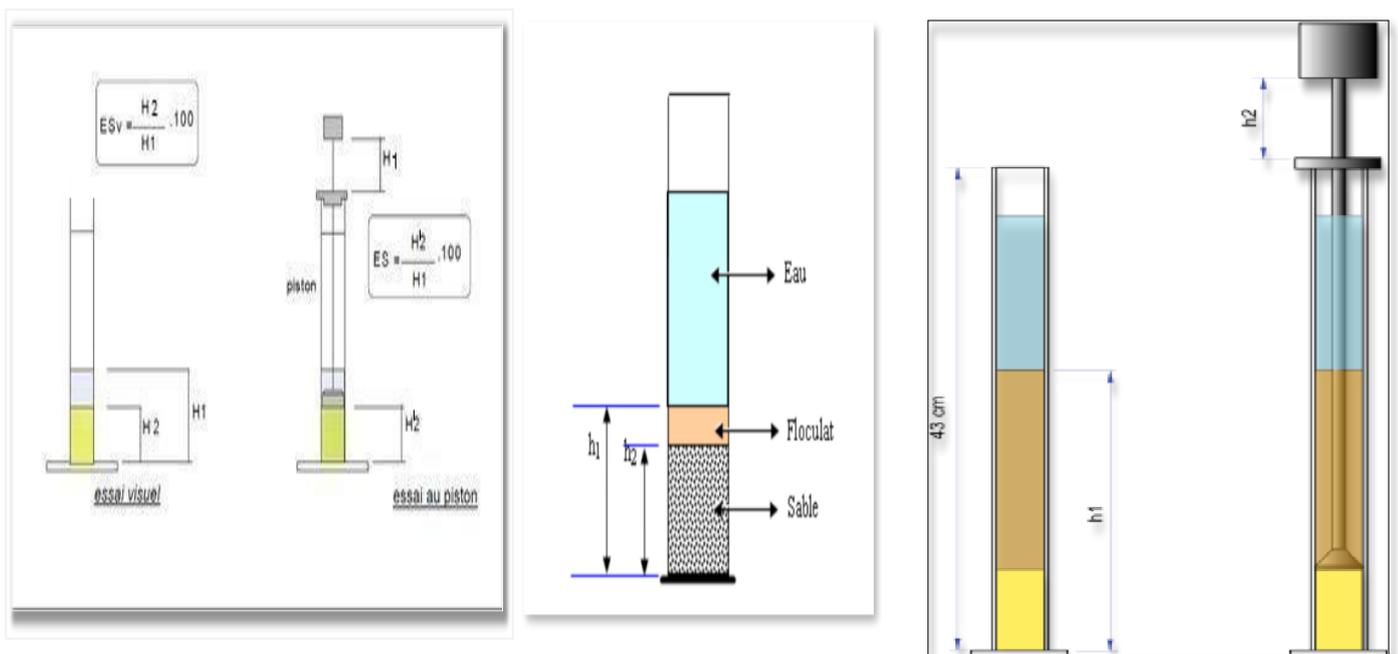
On déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq III.6})$$

Hauteur  $h_1$  : sable propre+éléments fins.

Hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

Selon que la hauteur  $h_2$  est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESv (Equivalent de sable visuel) ou ESP (Equivalent de sable par piston).



**Figure III.8 : Précision des hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  pour l'essai d'équivalent de sable**



a) Eprovettes de mesure



b) Piston



c) Bonbonne d'eau



d) Une règle



e) Récipient



f) Entonnoir



g) Tamis 2 mm



h) Balance électrique



i) Eau distillée



j) Éprovettes avec échantillons

**Figure III.9 : Matériels utilisés pour l'essai d'équivalent de sable**

**III-3-2-2 Masse volumique apparente (NF 18-555) :**

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

La masse volumique apparente est déterminée par la formule :

$$Mvapp = \frac{(M_1 - M_2)}{V} \quad (\text{Eq III.7})$$

$M_1$  : Le poids du récipient vide ;

$M_2$  : Le poids du récipient avec le matériau ;

$V$  : le volume du récipient. ( $V=1\text{litre}=1000\text{cm}^3$ ).

**III-3-2-2-1 Sable naturel et recyclé :**

Le sable naturel utilisé est de classe (0/4) d'origine calcaire, et le sable recyclé est préparé au laboratoire après concassage et tamisage.



**Figure III.10 Détermination de la masse volumique des granulats**

**III-3-2-2 Graviers (3/8), (8/15) naturels et recyclés :**

Au cours de cette étude, 8 granulats différents ont été utilisés et comparés. Ils se répartissent comme suit : deux granulats de référence naturel GN (3/8, 8/15), 6 granulats recyclés en laboratoire de compositions connues, deux à base de BHP de fumée de silice de GRANITEX GRFSG (3/8, 8/15), deux à base BHP de fumée de silice de SIKA GRFSS (3/8, 8/15), et deux à base BHP de laitier GRL (3/8, 8/15).



**Figure III.11 Graviers (3/8), (8/15) naturels et recyclés**

**III-3-2-2-3 Fumée de silice :**

La fumée de silice utilisée dans les bétons hydrauliques conformément à la norme [NF EN 13263-1 2009]. Elle présente un matériau pouzzolanique qui joue un rôle très important durant le processus d'hydratation, l'évolution de la résistance mécanique et l'amélioration de la durabilité des bétons. La fumée de silice utilisée dans cette étude est fournie par les sociétés algériennes GRANITEXT et SIKA de dénomination commerciale successive MEDAPLAST HP, CONDENSIL S 95-DP sous forme de poudre fine de couleur grise (Figure III.12). La composition chimique et les propriétés physiques de la fumée de silice sont présentées aux tableaux III.1 et III.2.



**Figure III.12 : Fumée de silice (Sika, Graniteux)**

**Tableau III. 1 Caractéristiques de la fumée de silice de Granitex :**

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

**Tableau III.2**Caractéristiques de la fumée de silice de Sika :

Aspect	Poudre
Densité	0,65
Densité absolu	2.24
Composants	SiO <sub>2</sub> = 85(%) SO <sub>3</sub> < 2,0 (%) Cl <sup>-</sup> < 0,1 (%)
Surface spécifique	Entre 15 et 39 (m <sup>2</sup> /gr)
Indice d'activité à 28 jours	(100%)
Teneur CaO	1%

**III-3-2-2-4 Laitier :**

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la font, de l'usine d'El-Hadjar Annaba. C'est un sable de granulométrie 0/3 mm, laitier granulé refroidi au jet d'eau, vitrifié c'est -à-dire amorphe. Le tableau 3 donne sa composition chimique. Il est réduit en poudre jusqu'à obtenir une grande surface spécifique par rapport au ciment. Le laitée d'El-Hadjar a l'avantage d'être plutôt acide (le rapport CaO/SiO<sub>2</sub> varie dans les limites de 0.95-1.04), il est relativement stable

**Figure III.13 : Laitier d'El \_ Hadjar (Annaba)****Tableau III.3** Composition chimique du laitier

Éléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	RI	PAF
%	39,77	41,69	7,05	1,41	5,49	0,15	0,44	0,10	0,12	0,11

**III-3-2-3 Masse volumique absolue (NA 255/1990) :**

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.



**Figure III.14 Détermination de la masse volumique absolue de sable naturel**

**III-3-2-3-1 Sable et gravier naturel et recyclé recyclé :**



a) Sable recyclé



b) Gravier recyclé



c) Sable naturel



d) Gravier naturel



e) Eau

**Figure III.15 Détermination de la masse absolue de sable recyclé**

**III-3-2-4 Coefficient d'absorption : [P18-554] [P18-555]**

Le taux d'absorption d'eau est déterminé selon les normes [NF P 18-554] et [NF P 18-555]. La formule suivante donne la valeur de  $Ab$  :

$$Ab = \frac{(M_a - M_s)}{M_s} \cdot 100(\%) \quad (\text{Eq III.8})$$

$M_a$  en (g) : la masse de 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.16 Détermination du Coefficient d'absorption des granulats (gravier, sable) naturels et recyclé**

**III-3-2-5 Superplastifiant :**

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un superplastifiant 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. Il est de dénomination commerciale GRANITEX MEDAFLOW RE 25 Conformément à la norme NF EN 934-2 NF[EN 934-2 2012]. Les données techniques de Superplastifiant sont présentées au tableau III.3.

**Tableau III.4 : Caractéristiques techniques du superplastifiant.**

<b>Aspect</b>	Liquide
<b>Densité</b>	1,06+0,01
<b>Densité absolu</b>	2.3 ± 0.1
<b>Couleur</b>	Brun clair
<b>PH</b>	7
<b>Teneur en chlore</b>	< 0.1 (g/l)
<b>Extrait sec</b>	25%

**Figure III.17 Superplastifiant MEDAFLOW RE 25 (GRANITEX)**

### III-4 Formulation des bétons BHP :

Une formulation d'un béton correspond à un processus de sélection des constituants et leurs proportions pour fabriquer un matériau aussi économique que possible possédant certaines propriétés minimales précises, notamment, la consistance, la résistance et la durabilité. La formulation d'un béton comporte trois volets : le choix et caractérisations des constituants suivis d'un calcul approché des proportions, l'épreuve expérimentale de la formule retenue et la vérification des performances atteintes.

Après une caractérisation détaillée des différents constituants, nous présenterons dans ce qui suit la procédure et la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons à Hautes Performances (BHP, BHPR) de notre étude. Trois tests expérimentaux sont utilisés pour ajuster et corriger la maniabilité et la compacité des formulations choisis.

La recherche des bétons à hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à optimiser le squelette granulaire afin d'améliorer la compacité et de réduire au maximum la porosité. Plusieurs méthodes de formulation des bétons sont proposées dans le chapitre 1 de la partie bibliographie. Nous utiliserons la méthode de coulis ajustée pour la formulation des BHP d'étude.

#### III-4-1 Les étapes de la méthode des coulis sont :

- ❖ On formule le BHP de référence, en rajoutant au squelette de formule régionale 425 Kg de ciment et de l'équivalent de 1.5% ce fluidifiant en extrait sec, et on recherche le dosage en eau qui donnera un affaissement égal à 20 cm ;
- ❖ La formulation du coulis de référence. Sa composition correspond à celle de la pâte du BHP « 0 », sans eau de mouillage. Des granulats (10L/m<sup>3</sup> de béton). Le temps d'écoulement au cône de MARSH entre 5 et 15 sec ;
- ❖ On détermine la composition minérale des coulis HP, en faisant varier la nature du ciment, le taux de fumée de silice (entre 5 et 10%) et en prévoyant éventuellement une partie de fines ;
- ❖ On détermine le dosage en super plastifiant des coulis HP Pour chaque coulis HP avec 0.3% de superplastifiant, on détermine la quantité d'eau nécessaire pour une consistance

fluide, puis on mesure révolution des temps d'écoulement en fonction du dosage croissant en adjuvant ou superplastifiant ;

- ❖ On détermine le dosage en eau des coulis HP fluidifiés de façon à obtenir le temps d'écoulement de référence.

Ces BHP que l'on pourra confectionner avec ces coulis auront la même quantité de pâte et la même maniabilité.

### III-5 Composition de BHP :

La fabrication d'un béton à hautes performances (BHP) recommande des matériaux de qualité et que le rapport E/C soit compris entre 0.3 et 0.4. On a fabriqué deux séries de BHP, une contenant la fumée de silice BHPFS et l'autre le laitier de haut fourneau BHPL.

Une quantité optimale de fumée de silice, soit 8 % par rapport à la masse du ciment, et une autre quantité de laitier 12% du poids de ciment permettent d'utiliser 450 kg/m<sup>3</sup> de ciment pour atteindre une résistance de 70MPa à 90 jours. La réduction de la quantité d'eau est obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dosé à 0.6% pour les BHPL et 0.8 à 1 % par rapport à la masse du ciment pour les BHPFS, ceci a permis de rendre le mélange fluide.

Les deux séries de bétons formulées sont récapitulées dans les tableaux III.5 et III.6.



**Figure III.18 Matériaux pour la composition de BHP et BHPR**

**Tableau. III.5 Composition d'un m<sup>3</sup> de BHP**

Composants	Ciment	Eau	Sable	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	Fumé de silice	Superplastifiant	laitier
Poids (kg)	450	175	715	432	528	36	4	
	450	176	715	432	528		2.70	54

**Tableaux.III.6 Composition d'un m<sup>3</sup> de BHPR**

Composition	50%											100%						
	ciment	eau	Sable naturel	Sable recyclé	Gravier naturel (3/8)	Gravier recyclé (3/8)	Gravier naturel (8/15)	Gravier recyclé (8/15)	Fumé de silice	sup	laitier	ciment	eau	Sable naturel	Sable recyclé	Gravier recyclé (3/8)	Gravier recyclé (8/15)	Fumé de silice
Poids (kg)	450	175	500.5	214.5	216	216	264	264	36	4		135	175	500.5	214.5	528	432	36
	450	176	500.5	214.5	216	216	264	264		2.70	54	135	176	500.5	214.5	528	432	

### III-6 Malaxage de béton :

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est à axe vertical il à une capacité de 50 litres. La séquence de malaxage retenue est la suivante :

- ❖ Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage ;
- ❖ Vérifier que tout le matériel est à disposition et matériaux sont bien séchés ;
- ❖ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour le gâchée. Pour la confection du BHP ;
- ❖ Le super plastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage ;
- ❖ Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable, le ciment et l'addition ;
- ❖ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 3 à 5 minutes ;
- ❖ Ajouter l'eau pendant le malaxeur en marche ;
- ❖ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié d'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélange, introduire ensuite la partie restante d'eau ;

- ❖ Malaxer pendant 2 min ;



Figure III.19 Préparations des ingrédients pour la fabrication des BHP et BHPR



Figure III.20 Préparation des bétons BHP et BHPR

### III-7 Essai des Bétons à l'état frais

#### III-7-1 L'ouvrabilité (NFP 18-541) :

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton haute performance à bien se mettre en œuvre pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et sans ségrégation. Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au **con d'Abrams**.

L'ouvrabilité pour le béton à hautes performances, une qualité fondamentale qui doit être sérieusement prise en compte dans l'étude de composition elle choisit en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyennes de vibration disponible.

#### III-7-2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

L'affaissement au cône d'Abram est effectué conformément aux prescriptions de la norme NFEN 12350-2.

Effectuer immédiatement l'essai pour déterminer l'ouvrabilité estimée du béton frais.



Figure III.21 Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'introduction du béton dans les moules est faite au moyen d'une pelle à coque cylindrique de dimension appropriée au volume des éprouvettes, accompagnée d'un mouvement de répartition.

Le choix du mode de mise en place dépend de la consistance du béton mesurée par l'essai d'affaissement.

Les bétons réalisés dans cette étude, ont été mis dans des moules cylindriques (16x32) cm<sup>2</sup> sont ensuite vibrée verticalement pendant 30 secondes.



**Figure III.22** Vibration, remplissage des moules et mode de mise en place

Le démoulage des éprouvettes doit être effectué après  $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$  dans un local maintenu à la température de  $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ . Et inscrire directement sur les moules le numéro d'ordre d'éprouvette.



**Figure III.23** Eprouvettes après démoulage

La conservation des éprouvettes démoulées se fait à une température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , dans l'eau.



**Figure III.24** conservation des éprouvettes dans l'eau

### **III-8 Essai des Bétons à l'état durci**

#### **III-8-1 Résistance en compression :**

La résistance mécanique en compression est le repère principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons. Ce paragraphe présente une description détaillée de la procédure de détermination de la résistance mécanique en compression. Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique de dimensions (16x32) cm<sup>2</sup> confectionnées conformément à la norme NF EN 12390-3. On a aussi testé deux éprouvettes cubiques 10x10x10 cm<sup>3</sup> uniquement pour le BHPN.

Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'aux échéances des essais (7, 14, 28 et 56 jours).

Le test de compression a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN asservie en force avec une vitesse de chargement de  $2,4 \pm 0,2$  kN/Sec

(Figure III.25). La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à "j" jours  $f_{cj}$  est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (voir l'équation. III.9)

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq III.9})$$

Avec :

$f_{cj}$  : Résistance à la compression en Méga Pascal (MPa) ;

P : charge de rupture en newton(N) ;

S : section en mm<sup>2</sup>.



**Figure III.25 Chargement des éprouvettes cylindriques et cubiques pour l'essai décompression**



**Figure III.26 Mode de rupture des éprouvettes après écrasement**

**III-9 Conclusion :**

Dans cette étude, les différentes caractéristiques physiques, et mécaniques des composants ont été établies, les courbes granulométriques de tous les granulats sont réalisées, la méthode de formulation a été développée. Nous avons fixé tous les paramètres constants sauf la substitution des granulats recyclés (sable, gravier).

Les BHP et BHPR préparés se caractérisent par un rapport E/L constant. On se propose dans le chapitre suivant d'étudier la variation de la masse volumique à l'état durcis, la résistance mécanique en compression des bétons d'études.

# **CHAPITRE IV**

## **LES RESULTAS**