



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 Génie Civil



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

Spécialité : Travaux public

Option : VOA

Présenté par :

MESSDED Mohamed El Amine

BENABED Amar

Sujet du mémoire

*Effet de la qualité de béton d'origine sur les caractéristiques d'un
béton élaboré avec des agrégats recyclés*

Mme. MIMOUNI Lamia

Présidente

Melle. RENNAK Zohra

Encadrant

Mme. DRAOUI Aicha

Examinatrice

Mr. BEKKI Hadj

Examineur

Mr. SERBAH Boumediene

Examineur

Mr. BOUMEDIENE Rachid

Invité

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude à :

DIEU, qui nous a donné la force d'avoir accès à cette formation ;

Chers parents, qui sont nos sources d'énergie dans la vie, les fondements de nos succès et notre soutien constant ;

Melle RENNAK ZOHRA, qui a été disponible tout au long de la réalisation de ce projet avec ses remarques et conseils ;

Les membres du jury, Mr.H.BEKKI, Mr.B.SERBAH, Mme.A.DRAOUI et Mme.L.MIMOUNI ;

Tous les enseignants du département de génie civil ;

Tous nos amis de la spécialité "VOA".

Thanks

We express our gratitude to :

GOD, who has granted us the opportunity to access this training;

Dear parents, who are our sources of energy in life, the foundations of our successes, and our constant support;

Ms. RENNAK ZOHRA, who was available throughout the realization of this project with her remarks and advice;

The jury members, Mr H. BEKKI, Mr B. SERBAH, Mrs A. DRAOUI, and Mrs L. MIMOUNI;

All the teachers of the Civil Engineering department;

All our friends from the specialization "ROS".

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, qui m'ont guidé et encouragé dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation ;

A mes grands-parents ;

A toute ma famille et à tous ceux que j'aime ;

A tous mes amis qui n'ont cessé de m'aider et de me conseiller pour accomplir mon travail ;

A toute personne qui m'a aidé à poursuivre mes études ;

A toute la promotion (2023/2024).

MESSDED Mohamed El Amine

BENABED Amar

Résumés

Résumé

Il est nécessaire de réutiliser efficacement les déchets de construction et de démolition (DCD) afin de conserver les ressources en agrégats naturels non renouvelables et d'atténuer la pression sur la recherche de nouveaux sites d'élimination pour gérer les déchets. Le recyclage et la réutilisation des DCD sous forme d'agrégats grossiers pour le nouveau béton facilitent son utilisation à grande échelle.

Cette étude expérimentale vise à évaluer l'influence de l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) issus d'un béton parent (BP) à résistance normale (BP1), moyenne (BP2) et élevée (BP3) pour remplacer les granulats naturels dans les mélanges de béton sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons recyclés (BR-1, BR-2 et BR-3).

Sept mélanges de béton ont été confectionnés, un béton ordinaire (BO) et six bétons recyclés dont deux avec un béton parent de résistance normale (BR-1), deux avec un béton parent de résistance moyenne (BR-2) et deux avec un béton parent de résistance élevée (BR-3) avec un taux de remplacement de 50% et 100% pour chaque béton recyclé.

Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation des agrégats recyclés de meilleure qualité (agrégats issus d'un béton parent de résistance élevée BP3) augmentent à la fois la résistance des bétons recyclés (BR-3) à la compression et à la traction par flexion par rapport aux agrégats de béton parent de qualité normale (BP1) et moyenne (BP2).

Mots clés : Béton Parent (BP), Granulats de Béton Recyclé (GBR), Béton Recyclé (BR),

Propriétés Mécaniques.

Abstract

There is a need for effective reuse of construction and demolition (CD) waste to conserve resources of non-renewable natural aggregates and to mitigate the pressure on seeking new disposal sites to manage waste. The recycling and reuse of CD waste in the form of coarse aggregates for new concrete facilitates its large-scale use.

This experimental study aims to evaluate the influence of the use of recycled concrete aggregates from parent concrete (PC) with normal (PC1), medium (PC2) and high (PC3) resistance to replace natural aggregates in concrete mixtures on the physical and mechanical properties of recycled concretes (RC-1, RC-2 and RC-3).

Seven concrete mixtures were made, one ordinary concrete (OC) and six recycled concretes, two with a normal strength parent concrete (RC-1), two with a medium strength parent concrete (RC-2) and two with a high strength parent concrete (RC-3) with a replacement rate of 50% and 100% for each recycled concrete.

The results obtained indicate that the use of better quality recycled aggregates (aggregates from a high strength parent concrete BP3) increases both the resistance of recycled concretes (RC-3) compression and tensile bending compared to parent concrete aggregates of normal (PC1) and medium (PC2) quality.

Keywords: Parent Concrete (PC), Recycled Concrete Aggregates (RCA), Recycled Concrete (RC), Mechanical Properties.

الملخص

هناك حاجة ماسة لإعادة الاستخدام الفعال لنفايات البناء والهدم (ب، هـ) للحفاظ على موارد الحصى الطبيعية غير المتجددة وتخفيف الضغط على البحث عن مواقع التخلص الجديدة لإدارة النفايات. إن إعادة تدوير وإعادة استخدام نفايات البناء والهدم المدمجة في شكل حصى خشن للخرسانة الجديدة يسهل استخدامها على نطاق واسع.

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم تأثير استخدام حصى الخرسانة المعاد تدويره المستخرج من الخرسانة الأم (خ أ) ذات المقاومة العادية (خ أ1)، المقاومة المتوسطة (خ أ2) والمقاومة العالية (خ أ3) لاستبداله بالحصى الطبيعي في مخاليط الخرسانة على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعاد تدويرها (خ م ت-1، خ م ت-2 و خ م ت-3).

تم صنع سبعة مخاليط خرسانية، واحدة عادية (خ ع) وستة خرسانات معاد تدويرها، اثنان منها من خرسانة الأم العادية المقاومة (خ م ت-1)، والاثنان الأخرى من خرسانة الأم المتوسطة المقاومة (خ م ت-2) والاثنان الباقية من الخرسانة الأم العالية المقاومة (خ م ت-3) مع معدل استبدال الحصى الطبيعي بالحصى المدور بنسبة 50% و100% لكل خرسانة معاد تدويرها.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن استخدام حصى الخرسانة المعاد تدويره ذو النوعية الأفضل (الحصى المستخرج من الخرسانة الأم العالية المقاومة خ أ3) يزيد من مقاومة القوة الضاغطة ومقاومة شد الإنحناء للخرسانة المعاد تدويرها (خ م ت-3) مقارنة بحصى الخرسانة المعاد تدويره ذو النوعية العادية (خ أ1) والمتوسطة (خ أ2).

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الأم (خ أ)، حصى الخرسانة المعاد تدويره (خ م ت)، الخرسانة المعاد تدويرها (خ م

ت)، الخصائص الفيزيائية، الخصائص الميكانيكية.

Table des matières

Table des matières

Remerciements.....	I
Thanks.....	II
Dédicaces	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
المخلص.....	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	XII
Liste des abréviations	XV
Introduction générale	1

CHAPITRE I: Le matériau béton

I.1 Introduction :	3
I.2 Historique	3
I.3 Les composants du béton :.....	4
I.3.1 Les granulats.....	4
I.4 Rôle des différents éléments constituant le béton.....	10
I.5 Propriétés du béton :	10
I.5.1 Propriétés du béton frais :.....	10
I.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	11
I.5.1.2 La masse volumique de béton frais.....	11
I.5.1.3 Propriétés du béton durci.....	12
I.6 Formulation du béton : Méthode de Dreux-Gorisse.....	15
I.6.1 Objectif.....	16
I.6.2 Critère de maniabilité	16
I.6.3 Critère de résistance.....	16
I.6.4 Choix du ciment.....	17
I.6.5 Détermination du rapport C/E	17
I.6.6 Détermination de C.....	18
I.6.7 Détermination de E.....	18

I.6.8 Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E.....	18
I.6.9 Détermination du mélange optimal à minimum de vides.....	19
I.6.10 Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.....	20
I.6.11 Détermination de la compacité du béton	21
I.6.12 Détermination des masses de granulats	22
I.6.13 Obtention de la formulation théorique de béton.....	23
I.7 Conclusion.....	23
Références.....	3

CHAPITRE II: Granulats recyclés

II.1 Introduction	26
II.2. Définition	28
II.3 Techniques et matériaux de démolition :	28
II.3.1 Démolition par dynamitage.....	29
II.3.2 Démolition à l'aide d'une tenaille.....	30
II.3.3 Technique de démolition à l'aide d'outils à main	30
II.3.4 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés	30
II.4 Composition du granulat recyclé.....	31
II.4.1 Mortier attaché	32
II.5 Propriétés des granulats de béton recyclés GBR.....	34
II.5.1 Caractéristiques physiques des GBR.....	34
II.5.1.1 Masse Volumique.....	34
II.5.1.2 Coefficient d'Absorption d'eau (Ab).....	34
II.4.3 Caractéristiques mécaniques des GBR.....	36
II.6 Conclusion.....	39
Références.....	26

CHAPITRE III: Protocole exerimental

III.1 Introduction.....	42
III.2 Les Matériaux Utilisés	43
III.2.1 Ciment.....	43
III.2.2 Les granulats	43
III.2.3 L'eau de gâchage (NF P 303 , NF EN 1008).....	47
III.3 Analyses physiques.....	48
III.3.1 La masse volumique absolue des matériaux (Granulat):	48

(NF P 18 554, NF P 18 555)	48
III.3.2 La masse volumique apparente des matériaux (Granulat, ciment):	50
(NA 255/1990)	50
III.3.3 Analyse Granulométrique par Tamisage (NF P18 560)	51
III.3.4 Modules de finesse (NF P 18-540)	53
III.3.5 Mesure de la propreté des granulats (l'essai d'équivalent de sable) : (NF P 18 585)	53
III.3.5 Coefficient d'absorption d'eau (Ab) (NF P18-554).....	56
III.4 Analyses mécaniques	57
III.4.1 Essai Los Angeles (LA) : (NF P18 573).....	57
III.4.2 Essai d'usure Micro Deval (MDE) : (NF P18 572)	59
III.5 Fabrication de béton.....	60
III.5.1 Formulation de béton	60
III.5.2 Malaxage de béton (NF P 18 404)	61
III.5.3 Affaissement au cône d'Abrams (NF P 18 451)	63
III.5.4 Vibration	64
III.5.5 Conservation avant démoulage (NF P 18 438, NF EN 12390-2)	65
III.5.6 Essai de Résistance à la compression des éprouvettes (NF P 18 430-3, NF EN 12390-3	67
III.5.6 Essai de Résistance à la traction par flexion (trois points)	68
(P 18 433, NF EN 12390-5).....	68
III.6 Conclusion	69

CHAPITRE IV: Résultats et interprétation

Résultats et interprétation	70
IV.1 Introduction.....	70
IV.2 Résultats des essais	70
IV.2.1 Résultats physiques.....	70
IV.2.2 Résultats mécaniques.....	79
Conclusion générale.....	95

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I-1 : Granulats pour béton(source alsford)	5
Figure I-2 : Granulats d'origine minéralogique (source guide béton)	6
Figure I-3: Granulats alluvionnaires (roulés) (source holcimpartner).....	7
Figure I-4: Granulats de carrière (source delmonico-dorel).....	7
Figure I-5: Sable pour béton (source live master)	8
Figure I-6: Fabrication de ciment (source science et technique).....	9
Figure I-7: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [5].....	11
Figure I-8: Dimension normalisée d'éprouvette cylindrique	13
Figure I-9: Différents types d'essais de résistance en traction.....	14
Figure I-10: Abaque permettant la détermination de C_{opt}	18
Figure I-11: Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.	21

CHAPITRE II

Figure II-1: Développement de la production de béton avec la quantité démolie estimée et le sable recyclé (Allemagne de l'ouest) [2,3].....	27
Figure II-2: Recyclage du beton [6]	28
Figure II-3: Démolition par dynamitage [22].....	29
Figure II-4: Démolition à l'aide d'une tenaille[25].....	30
Figure II-5: Différentes zones de transition interfaciale (ZTI) dans- (a) le GR, et (b) le GN[9]	33
Figure II-6: Absorption des granulâtes recyclés en fonction de temps	35
Figure II-7: machine Los Angeles.....	36
Figure II-8: Machine Micro-Deval.....	37

CHAPITRE III

Figure III-1: Ciment CEMII / B-L 42,5 N (MATINE)	43
Figure III-2: Préparation de gravier naturel (lavage et séchage).....	44
Figure III-3: Préparation des granulats recyclés	46
Figure III-4: Élaboration des granulats des bétons recyclés	47
Figure III-5: Eau de gâchage.....	48

Figure III-6: Détermination de la masse volumique absolue de sable	49
Figure III-7: Détermination des masses volumiques absolues (GN, GBR)	49
Figure III-8: Détermination de la masse volumiques apparente de sable	50
Figure III-9: Détermination des masses volumiques apparentes (GN, GBR).....	51
Figure III-10: Détermination de la masse volumique apparente de ciment	51
Figure III-11: Essai de l'analyse granulométrique de sable et GN,GR.....	52
Figure III-12: Essai d'équivalent de sable	54
Figure III-13: Procédure d'essai d'Équivalent de Sable (ES).....	55
Figure III-14: Essai d'Absorption d'eau	56
Figure III-15: Essais Los Angeles.....	58
Figure III-16: Essais Micro-dévale	59
Figure III-17: Eprouvettes utilisées (cylindriques 16x32cm ² , cubiques 10x10x10 cm ³ et prismatique 10x10x40 cm ³)	61
Figure III-18: Préparation des constituants pour gâchage.....	62
Figure III-19: Malaxage de béton à l'aide d'une bétonnière.....	63
Figure III-20: Affaissement au cône d'Abrams	64
Figure III-21: Vibration de béton	65
Figure III-22: Conservation des éprouvettes avant démoulage.....	66
Figure III-23: Démoulage et conservation des éprouvettes cylindriques, prismatiques et cubiques	66
Figure III-24: Essais de compression des éprouvettes cylindriques (16x32) cm ²	67
Figure III-25: Résultats de l'essai de compression	68
Figure III-26 : Chargement de l'éprouvette (Charge centrée en un point)	68
Figure III- 27: Essai de traction par flexion des éprouvettes prismatiques (10x10x40) cm ³ (trois points).....	69
Figure III-28: Résultats des Essai de traction par flexion	69

CHAPITRE IV

Figure IV-1: Analyse granulométrique des granulats (naturel et recyclés).....	74
Figure IV-2: Masses volumiques apparentes des GN et GBR	76
Figure IV-3: Masses volumiques absolue des GN et GBR	77

Figure IV-4 : Evolution de coefficient d'absorption d'eau des GR	78
Figure IV-5: Résultats d'essai Los Angeles	79
Figure IV-6: Résultats d'essai Micro-Deval.....	80
Figure IV-7: Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement	82
Figure IV-8: Variation de la densité moyenne des BN, BR-1, BR-2 et BR03 en fonction de temps des éprouvettes cylindriques	86
Figure IV-9: Variation de la densité moyenne des BO, BR-1, BR-2 et BR-3.....	87
Figure IV-10: Variation de la densité moyenne des BO, BR-1, BR-2 et BR03.....	87
Figure IV-11: Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge.....	92
Figure IV-12: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton (BO , BR-1 ,BR-2 , BR-3)	93
Figure IV-13: Faciès de rupture des bétons (BO, BR50% et BR100%)	94

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I-1: Classes des granulats selon la norme XP P 18-540	6
Tableau I-2: Affaissement au cône conseillé en fonction du type d’ouvrage à réaliser.....	16
Tableau I-3: Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments....	17
Tableau I-4: Coefficient granulaire G’ en fonction de la qualité et de la taille maximale.....	17
Tableau I-5: Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax	19
Tableau I-6: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ..	20
Tableau I-7: Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage.....	22

CHAPITRE III

Tableau III-1: Conception du mélange kg/m ³	61
---	----

CHAPITRE IV

Tableau IV-1: Détermination de l’essai d’Equivalent de Sable naturel (0/5)	70
Tableau IV-2: Analyse granulométrique de sable (0/5)	71
Tableau IV-3: Analyse granulométrique du gravier naturel (GN) (3/8, 8/15)..	72
Tableau IV-4 : Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -1) (3/8, 8/15).....	73
Tableau IV-5: Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -2) (3/8, 8/15).....	73
Tableau IV-6 : Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -3) (3/8, 8/15).....	74
Tableau IV-7: Masses volumiques apparentes des constituants utilisés	75
Tableau IV-8: Masses volumiques absolues des constituants utilisés	76
Tableau IV-9: Taux d’absorption d’eau	78
Tableau IV-10: Résultats d’essai Los Angles.	79
Tableau IV-11: Résultats d’essai Micro-Deval	80
Tableau IV-12: Valeurs de l’affaissement des bétons (BN, BR-1, BR -2 et BR -3).....	81
Tableau IV-13: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BO	83
Tableau IV-14: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-1 50%	83
Tableau IV-15: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-1 100%	84

Tableau IV- 16: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-02 50%	84
Tableau IV-17: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-02 100%	85
Tableau IV-18: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-03 50%	85
Tableau IV-19: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-3 100%	86
Tableau IV-20 : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BO	89
Tableau IV-21: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-1 50%	89
Tableau IV- 22: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-1 100%	90
Tableau IV-23: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-2 50%	90
Tableau IV-24: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-2 100%	91
Tableau IV-25: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion de BR-3 50%	91
Tableau IV-26: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion de BR-3 100%	92

Liste d'abréviations

DCD : Déchets de Construction et de Démolition

GN : Granulats Naturels

GR : Granulats Recyclés

GBR : Granulats de Béton Recyclé

BO : Béton Ordinaire

BP : Béton Parent

BP1 : Béton Parent de résistance normale

BP2 : Béton Parent de résistance moyenne

BP3 : Béton Parent de résistance élevée

BR : Béton Recyclé

BR-1 : Béton Recyclé issu d'un béton parent de résistance normale

BR-2 : Béton Recyclé issu d'un béton parent de résistance moyenne

BR-3 : Béton Recyclé issu d'un béton parent de résistance élevée

PCD : Pâte de ciment durcie

MA : Mortier attaché (adhérent)

SiO₂ : Dioxyde de silicium, également connu sous le nom de **silice**

Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium

Fe₂O₃ : Oxyde de fer, également appelé **hématite**

ZTI : Zone de transition interfaciale

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est un pilier fondamental de l'industrie de la construction, jouant un rôle essentiel dans la réalisation de structures durables et résistantes. Ce matériau polyvalent, composé principalement de ciment, de granulats et d'eau, est largement utilisé dans divers projets de construction, allant des infrastructures urbaines aux ouvrages architecturaux. Son importance dans le domaine de la construction ne peut être surestimée, et pourtant, malgré sa prévalence, le béton ordinaire demeure un sujet d'étude fascinant et évolutif.[1] . L'industrie de la construction s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des matériaux recyclés. Parmi ces matériaux, les agrégats recyclés, issus du béton de démolition des structures qui sont réutilisés pour fabriquer de nouveaux bétons. L'intérêt pour cette pratique est motivé par des préoccupations environnementales, économiques et techniques.[3] Utiliser des agrégats recyclés permet de réduire l'exploitation des ressources naturelles, de diminuer les déchets de construction et de baisser les coûts de production.[4] Toutefois, l'hétérogénéité et la variabilité de la qualité des bétons d'origine posent des défis importants.

La qualité du béton d'origine dont sont issus les agrégats recyclés influence directement les caractéristiques du béton nouvellement élaboré.[1] Cette influence soulève des questions importantes concernant les propriétés mécaniques, la durabilité et la performance globale du béton recyclé[2].Des études [5],[6] ont montré que le béton recyclé peut présenter une résistance mécanique inférieure et une durabilité réduite par rapport au béton conventionnel, principalement en raison des caractéristiques intrinsèques des agrégats recyclés utilisés. Par exemple, un béton d'origine de faible qualité, avec une haute porosité et une faible résistance, engendre des agrégats recyclés moins performants. Des recherches récentes [7] se concentrent sur l'amélioration de la qualité des agrégats recyclés et sur l'optimisation des mélanges de béton pour compenser les effets négatifs de l'utilisation d'agrégats de moindre qualité. Parmi les solutions envisagées, on retrouve l'utilisation d'additifs chimiques, le traitement préalable des agrégats recyclés, et l'élaboration de nouvelles techniques de mélange.

L'étude présentée ci-après montre qu'il est possible d'obtenir des bétons de granulats recyclés possédant des propriétés mécaniques proches de celles de bétons de granulats naturels.

L'objectif de notre travail expérimental est d'examiner l'effet de la qualité du béton d'origine sur les caractéristiques du béton élaboré avec des agrégats recyclés, en analysant les propriétés des granulats de béton recyclés ainsi que leur impact sur la confection et les propriétés d'un béton dans lesquels ils sont utilisés en remplacement des granulats naturels.

Cette étude va donc être présentée en 4 chapitres :

- Le chapitre I a fait l'objet sur l'étude des principales caractéristiques du matériau béton ;
- Le chapitre II présente une revue de l'état de l'art sur les granulats de béton recyclés et leur utilisation dans le béton ;
- Le chapitre III rassemble la méthodologie adoptée pour l'expérimentation (caractérisation des constituants, composition du béton, préparation et dimensionnement des spécimens, moyens de mesure) ;
- Le chapitre IV est consacré à la présentation, la discussion et l'analyse de résultats expérimentaux trouvés ;
- Une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus, avec des perspectives proposées pour la continuité de ce travail.

CHAPITRE I

Le matériau béton

I.1 Introduction :

Né avec le XXe siècle, le béton, matériau jeune, a connu ces vingt dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau, (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovantes tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de la modernité et de l'innovation.

L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse. Les qualités initiales de résistances mécaniques se sont déclinées, différenciées. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées, à des résistances toujours plus importantes, à des exigences de durabilité plus fortes, à des contraintes et à de nouvelles exigences de mise en œuvre (maîtrise de la rhéologie, pompabilité, etc.).

Le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des qualités intrinsèques : durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustiques, diversité des formes, des couleurs et des aspects, qui sont les garants d'ouvrages pérennes, efficaces, écologiques, économes et harmonieux. [2].

I.2 Historique

L'ingénieur Bélidor, auteur de L'architecture hydraulique (1737) [3] étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 [3] et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français.

C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot (1848), le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898) [3].

Au xxe siècle, le béton se développera considérablement et, parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en oeuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, avec une réalisation comme l'Arche de la Défense, ou en génie civil : pont de l'Île de Ré, pont sur l'Élorn, pont de Normandie, Viaduc de Millau.[3]

I.3 Les composants du béton :

Le béton est un matériau composite, il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique. La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et la matrice [4]:

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques. Il n'est pas donc étonnant que les performances des bétons dépendent des propriétés des granulats qui les composent.
- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure.

I.3.1 Les granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte provenant de l'érosion des roches ou de leur broyage, utilisé dans la construction et entrant dans la composition des mortiers et des bétons, leurs dimensions sont comprises entre 0mm et 25mm [5].

Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple).

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons ; du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher ; du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité ;
- La qualité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.



Figure I-1 : Granulats pour béton(source alsford)

I.3.1.1 Classe des granulats

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis[6].

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou $0/D$ avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau I-1: Classes des granulats selon la norme **XP P 18-540**.

Classes	Démentions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	D ≤ 1 mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	d = 0 ≤ D ≤ 4 mm
Graves	0/D	D ≥ 6,3 mm
Gravillons	d/D	D ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
Ballasts	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

I.3.1.2 Différents types de granulats :

A. Granulats naturels

Les granulats naturels (GN), les plus utilisés pour le béton proviennent des roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telle que le quartz et quartzites, ou des roches éruptives telle que les basaltes, les granites, les porphyres[7].



Figure I-2 : Granulats d'origine minéralogique (source guide béton)

B. Granulats roulés et granulats de carrières :

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories :

- Les granulats alluvionnaires (roulés), ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses nuisibles à la résistance du béton. On trouve les différentes roches selon la région d'origine, les granulats les plus fréquents sont les silico-calcaires[7].



Figure I-3: Granulats alluvionnaires (roulés) (source holcimpartner)

- Les granulats de carrières, sont obtenus par abattage et concassage des roches ce qui leur donne une forme angulaire des classes granulaires souhaitées.



Figure I-4: Granulats de carrière (source delmonico-dorel)

Ces granulats présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche et degrés de concassage.

I.3.1.3 Sable

Le sable utilisé pour fabriquer des bétons très solide doit avoir un module de finesse élevé. Il a été constaté qu'avec un module de finesse d'environ 3, le béton a une meilleure ouvrabilité et de meilleures résistances en compression simple. Un module de finesse inférieure à 2.5 rend le béton collant et donne des résistances moins bonnes. [17]



Figure I-5: Sable pour béton (source live master)

I.3.2 Le ciment :

Le ciment est obtenu par un mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et de silice cuits) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitée, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...). [8]

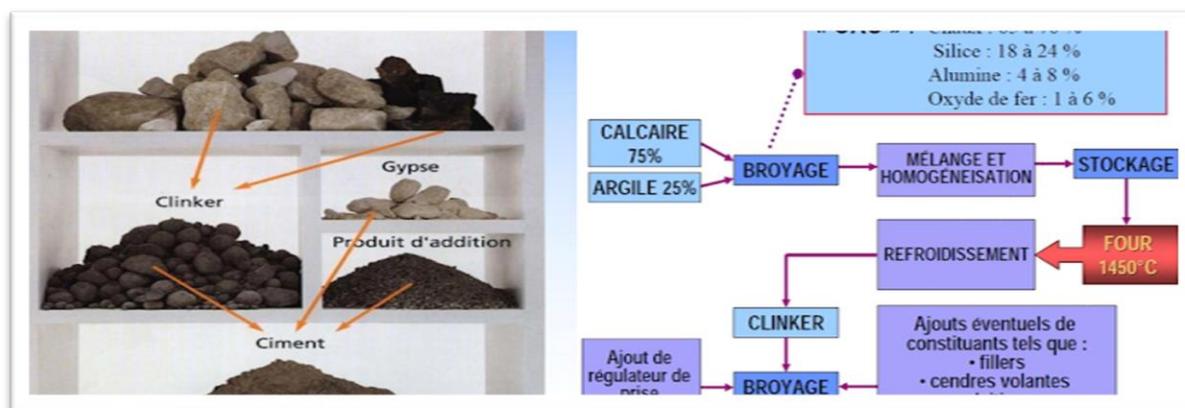


Figure I-6: Fabrication de ciment (source science et technique)

Il existe cinq types de ciment normés « CEM ». Cette désignation caractérise un ciment conforme à la norme européenne EN 197-1. Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène.

CEM I : désigne un ciment de type « ciment Portland », c'est-à-dire un ciment composé d'un minimum de 95 % de clinker.

CEM II : cette désignation caractérise des ciments dont les plus courants sont le « ciment Portland composé », le « ciment Portland au Calcaire », le « ciment Portland au Laitier » ou le « ciment Portland à la fumée de silice ».

CEM III : sont des ciments du type « ciment de haut fourneau » constitué de clinker et de laitier de haut fourneau, dans des proportions alternatives.

CEM IV : désigne le « ciment pouzzolanique ».

CEM V : désigne le « ciment composé »

I.3.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Il est ajouté lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permettre de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite la mise en œuvre du béton. L'eau utilisé doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès si ces deux conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées. [9]

I.4 Rôle des différents éléments constituant le béton

- **Ciment:** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients ;
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable ;
- **Les granulats:** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats ;
- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats. [10]

I.5 Propriétés du béton :

Le béton doit être considéré sous deux aspects [10]:

- **Le béton frais :** mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.
- **Le béton durci :** solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I.5.1 Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage [11]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité.
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Le plus couramment utilisé dans la pratique est le cône d'Abrams.

I.5.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance [12].

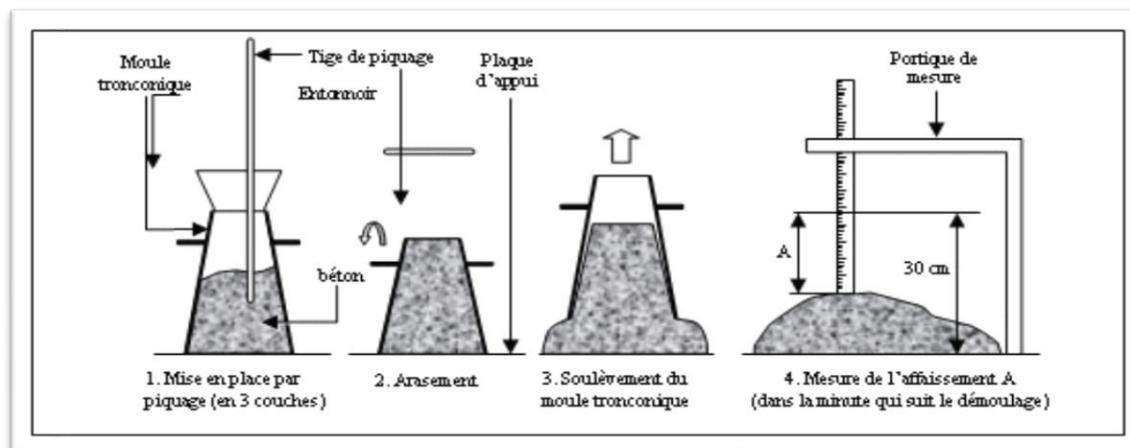


Figure I-7: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [5]

I.5.1.2 La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante [24]:

$$\gamma_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Eq I.1})$$

Où :

γ_b : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3).

m_1 : est la masse du récipient (kg) ;

m_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg) ;

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3).

I.5.1.3 Propriétés du béton durci

A. Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton est l'un des paramètres fondamentaux employés pour évaluer la qualité d'un béton. La résistance à la compression est souvent considérée comme la propriété la plus importante du béton pour plusieurs raisons [27] :

- La résistance à la compression est généralement un bon indicateur de la qualité du béton, car elle est directement reliée aux propriétés de la pâte de ciment hydratée ;
- La résistance à la compression est un élément essentiel de la conception structural et est généralement requise pour assurer la conformité ;
- Plusieurs autres propriétés du béton, telle la résistance en traction, à la flexion et le module d'élasticité, sont directement reliés à la résistance à la compression.

Cette propriété est aussi la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des granulats recyclés. On définit celle-ci comme la contrainte maximale que peut subir une éprouvette de béton avant sa rupture.

La taille et la forme des éprouvettes peuvent avoir un impact significatif sur la résistance mesurée, notamment en raison de l'effet de masse et des différences d'hydratation dues aux variations de température.

Il est crucial de garantir que les bétons répondent aux normes de résistance et de dosage pour assurer leur qualité et leur performance. Pour ce faire, nous pouvons mettre en place un processus de contrôle de qualité comprenant des tests réguliers sur des échantillons représentatifs du matériau. Ces tests peuvent inclure des essais de compression et traction pour évaluer la résistance du béton, ainsi que des analyses de dosage pour vérifier la conformité aux spécifications requises. En mettant en œuvre un contrôle de qualité rigoureux, ainsi nous pouvons garantir que les bétons produits répondent aux normes requises et offrent une qualité optimale pour leur utilisation dans diverses applications.[13]

Lorsque le béton est testé sur des éprouvettes normalisées, les résultats peuvent différer de ceux obtenus à partir du béton utilisé dans une structure réelle en raison de ces facteurs. C'est pourquoi il est important de prendre en compte la méthode d'essai utilisée, ainsi que la référence à la norme spécifique, lors de l'interprétation des résultats de résistance en compression. Si l'on considère P comme la charge maximale de compression produisant l'éclatement du cylindre soumis à une compression verticale, la résistance en compression

doit être associée à la méthode d'essai spécifique utilisée et à l'échéance fixée. Cela signifie que la résistance en compression déterminée à partir d'éprouvettes normalisées doit être interprétée dans le contexte de la méthode d'essai et des conditions spécifiques dans lesquelles elle a été réalisée. [14]

La résistance en compression sera :

$$f_{cj} = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq I.2})$$

j : âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

P : Charge maximale de compression produisant l'éclatement du cylindre

S : Surface du cylindre.

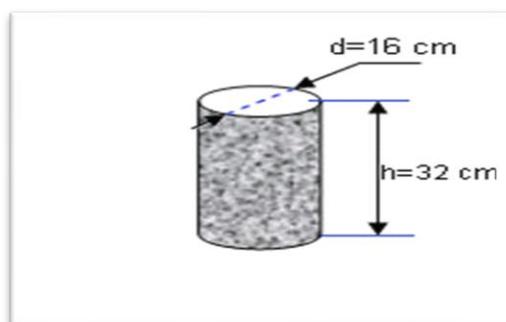


Figure I-8: Dimension normalisée d'éprouvette cylindrique

B. Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons est une autre propriété importante pour évaluer la qualité des bétons. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée essai brésilien ou par fendage. Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance à la traction permet d'estimer la charge sous laquelle la fissuration se développe [9].

Les chercheurs et ingénieurs ont effectivement entrepris des efforts considérables pour comprendre et caractériser la résistance à la traction du béton. Pour cela, différentes méthodes d'essai ont été développées afin de mesurer ce paramètre intrinsèque des matériaux de manière précise et fiable.

Ces trois essais présentés ci-après sont largement utilisés dans l'industrie de la construction et permettent d'évaluer la résistance du béton à la traction dans différentes conditions et configurations :

- **Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques NF P 18 407** : Cet essai consiste à soumettre une éprouvette de béton de forme prismatique à une charge de flexion. La résistance à la traction du béton est alors mesurée en fonction de la contrainte qui se développe à la surface opposée à la charge. Cette méthode est largement utilisée car elle permet une évaluation directe de la résistance à la traction du béton dans des conditions proches de celles rencontrées dans des applications réelles.[24]
- **Essai Brésilien NF P 18 408** : Aussi connu sous le nom d'essai de fendage par compression diamétrale, cet essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de béton à une force de compression appliquée le long de deux génératrices diamétralement opposées. La résistance à la traction du béton est ensuite calculée en fonction de la force de rupture et de la surface de section transversale de l'éprouvette. Cette méthode est particulièrement utile pour évaluer la résistance à la traction du béton dans des conditions de chargement différentes de celles de l'essai de flexion.[25]
- **Essai de traction directe NF P 18 409** : Dans cet essai, une force de traction est appliquée directement sur une éprouvette de béton. La résistance à la traction est mesurée en fonction de la charge maximale supportée par l'éprouvette avant sa rupture. Bien que moins courant que les deux premières méthodes, cet essai offre une évaluation directe de la résistance à la traction du béton dans des conditions de traction pure.[26]

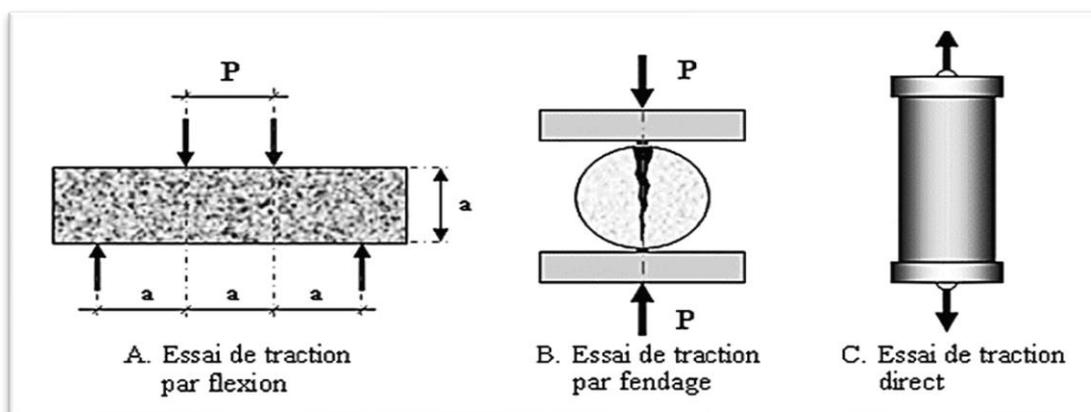


Figure I-9: Différents types d'essais de résistance en traction

Effectivement, même si les performances du béton sont satisfaisantes en compression, sa résistance à la traction peut souvent être limitée, restreignant ainsi son utilisation dans des applications où la traction est prédominante. Cette faible résistance à la traction est souvent le résultat d'une mauvaise adhérence du liant aux granulats, ce qui entraîne une fragilité accrue du matériau. Pour améliorer la résistance à la traction du béton, plusieurs approches peuvent

être envisagées, notamment l'utilisation de renforts tels que des fibres de verre ou d'acier, l'incorporation de matériaux adhésifs pour renforcer l'interface entre le liant et les granulats, ou encore l'optimisation de la formulation du béton pour améliorer ses propriétés de liaison. En prenant des mesures pour renforcer la résistance à la traction du béton, il est possible d'augmenter sa polyvalence et son utilisation dans une gamme plus large d'applications structurelles.[13]

Grâce à ces méthodes d'essai et à d'autres techniques de caractérisation, les chercheurs et les ingénieurs peuvent mieux comprendre le comportement du béton sous différentes sollicitations, ce qui contribue à l'amélioration continue de sa performance et de sa fiabilité dans une variété d'applications.[19]

I.6 Formulation du béton : Méthode de Dreux-Gorisse

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance). Les méthodes proposées sont nombreuses (Bolomey, D'abrams, Vallette, Fuller-Thompson, Caquot, Faury, Baron-Lesage, Féret...) [15], et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou, de préférence, pondéraux, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.[16]

La méthode de G. Dreux et L. Gorisse (1970) [15] rassemble les différentes méthodes de l'époque (Valette, Faury, Joisel, etc.) et en déduit une méthode pratique et simplifiée de formulation adaptée aux matériaux. Cette méthode est basée sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue permettant de produire un squelette granulaire le plus dense possible, et d'optimiser le dosage en ciment et en eau des bétons ordinaires.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides ;
- Détermination de la compacité du béton ;
- Détermination des masses de granulats.

Les résultats relatifs à chaque étape de calcul seront consignés dans le chapitre IV.

I.6.1 Objectif

L'objectif de cette méthode est de déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis, la nature et les quantités optimales de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m³).

Il s'agit de définir, en fonction du type d'ouvrage à réaliser, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre du béton et à la stabilité à court et long terme de l'ouvrage.

Les paramètres principaux devant être définis sont : la maniabilité et la résistance du béton, la nature du ciment et le type de granulats.

I.6.2 Critère de maniabilité

La maniabilité est caractérisée, entre autres, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff.). Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier (Tab I.2).

Tableau I-2: Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

I.6.3 Critère de résistance

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28}

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression (f_{c28}) nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28} \quad (\text{Eq I.3})$$

I.6.4 Choix du ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie σ'_c et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...). La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantit une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabricant est donnée dans le (Tab I.3).

Tableau I-3: Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

I.6.5 Détermination du rapport C/E

Le rapport $\frac{C}{E}$ est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{Eq I.4})$$

Avec :

σ'_{28} : Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa ;

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa ;

C : Dosage en ciment en kg par m³ de béton ;

E : Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton ;

G' : Coefficient granulaire (Tab.I.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau I-4: Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale

Qualité des granulats	Dimension D_{\max} des granulats		
	Fins $D_{\max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$	Gros $D_{\max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe)

1.6.6 Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure (I.10) en fonction des valeurs de $\frac{C}{E}$ et de l'affaissement au cône d'Abrams.

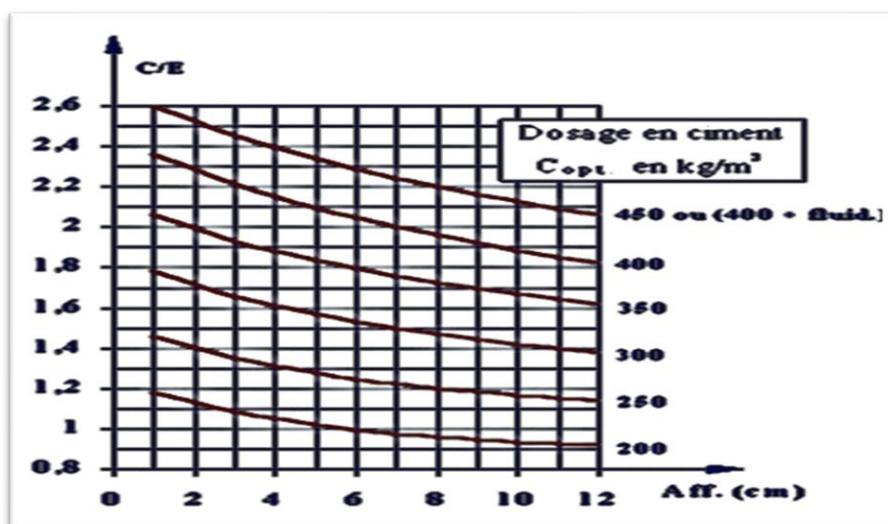


Figure I-10: Abaque permettant la détermination de C_{opt.}

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de $\frac{C}{E}$ et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt.}. Au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluid.) est indispensable.

1.6.7 Détermination de E

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

1.6.8 Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E

Lorsque la dimension maximale des granulats D_{max} est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections (Tab I.5) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé).

Tableau I-5: Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax

Dimension maximale des granulats (D _{max} en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

I.6.9 Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence ;
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux Tracé de la droite de référence de Dreux :
- La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = \frac{D_{\max}}{2}$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module } (X) = \left[\frac{\text{Module } (D_{\max}) + 38}{2} \right] \quad (\text{Eq I.5})$$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 (D_{\max})} + K' \quad (\text{Eq I.6})$$

Avec $K' = K + K_S + K_P$

Y : est donné en pourcentage de passants cumulés ;

K : est un coefficient donné par le tableau (I.6) ;

K_s et K_p : étant des coefficients correctifs définis par :

K_s : (correction supplémentaire en fonction de la granularité du sable) :

$$K_s = (6 M_f - 15) \quad \dots (\text{Eq I.7})$$

avec M_f le module de finesse du sable ;

K_p : (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

K_p = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Tableau I-6: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats figure (I.11).

I.6.10 Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure (I.11) des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

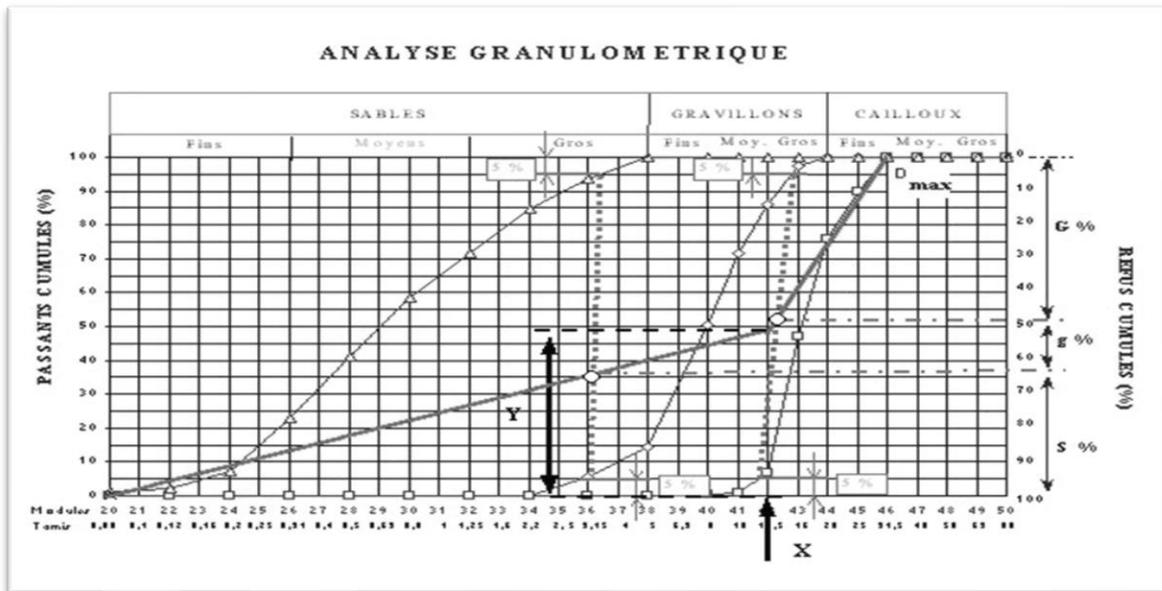


Figure I-11: Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

I.6.11 Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c_0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tab.1.7). Des corrections (c_1 , c_2 et c_3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tab.1.7) :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 \tag{Eq I.8}$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c) \tag{Eq I.9}$$

V_c : est le volume de ciment défini par :

$$V_c = \frac{c}{\rho_s(c)} \tag{Eq I.10}$$

$\rho_s(c)$: est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau I-7: Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	compacité (c ₀)						
		D _{max} = 5	D _{max} = 8	D _{max} =12,5	D _{max} = 20	D _{max} =31,5	D _{max} = 50	D _{max} = 80
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
<i>Nota :</i>								
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes : <i>Sable roulé et gravier concassé (c₁ = - 0,01)</i> <i>Sable et gravier concassé (c₁ = - 0,03)</i> ▪ Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : (c₂ = -0,03) * Pour un dosage en ciment C ≠ 350 kg/m³ on apportera le terme correctif suivant : (c₃ = (C - 350) / 5000) 								

I.6.12 Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$\begin{aligned}
 V_s &= V \cdot S \% \\
 V_g &= V \cdot g \% \\
 V_G &= V \cdot G \%
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} V_s \\ V_g \\ V_G \end{aligned}} \right\} \quad \text{(Eq I.11)}$$

$$\begin{aligned}
 S &= V \cdot S \% \cdot \rho_s(S) \\
 g &= V \cdot g \% \cdot \rho_g(g) \\
 G &= V \cdot G \% \cdot \rho_G(G)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} S \\ g \\ G \end{aligned}} \right\} \quad \text{(Eq I.12)}$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes :

$$\rho_s(c) = 3,1 \text{ t/m}^3, \rho_s(S) = 2,6 \text{ t/m}^3, \rho_s(g) = 2,6 \text{ t/m}^3 \text{ et } \rho_s(G) = 2,6 \text{ t/m}^3.$$

I.6.13 Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton $\Delta o = (E + C + S + g + G)$ est pour un béton courant comprise entre 2,3 t/m³ et 2,5 t/m³. La formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.

I.7 Conclusion

En conclusion, le béton continuera à jouer un rôle essentiel dans les constructions modernes et durables. Toutefois, il est impératif de poursuivre les efforts visant à améliorer les propriétés et à développer des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement. En investissant dans la recherche et l'innovation, nous pouvons garantir que le béton reste un pilier solide de l'industrie de la construction.

La résistance à la compression du béton dépend de la nature de ses composants, de leur dosage et des conditions de mise en œuvre, l'importance de la réaction chimique entre le ciment et l'eau, qui agit comme une colle pour lier les granulats entre eux. Cette réaction se produit principalement au cours des 28 premiers jours de l'âge du béton, période pendant laquelle la résistance continue à augmenter considérablement, passant d'une valeur initiale inférieure à 1 MPa à une valeur jusqu'à 30 fois supérieure après 28 jours.

Aussi Cette partie théorique nous a permis de conclure que le béton est un mélange homogène de granulats, de ciment, d'eau, dans des proportions étudiées. Pour obtenir un béton avec certaines performances désirées on doit appliquer des techniques ou des méthodes, qu'on appelle les méthodes de formulations. Il y a plusieurs systèmes et méthodes de formulation de béton. Parmi ces méthodes on a utilisé la formulation du béton par la méthode de Dreux-Gorisse ; elle offre l'avantage d'être simple et pratique car elle permet d'optimiser l'ouvrabilité et de déterminer le dosage des granulats, le dosage en eau et le dosage en ciment et elle est basée sur des abaques qui permettent d'évaluer approximativement le dosage en ciment et en eau à prévoir en fonction du rapport $\frac{C}{E}$ et de l'ouvrabilité désiré

Références

1. A.Guerrin et R.Laveur, Paris 1973 « Traité de béton armé »
2. Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques DEC LES EXPERTS – Tome1, 2009
3. LES EXPERTS, D. C. (2009). Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiches techniques. Tome, 2, 50-107.
4. Collection CIM béton. Fiches techniques. Tome 1 : 71 pages. Réf. G10. Editeur Cimbéton. Septembre 2005. F. Gorisse, Paris 1982 « les essais mécaniques : le béton hydraulique ». Presse de l'Ecole National des ponts et Chaussées
5. G-Dreux, éd Eyrolles Paris 1978 « Nouveau guide du béton »
6. B.Radjel et S.Benmedakhen « La pratique des essais destructifs . Article paraitre ».
7. Robert, L. E. Loïc DIVET. , Novembre 2013 , Étude de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures des bétons formulés avec des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau, Université Paris Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France
8. Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B., & Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, 21(10), 601-611.
9. Rachedi, M., Kriker, A., & Mokhtari, A. (2017). Contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier. *Journal of Renewable Energies*, 20(2), 243-251.
10. Nguyen, T. T. (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
11. Collet, Y. (1977). Etude des Propriétés du Béton soumis à des Températures Elevées. *Ann Trav Publics Belg*, (4).
12. Phommavong, Vimane., « Matériaux de construction », université nationale du Laos, Faculté d'ingénierie et d'architecture, 2006.
13. De Larrard, F., & Belloc, A. (1999). L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (219).
14. LECOMTE, A., & de LARRARD, F. R. A. N. C. O. I. S. (2001). Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (234).
15. Layada Samir, K. K. (2020). Etude et caractérisation d'un béton à base de recyclâts-Etat de l'Art. Kou, S. C., Poon, C. S., & Etxeberria, M. (2011). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 286-291.
16. AIAD, M. E., & ARIF, A. E. H. Etude d'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques du béton de la centrale à béton de la société SMC-Ouargla (Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA).
17. Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and building materials*, 23(2), 1163-1167.
18. CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and structures*, 2011, 44: 205-220.

19. YANG, Keun-Hyeok; CHUNG, Heon-Soo; ASHOUR, Ashraf. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. 2008.
20. Abd Elhakam, A., & Awad, E. (2012). Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 421-427.
21. Gorisse, F. (1982). Les essais mécaniques. Le béton hydraulique, connaissance et pratique ».
22. Gorisse, F. (1980). Les essais mécaniques. Le béton hydraulique, connaissance et pratique ».
23. F. Gorisse, Paris 1978 « essai et contrôle du béton »
24. F. Gorisse, Paris 1979 « essai et contrôle du béton »
25. Fathifazl, G. (2008). Structural performance of steel reinforced recycled concrete members (Doctoral dissertation, Carleton University).
26. De Oliveira, M. B., & Vazquez, E. (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste management*, 16(1-3), 113-117.
27. Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.
28. TOPCU, Ilker Bekir; ŞENGEL, Selim. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 2004, 34.8: 1307-1312.

CHAPITRE II

Granulats recyclés

II.1 Introduction

Effectivement, le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé à travers le monde en raison de sa polyvalence, de sa durabilité et de sa disponibilité. Cependant, son utilisation généralisée pose des défis environnementaux importants. La production de béton nécessite d'importantes quantités de ressources naturelles, notamment du gravier et du sable. L'extraction de ces matériaux peut entraîner la destruction des écosystèmes locaux, la dégradation des sols et la déplétion des ressources.

De plus, la fabrication du ciment, un composant clé du béton, est responsable d'une quantité importante d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂), contribuant ainsi au changement climatique.

Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton. Cette approche consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires des résidus industriels, afin de remplacer le ciment dans le béton, et d'utiliser les matériaux recyclés pour la réalisation des bétons, ce qui permettra d'augmenter la production de ce dernier à un coût compétitif, et protéger la nature des stocks grandissants des résidus industriels.

Le recyclage du béton est une méthode de plus en plus courante d'élimination des gravats de démolition et peut fournir une source durable d'agrégats de béton. [1]

Le recyclage du béton présente plusieurs avantages et devrait être développé pour plusieurs raisons principales :

- **Pression sur l'utilisation des terres** : Les terrains disponibles pour l'extraction de matériaux de construction sont de plus en plus limités en raison de la compétition pour l'utilisation des sols, notamment pour le développement résidentiel, agricole et industriel. Les politiques publiques visent souvent à limiter l'expansion des carrières pour préserver les terres.[2]
- **Restriction environnementale** : L'exploitation de nouvelles carrières peut entraîner des impacts environnementaux significatifs, tels que la destruction des habitats naturels, la dégradation des paysages et la pollution de l'air et de l'eau. Les réglementations environnementales de plus en plus strictes limitent souvent l'ouverture de nouvelles carrières.[3]

- **Gestion des déchets de construction** : La mise en décharge des déchets de construction et de démolition (DCD) est de plus en plus réglementée en raison de son impact sur l'environnement. Les gouvernements cherchent à promouvoir le recyclage et la réutilisation des matériaux de construction pour réduire la quantité de déchets envoyés en décharge.[4]
- **Réduction des émissions de CO₂** : En utilisant des matériaux recyclés localement, on réduit la distance de transport nécessaire pour acheminer les matériaux de construction sur le chantier. Cela permet de diminuer les émissions de dioxyde de carbone associées au transport, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.[5] ; Et Moins de camions circulant sur les routes pour transporter des matériaux de construction signifie moins de pollution atmosphérique et sonore, ainsi qu'une réduction du risque d'accidents liés à la circulation routière, ce qui améliore la qualité de vie des habitants des zones urbaines.

Enfin, il est essentiel que l'industrie du béton progresse dans le domaine du recyclage pour pouvoir rivaliser avec d'autres matériaux de construction tels que l'acier ou les enrobés bitumineux, qui bénéficient déjà de procédés et de circuits de recyclage bien établis. Le recyclage du béton est crucial pour réduire son empreinte environnementale et le rendre plus compétitif sur le plan environnemental par rapport à d'autres solutions de construction. En intégrant la capacité à réutiliser ses propres déchets dans les méthodes d'évaluation environnementale, cela renforce l'incitation pour l'industrie du béton à investir davantage dans le recyclage et le développement de technologies plus efficaces.

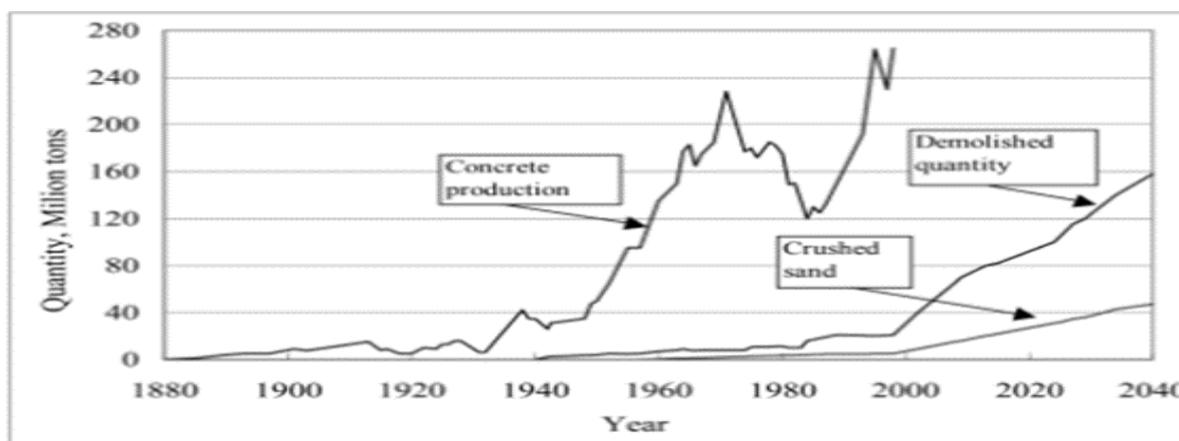


Figure II-1: Développement de la production de béton avec la quantité démolie estimée et le sable recyclé (Allemagne de l'ouest) [2,3]

II.2. Définition

Le recyclage du béton est un ensemble de techniques utilisées afin de revaloriser les déchets inertes produits par le béton, par exemple, lorsque les structures en béton sont démolies, autrefois transporté par le camion vers les décharges pour enfouissement. Le recyclage du béton est une alternative de plus en plus valorisée il présente de nombreux avantages sur le plan écologique à l'heure de convergence des problèmes environnementaux. Chaque année, le secteur du BTP génère 300 millions de tonnes de déchets qui ne sont pas valorisés, le recyclage des déchets se présente donc comme une bonne alternative à l'enfouissement [6].



Figure II-2: Recyclage du béton [6]

II.3 Techniques et matériaux de démolition

Les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable. Plusieurs études ont montré que la démolition sélective était techniquement et économiquement réalisable [7].

Dans le cas d'une démolition complète, les déchets inertes représentent 94 % des déchets générés, mais, dans la pratique, 60 % de certains déchets non inertes restent associés aux déchets inertes (par exemple, restes de plâtre sur le béton, bois et plastiques non retirés des murs [8]). Aujourd'hui, si le recyclage et la valorisation des déconstructions de tout béton dépasse 75 %, le taux n'est que de 12 % pour les déchets inertes mixtes [9]. En France, cette

situation devrait évoluer en raison de l'application des « Plans de Prévention et de Gestion de Déchets de Construction et de Démolition », qui imposent un diagnostic préalable à la démolition.

II.3.1 Démolition par dynamitage

Le dynamitage est l'une des méthodes de démolition les plus efficaces pour fragiliser ou provoquer l'effondrement contrôlé de structures de bâtiments. Selon le type de bâtiment et les objectifs de la démolition, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Ces techniques peuvent également être appliquées de manière sélective pour démolir des parties spécifiques d'un bâtiment tout en préservant d'autres sections.

Avant d'effectuer le dynamitage, il est crucial de nettoyer le bâtiment et de trier les matériaux récupérés. Ce processus de nettoyage et de tri permet de garantir une gestion appropriée des déchets de démolition, en séparant les matériaux recyclables, réutilisables ou dangereux des déchets non recyclables. Cela contribue à réduire l'impact environnemental de la démolition en favorisant le recyclage et la réutilisation des matériaux et en minimisant la quantité de déchets envoyés en décharge.

Les techniques de dynamitage doivent être mises en œuvre avec soin et conformément aux réglementations locales et aux normes de sécurité pour garantir la sécurité des travailleurs et du public environnant. Une planification minutieuse, une expertise technique et une gestion rigoureuse des déchets sont essentielles pour mener à bien un projet de démolition par dynamitage de manière sûre et efficace [22]

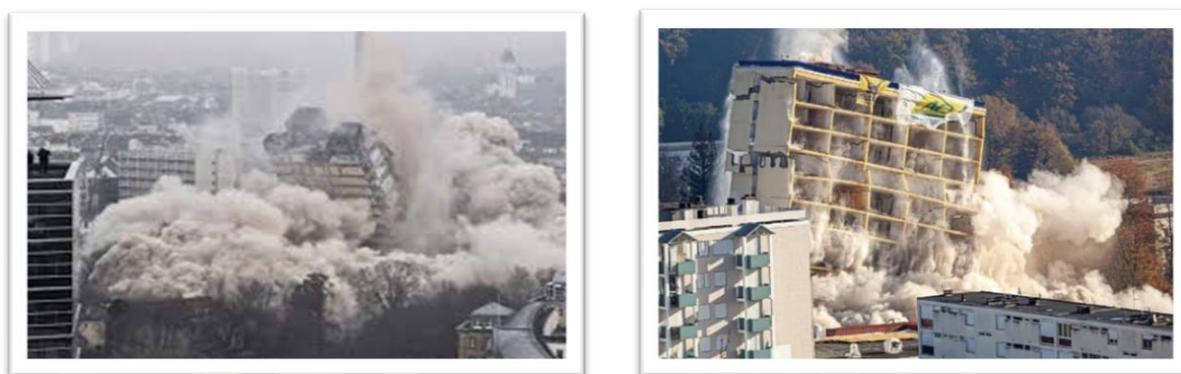


Figure II-3: Démolition par dynamitage [22]

II.3.2 Démolition à l'aide d'une tenaille

La démolition à l'aide d'une tenaille est une méthode manuelle de déconstruction qui implique l'utilisation d'une pince ou d'une pince à démolition pour démanteler les éléments structurels d'un bâtiment, tels que les poutres en bois, les cadres métalliques, les cloisons légères, etc.

La démolition à l'aide d'une tenaille est souvent utilisée pour des projets de démolition sélective où une précision et un contrôle supplémentaires sont nécessaires pour préserver certaines parties de la structure ou pour travailler dans des espaces restreints où l'utilisation d'équipements lourds est difficile.



Figure II-4: Démolition à l'aide d'une tenaille[25]

II.3.3 Technique de démolition à l'aide d'outils à main

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lent et coûteuse, mais elle permet un bon tri si elle est bien faite [25].

II.3.4 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets, sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent [25].

II.4 Composition du granulat recyclé

Les granulats recyclés (GR) sont des matériaux obtenus à partir du recyclage des déchets de construction et de démolition (DCD), tels que le béton, les briques, les pavés, etc. Le processus de recyclage consiste généralement à concasser les déchets de construction en granulats de différentes tailles, qui peuvent être réutilisés dans la construction de nouvelles structures.

Un granulat de béton recyclé (GR) est un matériau composite composé de deux phases distinctes. La première phase est constituée d'un granulat naturel (GN), tandis que la deuxième phase est formée d'une pâte cimentaire généralement adhérente au GN. Cette pâte cimentaire peut envelopper totalement ou partiellement le GN, et le ratio de chaque phase dépend de la composition initiale du béton.

La distinction entre un GN et un GR réside dans la présence de la pâte cimentaire. Alors que le GN est monophasique, le GR est biphasique. Les propriétés physiques et mécaniques des GR dépendent principalement des caractéristiques des deux phases, à savoir le GN et la pâte cimentaire qui constitue le GR. La pâte cimentaire adhérente présente une porosité élevée, ce qui altère les propriétés des GR et les différencie de celles des GN. [22]

Les propriétés chimiques des granulats recyclés dépendent largement des matériaux d'origine et des procédés de recyclage utilisés. Voici quelques-unes des compositions chimiques typiques que l'on peut trouver dans les granulats recyclés :

- **Ciment** : Les granulats recyclés provenant du béton peuvent contenir des traces de ciment, de mortier ou d'autres adhésifs utilisés dans la construction d'origine ;
- **Minéraux divers** : Les granulats recyclés peuvent contenir une variété de minéraux provenant des matériaux de construction d'origine, tels que le quartz, le feldspath, le calcaire, etc ;
- **Composés organiques** : Des traces de composés organiques, tels que des résidus de bois, de plastique ou d'autres matériaux organiques présents dans les déchets de construction, peuvent également être présents dans les granulats recyclés.

Lorsque le béton est concassé pour produire des granulats de béton recyclés (GBR), une partie de la pâte de ciment d'origine reste attachée aux grains. Cette pâte de ciment adhérente (mortier adhérent), également appelée pâte de ciment durcie (PCD) résiduelle ou mortier attaché (MA), peut avoir une composition et une structure différentes de celles des granulats naturels utilisés dans la fabrication du béton.

La pâte de ciment durcie présente généralement une porosité plus élevée que les granulats naturels, ce qui peut avoir un impact significatif sur les propriétés du béton recyclé. Une pâte de ciment résiduelle plus poreuse peut entraîner une moins bonne interconnexion entre les grains dans le béton recyclé, ce qui peut affecter sa résistance, sa durabilité et d'autres propriétés mécaniques.

En outre, la présence de pâte de ciment durcie peut également modifier la réaction ciment-eau dans le mélange de béton recyclé, ce qui peut influencer le durcissement et la résistance finale du matériau.

Pour améliorer les propriétés des granulats de béton recyclé, il est important de contrôler et de minimiser la quantité de pâte de ciment résiduelle lors du processus de recyclage. Cela peut être réalisé par des techniques de tri et de criblage appropriées, ainsi que par l'utilisation de procédés de concassage et de broyage qui favorisent la séparation efficace de la pâte de ciment des granulats. De plus, des traitements de surface ou des modifications chimiques peuvent être envisagés pour améliorer les propriétés des granulats recyclés et optimiser leur utilisation dans la fabrication de béton recyclé.

II.4.1 Mortier attaché

Le mortier attaché dans le béton recyclé est composé principalement de ciment, de sable et d'eau, tout comme dans le béton ordinaire. Cependant, dans le béton recyclé, ce mortier peut contenir des quantités variables de matériaux recyclés provenant du béton démantelé ou d'autres sources. Ces matériaux recyclés peuvent inclure des agrégats concassés provenant de béton recyclé, ainsi que des fines de béton recyclé.

La présence d'agrégats recyclés dans le mortier attaché peut influencer ses propriétés adhésives et mécaniques. Les fines de béton recyclé, en particulier, peuvent modifier la texture et la composition du mortier, ce qui peut avoir des implications sur sa résistance, sa cohésion et son adhérence aux agrégats recyclés.

Sur le plan scientifique, l'étude du mortier attaché dans le béton recyclé implique généralement des analyses de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Cela comprend des tests pour évaluer sa résistance à la compression, sa résistance à la traction, son adhérence aux agrégats recyclés, sa porosité, etc. Plusieurs approches ont été tentées pour quantifier cette teneur, mais en raison de sa complexité, elles n'ont pas abouti à des résultats concluants [9].

Les méthodes expérimentales se sont donc concentrées sur la mesure de la teneur en mortier adhérent (MA), le mortier adhérent est a priori plus facile à quantifier expérimentalement, bien que sa définition soit plus ambiguë. En effet, la quantification de la teneur en mortier adhérent dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer le mortier du béton, généralement fixée à (4 à 5 mm) [9].

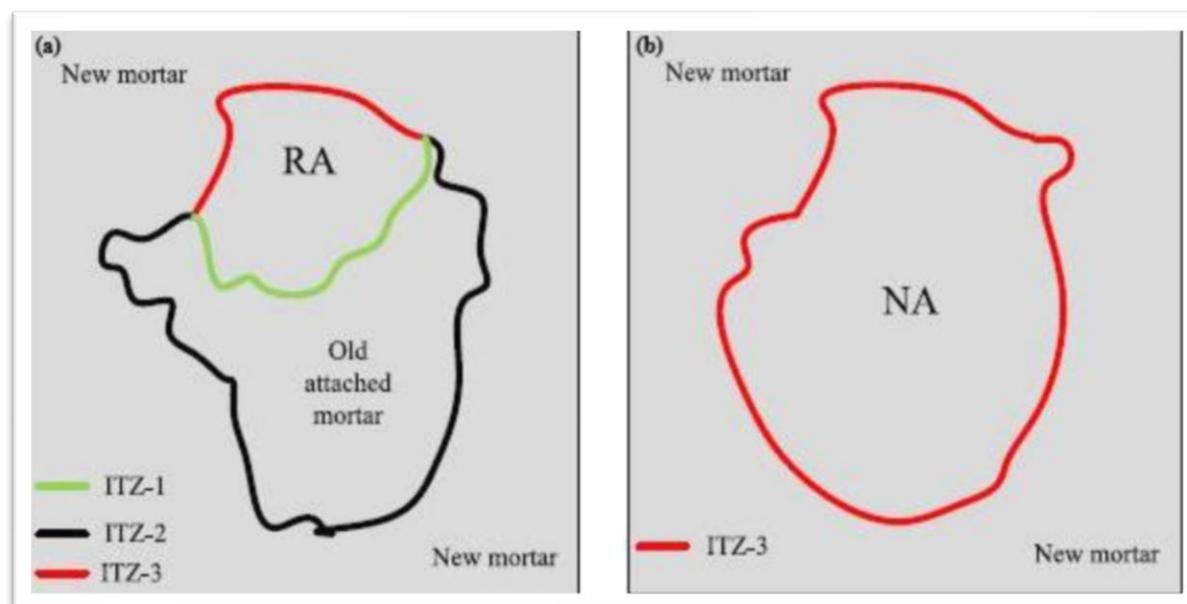


Figure II-5: Différentes zones de transition interfaciale (ZTI) dans- (a) le GR, et (b) le GN[9]

Les méthodes thermomécaniques cherchent à séparer le MA des gravillons en favorisant le développement de fissures entre les deux phases. En exemple [10] une méthode thermique particulière où les GBR sont tout d'abord immergés dans l'eau pendant 2 heures pour quasi-saturer le mortier adhérent, puis chauffés à 500 °C pendant 2 heures, et immergés une nouvelle fois dans l'eau froide. Le traitement thermique à 500 °C génère de la vapeur d'eau à l'intérieur du MA saturé, et le refroidissement brusque des granulats induit des contraintes et des fissures à l'interface entre mortier et granulat. Ces deux étapes permettent ensuite une séparation plus facile des deux matériaux. La faible quantité de mortier qui, généralement, reste encore attachée aux granulats est enlevée avec un maillet en caoutchouc.

La teneur en MA est calculée à partir de la perte de masse entre le gravillon de GBR d'origine et le gravillon propre obtenu. L'échantillon est alors tamisé à 4 mm pour récupérer le gravillon sans mortier. La teneur en ciment dans la PCD peut également être évaluée en s'intéressant à des traceurs propres au ciment, tels SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ [10].

Les GBR sont tout d'abord broyés jusqu'à 315 μm puis immergés dans une solution d'acide nitrique diluée (1/50). Après filtration, la solution est analysée et la teneur en PCD est déterminée à partir du rapport entre la masse de SiO_2 par gramme de GBR et la fraction massique de SiO_2 contenue dans le ciment.

II.5 Propriétés des granulats de béton recyclés GBR

II.5.1 Caractéristiques physiques des GBR

II.5.1.1 Masse Volumique

Les propriétés physiques, comme la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau (A_b), sont des propriétés très importantes pour la réutilisation des GBR dans le béton. La masse volumique est définie comme le rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat et le volume qu'il occupe dans l'eau. Jusqu'à présent, il n'existe pas de norme particulière pour mesurer la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes dédiées aux granulats naturels, telles (NF P18-554) (pour les gravillons) et (NF P18-555) (pour les sables) sont donc aussi utilisées pour les GBR. En général, la masse volumique des granulats recyclés (GR) est inférieure à celle des granulats naturels (GN)[11].

Selon la littérature, la masse volumique des granulats recyclés (GR) se situe généralement entre 2400 à 2500 kg/m^3 , tandis que les granulats naturels (GN) ont généralement une masse volumique d'environ 2750 kg/m^3 . Cette réduction de la masse volumique des granulats recyclés est attribuée à la présence du mortier résiduel, qui a une masse volumique plus faible que le granulat d'origine, entraînant ainsi une diminution de la masse volumique totale du granulat recyclé [12].

II.5.1.2 Coefficient d'Absorption d'eau (A_b)

L'absorption d'eau correspond au rapport entre la masse d'eau absorbée par un échantillon de granulat après immersion dans l'eau et sa masse sèche. Le granulat est tout d'abord immergé 24 h dans l'eau, puis le coefficient d'absorption d'eau (A_{b24}) est déterminé en mesurant la teneur en eau à l'état Saturé Surface Sèche (SSS). À ce stade, les pores accessibles à l'eau sont supposés saturés d'eau, la surface des grains étant sèche (seul un mince film d'eau adsorbée persiste).

L'état SSS des gravillons est obtenu en essuyant les grains un à un avec un chiffon sec ou des feuilles de papier absorbant jusqu'à ce que l'eau ne soit plus visible en surface. Les études

réalisées sur les GR ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grandes pour les GR que les granulats naturels.

Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le GR et le GN. Les valeurs d'absorption des GR se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un GN celles-ci sont souvent de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5% [13]. La mesure de l'absorption d'un GR est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel, une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel [14] et par le fait même, un impact plus important sur les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée.

Comme l'absorption du GR est beaucoup plus grande que celle du GN, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport eau sur liants E/L. Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du GR asséché. L'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [15].



Figure II-6: Absorption des granulats recyclés en fonction de temps

II.4.3 Caractéristiques mécaniques des GBR

II.4.3.1 Résistance aux chocs et à l'abrasion

L'essai Los Angeles (LA) est le plus souvent retenu pour déterminer la résistance aux chocs et à l'abrasion des divers GR. Les recommandations de la norme européenne [16] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des GR pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient LA, réalisé selon la norme [17] des GN. En général, la valeur du coefficient LA mesurée sur les matériaux de construction recyclés (CR) est comprise entre 20 et 40. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des GN, c'est la teneur en mortier des (GR) qui explique cette différence [18]. Il a été également remarqué que les deux types de GN et GR, présentent une augmentation presque identique de leur coefficient LA, lorsque leur masse volumique diminue, avec un taux de variation très proche.



Figure II-7: machine Los Angeles

Le test Micro-Deval (MDE) est l'une des méthodes largement utilisées pour mesurer la résistance au polissage et à l'abrasion des granulats. Ce test a été développé à l'origine en France dans les années 1960 et est depuis lors accepté comme test standard de l'Union européenne (EN 1097-1) et comme test standard en Amérique du Nord. Dans l'appareil MDE, les agrégats qui interagissent les uns avec les autres sont exposés à des billes d'acier et à de l'eau dans un récipient en acier rotatif. Après polissage, le coefficient Micro-Deval (MDE) est calculé, qui décrit la perte de poids résultant du polissage. Un MDE plus élevé signifie une résistance à l'usure plus faible des granulats [18].



Figure II-8: Machine Micro-Deval

II.5.3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression est une propriété clé étudiée dans le contexte des bétons incorporant des granulats recyclés. L'impact de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur la résistance à la compression dépend du taux de remplacement, et il est crucial de comprendre comment cela affecte la qualité globale du béton.[19]

L'impact du remplacement du GN par un GR sur la résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement. Il est généralement reconnu que pour une formulation traditionnelle du béton et un taux de remplacement de 100 % du GN une diminution de la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont trouvé une diminution de 10 % de la résistance à l'âge de 28 jours du béton [20].

Des résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon les résultats de Ajdukiewicz, A. et Kliszczewicz [20], la résistance à 28 jours est de 20 à 25% plus faible, de 33% et 23% selon Ravindrarajah, R. et Tam [19], de 22% selon Braymand, S [23], alors que selon Al-Harhi, A [15] la résistance à 28 jours est la même que pour le béton témoin. Il est, cependant, à noter que dans le cas de cette étude un rapport $\frac{E}{C}$ très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulat naturel (GN) par un granulat recyclé (GR) n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés (GR).

L'incorporation de granulats de béton recyclé (GBR) dans les mélanges de béton peut avoir un impact variable sur la résistance à la compression du béton, et il est souvent difficile d'obtenir des conclusions univoques en raison de plusieurs facteurs :

- **Comparaison avec des bétons de référence :** Les études sur les bétons de GBR comparent généralement leurs performances à celles des bétons traditionnels à base de granulats naturels. Cependant, la qualité et les propriétés mécaniques du granulat naturel utilisé comme référence peuvent varier considérablement, ce qui peut influencer les résultats de l'étude.
- **Différentes stratégies de comparaison :** Les chercheurs adoptent différentes approches pour comparer les bétons avec différents taux de recyclage, notamment en maintenant le même rapport eau/ciment total (E_{tot}/C), le même rapport eau/ciment efficace (E_{eff}/C), ou encore en maintenant la même maniabilité, ce qui entraîne différents rapports E_{eff}/C . Ces variations dans les méthodologies peuvent conduire à des résultats contradictoires.
- **Caractéristiques des granulats :** L'influence des GBR, tout comme celle des granulats naturels, dépend de leur forme, de leur taille, de leurs propriétés mécaniques, etc. Des variations dans ces caractéristiques peuvent affecter la performance globale du béton.

II.5.3.3 Résistance à la traction par flexion

Comme plusieurs autres propriétés du béton, la résistance à la traction du béton diminue lorsque le taux de remplacement des GN par des GR augmente [10] et plus la variation du taux de remplacement du GN par les GR, la résistance à la traction diminue quand la porosité augmente.

Dans l'étude [12], l'impact du remplacement de deux GR à porosité différentes a été évalué, il a été observé que la résistance à la traction était moins grande pour le béton utilisant un GR très poreux que pour un GR peu poreux. Selon, le remplacement d'un GN par un GR aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction des bétons recyclés que sur la résistance à la compression.

Il est courant de constater des variations dans les résultats des études sur la résistance en traction des bétons recyclés, même si la plupart convergent vers une conclusion générale : une perte de résistance pour le béton recyclé par rapport au béton standard. Ces différences peuvent être dues à plusieurs facteurs, certains ont obtenu une réduction de 15 à 20% à un taux de remplacement de 100% et d'autres une perte de moins de 10% pour un essai réalisé à 28 jours [21].

II.6 Conclusion

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés d'un mélange intime de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durci (PCD) adhérente. Les GBR sont donc plus hétérogènes que les GN. En outre, en raison de leur composition particulière, ils possèdent des propriétés qui diffèrent sensiblement de celles des GN. En particulier, la présence de la pâte de ciment durci adhérente qui procure aux GBR une porosité et une absorption d'eau (A_b) plus élevées, ainsi qu'une masse volumique réelle plus faible. L'absorption d'eau élevée des GBR peut avoir une influence significative sur les propriétés du béton recyclé. Cela peut conduire alors à des propriétés différentes de celles attendues, tant pour le matériau frais que pour le matériau durci.

La résistance des granulats de béton recyclé est influencée par la présence du mortier primaire. La fragilité du mortier adhérent au granulat recyclé induit une diminution de la résistance à la fragmentation se traduisant par un coefficient de Los Angeles (LA) plus élevé que celui obtenu pour des granulats naturels.

L'utilisation des granulats recyclés dans la construction de béton représente une solution prometteuse pour répondre aux défis environnementaux et économiques auxquels nous sommes confrontés. Il est possible de promouvoir davantage l'utilisation de ces matériaux recyclés et de contribuer ainsi à la construction d'un avenir plus durable pour les générations futures.

Références

1. Ong, K. C. G., and R. Ravindrarajah Sri. "Mechanical properties and fracture energy of recycled-aggregate concretes." (1987).
2. Solyman, Mahmoud. *Classification of Recycled Sands and Their Applications as Aggregates for Concrete and Bituminous Mixtures: Vol. 5.* kassel university press GmbH, (2006).
3. Bayard, R., Ch De Brauer, G. Ducom, P. Naquin, B. Sarrazin, F. Achour, M. Rouez, and J. De Araujo Morais. "Influence du prétraitement mécanique et biologique des ordures ménagères résiduelles sur leurs caractéristiques bio-physico-chimiques." *Techniques Sciences Méthodes* 5 (2007): 93-106.
4. Guyard, Paul, Myriam Saade, and Adelaide Feraille. "Carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés quels bénéfices environnementaux ?" *Academic Journal of Civil Engineering* 40, no. 3 (2022): 117-131.
5. GOUFI, N., et al. (2018) Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques de bétons de granulats recyclés. *Academic Journal of Civil Engineering*, 36.1: 150-154.
6. LIPPIATT, Nicholas Richard. (2014) Études sur la texture du béton pour le développement d'un processus de recyclage du béton en utilisant un chauffage par micro-ondes. PhD Thesis. Toulouse, INPT.
7. Zaitri, R., Bederina, M., Dif, F., & Guetaf, Y. (2015, May). Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*.
8. Éric Garcia-Diaz, (2018), *Le béton recyclé, de la fabrication au durcissement*, de Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques.
9. Akbarnezhad A, Ong K, Zhang M, Tam C. (2013), Acid Treatment Technique for Determining the Mortar Content of Recycled Concrete Aggregates *Journal of Testing and Evaluation* 41:441-50.
10. C. Gao, L. Huang, L. Yan, R. Jin, H. (2020) , Chen, Mechanical properties of recycled aggregate concrete modified by nano-particles, *Constr. Build. Mater.* 241.
11. Topc_u IB. (1997) Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement Concrete Res* ; 27(12):1817–23.
12. Chakradhara Rao, M., S. Bhattacharyya, and S. Barai, (2011), Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and structures.* 44 : p. 205-220.
13. Tam, V. W., Gao, X. F., Tam, C. M., & Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and building materials*, 22(3), 364-369.
14. Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, 2(5), 1204-1225.
15. Al-Harhi, A. (2001). A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, 193-200.
16. NF EN 1097-2. Juin (2010). AFNOR. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation

17. Zega, C. J., Villagrán-Zaccardi, Y. A., & Di Maio, A. A. (2010). Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures*, 43(1), 195-202.
18. Wang, D., Wang, H., Bu, Y., Schulze, C., & Oeser, M. (2015). Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques. *Wear*, 338, 288-296.
19. Sri Ravindrarajah, R. and Tam, C. T. (1985), "Properties of Concrete Made With Crushed Concrete as Coarse Aggregate," *Mag. Concrete Res.*, Vol. 37(130), pp. 29–38.
20. Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and concrete composites*, 24(2), 269-279.
21. Zhao, Z., Courard, L., Michel, F., Remond, S., & Damidot, D. (2016). Influence de la fraction granulaire et de l'origine des granulats recyclés sur leurs propriétés. In *Rencontres Universitaires de Génie civil*.
22. Bénazet, J. (1997). *Techniques des démolitions à l'explosif*. Editions TI.
23. Braymand, S. (2010). Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons. In *Actes du colloque Matériaux*.
24. Maillot, R. (2001). *Mémento technique des granulats*. Presses des MINES.
25. Da Costa, M. (2009). *Processes of demolition of structures*. Civil Engineering MSc Thesis, Aveiro, Portugal, University de Aveiro.
26. Coelho, A. (2013). Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW). In *Handbook of recycled concrete and demolition waste* (pp. 141-185). Woodhead Publishing.

CHAPITRE III
Protocole expérimental

III.1 Introduction

Dans cette partie nous exposons les différents essais réalisés sur les constituants pour formuler le béton recyclé et le béton ordinaire témoin, ainsi on a évalué les propriétés du béton à différents stades, à la fois à l'état frais et durci, dans le but de garantir les performances et les qualités de ce nouveau béton. Les essais couramment réalisés sont :

- Essais physiques pour les matériaux utilisés (ciment, sable et gravier) ;
- Essais mécaniques de compression et de flexion par traction sur le béton ordinaire (BO), et béton recyclé (BR).

Dans ce paragraphe, nous nous concentrons sur la présentation des matériaux utilisés pour préparer les différents mélanges de béton étudiés, ainsi que sur la méthodologie employée dans cette recherche expérimentale. Les caractéristiques des matériaux et des bétons ont été étudiées au laboratoire du département de génie civil.

Nous avons effectué une analyse détaillée des caractéristiques des granulats recyclés (GR) et des granulats naturels (GN) qui sont intégrés dans la composition des bétons examinés. Cette analyse comprend divers paramètres tels que la granulométrie, la densité, l'absorption d'eau et les résistances mécaniques, entre autres, tous les essais ont été réalisés conformément aux normes et aux protocoles établis afin d'assurer la fiabilité et la précision des résultats dont l'objectif est de mieux comprendre les propriétés des GR et GN. Ces données serviront de base pour formuler les différents mélanges de béton et pour évaluer leurs performances.

Cette étude se propose d'analyser l'impact de la teneur en granulats recyclés (GR) et de leur qualité (résistance), sur les propriétés mécaniques du béton recyclés (BR). À cette fin, trois bétons recyclés BR-1, BR-2 et BR-3 ont été élaborés, avec des proportions de granulats recyclés de 50% et 100%. Les matériaux recyclés utilisés dans ces travaux sont exclusivement issus de trois bétons parents (BP), confectionnés en laboratoire. Le concassage et le criblage de ces (BP), préalablement caractérisés, permettent ainsi de produire des (GR) de composition maîtrisée.

Le protocole expérimental ci-après définit la méthode mise en œuvre afin de caractériser les granulats recyclés résultant de concassage des bétons parents 1,2 et 3. Il est décomposé en deux cycles :

- La fabrication des granulats recyclés issus de trois bétons parents (BP), concassage et fabrication des familles de (GR) de nature et de granulométrie différentes ;

- La caractérisation des (GR) qui a été réalisée avec les moyens d'essais du laboratoire.

III.2 Les Matériaux Utilisés

D'après les chapitres I, II précédents, nous avons identifié les critères nécessaires que doivent remplir les matériaux utilisés pour confectionner un béton qui atteint les performances désirées. Il est largement connu que le béton est un matériau composite, et que ses propriétés à l'état frais et à l'état durci, telles que la résistance à la compression, dépendent de la nature, de la qualité et du dosage de ses composants. C'est pourquoi il est essentiel de caractériser ces composants de manière approfondie. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux et qui sont respectivement :

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans la préparation des différents bétons est **CEMII / B-L 42,5 N MATINE** répond aux normes **NA 442** , fabriqué par **LAFARGE**.



Figure III-1: Ciment CEMII / B-L 42,5 N (MATINE)

III.2.2 Les granulats

On a utilisé trois types de granulats :

III.2.2 1 Sable naturel :

Le sable est un matériau granulaire polyvalent largement utilisé dans divers domaines, avec sa principale application étant la fabrication du béton. Toutefois, il est important de souligner que le sable est une ressource non renouvelable.

On a utilisé un sable qui se trouve sur le marché de **GUELTET SIDI SAÂD** de la **Wilaya de Laghouat**.

III.2.2 2 Granulats naturels : (concassés) (graviers (3/8,8/15))

Les graviers, caractérisés par leurs classes granulaires relativement grossières, sont des agrégats dont la taille est généralement plus importante. Par conséquent, la séparation entre les agrégats et les éléments fins ne s'effectue pas par sédimentation, comme c'est le cas pour les matériaux plus fins, mais plutôt par lavage. Les graviers utilisés dans la confection des bétons de classes (3/8),(8/15) sont d'origine Dolomitique et proviennent de la carrière de « Ben Brahim » sise à Rechaiga située dans la région Sud de Tiaret.



Figure III-2: Préparation de gravier naturel (lavage et séchage)

III.2.2 3 Granulats recyclé (3/8, 8/15)

Tout d'abord, les trois bétons parents (BP-1 avec une résistance de 36.33 MPa, BP-2 avec 45.75 MPa et BP-3 avec 53.86 MPa), ont été fabriqué avec 100% de granulats naturels. Les granulats recyclés issus des BP sont :

- Un GBR-1 donne un béton recyclé BR-1 ;
- Un GBR-2 donne un béton recyclé BR-2 ;
- Et un GBR-3 donne un béton recyclé BR-3.

Les granulats recyclés élaborés des trois BP sont passés par les étapes suivantes :

- Fragmentation des blocs de béton (éprouvettes cylindriques de béton déjà compressés) ;
- À l'aide d'un marteau piqueur, et à l'aide d'un marteau, on a brisé les fragments du béton à des dimensions adaptées ;
- En suite le granulats recyclés a été obtenue en écrasant les fragments du béton dans un concasseur à mâchoires ;
- Les fractions grossières (3/15 mm) et fines ont été séparées par tamisage ultérieur. De cette façon, la proportion d'agrégats est restée constante dans tous les mélanges figure (III.3).



Fragmentation des blocs de béton



Écrasement des fragments dans le concasseur



Granulats de béton recyclé GBR



Séparation des fractions par tamisage

Figure III-3: Préparation des granulats recyclés

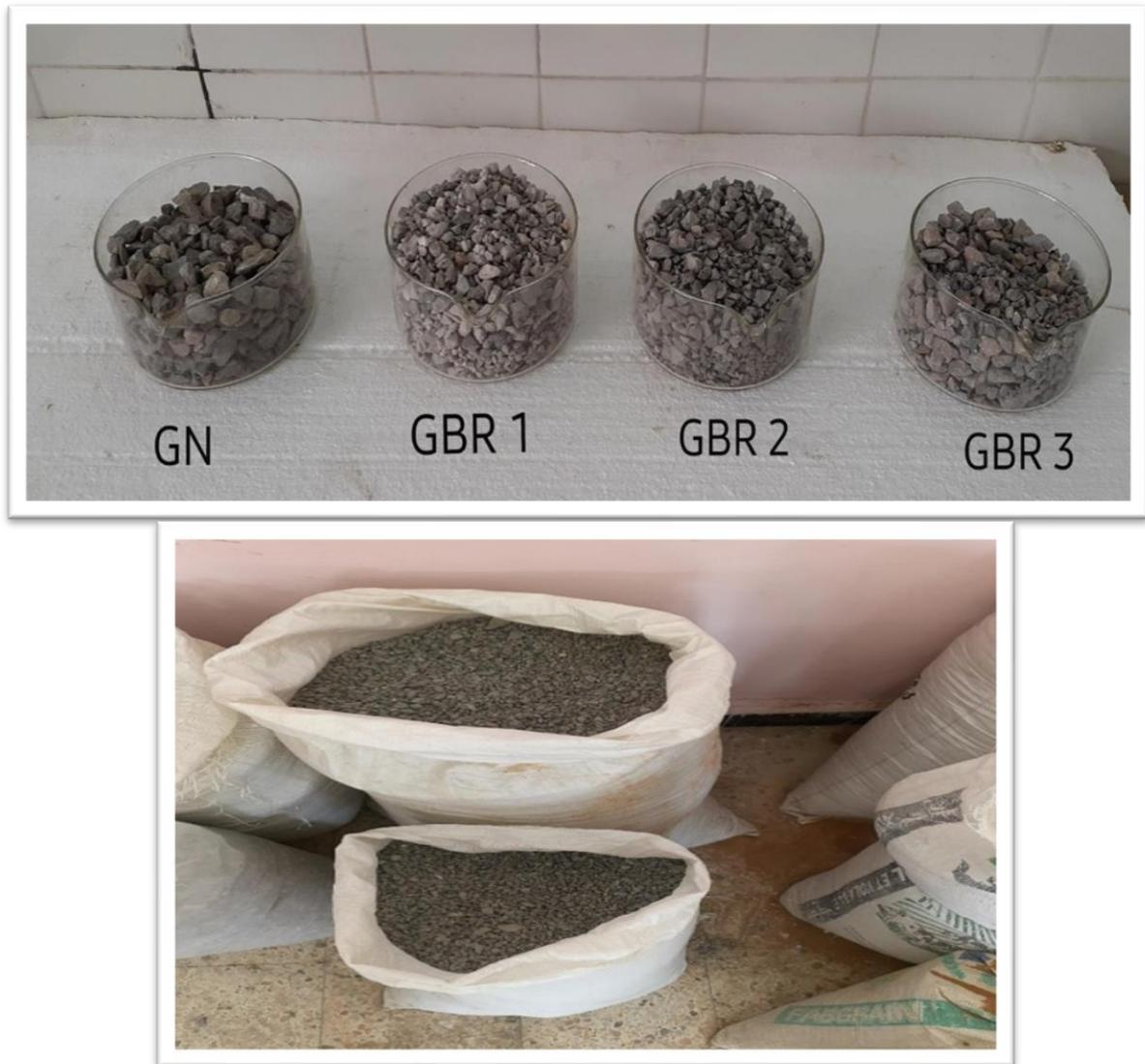


Figure III-4: Élaboration des granulats des bétons recyclés

III.2.3 L'eau de gâchage (NF P 303 , NF EN 1008)

L'eau de gâchage est un élément essentiel dans la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange pour hydrater le ciment et permettre de lier les constituants du béton entre eux. En outre, l'eau rend le mélange plus maniable, facilitant ainsi l'application du béton. La qualité de l'eau de gâchage est cruciale : elle doit être propre et ne pas être ajoutée en excès. Si ces conditions ne sont pas respectées, le béton risque d'être fragile et ses performances altérées.



Figure III-5: Eau de gâchage

Elle agit à deux niveaux :

- Elle hydrate les grains de ciment (25% de l'eau) ;
- Elle apporte la consistance souhaitée au béton (75% de l'eau introduite).

Elle doit être introduite dans la juste proportion pour ne pas dégrader la résistance du béton.

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable de robinet.

III.3 Analyses physiques

III.3.1 La masse volumique absolue des matériaux (Granulat)

(NF P 18 554, NF P 18 555)

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300g. On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on y verse 300ml d'eau préparé préalablement dans le deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange granulas-eau soit (V) ce volume. Sachant que le volume (V1) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul. Volume de granulas :

$$V1 = V - 300 \text{ (ml)}$$

La masse volumique absolue du granulas est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V} \quad \text{(Eq III.1)}$$



Figure III-6: Détermination de la masse volumique absolue de sable

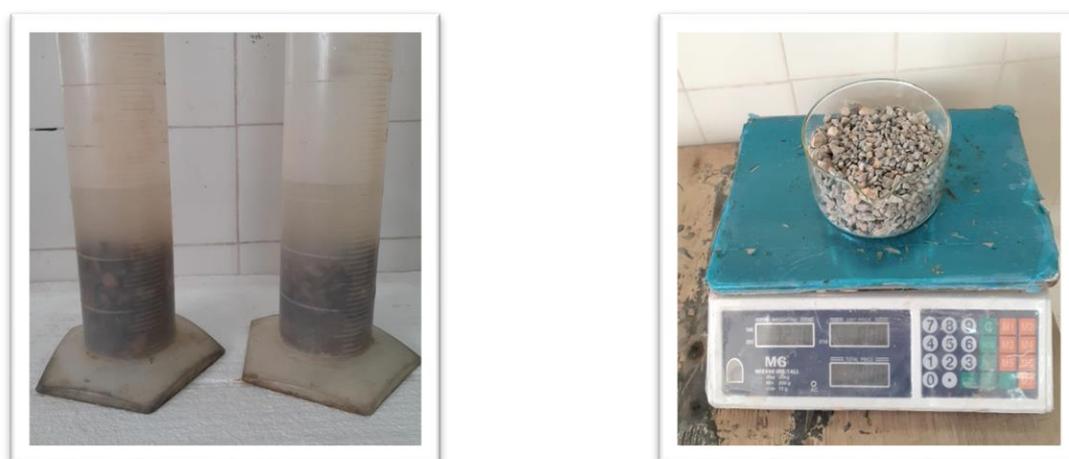


Figure III-7: Détermination des masses volumiques absolues (GN, GBR)

III.3.2 La masse volumique apparente des matériaux (Granulat, ciment)

(NA 255/1990)

La masse volumique réelle est définie comme le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide, y compris les vides contenus dans les grains (volume réel), Elle est obtenue par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de sable. La masse volumique apparente est déterminée par la formule :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{Eq III.2})$$

Avec :

M_1 : Le poids du récipient vide ;

M_2 : Le poids du récipient avec le matériau ;

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



Figure III-8: Détermination de la masse volumiques apparente de sable



Figure III-9: Détermination des masses volumiques apparentes (GN, GBR)



Figure III-10: Détermination de la masse volumique apparente de ciment

III.3.3 Analyse Granulométrique par Tamisage (NF P18 560)

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon. On dénomme les granulats, fins, sables, gravillons ou cailloux. On procède ainsi au classement des grains sur une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les dimensions des mailles des tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le granulat est placé sur le tamis le plus haut et par vibrations, on répartit les grains sur les différents tamis selon leur grosseur.

- **Refus :** c'est la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis après l'analyse ;
- **Tamisât (ou passant) :** c'est la quantité de matériau qui passe à travers le tamis après l'analyse.

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C. Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et son ouverture (2 à 3mn pour le gravier et 3 mn pour le sable).



Figure III-11: Essai de l'analyse granulométrique de sable et GN,GR

III.3.4 Modules de finesse (NF P 18-540)

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Il est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, aux tamis de 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm

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

III.3.5 Mesure de la propreté des granulats (l'essai d'équivalent de sable) : (NF P 18 585)

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la propreté des granulats, notamment l'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie de la construction pour garantir la qualité des granulats utilisés dans la fabrication du béton et d'autres matériaux de construction. Elle est souvent spécifiée dans les normes et les spécifications techniques pour les granulats.

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, il est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide pour ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- La hauteur h1 : sable propre + éléments fins ;
- La hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable :

$$ES = \left(\frac{h_1}{h_2} \right) 100\% \quad (\text{Eq III.3})$$

Il y a 2 façons de mesurer h2, soit visuellement pour déterminer ESV (équivalent de sable à vue), soit avec un piston pour déterminer ESP (équivalent de sable au piston)

Le mode opératoire a une grande influence sur le résultat donc il faut le suivre scrupuleusement.

L'essai est effectué avec 120 g de grains. Il faut tamiser au tamis de 5 mm, éliminer le refus, et recueillir tout le tamisât.

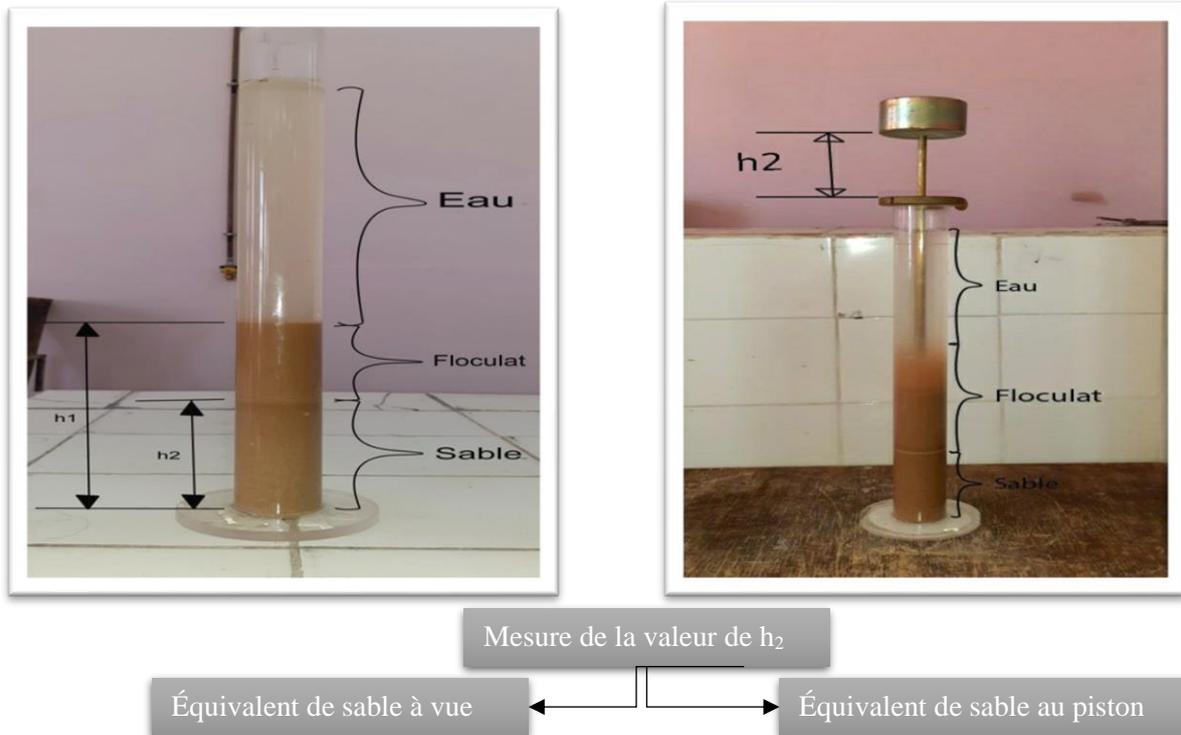
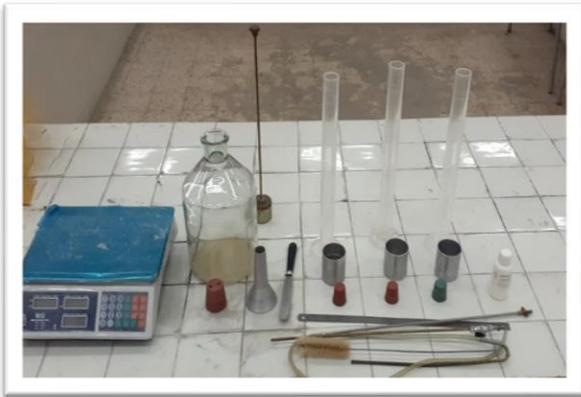


Figure III-12: Essai d'équivalent de sable



Appareillages nécessaires



10 minutes de repos après agitation horizontale



Lavage à l'aide du tube laveur



Repos pendant 20 minutes



Expression des résultats visuels (ESV)



Expression des résultats par piston (ESP)

Figure III-13: Procédure d'essai d'Équivalent de Sable (ES)

III.3.5 Coefficient d'absorption d'eau (A_b) (NF P18-554)

L'absorption d'eau et la porosité sont deux caractéristiques des granulats recyclés de béton lié. Elles sont également dues à la présence de résidus de mortier. Cependant, les granulats naturels ont généralement une absorption d'eau faible en raison de leur porosité faible, mais le mortier attaché aux GBR a une plus grande porosité qui lui permet de retenir plus d'eau. En fait, la détermination de l'absorption d'eau et la connaissance de l'état de saturation initial des granulats sont nécessaires pour la formulation et la fabrication du béton.

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon, cette imbibition partielle est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 20°C à la pression atmosphérique. Le taux d'absorption d'eau est déterminé par la formule suivante :

$$A_b = \frac{(M_a - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (\text{Eq III. 4})$$

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

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

Nous avons mis 3Kg de granulas recyclés dans un seau d'eau et laissé 24H, puis nous avons éliminé l'excès d'eau avec du papier absorbant, et on a pesé l'échantillon.



Figure III-14: Essai d'Absorption d'eau

III.4 Analyses mécaniques

III.4.1 Essai Los Angeles (LA) : (NF P18 573)

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. Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre. Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si M est le matériau soumis à l'essai, m le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :

$$LA = \left(\frac{M}{m}\right) \cdot 100 \quad (\text{Eq III. 5})$$

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

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



Figure III-15: Essais Los Angeles

III.4.2 Essai d'usure Micro Deval (MDE) : (NF P18 572)

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

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

$$\text{MDE} = \left(\frac{M-m'}{m} \right) \cdot 100 = \left(\frac{M}{m} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq III. 6})$$

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

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

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



Figure III-16: Essais Micro-dévale

III.5 Fabrication de béton

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 :

- Un liant : le ciment, poudre d'une très grande finesse ;
- Des granulats de forme et de densité variées ;
- Un liquide : l'eau de gâchage ;

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.

Pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours de phase de fabrication, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohesion.

Après avoir identifié et caractériser les différents constituants entrant dans la fabrication de béton ordinaire et recyclé on a procédé à la formulation du béton par la méthode proposée par Dreux-Gorisse.

III.5.1 Formulation de béton

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours, à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre quant aux facteurs dont elles dépendent mais elles varient en sens inverse.

Afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de l'élément d'ouvrage, nous avons utilisé la méthode de Dreux-Gorisse qui a permis de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié tableau (III.1) mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Tableau III-1: Conception du mélange kg/m³

Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier naturel (kg)	Gravier recyclé (kg)		E/C	Eau
365,00	626.145	1090,375	50%	100%	0,571	208,570
			545,187	1090,375		

Dans ce programme expérimental, trois types de moules ont été utilisés figure (III.17): des éprouvettes de forme cylindrique de dimensions 16x32 cm², des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm³ pour l'essai de compression, et des éprouvettes prismatiques de dimensions 10x10x40 cm³ pour l'essai de traction par flexion trois points selon les normes NF P 18 400, NF P 18 430 et NF EN 12390-1.



Figure III-17: Eprouvettes utilisées (cylindriques 16x32cm², cubiques 10x10x10 cm³ et prismatique 10x10x40 cm³)

III.5.2 Malaxage de béton (NF P 18 404)

L'objectif du malaxage est d'assurer une répartition homogène des différents constituants, grâce à l'action de brassage des outils du malaxeur. Il est essentiel de maîtriser le dosage des différents constituants afin de garantir la constance et l'homogénéité du béton fabriqué.

Pour produire le béton, les matériaux ont été mélangés dans un malaxeur vertical d'une capacité de 50 litres. Nous avons ajouté une quantité de matériaux permettant la production six (6) éprouvettes : deux cylindres, deux prismes et un cube.

Les constituants sont introduits dans l'ordre suivant : gros éléments, liant, sable. Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min, on a ajouté l'eau de gâchage et on a poursuivi le malaxage pendant 2 min

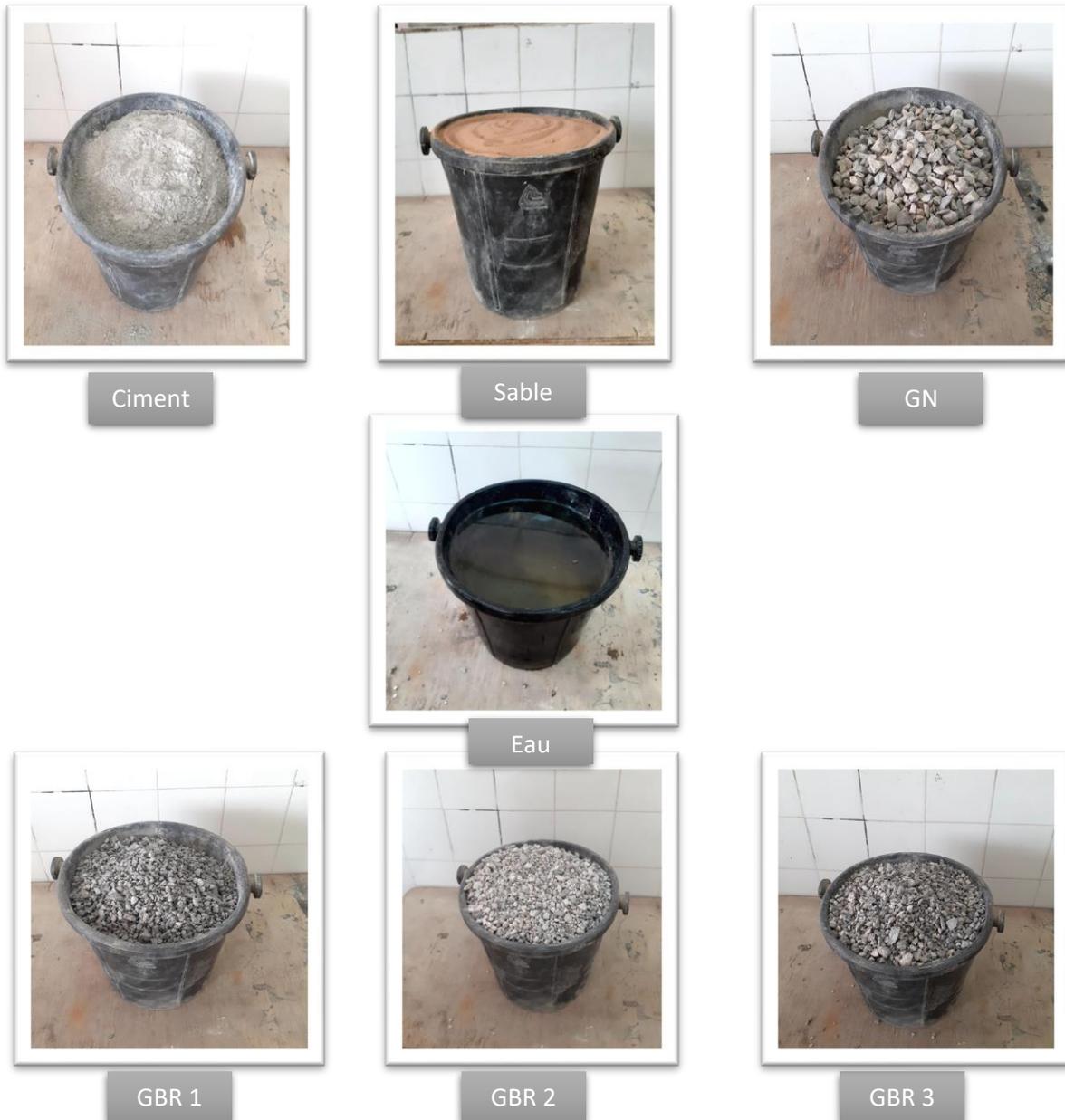


Figure III-18: Préparation des constituants pour gâchage



Figure III-19: Malaxage de béton à l'aide d'une bétonnière

III.5.3 Affaissement au cône d'Abrams (NF P 18 451)

Cet essai vise à évaluer la consistance d'un volume de béton frais en mesurant la hauteur d'affaissement. Le béton est compacté dans un moule en forme de tronc de cône, et en soulevant ce dernier verticalement, on peut mesurer la diminution de hauteur due à l'affaissement du béton. Le test d'affaissement au cône d'Abrams est utilisé pour contrôler la maniabilité du béton.



Figure III-20: Affaissement au cône d'Abrams

A la fin du malaxage les moules sont remplis de béton, la partie de béton qui se trouve au-dessus du bord supérieur du moule doit être enlevé au moyen de deux truelles, par un mouvement de sciage de l'extérieur vers l'intérieur, puis la surface doit être soigneusement arasée. Les prélèvements de béton ne doivent en aucun cas être effectués directement dans la cuve, mais par vidage latéral ou central de celle-ci.

III.5.4 Vibration

La vibration des bétons est obligatoire (sauf dans le cas des bétons autoplacants) pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques et, en particulier, une compacité maximale et des parements de qualité.

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction, en le fluidifiant, de favoriser l'arrangement optimal des grains qui sont les constituants du béton (gravillons, sables, fines, ciment). Les grains s'imbriquent les uns dans les autres et laissent le moins de vide possible entre eux, les plus fins s'insèrent entre les plus gros. La vibration permet un remplissage

optimal des coffrages. La fréquence et la durée de vibration doivent être adaptées à la composition du béton et aux caractéristiques de l'ouvrage.

Sous l'effet de la vibration, le béton se liquéfie (les grains se rapprochent, l'air remonte à la surface, les vides se remplissent par le mortier de ciment), il est comparable à une sorte de liquide visqueux, ce qui permet une meilleure mise en place dans les coffrages, un remplissage intégral des coffrages et des moules, un parfait enrobage des armatures et une adhérence optimale entre le béton et les armatures.

La vibration permet aussi d'évacuer une grande partie de l'air contenu dans le béton (air occlus dont le volume est de l'ordre de 1,5% du volume du béton) et d'améliorer ainsi sa compacité (sans vibration, les bulles restent piégées au sein de la pâte cimentaire, ces bulles d'air sont créées lors du malaxage, du transport et du déverser du béton dans le coffrage).

Les effets de la vibration sur le béton frais se traduisent par des propriétés améliorées du béton durci : compacité et densité supérieure, caractéristiques mécaniques améliorées, porosité réduite, meilleure homogénéité, retrait diminué, enrobage et adhérence efficaces des armatures, durabilité augmentée et amélioration de l'aspect de surface.



Figure III-21: Vibration de béton

III.5.5 Conservation avant démoulage (NF P 18 438, NF EN 12390-2)

Les moules sont ensuite conservés sans les déplacer, les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs, les vibrations et la dessiccation pendant un minimum de 16 h et un maximum de 3 jours, à la température de $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.



Figure III-22: Conservation des éprouvettes avant démoulage

Après démoulage, les éprouvettes sont marquées sans endommagement de façon claire et durable (identification de l'éprouvette depuis le prélèvement jusqu'à l'essai), elles sont ensuite entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai, à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (NF P 18-404).



Figure III-23: Démoulage et conservation des éprouvettes cylindriques, prismatiques et cubiques

III.5.6 Essai de Résistance à la compression des éprouvettes (NF P 18 430-3, NF EN 12390-3)

La résistance en compression des bétons est évaluée à l'aide d'éprouvettes de deux formes : cylindriques de dimensions 16x32 cm² et cubiques de dimensions 10x10x10 cm³. L'application de la force est réalisée à l'aide d'une presse hydraulique, et la contrainte de rupture est directement mesurée par la machine d'essai.

Les éprouvettes cylindriques, au nombre de deux par essai, sont d'abord immergées dans l'eau puis retirées et séchées. Ensuite, après avoir été rectifiées, sont centrées individuellement sur la presse de chargement. Chacune des éprouvettes est soumise à une charge croissante appliquée à une vitesse de 0,5 MPa/s.

En désignant par P, la charge maximale qui provoque la rupture en en Newton (N) et S la section en mm², la résistance par compression en Méga Pascal (MPa) est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq III. 7})$$



Figure III-24: Essais de compression des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² et cubiques (10x10x10) cm³ des bétons BO et BR



Figure III-25: Résultats de l'essai de compression

III.5.6 Essai de Résistance à la traction par flexion (trois points)

(P 18 433, NF EN 12390-5)

Pour évaluer la résistance à la traction du béton, des éprouvettes prismatiques normalisées de dimensions 10x10x40 cm³ ont été employées. Ce type d'essai est largement utilisé pour cette mesure. Il implique la rupture en flexion d'une éprouvette prismatique ayant un côté de dimension d et une longueur de $4d$, sous l'effet d'une charge totale P .

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

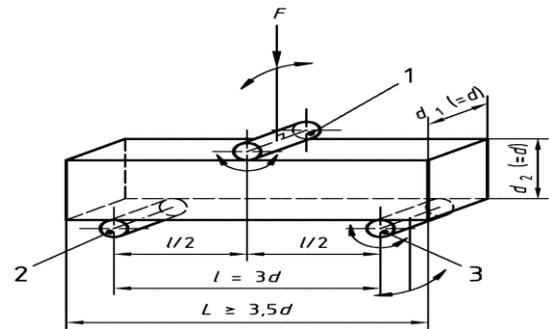


Figure III-26 : Chargement de l'éprouvette (Charge centrée en un point)

$$f_{cf} = \frac{3FL}{2d_1 \cdot d_2^2}$$

(Eq III. 8)

Avec :

f_{cf} : la résistance en flexion, en mégapascals (newtons par millimètre carré) ;

F : la charge maximale, en newtons ;

L : l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;

d_1 et d_2 : les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètres.

Si $d_1 = d_2$ la résistance en flexion (f_{cf}) devient :

$$f_{cf} = \frac{3FL}{2d^3}$$

(Eq III. 9)



Figure III- 27: Essai de traction par flexion des éprouvettes prismatiques (10x10x40) cm³ (trois points)



Figure III-28: Résultats des Essai de traction par flexion

III.6 Conclusion

Ce chapitre expose les caractéristiques des matériaux de base utilisés dans la fabrication des divers bétons. Nous avons décrit les différents tests utilisés pour caractériser les matières premières, ainsi que la méthode de formulation et les proportions des différents composants du béton. Ensuite, nous avons examiné les comportements des bétons frais et évalué les performances des bétons durcis. Cette partie de l'étude expérimentale vise à mettre en valeur les agrégats recyclés. Les résultats des tests effectués sur le béton à l'état frais et durci sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre IV).

CHAPITRE IV

Résultats et interprétation

IV.1 Introduction

À l'issue de chaque essai, des résultats sont obtenus et des observations sont faites, permettant de répondre à plusieurs de nos questions. Ce chapitre a pour objectif de présenter et d'analyser les résultats des essais effectués sur les constituants et les différents bétons testés dans le chapitre III, notamment :

- Les résultats physiques (équivalent de sable, analyse granulométrique, module de finesse, masses volumiques et absorption d'eau) ;
- Les résultats mécaniques (essai Los Angeles, essai de compression et essai de traction par flexion).

IV.2 Résultats des essais

IV.2.1 Résultats physiques

IV. 2.1.1 Equivalent de sable

D'une façon générale, la propreté des granulats doit toujours être vérifiée. L'utilisation de granulats pollués peut provoquer une baisse des résistances mécaniques et une augmentation du retrait, sans oublier un dosage en eau plus important dans le béton, ce qui affecte ses caractéristiques.

Tableau IV-1: Détermination de l'essai d'Equivalent de Sable naturel (0/5)

N° D'essais	H1 (Cm)	H2 (Cm)	ESV (%)	H2 (Cm)	ESP (%)
1	14,00	10,20	72,80	9,60	68,50
2	14,50	10,40	71,70	9,50	67,80
3	14,80	10,00	67,50	9,10	65,00
ESV% moyen			E _{SV} = 70,66 %	ESP% moyen	E _{SP} = 67,10 %

En comparant les résultats obtenus avec ceux du tableau 1 (annexe 1), nous concluons que notre sable est légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

IV.2.1.2 Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la taille et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon. L'échantillon de matériau est passé à travers une série de tamis de différentes mailles, classées par taille décroissante. Chaque tamis retient les particules plus grandes que ses ouvertures tout en laissant passer les plus petites.

▪ Sable

Les résultats des analyses granulométriques de sable étudié sont regroupés dans le tableau (IV.2) suivant :

Tableau IV-2: Analyse granulométrique de sable (0/5)

Tamis	Refus partiels	Refus cumulés	Refus cumulés %	Tamisât%
5	5	5	0.5	99.5
2.5	115.9	120.9	12.09	87.91
1.25	160	280.9	28.09	71.91
0.63	282	562.9	56.29	43.71
0.315	237.1	800	80	20
0.16	95	895	89.5	10.5
0.08	60	955	95.5	4.5
0.01	30	985	98.5	1.5

▪ Module de finesse

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5)}$$

$M_f = 2,66$ Le module de finesse est compris entre la valeur 2,2 et 2,8 ($2,2 < M_f < 2,8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. On est en présence d'un sable préférentiel.

▪ Gravier naturel

Les résultats de l'analyse granulométrique de gravier naturel étudié sont regroupés dans le tableau (IV.3) suivant :

Tableau IV-3: Analyse granulométrique du gravier naturel (GN) (3/8, 8/15).

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
20	0,00	0,00	0,00	100
16	33,00	33,00	0,825	99,175
14	596,00	629,00	15,725	84,275
12,5	575,00	1204,00	30,1	69,90
10	863,00	2067,00	51,675	48,325
8	912,00	2979,00	74,475	25,525
6,3	638,00	3617,00	90,425	9,575
4	322,00	3939,00	98,475	1,525
2,5	49,00	3988,00	99,70	0,30
2	9,00	3997,00	99,925	0,075
Fond	3,00	4000,00	100,00	0,00

- **Gravier recyclé**

La granulométrie des granulats recyclés représente un paramètre important dans les conditions limites de leur utilisation.

L'analyse granulométrique des graviers recyclés (GBR-1, GBR-2 et GBR-3) provenant des béton parents (BP-1 avec une résistance moyenne de 36.33 MPa, BP-2 45.75 MPa et BP-3 53.86 MPa) sont rassemblés respectivement dans les tableaux (IV.4), (IV.5) et (IV.6) suivants :

Tableau IV-4 : Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -1) (3/8, 8/15)

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
20	0,00	0,00	0,00	100,00
16	4,00	4,00	0,10	99,90
14	43,00	47,00	0,20	99,80
12,5	48,00	95,00	1,40	98,60
10	1739,00	1834,00	44,87	55,12
8	237,00	2071,00	50,80	49,20
6,3	444,00	2515,00	61,90	38,10
4	1141,00	3656,00	90,42	9,57
2,5	294,00	3950,00	97,78	2,22
2	49,00	3999,00	99,00	1,00
Fond	1,00	4000,00	100,00	0,00

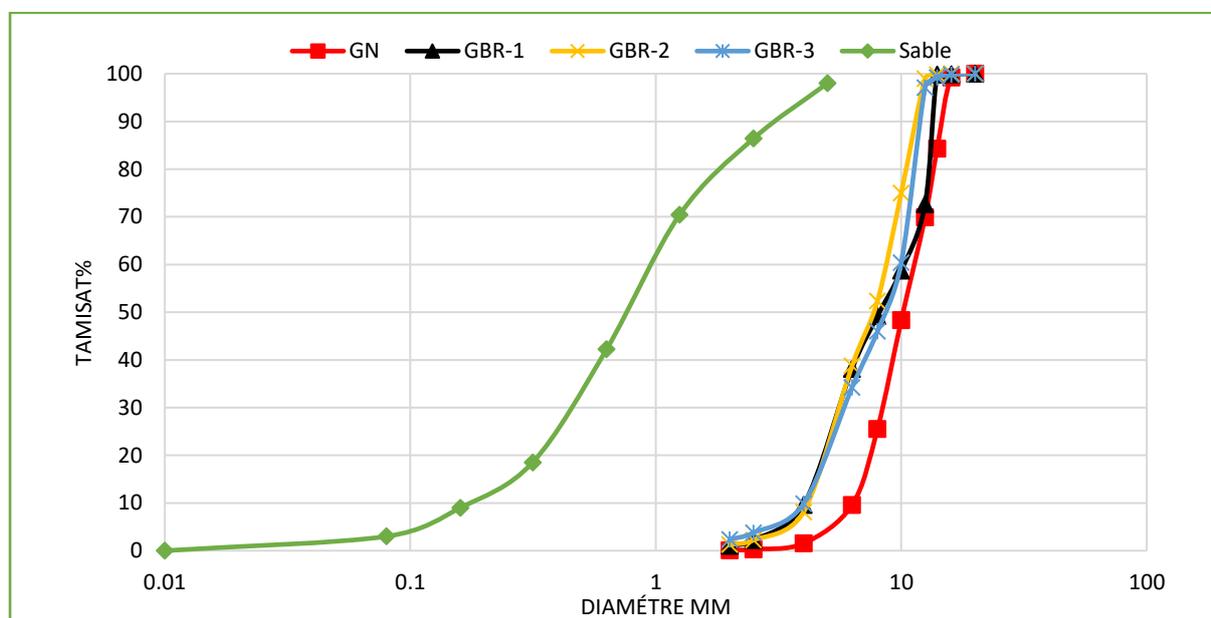
Tableau IV-5: Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -2) (3/8, 8/15)

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
14	8	8	0,2	99,8
12,5	34	42	1,05	98,95
10	1522	1564	39,1	60,9
8	341	1905	47,62	52,38
6,3	546	2451	61,27	38,73
4	1224	3675	91,87	8,13
2,5	236	3911	97,77	2,23
2	39	3950	98,75	1,25
Fond	50	4000	100	0

Tableau IV-6 : Analyse granulométrique du gravier recyclé (GBR -3) (3/8, 8/15)

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés(g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
20	0,00	0,00	0,00	100,00
16	7,00	7,00	0,17	99,83
14	25,00	32,00	0,80	99,20
12,5	85,00	117,00	2,92	97,08
10	178,001	1898,00	47,45	52,55
8	262,00	2160,00	54,00	46,00
6,3	472,00	2632,00	65,80	34,20
4	974,00	3606,00	90,15	9,85
2,5	243,00	3849,00	96,22	3,78
2	57,00	3906,00	97,65	2,35
Fond	94,00	4000,00	100,00	0,00

Les courbes granulométriques sont ensuite tracées sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

**Figure IV-1:** Analyse granulométrique des granulats (naturel et recyclés)

On peut constater sur la figure (IV.1) que toutes les courbes des granulats naturels et recyclés sont continues. Cela indique que les agrégats sélectionnés possèdent une granulométrie uniforme, assurant ainsi une composition appropriée pour tous les mélanges de bétons.

IV.2.1.3 Masse volumique

Chaque mesure de masse volumique apparente ou absolue a été effectuée trois fois. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (IV.7) et (IV.8).

- **Masse volumique apparente :**

Tableau IV-7: Masses volumiques apparentes des constituants utilisés

Matériaux	M1(g)	M2(g)	ρ app (g/cm ³)
Sable naturel (SN) (0/5)	1330	460	1.33
Ciment	1144		1.144
Gravier naturel (GN) (3/8,8/15)	9150	6432	1.422
Graviers recyclés	7715		1.199
(GBR-1, GBR-2, GBR-3) (3/8,8/15)	7786		1.210
	7985		1.241

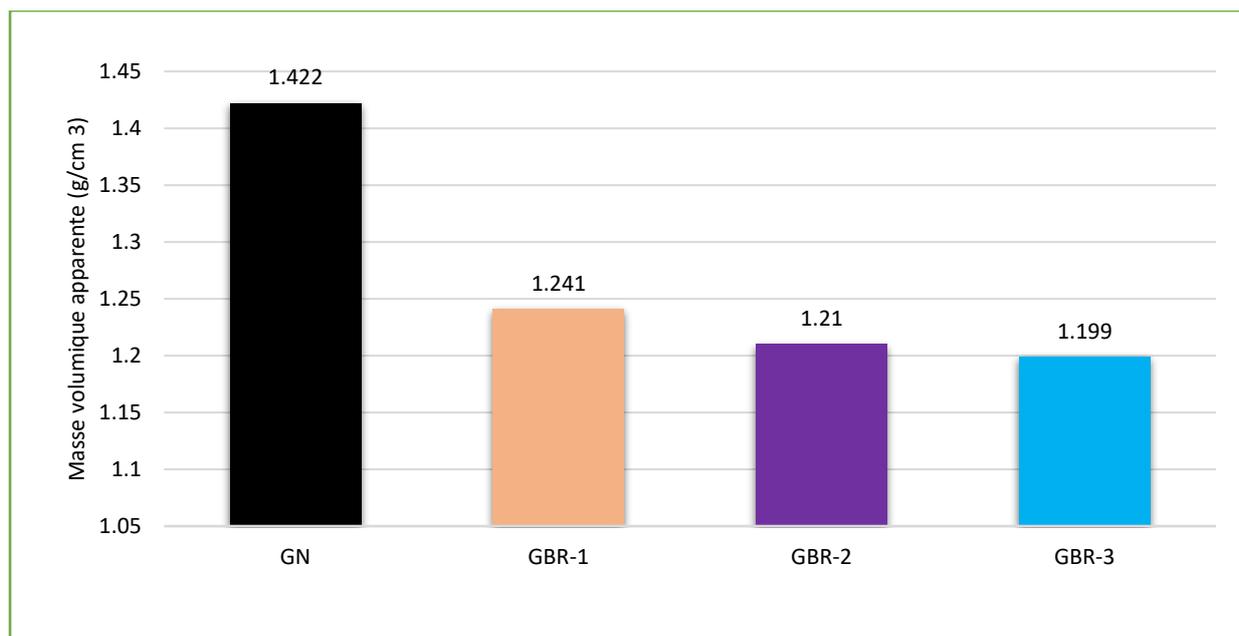


Figure IV-2: Masses volumiques apparentes des GN et GBR

- **La masse volumique absolue**

Tableau IV-8: Masses volumiques absolues des constituants utilisés

Matériaux	M1(g)	M2(ml)	ρ app (g/cm ³)
Sable naturel (SN) (0/5)	300	120	2.5
Gravier naturel (GN) (3/8,8/15)		120	2.5
Gravier recyclé (GBR-1) (3/8,8/15)		140	2.14
Gravier recyclé (GBR-2) (3/8,8/15)		132	2.27
Gravier recyclé (GBR-3) (3/8,8/15)		130	2.30

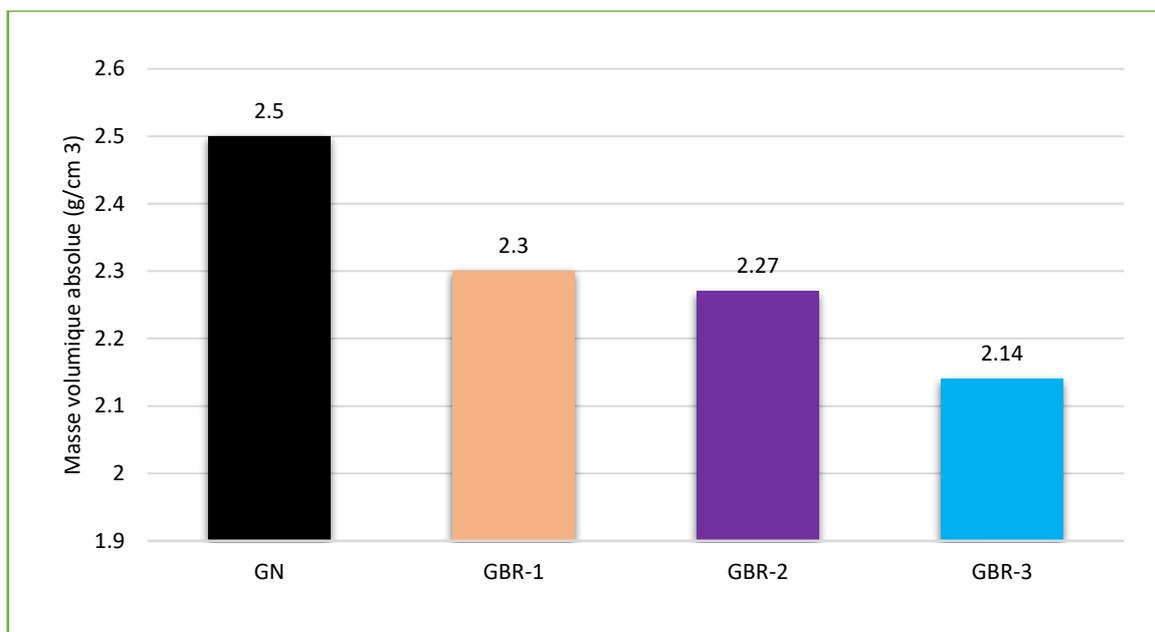


Figure IV-3: Masses volumiques absolue des GN et GBR

Les figures (IV.2) et (IV.3) montrent que les masses volumiques apparentes et absolues des granulats naturels sont nettement supérieures à celles des agrégats recyclés, ce qui peut être expliqué par la différence de structure et de composition entre ces matériaux (présence de mortier attaché dans les granulats recyclés). Les agrégats de béton recyclés GBR dérivés du béton parent BP plus faible ont une plus grande masse volumique (apparente, absolue) et donc moins de mortier. L'explication provient probablement du fait que le mortier attaché dans le béton parent plus faible perd plus facilement dans le processus de concassage, laissant plus de particules de roche propres.

IV.2.1.4 Coefficient d'absorption d'eau (A_b) :

Le taux d'absorption d'eau est déterminé à partir de 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. Les résultats sont indiqués dans le tableau IV.9 :

Tableau IV-9: Taux d'absorption d'eau

Heures	Ms (g)	GN (g)	GBR-1 (g)	GBR-2 (g)	GBR-3 (g)
30 min	300	301	306	304	303
1 h		302	307	304,5	304
1h30min		302 ,5	308	305	304,8
2h		303	308,5	306	305
3h		303,2	309	307	306
6h		304	310	308	306,4
12h		312	310	308	
24h		304	312	310	308

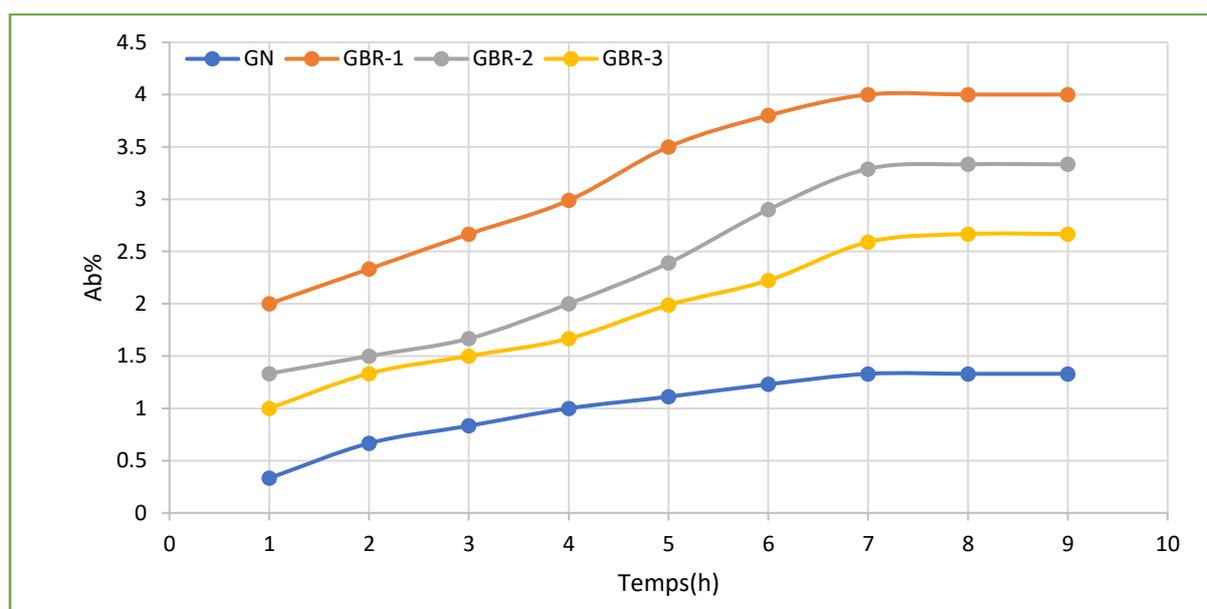


Figure IV-4 : Evolution de coefficient d'absorption d'eau des GR

Les taux d'absorption illustrés dans la figure (IV.4) montrent que les granulats recyclés présentent des coefficients d'absorption plus élevés, absorbant ainsi beaucoup plus d'eau par rapport aux granulats naturels plus denses donc moins poreux et dans les trois graviers recyclés on remarque que le GBR-1 absorbe plus que le GBR-2 et GBR-3 donc ça résistance est plus faible par rapport aux deux autres GBR-2 et GBR-3.

IV.2.2 Résultats mécaniques

IV.2.2.1 Essais Los Angeles

D'après le tableau IV.10 et la figure IV.5 ci-dessous, la valeur du coefficient LA pour le gravier recyclé (relativement dur) est supérieure à celle du gravier naturel (dur). Ainsi, le gravier naturel GN présente une meilleure résistance à l'usure, tandis que les granulats de béton recyclé GBR-1 , GBR-2 et GBR-3 obtenus par recyclage montrent une résistance inférieure. Cela s'explique par la quantité de mortier attaché aux granulats recyclés (voir annexe 2).

Tableau IV-10: Résultats d'essai Los Angles.

Type de gravier	Gravier naturel	Gravier recyclé		
		GBR-1	GBR-2	GBR-3
Coefficient LA	23.28%	42.96%	40.26%	35.14%

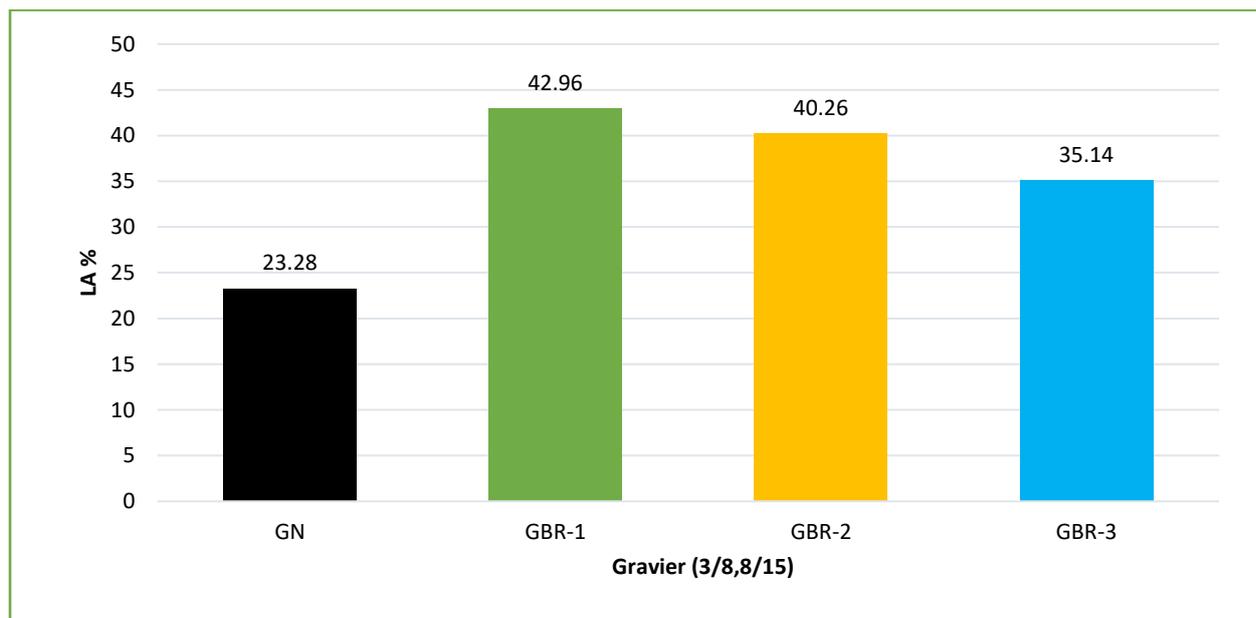


Figure IV-5: Résultats d'essai Los Angeles

IV.2.2.2 Essais Micro-Deval :

Les résultats de l'essai Micro-Deval montrent que les granulats recyclés GBR ont un indice de désagrégation plus élevé que les granulats naturels. Cette différence indique que les granulats recyclés sont plus susceptibles de se dégrader sous l'effet de l'abrasion par rapport aux granulats naturels. La présence de mortier résiduel sur les granulats recyclés contribue à cette moindre

résistance à l'abrasion. Par conséquent, bien que les granulats recyclés puissent être utilisés dans certaines applications, leur performance inférieure en termes de résistance à l'usure doit être prise en compte lors de la formulation des mélanges de béton destinés à des usages exigeant une grande durabilité.

Tableau IV-11: Résultats d'essai Micro-Deval

Type de gravier	Gravier naturel	Gravier recyclé		
		GBR-1	GBR-2	GBR-3
MDE	2.88 %	4.3%	3.86%	3.5%

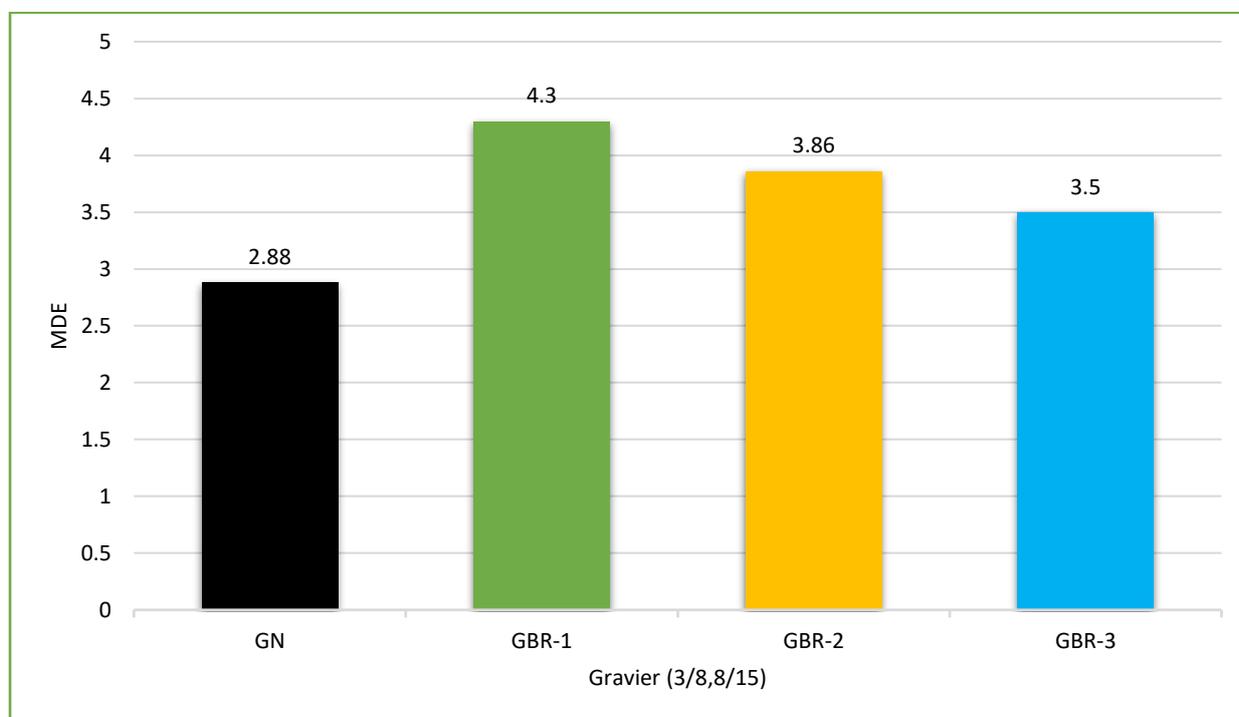


Figure IV-6: Résultats d'essai Micro-Deval

IV.2.2.3 Affaissement au cône d'Abrams

L'un des objectifs de conception de nos mélanges de béton était d'obtenir un affaissement supérieur, une mise en œuvre aisée de tous les mélanges. Conformément aux résultats présentés dans le tableau (IV.12), tous les mélanges satisfaisaient à cette exigence et pouvaient être classés dans la classe de maniabilité S2 affaissement (5cm à 9cm), comme le stipule la norme. (Voir annexe 3 pour plus de détails).

Tableau IV-12: Valeurs de l'affaissement des bétons (BN, BR-1, BR -2 et BR -3)

Type de béton	Taux de remplacement (%)	Essais	Affaissement (cm)
BN	100%	1	9
		2	8.7
		3	8.1
		Affaissement (cm) Moyen	8.6
BR-1	50%	1	7.4
		2	7.1
		3	6.8
		Affaissement (cm) Moyen	7.1
	100%	1	6.8
		2	6.5
		3	6.4
		Affaissement (cm) Moyen	6.57
BR-2	50%	1	8.4
		2	8.1
		3	7.9
		Affaissement (cm) Moyen	8.13
	100%	1	7.9
		2	7.6
		3	7.4
		Affaissement (cm) Moyen	7.63
BR-3	50%	1	8.8
		2	8.6
		3	8.3
		Affaissement (cm) Moyen	8.57
	100%	1	8
		2	7.8
		3	7.7
		Affaissement (cm) Moyen	7.83

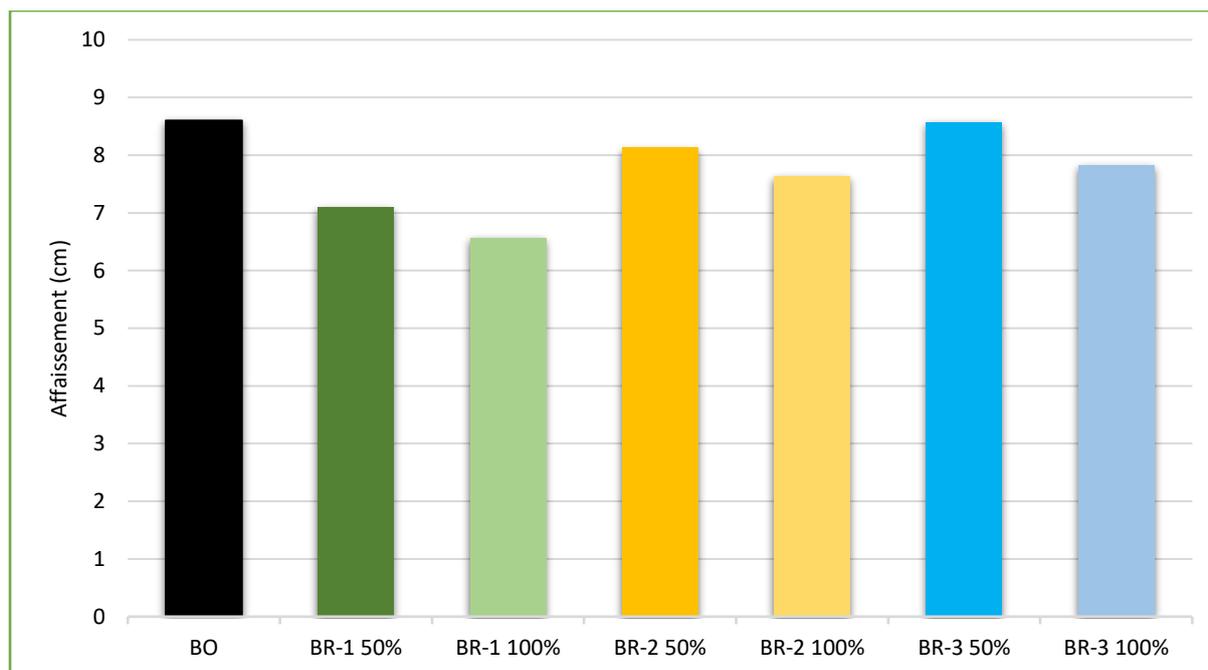


Figure IV-7: Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement

Selon la figure IV.7, on observe que l'affaissement des béton recyclés (BR) diminue au fur et à mesure que le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés augmente (50% à 100%). Les granulats des mélanges (BR-1 50% et 100%), (BR-2 50 % et 100%) , ont une capacité d'absorption d'eau plus élevée; par conséquent, ils absorbent l'eau de la pâte de ciment, ce qui entraîne un affaissement inférieur par rapport au béton à base de granulats naturels (BN).

IV.2.2.4 La masse volumique (densité) de béton a l'état durci (NF EN12390-7, P 18 435)

La densité du béton dépend d'un certain nombre de facteurs dans le principal est la teneur en eau libre interne, elle-même fonction de l'hygrométrie et de la température. Dans les tableaux (IV.13) , (IV.14) , (IV.15) , (IV.16) , (IV.17) , (IV.18) et (IV,19) on regroupe la variation de la densité des BN, BR-1, BR-2 et BR-3 en fonction de temps (7, 21 et 28) jours et de taux de remplacement (T.R) (50%, 100%) .

Tableau IV-13: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BO

	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume	Masse volumique (kg/m ³)
BO	Cubique01	2,34	1,00	2,34	2,34	1,00	2,34	2,28	1,00	2,33
	Cubique02	2,34	1,00	2,33	2,35	1,00	2,35	2,35	1,00	2,35
	Cylindrique01	15,04	6,43	2,34	15,08	6,43	2,34	15,06	6,43	2,34
	Cylindrique02	15,02	6,43	2,33	15,01	6,43	2,35	15,06	6,43	2,34
	Prismatique	9,45	4,00	2,36	9,41	4,00	2,35	9,36	4,00	2,34

Tableau IV-14: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-1 50%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
BR-1 50%	Cubique 01	2,21	1,00	2,21	2,25	1,00	2,25	2,26	1,00	2,26
	Cylindrique 01	14,54	6,43	2,26	14,46	6,43	2,250	14,47	6,43	2,25
	Cylindrique 02	14,54	6,43	2,26	14,57	6,43	2,27	14,45	6,43	2,25
	Prismatique	8,96	4,00	2,245	9,24	4,00	2,31	9,24	4,00	2,31

Tableau IV-15: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-1
100%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
BR-1 100%	Cubique 01	2,21	1,00	2,21	2,30	1,00	2,21	2,20	1,00	2,20
	Cylindrique 01	14,19	6,43	2,20	14,22	6,43	2,21	14,53	6,43	2,26
	Cylindrique 02	14,24	6,43	2,21	14,22	6,434	2,21	14,17	6,434	2,20
	Prismatique	8,96	4,00	2,24	9,23	4,00	2,31	9,03	4,00	2,26

Tableau IV- 16: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-02
50%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
BR-2 50%	Cubique01	2,27	1,00	2,27	2,27	1,00	2,27	2,3	1,00	2,3
	Cylindrique 01	14,38	6,43	2,27	14,31	6,43	2,22	14,79	6,43	2,3
	Cylindrique 02	14,38	6,43	2,27	14,92	6,43	2,32	14,79	6,43	2,3
	Prismatique	9,18	4,00	2,29	9,23	4,00	2,31	9,28	4,00	2,32

Tableau IV-17: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-02 100%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
BR-2 100%	Cubique01	2,22	1,00	2,22	2,22	1,00	2,22	2,22	1,00	2,22
	Cylindrique 01	14,32	6,43	2,22	14,37	6,43	2,23	14,85	6,43	2,31
	Cylindrique 02	14,40	6,43	2,24	14,36	6,43	2,23	14,35	6,43	2,23
	Prismatique	9,18	4,00	2,29	9,2	4,00	2,30	9,25	4,00	2,31

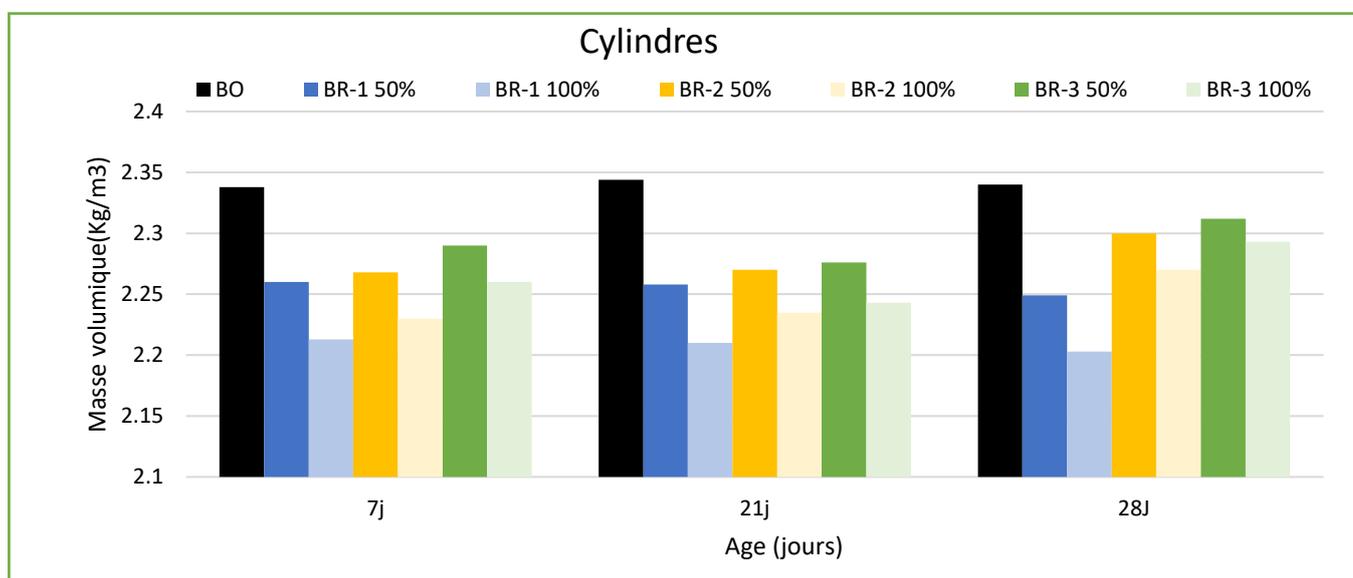
Tableau IV-18: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-03 50%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jour			21Jour			28Jour		
		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
BR-3 50%	Cubique01	2,23	1,00	2,23	2,28	1,00	2,28	2,29	1,00	2,29
	Cylindrique 01	14,40	6,43	2,24	14,78	6,43	2,3	14,85	6,43	2,31
	Cylindrique 02	14,98	6,43	2,33	14,40	6,43	2,24	14,85	6,43	2,31
	Prismatique	9,24	4,00	2,31	9,28	4,00	2,32	9,32	4,00	2,33

Tableau IV-19: Résultats obtenus pour la détermination de la masse volumique des BR-3 100%

T.R	Types d'éprouvettes	7Jours			21Jours			28Jours		
BR-3 (100%)		Poids (kg)	Volume (m ³)×10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)× 10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)	Poids (kg)	Volume (m ³)× 10 ⁻³	Masse volumique (kg/m ³)
	Cubique01	2,22	1,00	2,22	2,24	1,00	2,24	2,25	1,00	2,25
	Cylindrique 01	14,53	6,43	2,27	14,58	6,43	2,26	14,55	6,43	2,26
	Cylindrique 02	14,53	6,43	2,26	14,27	6,43	2,22	14,91	6,43	2,32
	Prismatique	9,04	4,00	2,26	9,12	4,00	2,28	9,26	4,00	2,31

Après avoir déterminé les masses volumiques des BO et BR des éprouvettes cylindriques, cubiques et prismatiques on va les représenter respectivement sur des histogrammes pour mieux illustrer les variations.

**Figure IV-8:** Variation de la densité moyenne des BN, BR-1, BR-2 et BR03 en fonction de temps des éprouvettes cylindriques

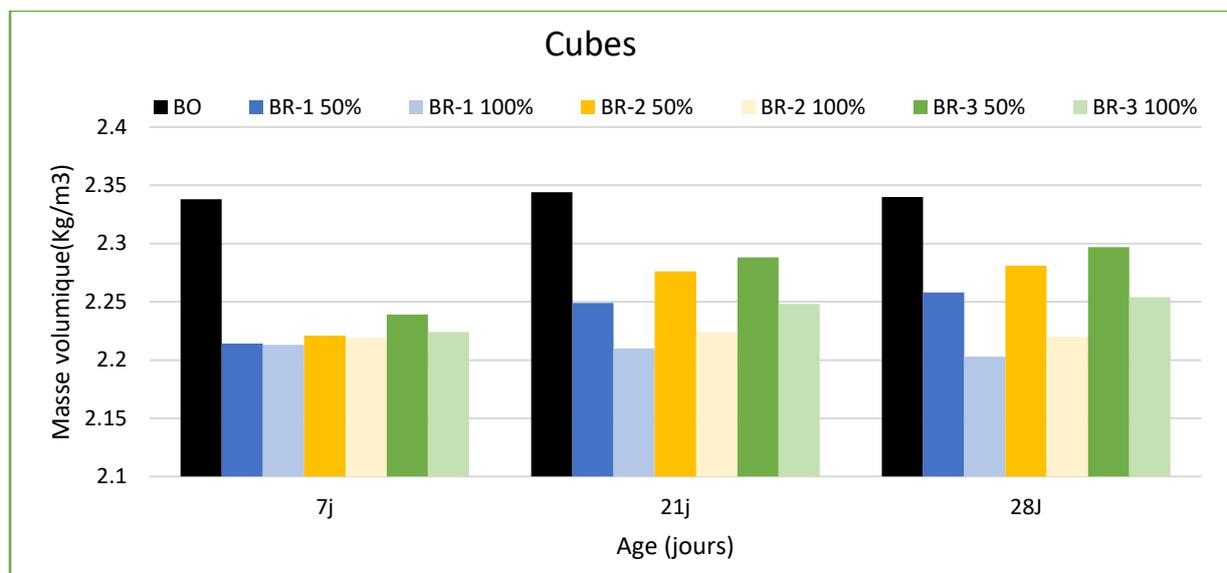


Figure IV-9: Variation de la densité moyenne des BO, BR-1, BR-2 et BR-3

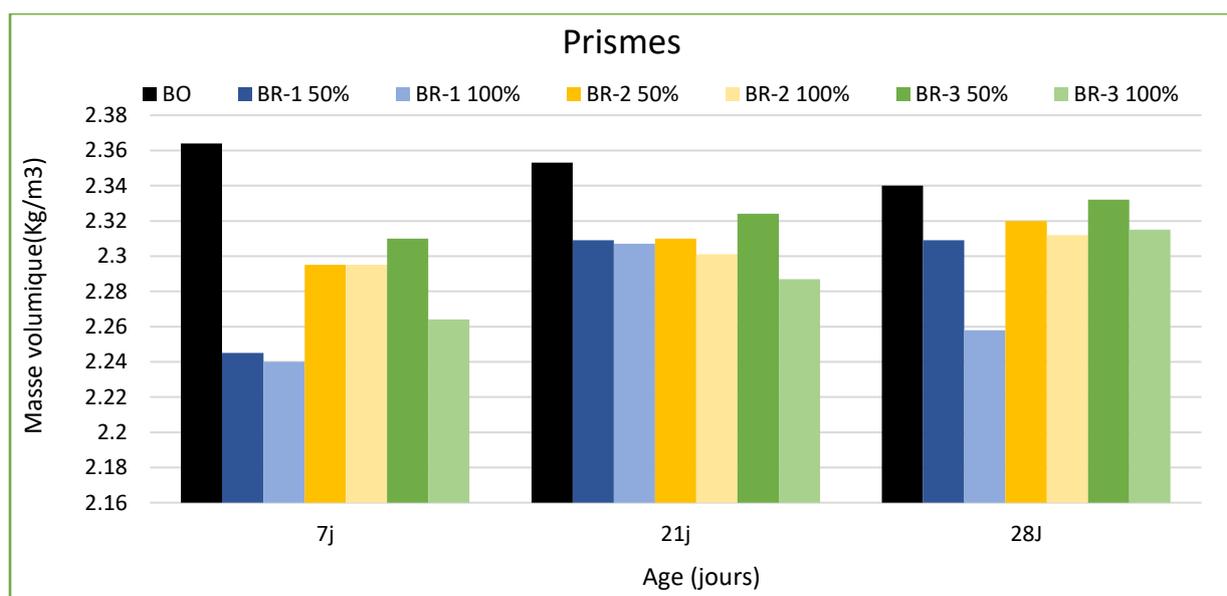


Figure IV-10: Variation de la densité moyenne des BO, BR-1, BR-2 et BR03

En examinant les données des figures (IV.8) , (IV.9) et (IV.10) de la variation des densités moyennes des éprouvettes (cylindriques , cubiques et prismatiques) de BO (béton ordinaire) et BR-1, BR-2, BR-3 (bétons recyclés) en fonction du temps on constate que la densité moyenne des éprouvettes BN reste relativement stable au fil du temps, cela indique une bonne compacité et une faible porosité du béton naturel, assurant une structure dense et uniforme. Et pour BR-1 présente la plus grande variation de densité moyenne au fil du temps. Cela est probablement

dû à la proportion encore plus élevée de granulats recyclés, qui accentue les effets de l'absorption d'eau et de la porosité accrue. Pour le BR-2 la densité moyenne suit une tendance similaire à la variation du BR-3, mais avec une variation plus marquée. L'augmentation du taux de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés pourrait expliquer cette diminution de la densité moyenne. Le BR-3 montre une légère diminution au fil du temps. Cette tendance peut être attribuée à la bonne qualité des agrégats recyclés plus grande résistance de béton parent). En remarque que la variation de la densité moyenne de BR-3 est similaire à celle de BN.

IV.2.2.5 Résultats des essais de compression et de traction par flexion

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons entre les différentes compositions de béton, les essais suivants ont été réalisés :

- Traction par flexion (éprouvettes prismatiques 10x10x40) ;
- Compression (éprouvettes cylindriques 16x32 et cubiques 10x10x10).

Les tableaux (IV.20), (IV.21), (IV.22), (IV.23), (IV.24), (IV.25) et (IV.26), ci-après regroupent tous les résultats obtenus des essais de compression et de traction à 7, 21 et 28 jours des différentes éprouvettes.

Tableau IV-20 : Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BO

BO	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,338	28,568	2,344	31,547	2,278	35,012
	Cubique 02	2,307	28,340	2,328	30,158	2,282	34,643
	Cylindrique 01	15,042	28,879	15,081	31,096	15,026	35,221
	Cylindrique 02	14,896	27,788	14,954	30,836	15,057	34,174
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
Prismatique	9,455	1,383	9,415	1,460	9,362	1,690	

Tableau IV-21: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-1 50%

BR-01 (50%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types D'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,260	22,826	2,288	26,689	2,280	28,098
	Cylindrique 01	14,490	21,450	14,530	25,953	14,475	28,397
	Cylindrique 02	14,420	22,122	14,433	25,453	14,412	27,998
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,151	1,118	9,297	1,298	9,260	1,311

Tableau IV- 22: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-1 100%

BR-1 (100%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,260	20,157	2,299	24,783	2,340	26,887
	Cylindrique 01	14,190	19,945	14,124	23,828	14,098	26,289
	Cylindrique 02	14,240	20,173	14,220	24,430	14,175	25,897
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	8,980	1,123	9,233	1,210	9,232	1,294

Tableau IV-23: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-2 50%

BR-2 (50%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,365	24,897	2,418	29,525	2,311	32,534
	Cylindrique 01	14,140	23,931	14,315	28,782	14,766	31,410
	Cylindrique 02	14,243	24,516	14,187	29,789	14,768	31,998
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,180	1,178	9,322	1,357	9,260	1,377

Tableau IV-24: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et à la traction par flexion de BR-2 100%

BR -2 (100%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,418	21,656	2,418	27,750	2,547	30,128
	Cylindrique 01	14,315	20,886	14,315	27,230	14,244	30,317
	Cylindrique 02	14,745	21,516	14,187	26,611	14,348	29,982
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,180	1,133	8,946	1,278	9,250	1,329

Tableau IV-25: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion de BR-3 50%

BR -3 (50%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,554	26,185	2,218	30,319	2,279	33,607
	Cylindrique 01	14,408	25,896	14,448	30,043	14,244	32,809
	Cylindrique 02	14,368	26,596	14,396	29,930	14,348	33,078
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,088	1.208	9,058	1.433	9,324	1,398

Tableau IV-26: Résultats obtenus pour la détermination de la résistance à la compression et en traction par flexion de BR-3 100%

BR-3 (100%)	Compression						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (Kg)	Résistance (MPa)
	Cubique 01	2,343	25,583	2,350	28,130	2,290	31,078
	Cylindrique 01	14,596	24,827	14,579	27,876	14,554	31,632
	Cylindrique 02	14,628	25,033	14,644	28,538	14,504	29,970
	Traction par Flexion						
	7 jours			21 jours		28 jours	
	Types d'éprouvettes	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)	Poids (kg)	Résistance (MPa)
	Prismatique	9,360	1,173	9,229	1,269	9,034	1,350

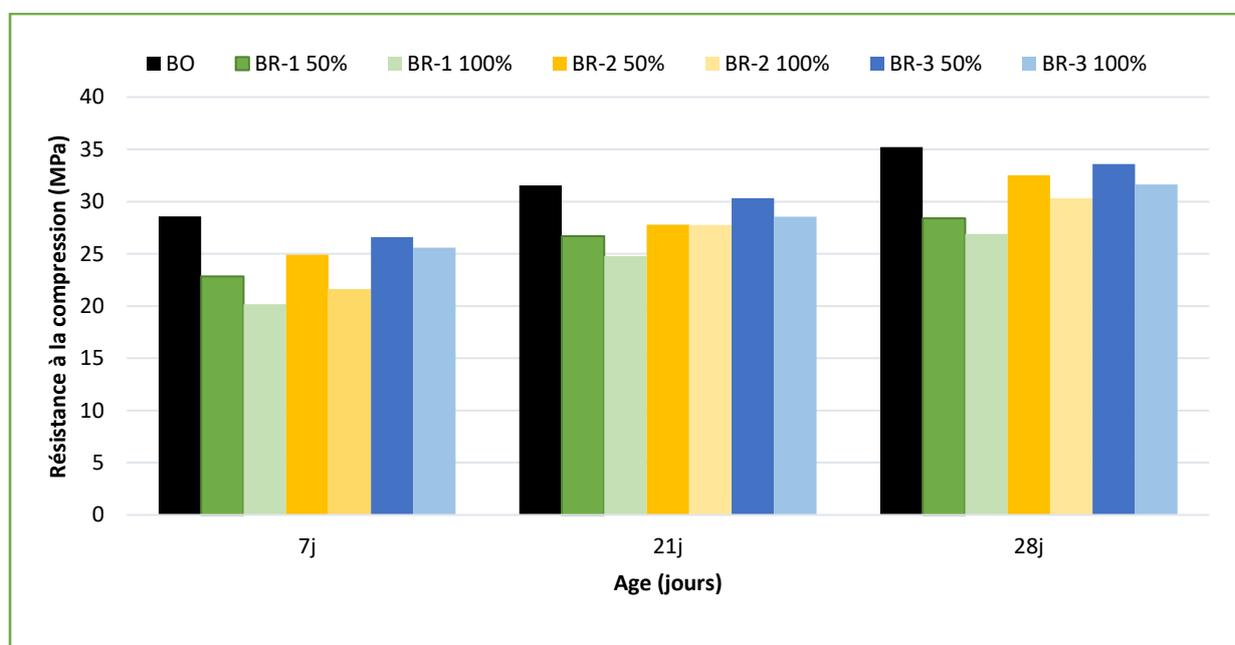


Figure IV-11: Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge

La figure IV.11 montre que la résistance à la compression augmente avec l'âge du béton d'agrégat recyclé (7, 21 et 28 jours). Cependant, pour tous les types de béton recyclé (BR-1,

BR-2 et BR-3), il est possible d'observer une réduction de la résistance à la compression à mesure que le taux d'agrégats recyclés augmente. Les raisons principales qui peuvent expliquer cette variation importante, premièrement, l'agrégat recyclé peut avoir des impacts différents dans le béton selon la qualité des propriétés mécaniques de béton parent (résistance mécanique). Et deuxièmement, la composition et les propriétés mécaniques des agrégats recyclés (GBR-1, GBR-2 et GBR-3), les granulats recyclés provenant d'un béton de qualité supérieure (GBR-3) offrent une plus grande résistance au béton produit avec ces granulats. La figure montre également que les résistances obtenues augmentent quel que soit l'âge du béton avec l'augmentation de la résistance du béton parent à partir duquel l'agrégat recyclé est fabriqué (BR-1, BR-2 et BR-3). La qualité (résistance) du BP à partir duquel le GR est obtenu a une influence significative sur le comportement du béton avec granulats recyclés.

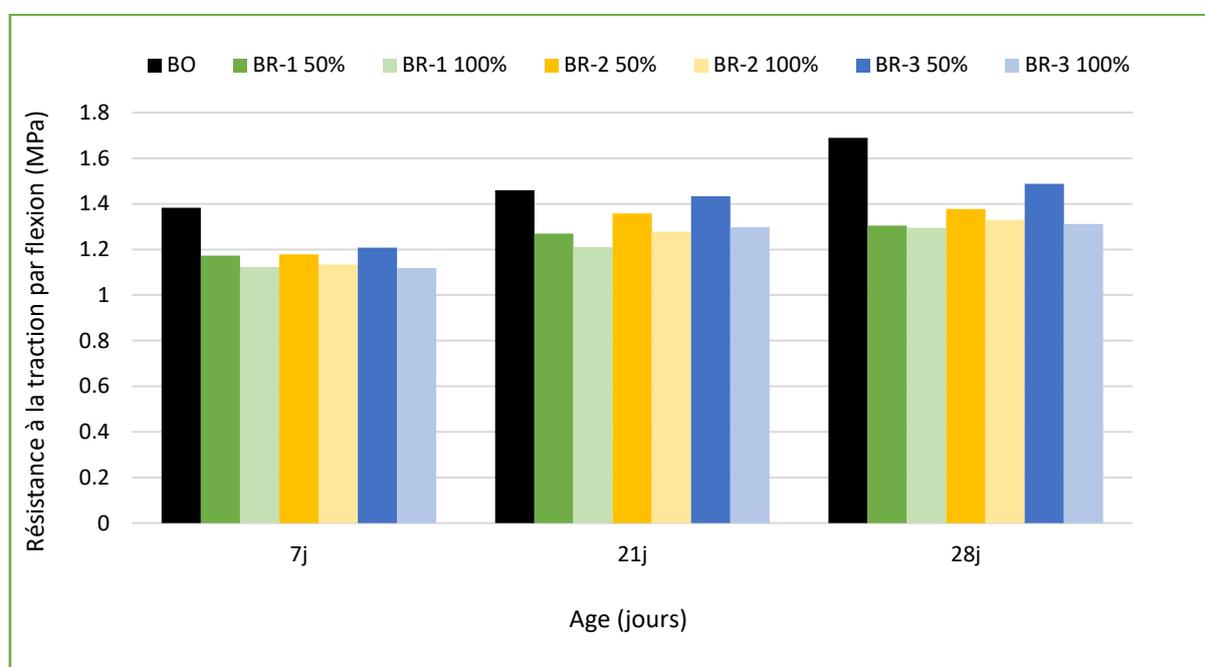


Figure IV-12: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton (BO , BR-1 ,BR-2 , BR-3)

Les résistances à la traction par flexion des différents mélanges sont illustrées dans la figure IV.12 . Selon les résultats, l'utilisation de granulats recyclés (GR) a également diminué la résistance à la traction par flexion. Par exemple, le mélange de béton ordinaire (BO) a montré une résistance à la traction par flexion de 1,690 MPa à 28 jours, alors qu'elle était à 1,311 et 1,294 MPa dans les mélanges des BR-1 et 1,377 et 1,329 MPa dans les mélanges des BR- 2 et 1,398 et 1,350 MPa dans les mélanges des BR-3 contenant 50 % et 100 % de GR successivement. Cette diminution est attribuée aussi à la porosité accrue des mélanges lorsque

la teneur en déchets augmente, ainsi qu'à la force de liaison entre les GR et la matrice cimentaire inférieure à celle des granulats naturels (GN). Comme pour la résistance à la compression, ce comportement est dû à la qualité inférieure des GR issus des béton parent (BP) de résistance médiocre (BR-1).

Après la rupture totale des éprouvettes prismatiques, l'observation des faciès de rupture Figure IV.13 des bétons ordinaire et recyclés (50% et 100%) amène les remarques suivantes :

- La présence de porosité (bulle d'air) sur les bétons recyclés est visible à l'œil nu ;
- On peut encore remarquer que les granulats recyclés et la pâte de ciment sont bien liaisonnés. Il n'y a pas de rupture (elle n'est pas visible à l'œil nu) entre les granulats recyclés et la pâte de ciment.

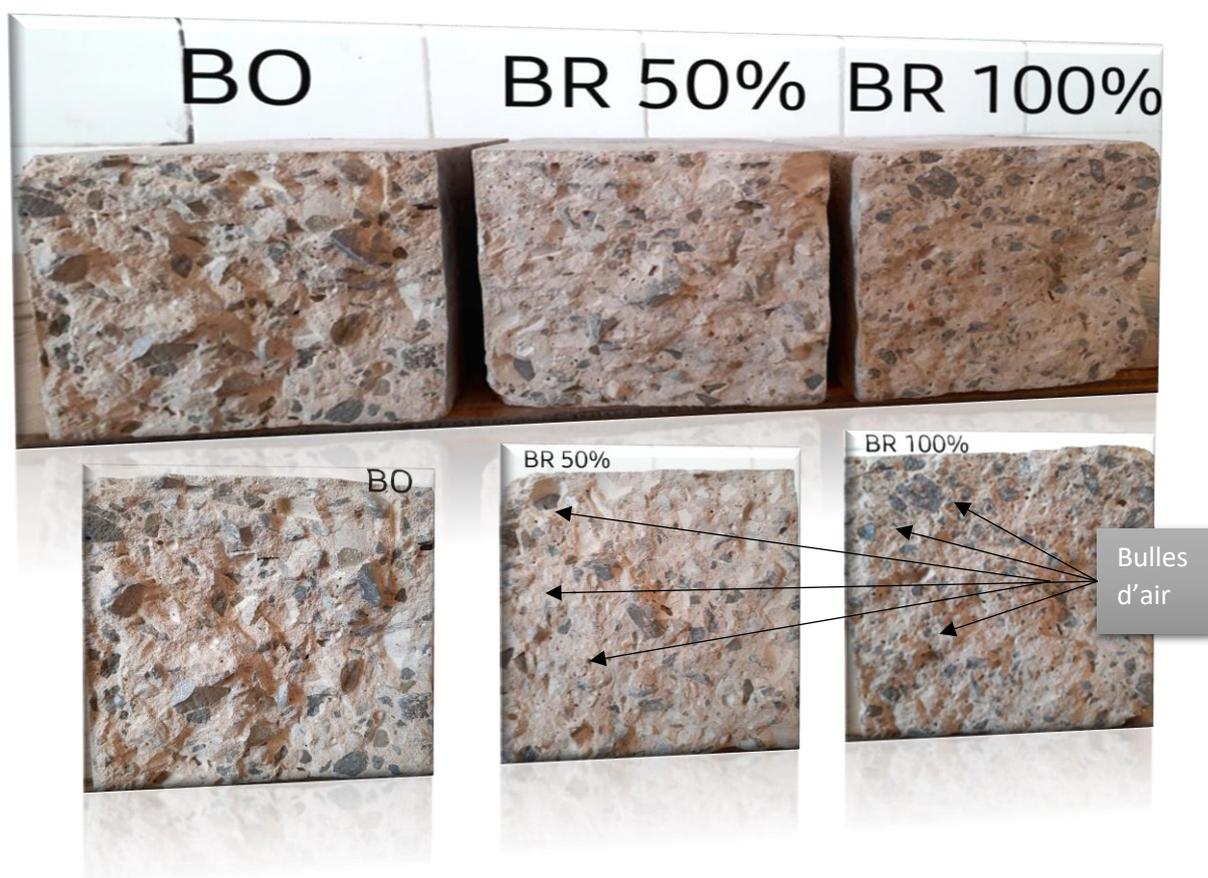


Figure IV-13: Faciès de rupture des bétons (BO, BR50% et BR100%)

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation d'agrégats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse au problème d'élimination de déchets et l'épuisement des sources d'agrégats naturels causés par le secteur de la construction. La grande quantité d'agrégats recyclés est actuellement utilisée dans des applications de bas de gamme, mais dans certaines économies développées ; elle est également employée dans le béton structurel, en raison de sa qualité qui est certifiée.

L'intégration du béton recyclé dans les pratiques de construction modernes constitue une démarche essentielle pour atteindre les objectifs de développement durable. Tandis que le béton ordinaire conserve ses avantages en termes de robustesse et de polyvalence, le béton recyclé présente des bénéfices environnementaux majeurs, sans compromettre significativement la performance structurelle. La promotion de l'utilisation du béton recyclé, soutenue par des recherches continues et des politiques incitatives, peut jouer un rôle crucial dans la transition vers une industrie de la construction plus durable et respectueuse de l'environnement. D'après la recherche expérimentale, le matériel utilisé pour la production d'agrégats recyclés ne diffère pas significativement de celui utilisé pour les agrégats naturels.

Et sur la base des résultats de cette étude expérimentale, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La confection et la mise en œuvre du béton recyclé (notamment avec des agrégats de béton concassé) sont très similaires à celles du béton ordinaire utilisant des granulats naturels ;
- Le béton à base de granulats recyclés (BR-1, BR-2 et BR-3) a une absorption d'eau plus importante comparée au béton ordinaire ;
- En raison de sa porosité plus élevée, le béton agrégé recyclé présente une densité inférieure aux bétons conventionnels pour toutes les différentes résistances et âges de durcissement ;
- L'utilisation d'agrégats recyclés dans les mélanges de béton (BO, BR-1, BR-2 et BR-3) a une maniabilité satisfaisante. Cependant, le béton aura une forte perte après 45 minutes en raison de l'absorption d'eau élevée de l'agrégat recyclé ;
- Les résultats indiquent que les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la traction) du béton fabriqué avec l'agrégat recyclé dérivé du béton parent de résistance normale à moyenne (BR-1, BR-2) sont considérablement réduites. Cependant les propriétés mécaniques du béton fabriqué avec béton parent de résistance meilleure (BR-

3) étaient similaires que celles du mélange de béton préparé uniquement avec des agrégats naturels ;

- L'analyse des résultats obtenus montre également que les résistances à la compression et à la traction par flexion du béton diminuent à mesure que le taux d'agrégats recyclés augmente (50% à 100%).

En conclusion le béton parent avec une résistance plus élevée (supérieure à 50 MPa) peut être utilisé pour remplacer les agrégats 100% naturels pour la production de béton recyclé de qualité. Ce présent travail apporte une contribution d'étude et à la connaissance du mécanisme de la résistance dans le béton recyclé, et que la voie soit continue pour la réalisation des essais expérimentaux complémentaires qui consisteraient à décrire mieux le matériau.

Parmi les thèmes portant sur l'amélioration de la qualité du béton recyclé, il est recommandé de développer et d'approfondir :

- Amélioration de la qualité de l'agrégat de béton recyclé (GBR) par l'optimisation des processus de production existants ;
- Amélioration de la composition des bétons recyclés (phase de malaxage) et le contrôle d'ouvrabilité.

Annexes

Annexe (1) : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable ES

ESV (%)	ESP (%)	Qualité de sable
ESV < 65	ESP < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités
65 ≤ ESV < 75	60 ≤ ESP < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 ≤ ESV < 85	65 ≤ ESP ≤ 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
ESV ≥ 85	ESP > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Annexe (2) : Classification des sables en fonction du module de finesse

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	>2,5
Moyen	2 á 2,5
Fin	1,5 á 2
Très Fin	1 á 1,5

Annexe (3) : Classification des roches en fraction du coefficient LA

Coefficient La	Nature de la roche
<20	Très dure
20 á 25	Dure
25 á 30	Assez dure
30 á 40	Mis dure
40 á 50	Tendre
>50	Très tendre

Annexe (4) : Classification des roches en fonction du coefficient MDE

Valeurs de coefficient Micro Deval en présence de l'eau	Appréciation
<10	Très bon à bon
De 10 à 20	Bon à moyen
De 20 à 35	Moyen à faible
>35	Médiocre

Annexe (5) : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams

Classe de consistance	Définition	Affaissement (mm)
S1	Ferme	10 à 40
S2	Plastique	50 à 90
S3	Très plastique	100 à 150
S4	Fluide	160 à 210
S5	Très fluide	≥220

Annexe (6) : Fiche technique de ciment MATINE



متين Matine

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

Annexe (7) : Normes des essais sur différents constituants de béton

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

FORMULATION DES BETONS : METHODE DE DREUX-GORISSE

Critère de résistance :

$$f_{c28} = 30 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28}$$

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28} = 1.15 \times 30 = 34.5 \text{ MPa}$$

Choix du ciment :

Tableau : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

Avec :

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (Tab.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{\max} .

Qualité des granulats	Dimension D_{\max} des granulats		
	Fins $D_{\max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$	Gros $D_{\max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G' \cdot \sigma'_c} + 0.5$$

$$\frac{C}{E} = \frac{34.5}{0.5 \times 55} + 0.5 = 1.75$$

Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 1 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

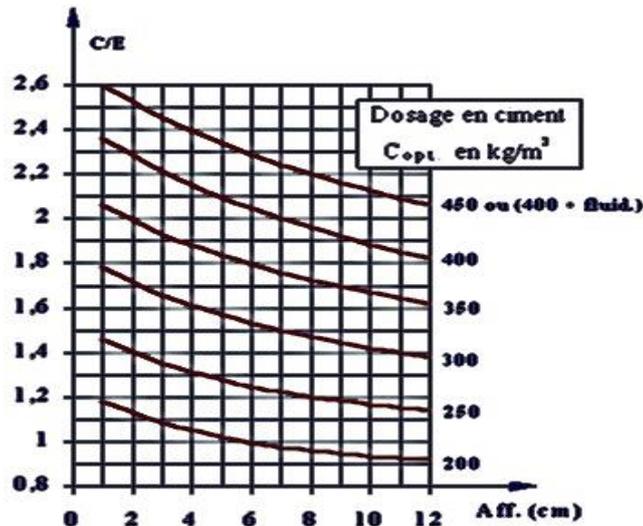


Figure : Abaque permettant la détermination de C_{opt} .

$$C = 365 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{C}{E} = 1.75$$

$$E = \frac{C}{1.75} = 208.57 \text{ kg/m}^3$$

$$Y = 50 - \sqrt{1.25 (D_{max})} + K' \quad \text{Avec } K' = K + K_S + K_P$$

$$K' = 8.96$$

$$D_{max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = D_{max} / 2$$

$$X = 10 \text{ cm} ; Y = 53.96 \text{ cm}$$

Détermination de la compacité du béton

$$V = (C - V_c)$$

$$V_c = \frac{C}{f_c} = \frac{365}{3.1 \text{ t/m}^3}$$

$$V_c = 0.118 \text{ m}^3$$

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3$$

Tableau 7 : Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	compacité (c_0)						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=8$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Nota :

- Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = - 0,01$)

Sable et gravier concassé ($c_1 = - 0,03$)

Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0.03$) * Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant : ($c_3 = (C - 350) / 5000$)

C= 0.768

Vt= 0.768-0.118

Vt= 0.65 m³

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

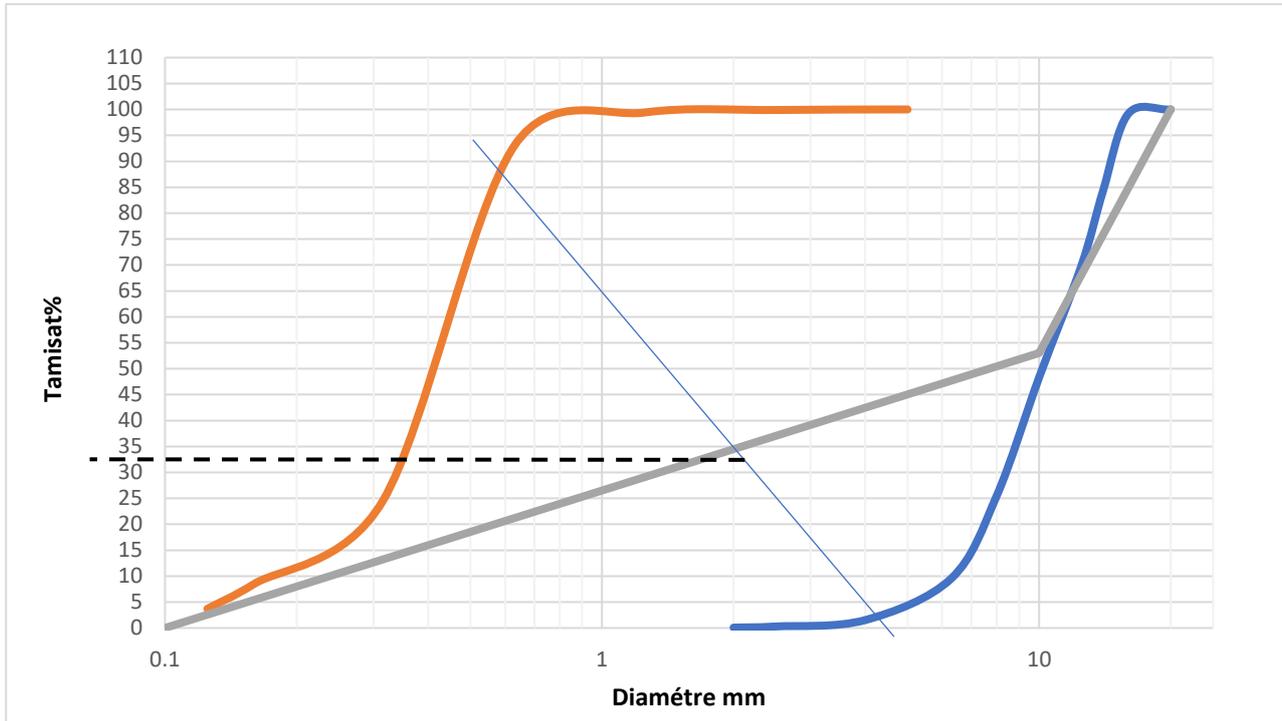


Figure : Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

$$V_s\% = 39\%$$

$$V_g\% = 61\%$$

Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable ($S\%$), de gravillon ($g\%$) et de gravier ($G\%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S , g et G) :

$$V_s = V * S\% = 0.2535 \text{ m}^3$$

$$S = V * S\% * \rho_s(S) = 626.145 \text{ Kg}$$

$$V_g = V * g\% = 0.3965 \text{ m}^3$$

$$g = V * g\% * \rho_s(g) = 1090.375 \text{ Kg}$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes : $\rho_s(c) = 3,1 \text{ t/m}^3$, $\rho_s(S) = 2,6 \text{ t/m}^3$, $\rho_s(g) = 2,6 \text{ t/m}^3$.

Tableau: Conception du mélange kg/m³

Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier naturel (kg)	Gravier recyclé (kg)		E/C	Eau
365,00	626.145	1090,375	50%	100%	0,571	208,570
			545,187	1090,375		



البطاقة التقنية للمشروع

مسدد محمد الأمين بن عابد عمر	الاسم و اللقب Votre prénom et nom Your first and last Name
الخصى المدور للأشغال GR des Travaux	الاسم التجاري للمشروع Intitulé de votre projet Title of your Project
شركة أشغال	الصفة القانونية للمشروع Votre statut juridique Your legal status
0559277045 0674715158	رقم الهاتف Votre numéro de téléphone Your phone number
aminemoh382@gmail.com benabedamar45@gmail.com	البريد الإلكتروني Votre adresse e-mail



Your email address

(تيارت-تيارت)	مقر مزاولة النشاط (الولاية- البلدية) Votre ville ou commune d'activité Your city or municipality of activity
---------------	---

طبيعة المشروع

	المشروع يتعلق بإستبدال نسبة من الحصى الطبيعي بالحصى المستخرج من خرسانة البناء المهدم
--	--

Value Proposition القيمة المقترحة أو العرض المقدم

تحديد المشكل الذي يواجهه الزبون

➤ الحفاظ على الطبيعة من التلوث ➤ الحفاظ على الموارد الطبيعية ➤ إستغلال نفايات حطام البناء	ما هي المشكلة التي تريد حلها؟
---	-------------------------------



التقليل من إستهلاك المواد الأولية الغير دائمة (حصى البناء)	ما هي البيانات المتوفرة لديك التي تثل على وجود المشكلة المحددة؟
البلاستيك، الزجاج،	ما هي المشاريع الأخرى التي استهدفت نفس المشكلة والتي جرى تنفيذها؟
التقليل من إستخدام المادة الأولية حصى البناء	ماهي أهداف مشروعك و/أو نتائجه المتوقعة؟

القيمة المقترحة وفق المعايير التالية

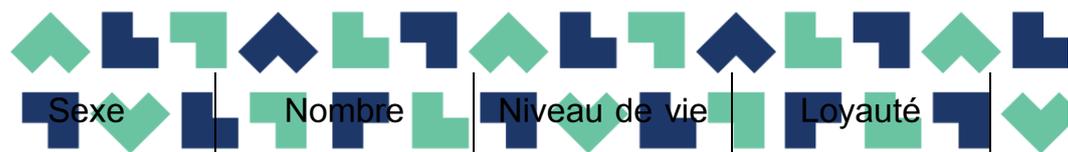
<ul style="list-style-type: none"> ➤ الحصى المدور بديل الحصى الطبيعي ➤ إستغلال حكام البناء الغير مستعمل ➤ إستغلال أماكن نفايات البناء والتي تقدر بكميات كبيرة 	القيمة المبتكرة أو الجديدة
<ul style="list-style-type: none"> ➤ تحميل نفايات الباء من أماكن الهدم ➤ ترتيبها في الأماكن المخصصة لإعادة تدويرها ➤ إستعمال الآلات المخصصة للتحطيم 	القيمة بالتخصيص



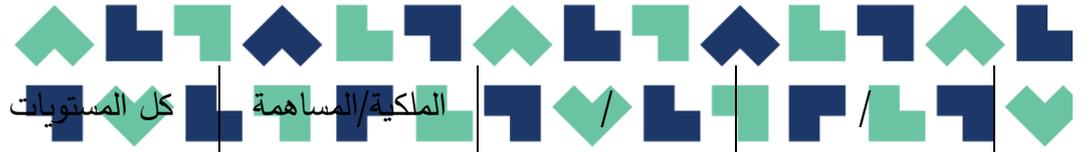
الحصى المطلوبة	
8 000 000 ,00 DA	القيمة بالسعر
8 500 000,00 DA	القيمة بالتصميم
9 100 000,00 DA	القيمة بالأداء العالي
9 900 000,00 DA	القيمة بالخدمة الشاملة
12 000 000,00 DA	القيمة المبتكرة أو الجديدة
/	قيم أخرى

شرائح العملاء أو الزبائن Customer Segments

Continent	Age	Secteur	Classe sociale	Usage
القارة	العمر	القطاع	كل الطبقات	استخدام
كل قارات	18الى 81	البناء		عام



Pays	Sexe	Nombre	Niveau de vie	Loyauté
الدولة الجزائر	الجنس ذكر/أنثى	d'employés عدد العمال في القطاع غير محدود	المستوى المعيشي ضعيف/متوسط/جيد	الوفاء الإلتزام بكل واجباته
Région الجهة كل انحاء الوطن	Revenus annuel متوسط الدخل 3,6 مليار دينار	Maturité de l'entreprise نضج المؤسسة عادي	Valeurs القيم /	Intérêt اهتمام مجال البناء /مقاولاتي
Département الولاية تيارت	Etat matrimonial الحالة الاجتماعية ضعيفة إلى متوسطة	Situation financière الحالة المالية للمؤسسة /	Personnalité الشخصية جاد و متفهم و مثابر بعمله	Passion الهواية و شغف /
Ville الدائرة او البلدية	Niveau d'étude المستوى الدراسي	Détention/ actionnariat	Convictions المعتقدات	Sensibilité حساسيات



Quartier الحي /	Profession المهنة كل المهن	Valorisation/ capitalisation boursière التقييم / القيمة السوقية 3 مليون دينار للمحمولة واحدة	Présence digitale et sur les réseaux sociaux استعمال التكنولوجيا في التواصل نعم	Habitude de consommation عادة الاستهلاك حسب الطلب
Climat المناخ /	Culture الثقافة /	Business model نموذج الأعمال /	Centres d'intérêts مراكز الاهتمام	Mode de paiement طرق الدفع دفع عند استلام
	Religion الدين مسلم	Secteur servi القطاع الذي يخدمه		Connaissance المعرفة غير محدودة



		هندسة معمارية		
	Langue اللغة كل اللغات	Technologie utilisée التكنولوجيا المستعملة متطورة	طلب المنتج من مصدر انتاج	Nature de la demande طبيعة الطلب
	تعبئة	Format du produit ou packaging شكل المنتج أو التعبئة والتغليف	غير محدود	Fréquence d'achat عدد مرات الطلب على السلعة

قنوات التوزيع Channels

نعم	المبيعات المباشرة
نعم	تجار الجملة
نعم	الموزعون

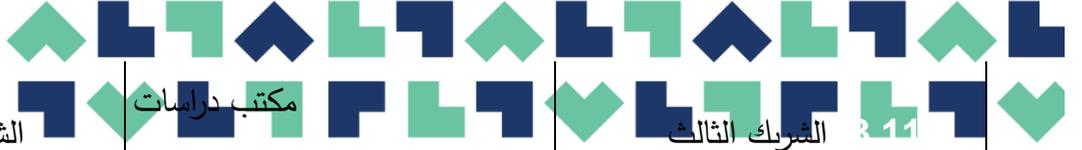


Customer Relationship العلاقة مع العملاء

<p>فهم توقعات العملاء</p> <p>تقديم قيمة مضافة</p> <p>التواصل المستمر</p> <p>تشجيع العملاء على مشاركة تجاربهم</p>	<p>كيف تدير علاقاتك مع العملاء؟</p>
<p>هاتف/ مواقع تواصل اجتماعية</p> <p>MICROSOFT DYNAMICS</p>	<p>ما هي أهم البرامج التي ستعتمد عليها في إدارة العلاقة مع الزبون</p> <p>Microsoft Dynamics</p> <p>Monday CRM</p> <p>Zoho CRM</p> <p>.....</p>

Key Partners الشركاء الأساسيون

1.3.8 طبيعة الشراكة	1.3.7 معلومات حول الشركاء	1.3.6 الشركاء
	الولاية	الشريك الأول
الشريك ليس منافس و انما هي عملية ترتيب متبادل المنفعة يكون لنا معه مصلحة مشتركة في تطوير منتجات جديدة إستراتيجية مصممة لتقليل المخاطر ، والتي قد ترتبط بإحضار منتج جديد إلى السوق علاقتنا مع الشريك هي علاقات بين المشتري والمورد	بلدية	الشريك الثاني



الشريك ليس منافس و إنما

هي عملية ترتيب متبادل المنفعة

يكون لنا معه مصلحة

مشتركة في تطوير منتجات جديدة

إستراتيجية مصممة لتقليل

المخاطر ، والتي قد ترتبط بإحضار

منتج جديد إلى السوق

علاقتنا مع الشريك هي

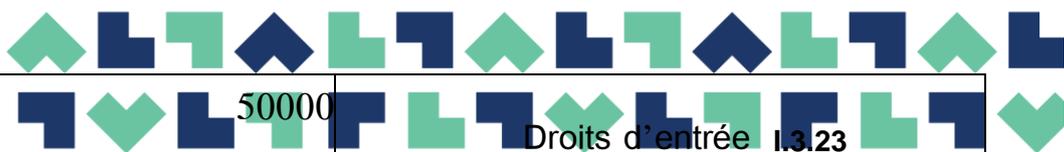
علاقات بين المشتري والمورد

قم بكتابة قائمة الشركاء الرئيسيون لمشروعك بالتفصيل مع ذكر الإسم، الهاتف، العنوان... إلخ

هيكل التكاليف structure Costs



<p>20000</p>	<p>I.3.12 تكاليف التعريف بالمنتج أو المؤسسة</p> <p>Frais d'établissement I.3.13</p> <p>I.3.14</p>
<p>50000</p>	<p>I.3.16 تكاليف الحصول على العدادات (الماء - الكهرباء)</p> <p>(.....)</p> <p>Frais d'ouverture de compteurs (eaux- I.3.17 gaz-.....)</p>
<p>/</p>	<p>I.3.18 تكاليف (التكوين - برامج الاعلام الالي المختصة)</p> <p>Logiciels, formations I.3.19</p> <p>I.3.20</p>
<p>تتكلف بها الجامعة</p>	<p>Dépôt marque, brevet, modèle I.3.21</p> <p>I.3.22 تكاليف براءة الاختراع و الحماية الصناعية و التجارية</p>



50000	Droits d'entrée I.3.23 I.3.24 تكاليف الحصول على تكنولوجيا او ترخيص استعمالها
50000	Achat fonds de commerce ou parts I.3.2 I.3.26 شراء الأصول التجارية أو الأسهم
150000	Droit au bail I.3.27 I.3.28 الحق في الإيجار
50000	Caution ou dépôt de garantie I.3.29 I.3.30 وديعة أو وديعة تأمين
50000	Frais de dossier I.3.31 I.3.32 رسوم إيداع الملفات
50000	Frais de notaire ou d'avocat I.3.33 I.3.34 تكاليف الموثق-المحامي-.....



50000	Enseigne et éléments de communication I.3.35 تكاليف التعريف بالعلامة و تكاليف قنوات الاتصال I.3
/	Achat immobilier I.3.37 I.3.38 شراء العقارات
120000	Travaux et aménagements I.3.39 I.3.40 الأعمال والتحسينات الاماكن
7000000	Matériel I.3.41 I.3.42 الآلات- المركبات- الاجهزة
100000	Matériel de bureau I.3.43 I.3.44 تجهيزات المكتب
500000	Stock de matières et produits I.3.45 I.3.46 تكاليف التخزين



8000000

Trésorerie de départ 1.3.47

1.3.4 التدفق النقدي (الصندوق) الذي تحتاجه في بداية المشروع.

المجموع = 12 000 000,00DA

نفقاتك أو التكاليف الثابتة الخاصة بمشروعك



25 000,00	Assurances I.3.49 التأمينات I.3.50
50 000,00	Téléphone, internet I.3.51 الهاتف و الانترنت I.3.52
20 000,00	Autres abonnements I.3.53 اشتراكات أخرى I.3.54
50 000,00	Carburant, transports I.3.55 الوقود و تكاليف النقل I.3.56
/	Frais de déplacement et hébergement I.3 تكاليف التنقل و المبيت I.3.58
15 000,00	Eau, électricité, gaz I.3.59 فواتير الماء - الكهرباء - الغاز I.3.60



20 000,00	Mutuelle I.3.61 التعاضدية الاجتماعية I.3.62 I.3.63
50 000,00	Fournitures diverses I.3.64 لوازم متنوعة I.3.65
20 000,00	Entretien matériel et vêtements I.3.66 صيانة المعدات والملابس I.3.67
10 000,00	Nettoyage des locaux I.3.68 تنظيف المباني I.3.69
10 000,00	Budget publicité et communication I.3.70 ميزانية الإعلان والاتصالات I.3.71

المجموع = 27 0000,00

/	Apport personnel ou familial المساهمة الشخصية أو العائلية
/	Apports en nature (en valeur) التبرعات العينية
بنك السلام	Prêt n°1 (nom de la banque) قرض رقم 1 اسم البنك
بنك البدر	Prêt n°2 (nom de la banque) قرض رقم 2 اسم البنك
بنك الخارجي الجزائري	Prêt n°3 (nom de la banque) قرض رقم 3 اسم البنك
6 000000,00	Subvention n°1 (libellé) منحة 1
6 000000,00	Subvention n°2 (libellé) منحة 2
/	Autre financement (libellé) تمويل آخر

المجموع = 12 000 000,00 DA



رقم الأعمال

بيع المنتج في السنة الأولى **Votre chiffre d'affaires de la première année**

متوسط أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الأولى
20	1Mois الشهر
20	2Mois الشهر
20	3Mois الشهر
20	4Mois الشهر
20	5Mois الشهر
20	6Mois الشهر
20	7Mois الشهر
20	8Mois الشهر
20	9Mois الشهر
20	10Mois الشهر



20	الشهر 11Mois
20	الشهر 12Mois

= المجموع

النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الأولى؟

بيع المنتج في السنة الثانية **Votre chiffre d'affaires de la deuxième année**

متوسط أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الثانية
20	الشهر 1Mois
20	الشهر 2Mois
20	الشهر 3Mois
20	الشهر 4Mois
20	الشهر 5Mois
20	الشهر 6Mois
20	الشهر 7Mois
20	الشهر 8Mois
20	الشهر 9Mois
20	الشهر 10Mois
20	الشهر 11Mois



= المجموع

النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثانية؟

Votre chiffre d'affaires de la troisième année بيع المنتج في السنة الثالثة

متوسط أيام العمل في الشهر	بيع المنتج في السنة الثالثة
20	1Mois الشهر
20	2Mois الشهر
20	3Mois الشهر
20	4Mois الشهر
20	5Mois الشهر
20	6Mois الشهر
20	7Mois الشهر
20	8Mois الشهر
20	9Mois الشهر
20	10Mois الشهر
20	11Mois الشهر
20	12Mois الشهر



= المجموع

النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين كل شهر لسنة الثالثة ؟

تطور حجم رقم الأعمال في السنة

- النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين السنة 1 والسنة 2؟
- النسبة المئوية للزيادة في حجم الأعمال بين السنة 2 والسنة 3 ؟

حاجتك لرأس المال العامل

30 يوم	متوسط مدة الاعتمادات الممنوحة للعملاء بالأيام Durée moyenne des crédits accordés aux clients en jours
30 يوم	متوسط مدة ديون الموردين بالأيام Durée moyenne des dettes fournisseurs en jours

رواتب الموظفين و مسؤولين الشركة

40 000,00	رواتب الموظفين Salaires employés
70 000,00	صافي أجور المسؤولين



Rémunération nette dirigeant

ANNEXES
