



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Génie Civil.

Option : structure.

Présenté par :

GASDI Wissame

KARMOUZI Fatima Zohra

Sujet du mémoire

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE POUR LA
DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES D'UN BÉTON
RECYCLÉ**

Soutenu publiquement le 05/10/2020. devant le jury composé de :

Mr, **B. SERBAH**

Mlle, **Z. RENNAK**

Mr, **H. BEKKI**

Mme, **A. DRAOUI**

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

PROMOTION : 2019/2020

Dédicace

Nous dédions ce mémoire

*À nos chers parents nos mères et nos pères pour leur patience, leur amour,
leur soutien et leurs encouragements.*

À nos frères.

À nos amis et nos camarades.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire ou de l'enseignement
supérieur.*

REMERCIEMENTS

Le premier remerciement c'est pour le **DIEU** qui nous a permis d'être dans cette situation et d'avoir cette formation.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos plus vifs remerciements à Mlle : **Z. RENNAK**, en tant que encadreur de ce travail, pour la proposition de ce sujet de recherche, sa grande patience, tous les encouragements qu'elle n'a cessé de nous prodiguer, pour la confiance qu'elle nous accordés. Nous la remercies pour l'aide qu'elle a su nous apporter.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Monsieur: **B.SERBAH**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury. Nos remerciements s'adressent également à Messieurs **H.BEKKI**, et madame **A.DRAOUI**, qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et ont bien voulu participer à ce jury.

Nous remercions également à Monsieur : **K. BOUAKKAZ**, Chef du Département de Génie Civil de l'Université **IBN KHALDOUN - TIARET**, pour toute l'aide apportée.

Un remerciement spécial à tous nos enseignants du département de Génie Civil de l'Université **IBN KHALDOUN – TIARET**.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel technique et administratif du département de génie civil de Tiaret ainsi que tous nos collègues.

Des spéciaux remerciements vont à Chef du département géotechnique du Laboratoire des Travaux Publics de l'ouest (**LTPO**) de Tiaret, de nous avoir accueillir au sein de son établissement.

Nous tenons enfin à remercier nos familles pour leur soutien et leur aide.

ABLE DES MATIERES

TABLES DES MATIERS.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS.....	XV
RESUMÉ.....	XVI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I : LE BETON RECYCLE :	5
I.1 INTRODUCTION :.....	5
I.2 DEFINITION :	6
I.3 POURQUOI UTILISER DES GRANULATS RECYCLES DANS LE BETON ?.....	6
I.3.1 Responsabilité environnementale et économie circulaire :.....	6
I.3.1.1 Le concept d'économie circulaire :	6
I.3.1.2 L'évolution environnementale :	7
I.3.1.3 Le rôle de l'Union Européenne dans l'évolution environnementale :	9
I.3.1.4 Construction et économie circulaire :	10
I.4 QUELS GISEMENTS POTENTIELS POUR DES GRANULATS RECYCLES DANS LES BETONS ?	11
I.5 DECHETS DE CONSTRUCTION ET DE DEMOLITION :	14
I.5.1 Différents types de Déchets de Construction et de Démolition :	14
I.5.2 Techniques et matériaux de démolition :	15
I.5.2.1 Techniques de démolition :.....	15
I.5.2.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main :.....	16
I.5.2.1.2 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés :	16
I.5.2.1.3 Démolition par dynamitage :.....	16
I.5.2.1.4 Autres procédés de démolition :.....	18
I.5.2.2 Démolition/déconstruction et coûts :	18
I.5.2.3 Matériaux produits :	19
I.6 ÉLABORATION DES GRANULATS DE BETON RECYCLE :	20
I.6.1 Concassage :.....	20
I.6.2 Criblage :	21
I.6.3 Dépoussiérage :	22
I.6.4 Tri par la densité :	23
I.6.5 Tri par capteurs :	23
I.6.6 Libération :	24

I.7 CARACTERISATION DES GRANULATS DE BETON RECYCLE :	26
I.7.1 Composition et propriétés chimiques des GBR :	27
I.7.1.1 Mesure de la teneur en pâte de ciment durci (PCD) adhérente et de mortier adhérent	27
I.7.1.2 Paramètres influençant la teneur en PCD ou en MA :	28
I.7.1.3. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR :	28
I.7.2 Propriétés physiques des GBR :	29
I.7.2.1 Masse volumique et absorption d'eau des GBR :	29
I.7.2.1 Influence de la carbonatation sur les propriétés des GBR :	30
I.7.3 Propriétés mécaniques des GBR :	30
I.7.3.1. Résistance aux chocs et à l'abrasion :	30
I.7.3.2. Résistance à la compression:	31
I.8 LE BETON RECYCLE, DE LA FABRICATION AU DURCISSEMENT :	33
I.8.1 Fabrication du béton recyclé :	33
I.8.1.1 Fabrication du béton avec des GBR en centrale de BPE :	34
I.8.1.1.1 Teneur en eau (humidité) :	34
I.8.1.1.2 Pré-saturation des GBR :	34
I.8.1.1.3 Procédure de malaxage – effet de la séquence de chargement :	35
I.8.1.1.4 Enrobage des granulats :	36
I.8.1.1.5 Méthode de malaxage :	36
I.8.1.1.6 Utilisation de pré-mélanges granulaires :	37
I.9 LIANTS INCORPORANT DES GRANULATS DE BETON RECYCLE :	37
I.9.1 Béton recyclé utilisé comme matière première alternative pour la fabrication du clinker portland :	37
I.9.2 Béton recyclé utilisé comme constituant du ciment ou comme ajout cimentaire au	38
I.10 EFFET DES GRANULATS DE BETON RECYCLE SUR LES PROPRIETES DU BETON FRAIS :	39
I.11 PROPRIETES DU BETON RECYCLE DURCI :	39
I.11.1 Microstructure du béton recyclé :	40
I.11.2 Résistance à la compression :	41
I.11.3 Résistance à la traction par flexion et par fendage :	42
I.11.4 Module d'élasticité :	42
I.12 PROPRIETES MECANIKES DIFFEREES :	42
I.12.1 Influence du taux de substitution des GBR sur le retrait :	43
I.12.2 Influence du taux de substitution des granulats recyclés sur le fluage :	44
I.13 PROPRIETES LIEES A LA DURABILITE :	44
I.14 COMPORTEMENT AU FEU:	45

I.15 ADHERENCE ENTRE ARMATURES ET BETONS DE GBR :	46
I.16 DOMAINES D'UTILISATION DES BETONS DE GBR :	47
I.16.1 Pont-cadre classique :	47
I.16.2 Bâtiment pour archives administratives :	48
I.16.3 Immeuble de bureaux / dalle intérieure :	49
I.19 CONCLUSION :	51
II GENERALITE SUR LES RESISTANCES MECANQUES DES BETONS :	53
II.1 INTRODUCTION:	53
II.2 DEFINITION :	54
II.3 LES TYPES DE RESISTANCE :	54
II.3.1 La résistance à la traction :	54
II.3.1.1 Définition :	54
II.3.1.2 Paramètres de l'essai :	54
II.3.1.2.1 Moules et éprouvettes :	54
II.3.1.2.2 Nombres d'éprouvette:	56
II.3.1.2.3 Vitesse de sollicitation :	56
II.3.1.3 Pratique des essais de traction sur le béton:	56
II.3.1.3.1 Essai de traction directe:	57
II.3.1.3.2 Essai de traction par fendage:	58
II.3.1.3.3 Essai de traction par flexion :	61
II.3.1.3.3.1 Essai sur machine «SIMRUPT»:	61
II.3.1.3.3.2 Essai sur machine de flexion 3 ou 4 points:	62
II.3.2 LA Résistance à la compression:	65
II.3.2.1 Introduction :	66
II.3.2.2 Evolution de la résistance à la compression :	67
II.3.2.3 Évaluation avec l'âge du béton:	68
II.3.2.4 Résistance du béton à l'état frais :	69
II.3.2.5 Mesure de la résistance à la compression (NF P 18-406) :	69
II.3.2.5.1 Confection des éprouvettes :	69
II.3.2.5.1.1 Dimension des moules (NFP 18-400) :	69
II.3.2.5.1.2 Conduite de l'essai de rupture :	70
II.3.2.5.1.3 Particularités de la rupture en compression :	71
II.3.2.6 Autres méthodes expérimentales:	72
II.3.2.6.1 Dispositifs ultrasonores et d'écrasement :	72
II.3.2.6.2 Mesure de la dureté de surface par rebondissement au scléromètre:	74

II.3.2.6.3 Valeurs mesurées :	75
II.3.2.7 Effet de la forme de l'éprouvette:	76
II.3.2.8 Mode de rupture en compression:	77
II.3.3 Développement des résistances:	78
II.3.3.1 Résistances du béton recyclé:	79
II.3.3.1.1 La résistance à la compression:	79
II.3.3.1.2 Traction par fendage :	86
II.4 CONCLUSION :	90
III : METHODES DE FORMULATION DES BETONS	91
III.1 INTRODUCTION :	91
III.2 COMMENT DETERMINER LA COMPOSITION DU BETON ?	92
III.3 CRITERES EN FONCTION DE LA DESTINATION DES BETONS :	92
III.3.1 Dimension maximale D des granulats :	95
III.3.2 Résistance souhaités :	95
III.3.3 Ouvrabilité :	96
III.3.4 Agressivité du milieu ambiant :	96
III.4 METHODES EXPERIMENTALES :	96
III.4.1 Objectif :	96
III.4.2 Critère de maniabilité :	97
III.4.3 Critère de résistance :	97
III.4.4 Choix de ciment :	97
III.4.5 Choix des granulats :	98
III .4.6 Choix des classes granulaires :	98
III .4.6. Les facteurs influents sur le Choix des granulats :	98
III.4.7 Dosage en eau :	98
III.4.8 Dosage d'adjuvant :	99
III.5 LES DIFFERENTES METHODES APPLICABLES AU BETON :	99
III.5.1 Méthode de Bolomey :	99
III.5.1.1 Considération expérimentale :	99
III.5.1.2 Calcule du pourcentage des constituants :	100
III.5.2 Méthode d'Abrams :	101
III.5.3 méthode de Faury:	102
III.5.3.1 Particularité de la méthode :	103
III.5.3.2 Courbe optimale :	103
III.5.3.2.1 Calcule de D :	104

III.5.3.2.2	Calcul de l'indice de vide et de la quantité d'eau du gâchage :	104
III.5.3.2.3	Composition pondérale des constituants solides :	105
III.5.4	Méthode de Vallette :	106
III.5.5	Méthode de Baron et Lesag:	107
III.5.6	Méthode de Dreux et Gorisse :	107
III.5.6.1	Énoncé du problème :	107
III.5.6.2	Principe de la méthode :	107
III.5.6.3	Les différentes étapes :	108
III.5.6.4	Dosage en ciment et en eau :	108
III.5.6.5	Dosage en eau réel :	110
III.5.6.6	Courbe granulaire de référence :	110
III.5.6.6	Proportion des granulats :	111
III.5.6.7	Masse des granulats :	111
III.5.7	Méthode de Féret [1892]:	113
III 5.8	méthode de Joisel:	114
III.5.9	Méthode britannique (BRE 1988) :	115
III.5.10	Méthode américaine (ACI 211) :	116
III.6	FORMULATION DES BETONS RECYCLES:	116
III.6.1	Conséquences des spécificités des granulats recyclés sur la formulation:	116
III.6.1.1	Absorption d'eau :	117
III.6.1.2	Propriétés mécaniques :	118
III.6.1.3	Compacité :	118
III.6.2.	Performances visées par le formulateur :	119
III.6.2.1	Approche générale classique :	119
III.6.2.2	Définition du cahier des charges :	120
III.6.2.3:	Evaluation du E_{eff}/L_{equi} :	121
III.6.2.4	Optimisation de la compacité :	122
III.6.2.4	Optimisation du rapport G/S :	123
III.6.2.5	Ajustement de la teneur en eau :	123
III.6.3	Optimisation du taux de recyclage :	123
III.6.3.1	Apport d'un modèle scientifique de formulation :	123
III.7	CONCLUSION :	125
IV	ESSAIS SUR BETONS :	128
IV.1	INTRODUCTION :	128
IV.2	LES MATERIAUX UTILISES POUR REALISER LES ESSAIS:	128

IV.3 LISTE DES ESSAIS REALISES :	130
IV.3.1 Analyse Granulométrique par Tamisage du sable et gravier :	130
IV.3.1.1 Module de finesse :	133
IV.3.2 Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats :	134
IV.3.3 Détermination de la masse volumique absolue d'un gravier:	136
IV.3.4 Mesure de la propreté des granulats (l'essai d'équivalent de sable):	137
IV.3.5 Essai au bleu de mythylene :	139
IV.3.6 Essai de l'évaluation des carbonates :	142
IV.3.7 L'essai de poids spécifique des grains solides :	144
IV.3.8 Essais los Angeles :	145
IV.3.9 Essais micro Deval :	149
IV.5.9 Essai de Propreté superficielle:	151
IV.3.10 Essai de la masse volumique apparente :	152
IV.4 LA FORMULATION D'UN BETON ORDINAIRE :	153
IV.4.1 La méthode utilisée :	153
IV.5 ORIGINE DES GRANULATS RECYCLES :	154
IV.5.1 Elaboration et préparation des granulats recyclés :	154
IV.6 LA FORMULATION D'UN BETON RECYCLE :	154
IV.7 :FABRICATION DES ECHANTILLONS :	155
IV.8 PROPRIETES DE BETON A L'ETAT FRAIS :	156
IV.8.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	156
IV.9 PROPRIETES DE BETON A L'ETAT DURCI :	157
IV.9.1:Préparation des éprouvettes (essais de compression) :	157
IV.9.2 Réparation et positionnement des éprouvettes :	159
IV.10 CONCLUSION :	160
V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS :	162
V.1 INTRODUCTION :	162
CONCLUSION GENERALE	180
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	183
ANNEXES.....	187

LISTE DES TABLEAUX

N° : de tab.	Titre	Page
CHAPITRE I :		
tab. (I.1)	: Volume des différents types de Déchets de Construction et de Démolition.....	19
tab. (I.2)	: Méthodes de séparation (procédés décrits dans la littérature).....	25
CHAPITRE II :		
tab. (II.1)	: Dimensions des éprouvettes cylindriques.....	55
tab. (II.2)	: Dimensions des éprouvettes prismatique	55
tab. (II.3)	: Evaluation de la résistance du béton et les rapports des résistances à une Température de 20°C.....	67
tab. (II.4)	: Evaluation de la résistance selon CEB-fib Model code 2010.....	74
tab. (II.5)	: Valeur moyenne de la résistance à la compression mesurée par les méthodes, écart type et la variation en pourcentage.....	75
tab. (II.6)	: Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression...	76
tab. (II.7)	: Valeur de kg_j pour chaque type de granulats.....	82
tab. (II.8)	: Composition du béton RECYBETON [Sedran, 2013].....	84
tab. (II.9)	: Valeurs ajustées de kt_j en supposant que tous les granulats naturels et que tous les GBR aient chacun la même valeur constante.....	86
tab. (II.10)	: Coefficient de traction de [Dao,2012],obtenus avec des GBR1 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 45 MPa et des GBR2 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 65 MPa	88
tab. (II.11)	: Coefficient de traction selon [Ajdukiewicz et Kliszczewicz,2007]	88

CHAPITRE III :

tab.	(III.1)	: Démentions admissible D pour les plus gros granulats.....	95
tab.	(III.2)	: Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser..	96
tab.	(III.3)	: Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.....	98
tab.	(III.4)	: Les valeurs de K	100
tab.	(III.5)	: Valeurs optimales du module de finesse des Compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams).....	102
tab.	(III.6)	: la nature des bétons avec le diamètre maximum de D.....	103
tab.	(III.7)	: la valeur de la consistance en fonction du D	104
tab.	(III.8)	: Valeur de k et k'.....	105
tab.	(III.9)	: La connaissance ou l'évaluation de, G et permet de calculer la valeur de C/E.....	109
tab.	(III.10)	: Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D de granulats (si $D \neq 25\text{mm}$).....	109
tab.	(III.11)	: La valeur du coefficient de γ	112
tab.	(III.12)	: Coefficient k en fonction de la forme des granulats ; du mode de vibration et du Ciment.....	113

CHAPITRE IV:

tab.	(IV.1)	: Dimensions nominales des tamis.....	132
tab.	(IV.2)	: Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées.....	135
tab.	(IV.3)	: Le pourcentage carbonaté présumé et sa masse de la prise d'essai.....	143
tab.	(IV.4)	: Le pourcentage carbonaté présumé et sa masse de la prise d'essai.....	148
tab.	(IV.5)	: La charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie.....	149
tab.	(IV.6)	: Nombre de rotation des boulets correspondant à chaque classe granulaire	150
tab.	(IV.7)	: Composition du béton ordinaire en poids et en volume.....	153
tab.	(IV.8)	: Composition d'un mètre cube de béton ordinaire en kg/m^3	154
tab.	(IV.9)	: Composition de béton recyclé en poids et en volume.....	155

tab.	(IV.10)	: Composition d'un mètre cube de Béton Recyclé en kg/m^3	155
CHAPITRE V :			
tab.	(V.1)	: Analyse Granulométrique par Tamisage : Gravier (GBS 8/15) de RECHAIGA.....	162
tab	(V.2)	: Analyse Granulométrique par Tamisage : Gravier (GBS 3/8) de RECHAIGA.....	163
tab.	(V.3)	: Analyse Granulométrique par Tamisage (Sable nature GTF) de RECHAIGA.....	163
tab.	(V.4)	: Analyse Granulométrique par Tamisage Gravier (8/15) BR.....	165
tab.	(V.5)	: Analyse Granulométrique par Tamisage. Gravier (3/8) BR.....	165
tab.	(V.6)	: Détermination du coefficient d'aplatissement.....	167
tab..	(V.7)	: Les résultats obtenus pour l'essai de la masse volumique absolue du GN et GR	167
tab.	(V.8)	: Résultats d'essai de l'équivalent de sable.....	168
tab.	(V.9)	: Résultats d'essai de bleu de méthylène.....	168
tab.	(V.10)	: Résultats d'essai d'évaluation des carbonates.....	168
tab.	(V.11)	: Résultats d'essai du poids spécifique des grains solide.....	169
tab.	(V.12)	: Résultats d'essai Los Angles	169
tab.	(V.13)	: Résultats obtenus pour l'essai de MDE.....	169
tab.	(V.14)	: Résultats obtenues pour l'essai de la propreté superficielle.....	170
tab.	(V.15)	: Résultats obtenus pour l'essai de la masse volumique apparente.....	170
tab.	(V.16)	: Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement.....	171
tab.	(V.17)	: Résultat de la résistance en compression de béton.....	174

LISTE DES FIGURES

N° : de fig.	Titre	Page
CHAPITRE I :		
Figure (I.1)	: Schéma général de l'économie circulaire.....	7
Figure (I.2)	: Le recyclage du béton dans l'économie circulaire	11
Figure (I.3)	: Flux potentiels de déchets recyclables pour les bétons – base 2014 (SOeS, CERC, UNICEM) (Etude RECYBETON)	12
Figure (I.4)	: Localisation des plates-formes de recyclage sur le territoire national.....	13
Figure (I.5)	: Démolition à l'aide d'une tenaille.....	17
Figure (I.6)	: Démolition par dynamitage.....	17
Figure (I.7)	: Tri durant une déconstruction sélective.....	18
Figure (I.8)	: Constitution d'un granulats recyclé.....	27
Figure (I.9)	: Microstructure du béton recyclé (vue au microscope électronique à balayage)– Crédit photo Ifsttar.....	41
Figure (I.10)	: Vue du pont construit avec un béton de granulats recyclés après 2,5 ans....	47
Figure (I.11)	: Localisation du bâtiment.....	48
Figure (I.12)	: Bâtiment D1 du « Parc de l'Étoile », travaux achevés.	49
Figure (I.13)	: Produit préfabriqué avec des GBR.....	50
Figure (I.14)	: Bâtiment utilisant des produits préfabriqués en béton incorporant des GBR.....	50
CHAPITRE II :		
Figure (II.1)	: Eprouvette allemande en forme de 8.....	56
Figure (II.2)	: Dispositif de traction directe.....	57
Figure (II.3)	: Schéma de fixation d'une éprouvette de traction au niveau des mâchoires de la machine de traction.(zones de serrage).....	57
Figure (II.4)	: Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage	58
Figure (II.5)	: Développement des contraintes de traction suivant un plan médian.....	58
Figure (II.6)	: Répartition des contraintes sur les plans diamétraux (horizontaux et	

	verticaux).....	59
Figure (II.7)	: Rupture d'une éprouvette cylindrique dans l'essai de traction par fendage.....	59
Figure (II.8)	: Appareil SIMRUPT pour mesure de la résistance du béton en traction Par flexion.....	61
Figure (II.9)	: Disposition de flexion 3 points.....	62
Figure (II.10)	: Disposition de flexion 4 points (ou flexion pure).....	62
Figure (II.11)	: Schématisation de la répartition des contraintes en flexion dans une éprouvette en béton selon A.Guerri [1973].....	63
Figure (II.12)	: Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	65
Figure (II.13)	: Dimension normalisée d'éprouvettes.....	66
Figure (II.14)	: Principe de surfaçage au soufre.....	69
Figure (II.15)	: Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la prise.....	70
Figure (II.16)	: Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression.....	71
Figure (II.17)	: Mode de rupture en compression (Cas de prisme)	76
Figure (II.18)	: Mode de rupture en compression (Cas de cylindre)	77
Figure (II.19)	: Résistance en compression relative minimum estimée pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de granulats recyclés ($A > B > C > D$), à différents taux de substitution [Brit2014] (RAC : Recycled Aggregates Concrete NAC : Natural Aggregate Concrete)	79
Figure (II.20)	: Classification mécanique des granulats issus de Déchets de Construction et de Démolition (béton, maçonnerie ou mixte), [adapté de Silva <i>et al.</i> 2014].....	80
Figure (II.21)	: comparaison entre les valeurs expérimentale et théorique de la résistance à la compression, avec une erreur de 1,07 MPa.....	85
Figure (II.22)	: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage pour les mélanges du Tableau II.8, avec les valeurs $k_{t,j}$ du (Tableau II.9) Erreur moyenne = 0,12 MP....	86
Figure (II.23)	: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage tirée de [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007]. Erreur moyenne = 0,23 MPa. Dans la légende Γ_v ..	86
Figure (II.24)	: Valeurs de k_t global pour des bétons ayant différents taux de recyclage (seuls les gravillons sont des GBR), selon [Etxeberria <i>et al.</i> , 2007b] et [Fathifazl <i>et al.</i> , 2011].....	88

CHAPITRE III:

Figure (III.1)	: Les données et facteurs de base de la composition du béton.....	94
Figure (III.2)	: Courbes de référence Faury.....	106
Figure (III.3)	: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône A).....	111
Figure (III.4)	: Courbe optimale de Joisel.....	115
Figure (III.5)	: Forme de la courbe granulaire de référence de la méthode Dreux-Gorisse.	120
Figure (III.6)	: dosage en ciment calculé pour différents taux volumiques de substitution en GBR.....	125

CHAPITRE IV :

Figure (IV.1)	: ciment AWTED.....	128
Figure (IV.2)	: sable GTF.....	129
Figure (IV.3)	: Gravier (8/15)	129
Figure (IV.4)	: Gravier (3/8)	129
Figure (IV.5)	: Gravier R (3/8)	129
Figure (IV.6)	: Gravier R (8/15)	129
Figure (IV.7)	: Matériels nécessaires pour l'analyse granulométrique	132
Figure (IV.8)	: Matériels nécessaires pour la détermination du coefficient d'aplatissement	134
Figure (IV.9)	: Matériels nécessaires pour l'essai de la masse volumique absolue....	136
Figure (IV.10)	: Définition de l'équivalent de sable.....	138
Figure (IV.11)	: Matériels pour l'essai de l'équivalent de sable.....	138
Figure (IV.12)	: Matériels pour l'essai de bleu de méthylène.....	140
Figure (IV.13)	: Solution de bleu de méthylène.....	140
Figure (IV.14)	: Matériels nécessaires pour l'essai de l'évaluation des carbonates.....	143
Figure (IV.15)	: Matériel nécessaire pour l'essai de poids spécifique des grains solides	145
Figure (IV.16)	: Matériels nécessaires pour l'essai Los Angles.....	147
Figure (IV.17)	: Matériels nécessaires pour l'essai Micro Deval.....	150
Figure (IV.18)	: Matériels nécessaires pour l'essai de la propreté superficielle.....	152
Figure (IV.19)	: Matériels nécessaires pour l'essai de la masse volumique apparent...	152
Figure (IV.20)	: Concassage et Calibrage des Granulats Recyclés.....	154
Figure (IV.21)	: Malaxage à sec des ingrédients du béton.....	156

Figure (IV.22)	: Malaxage de béton après introduction d'eau de gâchage.....	156
Figure (IV.23)	: Matériels nécessaire pour l'essai de l'affaissement.....	157
Figure (IV.24)	: Mesure de l'affaissement.....	157
Figure (IV.25)	: Identification des éprouvettes (date de coulage et date d'écrasement pour les bétons élaborés).....	158
Figure (IV.26)	: Démoulage des éprouvettes cylindriques.....	158
Figure (IV.27)	: Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20 C.....	159
Figure (IV.28)	: Disque en néoprène Ø 16 cm (surfaçage)	159
Figure (IV.29)	: Chargement et rupture des éprouvettes.....	160
 CHAPITRE V :		
Figure (V.1)	: Analyse granulométrique des graviers (3/8, 8/15) et le sable 0/3 (les pourcentages des tamisât cumulés en fonction du diamètre)	164
Figure (V.2)	: Analyse granulométrique des graviers recyclés (3/8, 8/15) et le sable 0/3 (les pourcentages des tamisât cumulés en fonction du diamètre)	166
Figure (V.3)	: L'affaissement en fonction de l'âge des bétons élaborés.....	171
Figure (V.4)	: Courbe du mélange d'un béton ordinaire.....	172
Figure (V.5)	: Courbe de mélange d'un béton recyclé.....	172
Figure (V.6)	: La masse volumique entre un BO et BR.....	175
Figure (V.7)	: Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge d'un Béton ordinaire (témoin)... ..	175
Figure (V.8)	: Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge d'un Béton RECYCLE.....	176
Figure (V.9)	: Comparaison entre les bétons élaborés (BO, BR).....	176

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS

DCD	: Déchets de Construction et de Démolition
BTP	: Bâtiment et travaux publics
REP	: La responsabilité Élargie du Producteur
DPC	: Directive Produits de Construction
UE	: Union Européenne
RPC	: Règlement Produit de Construction
DEP	: Déclaration environnementale sur les produits
PCR	: Product Category Rule
GBR	: Granulats de Béton Recyclé
BRH	: Brise-Roche Hydraulique
DXA	: Dual x-ray absorptiometry
NIR	: Near infrared spectroscopy
LIBS	: Laser Induced Breakdown Spectroscopy
GN	: Granulats naturels
PCD	: Pâte de Ciment Durci
MA	: Mortier Adhérent
AT	: Auréole de Transition
Ab	: Absorption d'Eau
Eeff	: Eau Efficace
SSS	: Saturé Surface Sèche
CSH	: Carbonation des Silicates de Calcium Hydratés
LA	: Los Angeles
MDE	: Micro-Deval
IRC	: Indice de Résistance à l'écrasement
FD	: Fragmentation Dynamique
ISO	: International Standard Organization
EMP	: Epaisseur Maximale de Pâte
BPE	: Béton Prêt à l'Emploi
SEC	: Sable Enrobé de Ciment
AT	: Auréole de Transition
MPA	: Matière Première Alternative
MEB	: Microscopie Electronique à Balayage
Etot/C	: Eau totale/Ciment
Eeff/C	: Eau efficace/Ciment
BUHP	: Bétons à Ultra Hautes Performances
CD77	: Conseil Départemental de Seine-et-Marne
Rt	: La résistance à la Traction
Rfd	: La résistance à la Traction par Fendage
FIP/CEB	: Fédération Internationale du béton /Certificat d'Etude de Base
CTC	: Contrôle Technique de : Construction
GBR	: Granulats de Béton Recyclé
G2	: Deuxième Génération
G3	: Troisième Génération
dc	: Dimension de Ciment

D	: les gros grains
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
CEB	: les certificats d'étude de base
Mf	: Module de Finesse
BR	: Béton Recyclé
BO	: Béton Ordinaire
fc28	: compression du béton à 28 jours
fcm28	: classe vraie (ISO) du ciment à 28 jours
pc	: masse volumique du ciment
pe	: masse volumique de l'eau
Va	: volume d'air
g	: fraction volumique du sable et des gravillons dans le béton
g*	: compacité du squelette granulaire
Dmax	: diamètre maximal du gravillon
Vc	: volume de ciment,
Ve	: volume de l'eau
F	Ferme
P	: Plastique
TP	: très plastique
F	: fluide
R'	: résistances désirées
CEBTP	: Centre d'Exploitation du Bâtiment et des Travaux Publics
Rt	: La résistance à la Traction
Rfd	: La résistance à la Traction par : Fendage
FIP	: Fédération Internationale du béton
CEB	: Certificat d'Etude de Base
FIB	: Fédération de l'industrie du béton
CEB	: certificats d'étude de base
N	: charge à la rupture
M	: moment fléchissant maximal
d	: diamètre de l'éprouvette
L	: longueur de l'éprouvette
V	: distances entre le centre de gravité de la section de l'éprouvette et la fibre la plus tendue ;
I	: moment d'inertie de l'éprouvette
L	: bras de levier
D	: représente le diamètre le plus gros granulat
J	: âge du béton (en jours)
S	: surface du cylindre.
V	: représente une vitesse de ciment

RESUME

Le recyclage des déchets de construction et de démolition comme source de granulats pour la production de béton suscite un intérêt croissant dans le secteur de la construction. Nous devons être conscients des besoins généraux en matière d'économie des ressources, de protection de l'environnement et de bonne utilisation de l'énergie dans le domaine de la technologie du béton.

Cette étude expérimentale fournit les résultats de la caractérisation physique et mécanique des granulats naturels et recyclés et les effets de ces matériaux recyclés sur les propriétés du béton frais et durci.

La caractérisation des matériaux utilisés montre que les granulats recyclés présentent une hétérogénéité, cependant, les restrictions imposées par la réglementation en vigueur n'empêchent pas l'utilisation de ces matériaux dans le béton.

Dans ce travail, nous avons déterminé et étudié la résistance à la compression du béton recyclé (100% de granulats recyclés) et béton ordinaire en utilisant la méthode de formulation de **FAURY**

La résistance mécanique à la compression en fonction du temps, des bétons à base des granulats recyclés avec différentes combinaisons granulaires, sont acceptables par rapport à celles des bétons ordinaires.

Ces performances mécaniques montrent que sans technologie appropriée les granulats recyclés peuvent conférer au béton une résistance caractéristique à **28 jours** qui dépasse **25 MPa**, (jusqu'à **28,68 MPa**).

Mots clés : béton, recyclage, granulats recyclé, résistance à la compression, formulation.

Abstract

Recycling of construction and demolition waste as a source of aggregate for the concrete production is attracting growing interest in the construction sector. We must be aware of the general need for conservation of resources, environmental protection and good use of energy in the field of concrete technology.

This experimental study provides the results of the physical and mechanical characterization of natural and recycled aggregates and the effects of these recycled materials on the properties of fresh and hardened concrete.

The characterization of the materials used shows that recycled aggregates exhibit heterogeneity, however, the restrictions imposed by existing regulations do not prevent the use of these materials in concrete.

In this work, we determined and studied the compressive strength of recycled concrete (100% of recycled aggregates) and ordinary concrete using the **FAURY** formulation method.

The mechanical resistance to compression over time, concrete based on recycled aggregates with different granular combinations are acceptable compared to those of ordinary concrete.

These mechanical performances show that without proper technology recycled aggregates can give the concrete a characteristic strength at **28 days** that exceeds **25 MPa**, (up to **28,68 MPa**).

Keywords: concrete, recycling, recycled aggregates, compression resistances, formulation.

المخلص

تكتسب إعادة تدوير نفايات التشييد والهدم كمصدر لتجميع المواد الحبيبية من أجل إنتاج الخرسانة اهتماماً متزايداً بقطاع البناء. يجب أن ندرك الحاجات العامة في ميدان اقتصاد الموارد، وحماية البيئة والاستخدام الجيد للطاقة في ميدان تكنولوجيا الخرسانة.

وتوفر هذه الدراسة التجريبية نتائج الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للحصى الطبيعي والحصى المعاد تدويره وأثار المواد المعاد تدويرها على خواص الخرسانة الرطبة والصلبة.

ويبين توصيف المواد المستخدمة أن المواد الحبيبية المعاد تدويرها تظهر عدم التجانس، بيد أن القيود المفروضة بموجب التنظيمات القائمة لا تمنع استخدام هذه المواد في الخرسانة.

في هذا العمل، حددنا ودرسنا القوة الضاغطة للخرسانة المعاد تدويرها (100% من المواد الحبيبية المعاد تدويرها)

والخرسانة العادية باستخدام طريقة الصياغة لـ **FAURY**.

المقاومة الميكانيكية للضغط بدلالة الزمن لخرسانة التي تحتوي على المواد الحبيبية المعاد تدويرها والتي تحتوي على

تركيبات حبيبية مختلفة، تكون نتائجها مقبولة بالمقارنة مع نتائج الخرسانة العادية.

تظهر هذه الأداءات الميكانيكية أنه بدون تقنية سليمة، يمكن للمواد الحبيبية المعاد تدويرها أن تعطي للخرسانة قوة مميزة

عند 28 يوماً تتجاوز 25 ميجاباسكال (حتى 28,68 ميجاباسكال).

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، إعادة التدوير، المواد الحبيبية المعاد تدويرها، مقاومة الضغط، صياغة.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé au monde après l'eau. Les professionnels de la construction, de plus en plus confrontés aux questions liées à la préservation de l'environnement, font face depuis quelques années à une double problématique.

La protection de l'environnement est un élément fondamental directement lié à la survie des humains, des animaux et des plantes. Des paramètres tels que l'environnement, la protection de la nature et le développement durable jouent un rôle important pour répondre aux exigences de l'ingénierie de construction moderne.

Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans les ouvrages modernes. Ces performances et souplesse d'emploi permettent d'être présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics. Il fait partie de notre environnement. Il a sa place dans les bâtiments résidentiels et les bâtiments liés aux activités professionnelles ou aux bâtiments divers.

Au 21^{ème} siècle, l'humanité est confrontée au défi le plus redoutable de son histoire: **comment faire survivre la terre pour les générations futures, avec une population de près de 10 milliards d'habitants et des ressources de plus en plus rares. Ressources non renouvelables?** Aujourd'hui, la plupart des citoyens éduqués affirment qu'il est nécessaire de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire.

Les chantiers de construction et de démolition génèrent une variété de déchets, qui représentent une grande partie des coûts de production de déchets solides dans le monde. Environ **90%** d'entre eux sont jetés dans des décharges.

Les sources naturelles disponibles d'agrégats rejetés, les lois de protection de l'environnement plus strictes et les problèmes de déchets sont des facteurs qui facilitent le recyclage des déchets de construction.

Le béton doit correspondre à d'autres matériaux, pour lesquels des procédés et circuits de recyclage existent depuis de nombreuses années. Parce que le béton représente près de **75%** du poids total du bâtiment. On constate que la plupart des déchets de démolition sont du béton.

Actuellement, le recyclage des déchets de démolition est passé par une phase expérimentale dans le monde entier et a connu un développement considérable, le taux de recyclage des déchets de construction / démolition atteignant **80%** dans certains pays.

Pour favoriser le recyclage des déchets de construction et de démolition (**DCD**), le granulat obtenu doit être de bonne qualité. En outre, pour promouvoir l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclés dans le nouveau béton, des déchets classés de haute qualité sont également nécessaires.

Les Déchets de Construction et de Démolition peuvent être classés en :

- déchets dangereux,
- déchets non dangereux, eux-mêmes divisés en « déchets inertes » et « déchets non inertes non dangereux ».

Le granulats de béton recyclé (**GBR**) doit être de bonne qualité avant de pouvoir être incorporé dans le béton. En particulier, ils doivent avoir une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux et ne pas être contaminés par du plâtre, du bois ou du plastique.

Pour y parvenir, il est nécessaire d'effectuer une procédure de démontage correcte afin de commander les différents types de matériaux rencontrés. Par conséquent, en l'absence d'accords préliminaires, la démolition est toujours préférable à la démolition.

Le recyclage des granulats récupérés à partir de matériaux de démolition a été très bien fait dans le domaine des travaux publics, mais il est rarement utilisé dans les travaux, ce qui semble être la solution idéale et la plus prometteuse au problème des déchets. Il a subi des changements majeurs dans les pays développés, répondant aux préoccupations concernant le manque d'agrégats naturels pour répondre aux besoins fonctionnels des chantiers de construction et favorisant le respect de l'environnement, éliminant l'élimination illégale des déchets.

Les granulats issus de produits de démolition recyclés font partie de la structure des matériaux alternatifs locaux et sont actuellement utilisés dans l'industrie routière dans la plupart des pays européens et comme ils sont considérés comme des granulats hors norme, ils entravent leur recyclage en béton hydraulique. Leur non-uniformité et leur forte capacité d'absorption d'eau rendent difficile le contrôle des performances du béton frais, affectant ainsi la résistance, et par conséquent, il est soupçonné d'avoir un effet négatif sur la durabilité du béton.

Le recyclage est désormais en marche, avec notamment la mise en place du projet national **RECYBETON**, réunissant de nombreux scientifiques et industriels du secteur de la construction pour décider des cadres d'utilisation de ce « **nouveau** » matériau.

Les propriétés du béton recyclé ont déjà été étudiées par de nombreux scientifiques à travers le monde ; De par leur composition, les granulats recyclés présentent des caractéristiques différentes des granulats naturels.

Des recherches sur l'utilisation d'agrégats recyclés sont menées depuis **50 ans**. Dans le même temps, selon diverses sources bibliographiques, il est apparu qu'aucune recherche n'avait été menée sur la composition du béton à base de granulats recyclés. C'est un problème même si ce n'est pas le principal inconvénient.

Dans ce contexte, notre travail s'inscrit pour l'objectif principal de faire une étude comparative entre un béton naturel et un autre à base des granulats recyclé concernant les résistances mécaniques dans le but de:

- Contribuer à préserver l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats et la limitation d'extraction des granulats de carrière et alluvionnaires.
- Répondre à la demande croissante de granulats.
- Aidez à promouvoir les agrégats recyclés.
- contribuer à la recherche sur l'utilisation d'agrégats recyclés au lieu d'agrégats naturels dans le béton.

Cet étude expérimentale comporte cinq chapitres: Après une introduction générale et un petit résumé ;

Le premier présente le **béton recyclé** ;

Le deuxième présente des généralités sur **les résistances mécaniques du béton : traction** avec leurs différents types (la résistance à la **traction directe, par fendage et par flexion**) et la résistance à **la compression** d'un béton et d'un béton recyclé ;

Le troisième traite les diverses méthodes de **formulation de béton** ;

Le quatrième expose les modes opératoires des essais sur les matériaux employés, ainsi que la méthode expérimentale, selon les normes, nécessaire pour la caractérisation **physique et mécanique** de ces matériaux. Et par la suite la caractérisation des bétons frais: **l'affaissement** et la caractérisation mécanique du béton durcis: **la compression**, en fonction du temps ;

Le dernier chapitre présente les résultats et leurs interprétations ;

Enfin une conclusion générale relative à ces travaux, et des recommandations pour des futurs travaux éventuels sont proposées.

CHAPITRE I

LE BÉTON RECYCLÉ

I LE BÉTON RECYCLÉ

I.1 Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. Son succès provient, entre autres raisons, de son extraordinaire polyvalence et de sa disponibilité pratiquement partout sur terre, en tant que matériau essentiellement local. Toutefois, en ce **XXI**e siècle, l'Humanité se trouve confrontée à son défi le plus difficile de son histoire : comment conserver la viabilité de la planète pour les générations futures, avec une population approchant les dix milliards d'habitants et une pénurie croissante des ressources non renouvelables ?

Le recyclage du béton dans le béton doit donc être développé, pour au moins quatre raisons principales :

- a) bien que les ressources minérales naturelles qui servent à produire le béton soient quasi-inépuisables – calcaire, argiles et roches dures – l'ouverture de nouvelles carrières à distance raisonnable des villes est devenue un réel défi dans de nombreux pays. En effet, dans la compétition pour l'utilisation des sols, entre terrains résidentiels, agricoles et industriels, la troisième catégorie perd souvent la bataille ;
- b) la mise en décharge des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**) est de plus en plus prohibée par les politiques publiques ;
- c) il existe une pression sociale pour réduire les distances de transport des matériaux depuis les sites de production jusqu'aux sites d'utilisation, afin de limiter les émissions de **CO₂** et l'impact du trafic des camions sur la population. Comme les matériaux de démolition sont principalement générés dans les villes, là où de nouveaux chantiers de construction ont besoin d'être alimentés, l'utilisation de **DCD** dans une nouvelle construction a alors un double avantage, en réduisant à l'échelle de la zone urbaine les transports générés à la fois par l'évacuation et par l'approvisionnement des matériaux ;
- d) enfin, le béton doit rattraper les autres matériaux (**acier, enrobés bitumineux, etc.**) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années. Ce n'est pas ici l'endroit pour analyser le cycle de vie du béton recyclé en tant que matériau de construction, par rapport à d'autres solutions. Notons simplement que, même si la solution « **béton** » a de nombreux avantages, sa capacité à incorporer ses propres déchets constitue un aspect important selon la plupart des méthodes d'évaluation environnementale. [François de Larrard, Horacio Colina, 2018]

I.2 Définition :

Les déchets de béton générés par la fabrication ont plusieurs origines : **déchets de béton frais, déchets de béton durci, rebuts de fabrication et retours de chantiers.**

Ils peuvent être réintégrés in situ (usine de préfabrication ou unité de production de béton prêt à l'emploi) pour la fabrication de nouveaux produits, ou recyclés une fois durcis, sans nécessité de tri complémentaire, dans des installations de concassage. [**Recyclage béton colloque recybeton, 2015**]

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 sont peut pas valorisés, le recyclage des déchets se présente donc comme une bonne alternative à l'enfouissement. [**Recyclage du béton**]

I.3 Pourquoi utiliser des granulats recyclés dans le béton ?

I.3.1 Responsabilité environnementale et économie circulaire :

Deux prises de parole gouvernementales en avril **2018** en France illustrent comment le secteur de la construction est concerné par les transformations de l'économie vers un modèle plus circulaire. Ces deux approches très différentes influenceront les pratiques des acteurs :

Celle du Premier Ministre publiant « **50** mesures pour une économie **100%** circulaire - (Feuille de Route Economie Circulaire) » et celle du Ministre de la Transition écologique et solidaire présentant les plans d'action territoriaux "Qualité de l'air" en réponse aux inquiétudes de la Commission Européenne face à une situation sanitaire qui ne s'améliore pas dans de nombreux pays européens dont la France.

I.3.1.1 Le concept d'économie circulaire :

Dans une économie véritablement circulaire, les ressources sont régénérées au sein des cycles biologiques, récupérées ou restaurées dans des cycles techniques. Typiquement, les granulats appartiennent à ces derniers, pour lesquels il n'y a pas de consommation mais des usages. Le schéma ci-dessous (**Figure (I.1)**) en rappelle les étapes qui obéissent à trois principes :

- Préserver le capital naturel ;
- Optimiser l'exploitation de ressources ;
- Identifier et éliminer les externalités négatives.



Figure (I.1) : Schéma général de l'économie circulaire

I.3.1.2 L'évolution environnementale :

Les repères pour le **BTP** :

Pour comprendre les transformations actuelles, il n'est pas inutile de brosser à grands traits l'évolution environnementale:

1972: rapport Meadows "**The Limits to Growth**" commissionné par le Club de Rome premier rapport alertant sur la gestion des ressources de la planète ;

1975: première loi relative à l'élimination des déchets introduisant :
la notion de déchet : « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon »

La responsabilité élargie du producteur (**REP**) pouvant faire « **obligation aux producteurs, importateurs et distributeurs de produits ou éléments et matériaux entrant dans leur fabrication de pouvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets** qui en proviennent ».

La possibilité par l'Etat de fixer une « **proportion minimale de matériaux** ou éléments récupérés dans la fabrication d'un produit ou d'une catégorie de produits ».

Instruction technique du **20 janvier 1980** pour la mise en décharge des déchets industriels définissant des classes d'imperméabilité en fonction des déchets (spéciaux, banals ou inertes).

1987: introduction du concept de "développement durable" (rapport Brundtland publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement).

Loi du **13 juillet 1992 (modifiée le 2 février 1995)** définissant les principes fondamentaux d'une réelle politique de gestion des déchets.

Circulaire du **15 février 2000** : Planification de la gestion des déchets du **BTP** au niveau des départements.

Directive Cadre « **déchets** » du **19 novembre 2008** dont le but est de renforcer les objectifs de valorisation.

2009-2010: les lois Grenelle I et II : mesures **d'économie d'énergie pour les bâtiments** (audits énergétiques, réglementation thermique, etc.), meilleure planification territoriale (schémas de cohérence écologique,..) ainsi que des mesures spécifiques telles le **diagnostic-déchets obligatoire pour la démolition** de certains bâtiments et les **plans départementaux de gestion des déchets du bâtiment et des travaux publics**.

2010: ordonnance déchet du **17 décembre 2010** : place la valorisation comme mode prépondérant de gestion, introduit la possibilité de sortie du statut de déchet pour certaines catégories.

2014: loi Alur (loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové) premiers schémas de l'économie circulaire, les **schémas régionaux des carrières**, bâtis sur l'appréciation globale de **l'économie des matières minérales** et de l'énergie associée, incluant le transport et le recyclage à l'échelle d'un territoire.

2015: loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, qui est aussi une loi sur **l'économie circulaire et les déchets**, inscrivant dans les codes de l'environnement, de l'énergie et dans le droit de la commande publique de nouveaux concepts :

« **l'économie circulaire** vise à dépasser le modèle économique linéaire en appelant à une **consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires** ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le **réemploi** des produits, et suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une **réutilisation**, à un **recyclage** ou, à défaut, à une **valorisation** des déchets».

« **La commande publique durable** est mise au service de la transition vers l'économie circulaire et de l'atteinte des objectifs mentionnés. Par son **effet d'entraînement**, elle contribue à faire émerger et à déployer des pratiques vertueuses, notamment en matière d'économie de la fonctionnalité, de réemploi des produits et de préparation à la réutilisation des déchets, et de production de biens et services **incorporant des matières issues du recyclage**. ».

Cette même loi transcrit dans le droit français un des éléments de la directive européenne de **2008**, à savoir un objectif de **70%** de valorisation des déchets du **BTP** à l'horizon **2020**.

Elle fixe également, pour la première fois, un objectif dans les travaux sous commande publique

A partir de **2017**, **50%** des matériaux nécessaires pour les **chantiers routiers** sont **issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage** des déchets, avec un taux de **20%** pour les couches d'assises et de **10%** pour les couches de roulement.

A partir de **2020**, ces mêmes taux sont fixés respectivement à **60%**, **30%** et **20%** (art **79** de la loi du **17 août 2015**).

I.3.1.3 Le rôle de l'Union Européenne dans l'évolution environnementale :

Le rôle de l'Union Européenne ne peut pas être éludé :

➤ **En matière de gestion de déchets :**

1975: première directive relative aux déchets (**directive 75/442 du 15 juillet 1975**)

1997: Avis du **11 novembre 1997** définissant la nomenclature des déchets modifié par l'Annexe II, Décret du **18 avril 2002** concernant les déchets dangereux :

Classification des déchets

2006: élargissement de la directive précédente pour favoriser la valorisation des déchets et l'utilisation des matériaux de valorisation comme matières premières afin de préserver les ressources naturelles » (**Directive 2006/12/CE**).

2008: intégration des orientations générales sur les déchets (**directive 2008/98/CE**) avec l'obligation de hiérarchiser la gestion des déchets, avec par ordre de priorité, le réemploi, la réutilisation, le recyclage, la valorisation et enfin l'élimination.

➤ **En matière de construction :**

1989: « **Directive produits de construction** » (dite aussi « **DPC** » n° **89/106/CEE**) des ouvrages de construction conçus et réalisés de manière à ne pas compromettre la sécurité des personnes, des animaux domestiques et des biens, et à ne pas nuire à l'environnement. Cette directive fixe des objectifs à atteindre, appelés les exigences essentielles, et laisse à la normalisation le soin de définir dans des spécifications techniques, normes ou agréments, les caractéristiques qui permettront aux produits d'y répondre. Les spécifications sont déclinées soit dans les normes harmonisées pour les produits « **traditionnels** » soit dans les agréments techniques pour les produits « **nouveaux** ». Un immense travail de normalisation est ainsi lancé à partir des années **1990** concernant plus d'un millier de documents. A noter que les **Eurocodes** , qui sont des normes de conception des structures de bâtiments et d'ouvrages pris au départ en application des directives marchés de travaux publics, ont été intégrés dans ce mouvement d'harmonisation.

2011: Remplacement de la directive **DPC** par le Règlement (UE) n°**305/2011** du **9 mars 2011** (dit aussi « **RPC** » d'application directe depuis le **1/07/2013**, sans mesure de transcription nationale, contrairement à une directive) : les six exigences essentielles initiales sont complétées par une septième concernant l'utilisation durable des ressources naturelles ; de plus, tout fabricant doit désormais marquer son produit **CE** et mettre à disposition une Déclaration des Performances (**DP**).

2012 (août): Norme NF EN 15804 Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclaration environnementale sur les produits (**DEP**)- Règles régissant les catégories de produits de construction (**PCR - Product Category Rule**). Cette norme remplace la norme **NFP 01 010**. Ce document décrit le tronc commun des règles de catégories de produits pour les déclarations environnementales de tout produit ou service de construction. Il précise une structure permettant de s'assurer que toutes les **DEP** relatives à la construction sont obtenues, vérifiées et présentées de façon harmonisée.

➤ **En matière d'économie circulaire :**

après plusieurs « **paquets** » de textes législatifs adoptés en **juillet 2014**, en **décembre 2015**, puis en avril **2018**, le Parlement européen a refondu le **30 mai 2018** plusieurs directives sur les déchets et en particulier la **directive-cadre 2008/98** pour renforcer la hiérarchie des déchets en favorisant la prévention et le recyclage.

I.3.1.4 Construction et économie circulaire :

Face aux risques et aux enjeux du monde d'aujourd'hui, la législation a donc progressivement structuré l'aménagement du territoire, l'urbanisation et les modes constructifs dans une approche globale des aspects qualité, sécurité et environnement. Les ouvrages, bâtiments et infrastructures, depuis leur conception, préparation, jusqu'à leur exécution et leur fin de vie, ne doivent plus seulement répondre à des normes économiques et sociétales mais également appliquer les règles environnementales qui intègrent une gestion économe des ressources de plus en plus affirmée. On comprend que la **filière béton**, engagée depuis longtemps dans l'innovation, doit mieux montrer comment elle contribue à cette **gestion économe des ressources naturelles** qui assure l'avenir. Ainsi, les principaux facteurs du développement des granulats recyclés dans la construction se répartissent à différents niveaux du schéma de l'économie circulaire (**Figure I.2**)

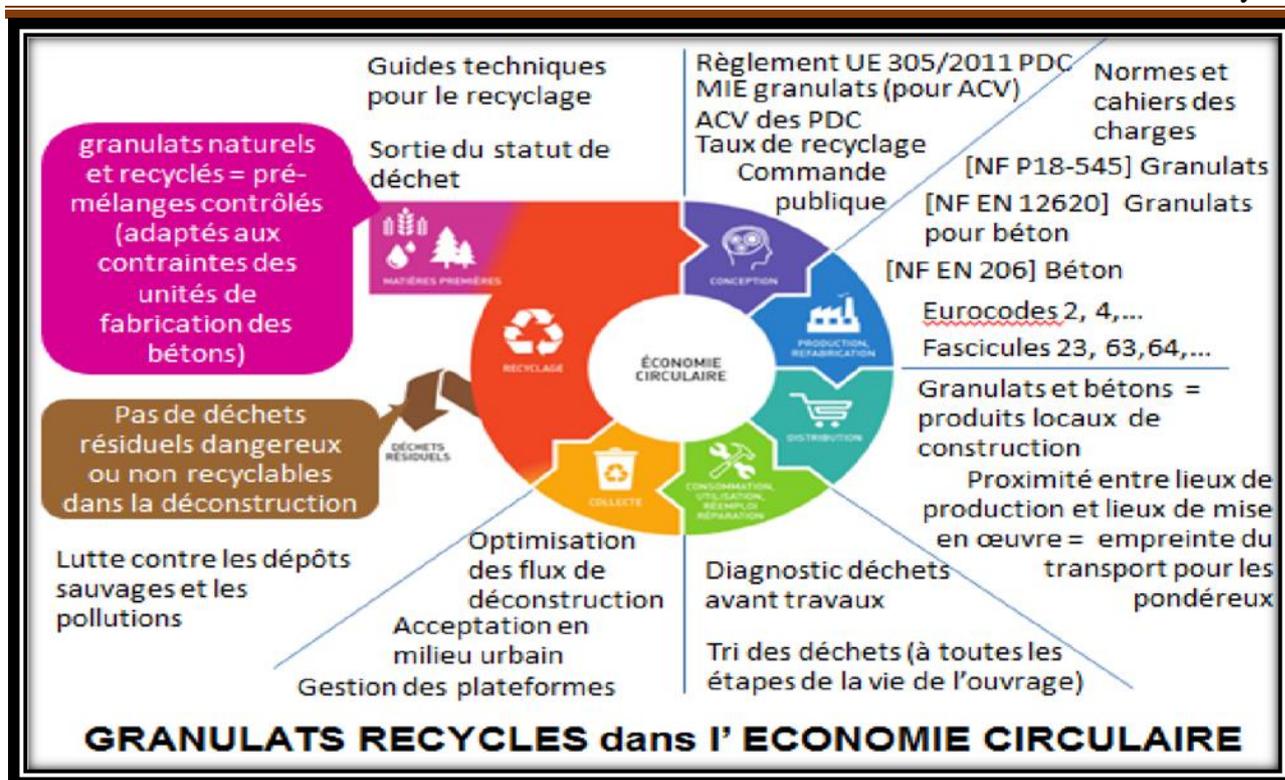


Figure (I.2) : Le recyclage du béton dans l'économie circulaire

L'utilisation des granulats recyclés dans les bétons ne repose pas sur un seul domaine, ni sur un seul paramètre. C'est la somme des actions dans les différents compartiments de l'économie circulaire qui permettra **le recyclage complet des bétons**, ajoutant cet atout à toutes les qualités spécifiques qui font de ce matériau un élément essentiel de la construction de demain.

I.4 Quels gisements potentiels pour des granulats recyclés dans les bétons ?

Les différents flux de déchets identifiés sont aujourd'hui en grande partie déjà captés pour une mise en œuvre dans les applications routières. Le premier d'entre eux est réalisé sur les chantiers-mêmes :

71 Mt d'inertes comprenant majoritairement des terres (**45 Mt**) et mélanges à base de bétons, graves et matériaux rocheux (**22 Mt au total**). La proximité rend ces flux naturellement captifs du réemploi en travaux publics.

De plus, les objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour une croissance durable « **60% des matériaux d'une route devront être d'origine secondaire en 2020** », vont renforcer la nécessité de maintenir tous ces déchets accessibles pour ces travaux.

De ce fait, le gisement potentiel pour la filière béton doit être évalué en ôtant la part des matériaux qui sont et resteront captifs pour les travaux routiers.

Il est ainsi possible de dresser le tableau des déchets inertes pouvant être mobilisés dans la fabrication de granulats recyclés pour les bétons, en prenant soin d'apporter un taux de recyclabilité par catégorie de déchets. En effet, une catégorie de déchets ne peut être intégralement recyclable. Les taux retenus sont basés sur les suivis réalisés sur plateformes et sur des dire

d'experts du domaine : **60%** pour le béton, **30%** pour les mélanges et **75%** pour les graves et matériaux rocheux. (Figure I.3)

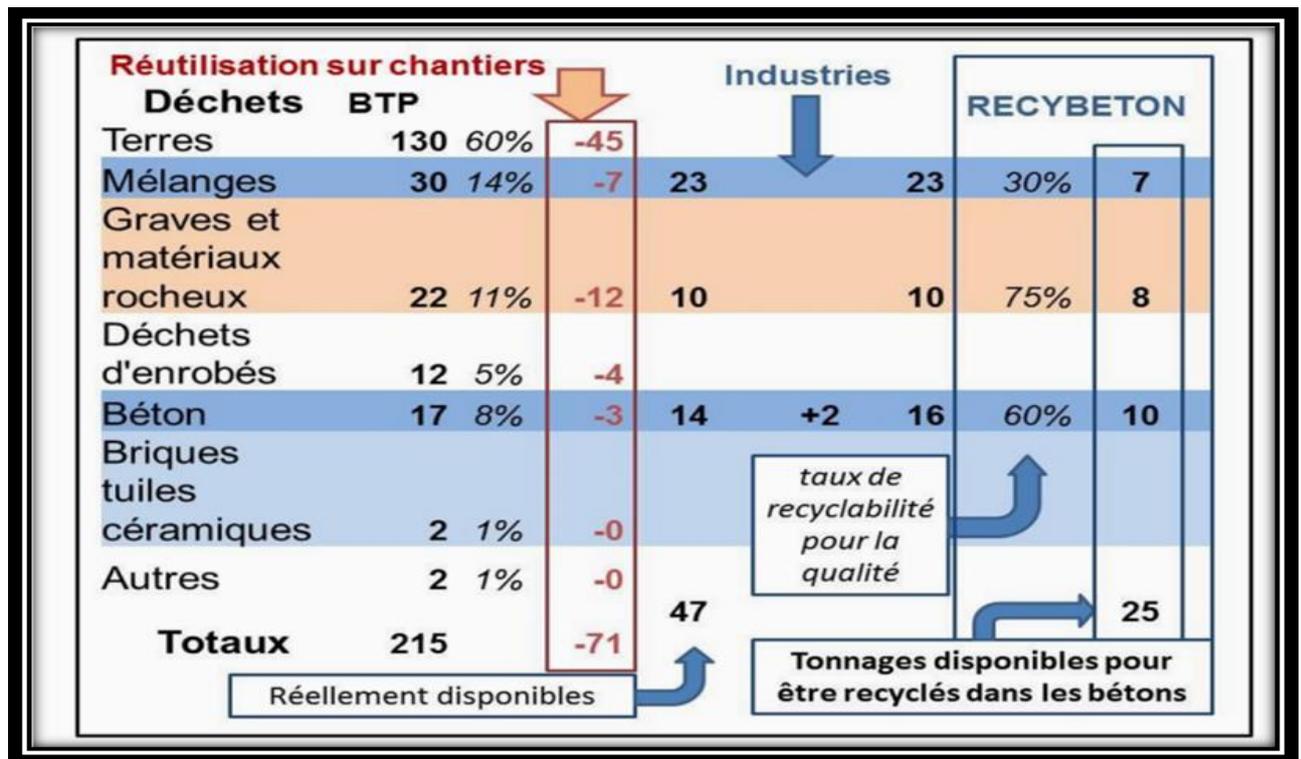


Figure (I.3): Flux potentiels de déchets recyclables pour les bétons – base 2014 (SOeS, CERC, UNICEM)(Etude RECYBETON)

On comprend ainsi que le gisement global disponible pour les bétons est en fait limité à environ **25 Mt** par an en France. Dans un modèle idéal où matières premières et déchets seraient répartis de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, dans un calendrier des opérations et une configuration de travaux permettant de réutiliser tous les déchets inertes générés, le taux de substitution théorique serait de **22 % (25 Mt / 112 Mt)** granulats dans le bâtiment et le génie civil).

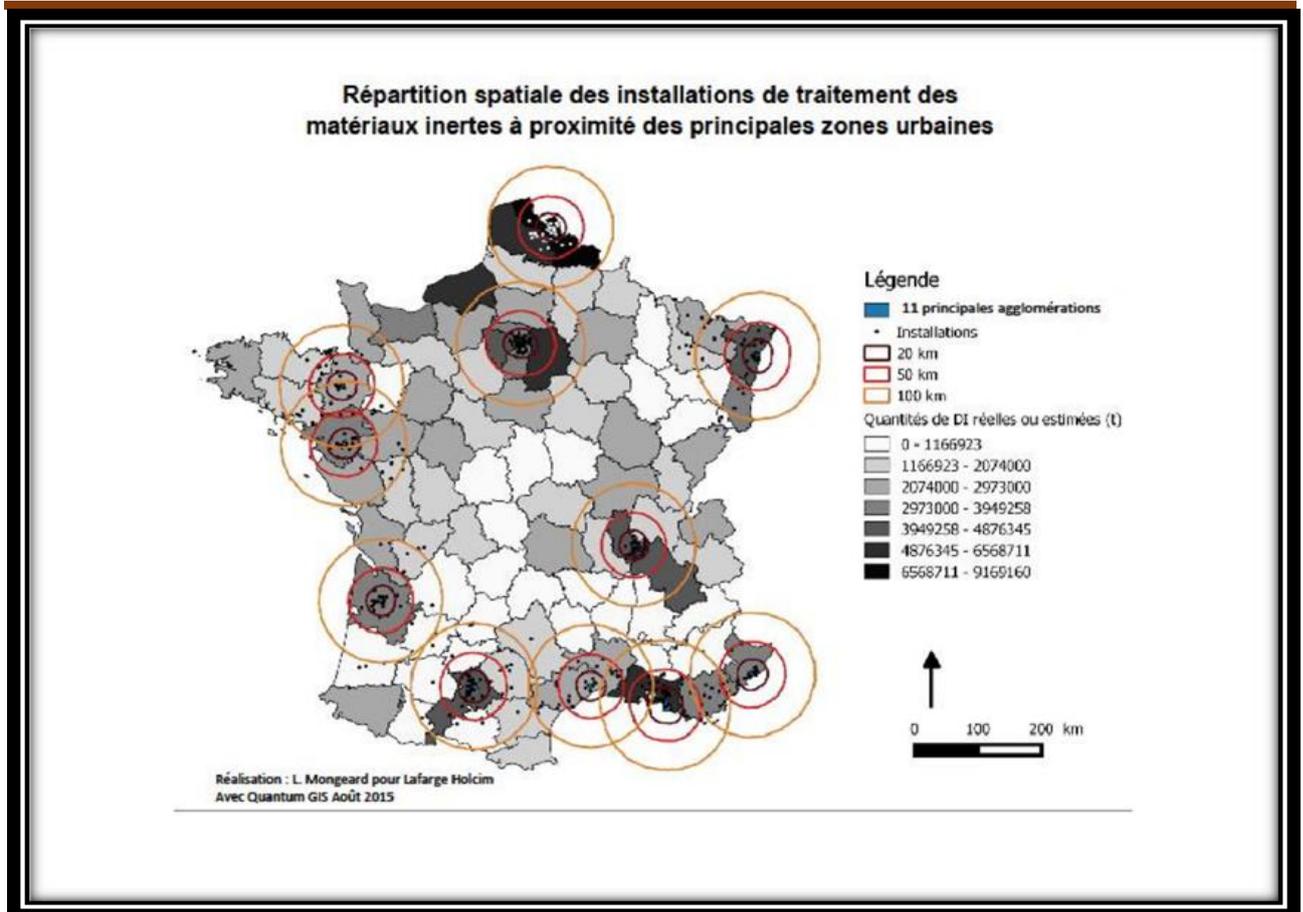


Figure (I.4): Localisation des plates-formes de recyclage sur le territoire national

Au plan qualitatif, les suivis effectués sur treize plateformes volontaires et représentatives ont montré que là où l'activité de démolition est suffisante pour que le recyclage fonctionne, les granulats recyclés répondent déjà globalement aux exigences normatives actuelles de ce nouveau marché des bétons durables (**Figure I.4**). L'optimisation du processus de production des **GR** pour les bétons nécessite la même organisation et la même rigueur tout au long de la chaîne d'élaboration : **diagnostic, démolition, transport, plateforme, réception, tri, concassage, stockage, mise en œuvre**. Cette optimisation, liée aux volumes impliqués, contribuera à l'amélioration du taux de recyclage mentionné plus haut.

Au plan quantitatif, un contrôle plus strict des pratiques de gestion des déchets augmenterait les volumes en orientant les flux vers les sites autorisés : actuellement on estime que **10 %** de l'ensemble des déchets inertes sont encore mis en décharges sauvages.

On rappelle que les normes de produits structuraux en béton s'appuient sur la **norme NF EN 13369** qui elle-même renvoie à la norme **NF EN 206/CN** lorsque cela est nécessaire. Les dates des références normatives indiquées dans les normes de produit doivent être prises en compte pour identifier les versions des normes **NF EN 206/CN** et **NF EN 13369** applicables. Pour les produits en béton disposant de normes contenant en elles-mêmes toutes les spécifications nécessaires, il convient de se référer à la norme du produit en béton concernée. [IREX Novembre 2018]

I.5 Déchets de Construction et de Démolition :

Pour favoriser le recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**), il faut que les granulats obtenus soient de bonne qualité. En outre, pour favoriser l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclé (**GBR**) dans de nouveaux bétons, il faut disposer aussi de déchets triés et de bonne qualité.

Selon [**Tam, 2013**], de nombreux outils et règlements de gestion des déchets et des activités liées au développement durable sont apparus ces dernières années, notamment en Chine, au Japon, aux États-Unis, au Brésil et dans la plupart des pays européens.

À partir de **2011**, la Commission Européenne a financé des études sur la définition de la politique communautaire en matière de gestion durable des ressources. Les Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**) ont été identifiés comme objectif prioritaire, en raison des grandes quantités générées et du fort potentiel de réutilisation et de recyclage de ces matériaux. Pour cette raison, la seconde Directive-Cadre sur les Déchets a demandé que tous les États Membres mettent en œuvre les dispositions qui s'imposent pour atteindre, d'ici **2020**, un objectif minimal de **70 %** (en masse) pour la récupération, le recyclage et la réutilisation des **DCD** et autres matériaux.

I.5.1 Différents types de Déchets de Construction et de Démolition :

Les Déchets de Construction et de Démolition peuvent être classés en :

- déchets dangereux,
- déchets non dangereux, eux-mêmes divisés en « déchets inertes » et « déchets non inertes non dangereux ».

Les déchets inertes sont principalement constitués de déchets d'origine minérale tels le béton, la tuile, la brique, le verre et aussi certains enrobés bitumineux.

Ces déchets sont parfois mélangés entre eux ou légèrement contaminés par du plâtre, des plastiques, du bois etc. Ils proviennent principalement du gros œuvre des bâtiments et sont récupérés lors de la démolition des ouvrages.

Pour servir de granulats recyclés, ces déchets de démolition doivent contenir un maximum de béton et de matériaux rocheux.

Les déchets dangereux n'entrent pas dans le champ du Projet National **RECYBETON**. Ils doivent être séparés des déchets inertes. Il s'agit par exemple de produits bitumineux à base de goudron de houille, de matériaux de construction contenant de l'amiante, de bétons contaminés des centrales nucléaires, etc.

I.5.2 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 [**RECYC-QUEBEC, 1999**]. 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 [**Laby, 2007**]).

Aujourd'hui, si le recyclage et la valorisation des déconstructions « **tout béton** » dépasse **75 %**, le taux n'est que de **12 %** pour les déchets inertes mixtes [**CGDD, 2010**].

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 [**BIO IS, 2011**]. Il s'agit aussi de respecter l'objectif européen de récupération, de recyclage ou de réutilisation d'ici **2020** d'au moins **70 %** des **DCD**, conformément à la Directive- Cadre Déchets (**Directive 2006/12/CE révisée par la Directive 2008/98/CE**).

I.5.2.1 Techniques de démolition :

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

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

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

I.5.2.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main :

[Da Costa, 2009 ; Coelho. et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

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.

I.5.2.1.2 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés :

[Coelho et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

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

I.5.2.1.3 Démolition par dynamitage :

[Coelho & de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

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



Figure (I.5): Démolition à l'aide d'une tenaille



Figure (I.6): Démolition par dynamitage

I.5.2.1.4 Autres procédés de démolition :

[Coelho et de Brito, 2013 ; Brokk, 2000]

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

I.5.2.2 Démolition/déconstruction et coûts :

La déconstruction est un processus de démolition sélectif permettant un tri efficace des différents matériaux. De ce fait, elle a un coût plus élevé que la démolition classique. Ce surcoût est directement lié à l'augmentation de la durée du processus de démolition, au nombre d'opérations à effectuer pour faire le tri des différents matériaux, et au nombre d'ouvriers nécessaires. Mais, dans la plupart des cas, ce surcoût n'est pas un réel obstacle, vu son bénéfice environnemental, et aussi parce que la démolition des bâtiments de plus de **1 000 m²**



Figure (1.7): Tri durant une déconstruction sélective

oblige maintenant à un inventaire des différents types de déchets, ainsi qu'à la désignation des installations locales pouvant accueillir les matériaux recyclés. Enfin, le traitement des déchets triés est beaucoup plus économique que celui des matériaux mélangés. La présence d'installations locales de récupération et de transformation des différents types de déchets encourage alors à un meilleur tri, et favorise donc ainsi l'option de la déconstruction [Laby, 2007].

Par conséquent, si le secteur du recyclage du béton se développe et se structure, alors l'option de la déconstruction et du tri sera de plus en plus privilégiée, et la qualité des granulats recyclés n'en sera qu'améliorée.

I.5.2.3 Matériaux produits :

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

Tableau (I.1) : Volume des différents types de Déchets de Construction et de Démolition

DCD inertes 2017 (données de l'enquête SOeS de 2014) Nature des déchets	Quantité totale de déchets produits (× 106 t)
Béton	19,1
Briques, tuiles, céramique et ardoise	4,2
Verre	0,2
Mélanges bitumineux dépourvus de goudron	11,2
Pierres et terre non polluées	114,8
Autres matériaux de démolition de chaussées	37,5
Ballast de voie non polluées	2,2
Déblais de dragage non pollués	2,8
Autres déchets inertes	1,1
Mélanges de déchets inertes	18,1
Total déchets inertes 211,2	211,2

Les déchets de démolition sont principalement constitués de matériaux minéraux tels que le béton, le mortier, la pierre, la brique et la tuile. D'autres produits de construction peuvent également être présents dans les matériaux obtenus, mais il s'agit surtout d'éléments polluants, tels que le verre, les produits bitumineux, etc.

C'est en intégrant dès la conception d'un projet le processus de déconstruction et de tri que le taux de recyclage des **DCD** augmentera [PDR, 2000 ; Bradley, 2004]. Ce principe permettra donc aussi d'accroître l'utilisation des granulats recyclés dans le béton.

Certains projets commencent à tenir compte de la déconstruction dès la conception, afin de limiter la production de déchets et de maximiser le recyclage des déchets obtenus. [S. Decreuse, N. Comte, C. Raillon, 2018]

I.6 Élaboration des granulats de béton recyclé :

La production des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**) peut combiner diverses opérations, telles l'élimination des éléments métalliques ou légers, le concassage, le criblage et la floculation des argiles. La plupart des plateformes de recyclage fonctionnent dans des configurations simples, sans faire appel à l'ensemble de ces techniques, alors que des procédés plus complexes et plus efficaces, décrits dans la littérature, pourraient aussi être utilisés.

Les granulats de béton recyclé (**GBR**) produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associés à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). Il est relativement facile de séparer les constituants tels le plastique, le bois, le métal, le papier et les matériaux de couverture. C'est moins évident pour la céramique, les enrobés et la pierre. Ces constituants sont presque toujours présents dans les différents granulats recyclés, indiquant qu'ils sont mal éliminés en pratique.

La plupart des **GBR** contiennent donc une variété de composants minéraux (pierre, mortier, brique, plâtre et autres matériaux de médiocre qualité). Pour pouvoir valoriser au mieux les **GBR**, il est alors nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants.

Actuellement, si l'on veut éviter le mélange des différents matériaux, la démolition doit se faire de façon très sélective voire, dans certains cas, manuellement.

Comme ces pratiques sont exceptionnelles, il en résulte que la plupart des **GBR** sont de mauvaise qualité, en témoigne leur réutilisation marginale dans les bétons de structure. Étant donné les seuils de composition exigés et les difficultés à éliminer certains constituants, le recours à des systèmes de séparation efficaces devient alors une nécessité.

I.6.1 Concassage :

Selon la taille, les **GBR** sont plus ou moins formés de grains qui contiennent du granulat naturel mélangé à du mortier. [Belin et al., 2014] ont montré que la quantité de pâte de ciment résiduelle dépendait notamment de la teneur en pâte initiale et de sa porosité, ainsi que de la qualité mécanique de l'interface entre le granulat naturel et la pâte de ciment initiale. [Haase et Dahms, 1998] ont montré que, pour une même taille de grains, les **GBR** issus d'un béton parent peu résistant contiennent une plus faible teneur en mortier résiduel. Ils ont expliqué ce fait par la présence d'une auréole de transition de moindre qualité, qui favorise la séparation du granulat et du mortier pendant le concassage, en laissant les grains rocheux plus propres. Toutefois, pour un béton

parent de bonne qualité, l'impact négatif du mortier peut être partiellement compensé par une meilleure résistance et une plus forte compacité du mortier, ainsi que par une (ancienne) auréole de transition de meilleure qualité. Ce constat a été confirmé par les valeurs Los Angeles obtenues avec des **GBR** de différentes masses volumiques.

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

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

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

I.6.2 Criblage :

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

Les **GBR** sont plus sensibles à la fragmentation que les granulats naturels. Ainsi, le criblage des **GBR** peut produire de la fragmentation.

[Schouenborg et al., 2004] ont montré que la quantité de matériau passant au tamis de **8 mm** augmentait avec l'énergie de tamisage des **GBR**. Ils ont comparé l'effet d'un criblage manuel et d'un criblage mécanique après **2,5 et 10 min**.

La quantité de passant a augmenté de **3, 4,5, 6,5 et 8,5 %** respectivement. L'augmentation était négligeable pour un granulats naturel de référence (**0,2 %**).

I.6.3 Dépoussiérage :

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

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

Meinel, 2010] soit la séparation à l'air qui fonctionne en introduisant le matériau dans une chambre où circule un flux d'air ascendant [**Johansson, 2014**].

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

I.6.4 Tri par la densité :

Comme présenté ci-avant, les technologies de soufflerie sont de plus en plus souvent proposées pour séparer des matériaux légers comme le bois, le plastique, le papier, le carton... des matériaux plus lourds. Toutefois, un plus grand éventail de technologies est proposé.

La concentration gravitaire est définie comme le processus par lequel des grains de tailles, de formes et de densités différentes sont séparés les uns des autres par la gravité ou par une force centrifuge. Ce processus de séparation est donc principalement basé sur la densité (gravité spécifique). Les procédés de concentration correspondant ont un débit massique élevé et des coûts d'investissements et d'exploitation faibles. En outre, il n'y a pas de limite sur la taille maximale des grains, et le procédé peut être utilisé avec des granularités très étendues.

La **jig** est un procédé de séparation qui consiste en une succession d'expansions (dilatations) et de contractions (compressions) d'un lit de particules dans un milieu support, habituellement l'eau ou l'air. Le résultat est la stratification verticale du lit selon la densité des grains [**Sampaio et Tavares, 2005**].

[**Ambrós et al., 2017**] ont testé des **jig** à air pour le traitement des **DCD**, en vue de séparer plusieurs composants, en travaillant par lots discontinus. Les résultats ont montré la faisabilité technique du procédé pour éliminer en une seule étape un certain nombre de contaminants indésirables tels le bois, le papier, le gypse et les fragments de briques. En outre, la teneur initiale en contaminants semble avoir peu d'effet sur les performances de séparation.

Dans tous les essais, le produit final obtenu présentait un taux de contaminants inférieur à **1%** en masse, avec environ **90%** de béton pur, en masse.

L'élutriation sépare les grains en fonction de leur taille, de leur forme et de leur densité, en utilisant un débit de gaz ou de liquide constant circulant en direction généralement opposée au sens de la sédimentation. La méthode a été appliquée à des classes étroites de sable de **GBR** [**Ulsen et al., 2013**]. Il a été observé que la pâte de ciment et les particules résiduelles de céramique rouges avaient diminué de moitié dans la partie dense, par comparaison à la partie légère. La méthode semble efficace puisque des granulats naturels ont atteint un degré de séparation équivalent.

I.6.5 Tri par capteurs :

Le tri optique automatique a été développé dans l'industrie minière pour élaborer différents minerais, en séparant des matériaux ayant des couleurs ou des formes significativement différentes. D'autres capteurs et techniques peuvent aussi être utilisés pour distinguer des grains de différentes compositions physiques ou chimiques, parmi lesquels : l'absorptiométrie à rayons **X** en double énergie (**Dual Energy X - ray transmission DXA**), la fluorescence induite par Laser (**Laser-induced fluorescence LIF**), la spectroscopie sur plasma induit par laser (**Laser-induced breakdown spectroscopy LIBS**), la fluorescence aux rayons **X** (**X-ray fluorescence XRF**), la spectroscopie proche infrarouge (**Nearinfrared spectroscopy NIR**), la détection et la télémétrie par ondes lumineuses (**Light Detection And Ranging Lidar**), la spectroscopie Raman, etc.

Le tri par couleur peut servir à augmenter la qualité du produit en évitant la présence de matières indésirables dans le flux à recycler, comme par exemple la brique rouge ou jaune [**Xing et al., 2002**]. La récupération du bois a atteint **83 %** dans les essais effectués par [**Mulder et al., 2007**]. De même, l'extraction du gypse et du verre de la fraction lourde a atteint **94 %** et **96 %** respectivement.

L'absorptiométrie à rayons **X** en double énergie (**DXA**) peut séparer efficacement les matériaux organiques et inorganiques, et reconnaître aussi le métal dans un même passage [**Mulder et al., 2007**].

La spectroscopie proche infrarouge (**NIR**) est efficace pour trier le gypse ou le béton cellulaire, mais pas le bois, les métaux et les plastiques [**Vegas et al., 2015**]. Avec un spectromètre configuré différemment [**Palmieri et al., 2014**] ont pu séparer la brique, le plâtre, les plastiques, le bois et la mousse des granulats recyclés. Avec les capteurs **LIBS**, cette méthode simple-coup constitue la méthodologie en temps réel la plus prometteuse, dont les succès dépendent de la qualité du modèle initialement ajusté sur une base de données fiables [**Xia et Bakker, 2014**].

I.6.6 Libération :

La présence du mortier primaire est responsable des différences de comportements entre granulats naturels et **GBR** [**Braymand et al., 2015 ; Sri Ravindrarajah et Tam, 1987**]. En partant de ce postulat, les méthodes pour séparer le mortier du granulat naturel trouvées dans la littérature ont été analysées [**Torgal, 2013 ; de Brito et Sakai, 2013**]. Elles ont recours à des procédés mécaniques (usure, fragmentation, etc.), chimiques (attaque acide) ou physiques (traitement thermique, micro-ondes). Elles exploitent les différences de propriétés entre granulat et pâte de ciment [**Torgal, 2013 ; Thomas et Jennings, 2009**], à savoir :

- les propriétés physico-chimiques (dilatation thermique ou réactivité chimique) et mécaniques (résistance à l'usure et à la fragmentation), qui conduisent à la dégradation spécifique de la matrice cimentaire ;

• les points faibles du matériau recyclé, tels l'adhérence pâte/granulat et l'auréole de transition où la porosité est plus élevée. La dégradation de cette zone, à partir par exemple de cycles de gel-dégel, permet la libération des granulats primaires. (**Tableau I.2**)

Tableau (I.2) : Méthodes de séparation (procédés décrits dans la littérature)

Traitement	Industrialisati o-n	Energie consommée	Perte de masse	Difficulté s	Références
Mécanique	Facile	Los Angeles 2KWh\tonne	60%	Dégradati on du granulat	[torgal,2013 ;NF EN 10972 ,2010 ;Shima et al ;2005,linb et Mueller;2004]
Haute température	Facile	250 kwh\tonne	20%	Dégradati on du granulat	[Bazant et Kaplan,1996 ,Ronning, 2001,Yang et al , 2006]
Ultrasons	Equipements spécifique requis	12 kwh\tonne	70%	Santé	[Akbamezhad et Ong , 2013a]
Basse température	Equipements spécifique requis			Obtention d'une très basse températu re	[Menard et at , 2013 ,Tasong et al ,1999]
Micro-ondes	Equipements spécifique requis		71%	Santé	[Thomas et Jennings, 2009 ; Akbamezhad et at, 2011 ,Zhao et al 2013b ;Tam et al,2007]
Chimique	Impossible	Non	100%	Santé, déchets issus du traitement	[Akbamezhad et at 2013a ; Momber,2004
Fragmentatio n électrohydrau lique	Très difficile,matéri eles spécifiques et haute tension exigés	2KWh\tonn e	Taux de recouv rement 58.5%	Petite quantité de matériaux traitée	[Menard et at , 2013 ;Bru et al 2017

Thermo_méc anique	Facile (chaud)	Proche du traitement thermique	45%	Dégradati on du granulat	[Bazant et kaplan,1996]
----------------------	----------------	--------------------------------------	------------	--------------------------------	-------------------------

Certaines études proposent une analyse comparative mono ou multicritères de ces méthodes [Torgal, 2013], mais leur efficacité réelle est rarement discutée [Braymand et al., 2016].

La première difficulté concerne la détermination de la taille maximale des grains appartenant au mortier primaire. La maille du tamis sélectionné pour distinguer les deux phases, une fois séparées, influe sur la valeur de la perte de masse : plus la maille est grande, plus la perte de masse est importante [Braymand et al., 2016, Deodonne, 2015]. Ce paramètre pèse donc directement sur la détermination de l'efficacité du procédé étudié et il est l'une des sources de la grande dispersion des teneurs en mortier observées dans la littérature [Braymand et al., 2016]. La perte de masse dépend aussi des dommages infligés au granulat primaire pendant le traitement. Ce fait a été montré par Yoda [Yoda et al., 2003] pour les procédés mécaniques, et par [Homand-Etienne et Houpert, 1989 ; Zhao, 2014] pour les procédés thermiques à haute température (supérieure à 600 °C) et par [Hansen, 1986 ; Momber, 2004] pour les traitements à l'acide.

La perte de masse ne peut donc pas être considérée comme l'unique critère permettant d'estimer l'efficacité technique d'un procédé : d'autres propriétés doivent être aussi examinées à l'issue du traitement. Par exemple, si la masse volumique réelle du granulat traité est inférieure à celle du granulat naturel, alors les GBR contiennent encore du mortier. En l'absence d'informations sur les propriétés du granulat d'origine, l'évaluation de l'efficacité du procédé nécessite alors des hypothèses sur sa composition. [B. Cazacliu, L. Le Guen, E. Hamard, S. Roux, S. Braymand, 2018]

I.7 Caractérisation des granulats de béton recyclé :

Les granulats de béton recyclé (GBR) sont composés le plus souvent d'un mélange intime de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durci (PCD) généralement adhérente aux GN. Les propriétés des GBR dépendent donc des propriétés de chacune des deux phases et de leurs proportions respectives dans le béton d'origine. La PCD possède généralement une porosité beaucoup plus élevée que celle du GN, ce qui modifie sensiblement les caractéristiques du GBR, par rapport à celles du GN. En particulier, les grains de GBR présentent une plus grande absorption d'eau et une plus faible masse volumique réelle. Leur composition chimique combine celle de la PCD et du GN, ce qui peut conférer aux GBR une sensibilité à certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice.

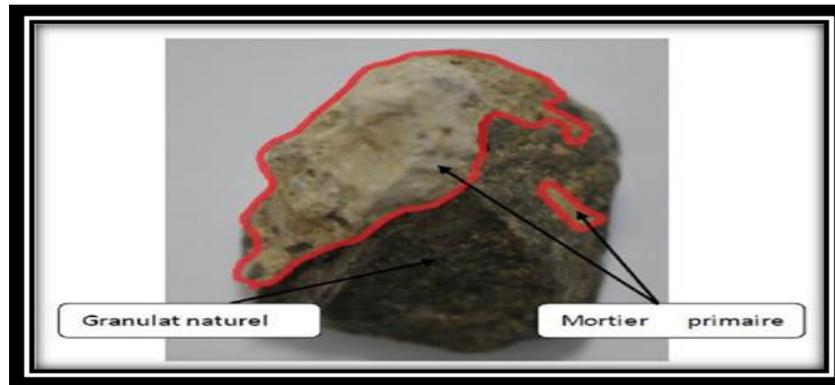


Figure (I.8): Constitution d'un granulats recyclés

I.7.1 Composition et propriétés chimiques des GBR :

I.7.1.1 Mesure de la teneur en pâte de ciment durci (PCD) adhérente et de mortier adhérent (MA) :

Lorsque le béton est concassé, une partie de la pâte de ciment reste attachée aux grains d'origine. Cette pâte de ciment adhérente est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels utilisés pour fabriquer le béton. Par conséquent, la qualité et le volume de **PCD** résiduelle sont très souvent à l'origine des moins bonnes propriétés des **GBR**, comparativement à celles des granulats naturels : plus faible masse volumique, plus forte absorption d'eau, coefficient Los Angeles plus élevé, plus forte teneur en sulfates, etc. Connaître la teneur en **PCD** dans un **GBR** est alors nécessaire pour évaluer sa qualité.

Plusieurs méthodes ont été tentées pour réaliser cette quantification mais, vu la difficulté, elles n'ont pas réellement abouti. Des méthodes expérimentales se sont alors intéressées à la mesure de la teneur en mortier adhérent (**MA**). Le mortier adhérent est a priori plus facile à quantifier expérimentalement que la **PCD**, mais sa définition est plus ambiguë. Tout d'abord, elle dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer mortier et béton (**généralement 4 à 5 mm**). Ensuite, le **MA** peut ne pas contenir que du mortier issu du béton d'origine, mais également des fragments du gravillon naturel libérés lors du concassage. Par conséquent, le **MA** dépend beaucoup de la méthode expérimentale utilisée pour sa détermination.

Plusieurs procédés sont proposés dans la littérature pour mesurer en laboratoire la teneur en **PCD** ou en **MA**. Elles reposent sur des méthodes thermomécaniques, chimiques ou visuelles.

Les méthodes thermo-mécaniques cherchent à séparer le **MA** des gravillons en favorisant le développement de fissures entre les deux phases. Par exemple, [de Juan et Gutiérrez, 2009] ont

proposé une méthode thermique particulière où les **GBR** sont tout d'abord immergés dans l'eau pendant **2 heure** pour quasi-saturer le mortier adhérent, puis chauffés à **500 °C** pendant 2 heure, 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 granulats. 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.

L'échantillon est alors tamisé à **4 mm** pour récupérer le gravillon sans mortier. 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.

Les méthodes chimiques sont basées sur la dissolution sélective de la pâte de ciment adhérente. Une solution d'acide chlorhydrique permet de dissoudre efficacement la **PCD**. Ces méthodes ont été utilisées dans plusieurs études [Yagishita et al., 1994 ; Nagataki et al., 2004], où elles ont permis de mesurer la teneur en **PCD** et la teneur en **MA**. Elles ne sont toutefois pas adaptées pour des **GBR** à base de granulats calcaires, qui sont eux aussi dissous dans l'acide chlorhydrique.

1.7.1.2 Paramètres influençant la teneur en **PCD** ou en **MA** :

La teneur et les propriétés de la **PCD** dépendent de la composition du béton d'origine. Une plus forte proportion de ciment et d'eau dans la formule du béton se traduira par une plus grande teneur en **PCD** dans les **GBR**. Cependant, la **PCD** n'est pas distribuée de façon homogène au sein des différentes classes granulaires concassées. En effet, plusieurs études ont montré que le taux de **MA** diminue quand la dimension des granulats augmente [Etxeberria et al., 2007a ; de Juan et Gutiérrez, 2009 ; Topçu et Sengel, 2004]. En outre, la distribution de la **PCD** selon les classes granulaires de **GBR** est largement influencée par le procédé de concassage. [Nagataki et al., 2004] ont étudié l'influence de la méthode de concassage sur la teneur en **MA** des gravillons de **GBR**. En effectuant un concassage primaire avec un concasseur à mâchoires ou à percussion, la teneur en **MA** de **GBR** issus de bétons de bonne, moyenne et moindre qualité (**fraction 5/20 mm**) est de **52,3%**, **55%** et **52,3%** respectivement. En réalisant un second concassage (concassage secondaire) avec différents types de concasseurs, la teneur en **MA** passe à **30,2%**, **32,4%**, **32,3%** respectivement. Par conséquent, les concassages successifs diminuent la teneur en **MA** des gravillons de **GBR**, mais augmentent concomitamment la quantité de fines de **GBR**.

1.7.1.3. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des **GBR** :

Peu de travaux fournissent des données précises et exhaustives sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques des **GBR**. Quelques études se sont intéressées au rôle du mortier

adhérent (**MA**) vis-à-vis des propriétés générales des **GBR**, physiques et mécaniques. Comparé aux **GN**, ces études [Tam et al., 2007 ; Al Bayati et al. 2016 ; Le et al., 2016] ont montré que le **MA** augmente la porosité, et diminue la masse volumique réelle, qu'il est le siège de l'apparition de micro-fissures pendant le concassage du béton, et qu'il présente une adhérence plus faible au niveau de l'aurole de transition (**AT**). D'un point de vue chimique, le **MA** recèle une teneur non négligeable en alcalins et en sulfates [Sánchez et al, 2004]. À cet égard, [Mahmoud 2005 ; Sánchez et al, 2004] ont établi des corrélations entre la teneur en **MA** des **GBR** et leur teneur en chlorures et en sulfates solubles.

Dans les études concernant les propriétés des bétons incorporant des matériaux recyclés, les **GBR** sont le plus souvent caractérisés au regard de classifications spécifiques. Par exemple, la **RILEM** [RILEM, 1994] et le **BRE (Building Research Establishment)** [BRE, 1998] définissent trois types de **GBR** qui tiennent compte de leurs teneurs en différents constituants, tels que les moellons de maçonnerie, les granulats naturels et recyclés, les gravats de briques et de bétons.

I.7.2 Propriétés physiques des GBR :

I.7.2.1 Masse volumique et absorption d'eau des GBR :

Les propriétés physiques, comme la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau (**Ab**), sont des propriétés très importantes pour la réutilisation des **GBR** dans le béton. La masse volumique réelle correspond au rapport entre la masse sèche d'un échantillon de granulat (**séché à l'étuve**) et le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume de tous les pores accessible et inaccessibles à l'eau. 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. En règle générale, les **GBR** ont une absorption d'eau supérieure et une masse volumique réelle inférieure que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la **PCD**. La mesure de **Ab** est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (**Eeff**) dans le béton, cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats.

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 EN 1097-6, 2014 ; ASTM C127, 2015] (**pour les gravillons**), [ASTM C128, 2015] (**pour les sables**) sont donc aussi utilisées pour les **GBR**. Les méthodes sont basées sur le même principe : le granulat est tout d'abord immergé **24 h** dans l'eau, puis le coefficient d'absorption d'eau (**Ab24**) 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. L'état **SSS** des sables est atteint en séchant progressivement l'échantillon sous un flux d'air chaud et il est repéré à l'aide d'un essai d'affaissement en admettant que lorsque la surface des grains devient sèche, la cohésion liée aux forces capillaires disparaît.

Les propriétés physiques des **GBR** varient dans une large fourchette selon l'origine et la taille du **GBR** (**sable ou gravillon**). À partir de plus de **230 articles** sur les **GBR**, [Silva et al., 2014b] ont constaté que la masse volumique réelle et **Ab24** suivaient une distribution normale. La masse volumique réelle moyenne de tous les résultats recueillis est **2 327 kg/m³** pour les gravillons et **2 065 kg/m³** pour les sables de **GBR**. Pour **Ab24**, les valeurs sont **4,7 %** pour les gravillons et **9,5 %** pour les sables.

I.7.2.1 Influence de la carbonatation sur les propriétés des GBR :

Selon la durée et les conditions de stockage des **GBR** après concassage, la **PCD** adhérente peut être plus ou moins carbonatée. En effet, le concassage augmente significativement la surface spécifique du béton, ce qui accélère le processus de carbonatation. La carbonatation de la portlandite et des **CSH** conduit à la formation de produits plus volumineux, qui peuvent colmater la porosité de la **PCD** et changer les propriétés physiques du **GBR**.

[Thiery et al., 2013] ont montré que le taux d'absorption du **CO₂** est plus faible pour les grains de tailles inférieures à **2 mm**, et ayant un taux de saturation en eau liquide inférieur à **0,4**. La carbonatation affecte donc de façon significative les propriétés de **GBR** fins. [Zhang et al., 2015] ont observé que la carbonatation améliore sensiblement les propriétés physiques des sables de **GBR**, avec une diminution de l'absorption d'eau, une augmentation de la masse volumique réelle et une légère diminution de la valeur à l'essai d'écrasement. La valeur à l'essai d'écrasement est définie comme le pourcentage de perte de masse d'une classe granulaire donnée après chargement à **25 kN** [JGJ 52, 2006]. [Zhao, 2014] a observé des résultats similaires pour l'absorption d'eau et la masse volumique réelle sur des **GBR** de laboratoire carbonatés ou non carbonatés.

Il a également montré que la carbonatation pouvait changer significativement la mesure de la teneur en **PCD** adhérente. En effet, la carbonatation réduit largement la fraction soluble dans l'acide salicylique et conduit au contraire à une augmentation de la perte de masse des **GBR** entre **105** et **600 °C**. Ce dernier résultat est dû au fait que certaines phases carbonatées de la pâte de ciment commencent à se décomposer vers **500 °C** [Villain et al., 2007].

I.7.3 Propriétés mécaniques des GBR :

I.7.3.1. 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 gravillons recyclés. En effet, les articles scientifiques qui relient la valeur de **LA** aux caractéristiques des granulats recyclés sont environ **3** fois plus nombreux que ceux

utilisant l'indice de résistance à l'écrasement (**IRC**), **4** fois pour la fragmentation dynamique (**FD**) et **6** fois pour l'essai Micro-Deval (**MDE**). Les proportions sont très similaires pour les granulats de béton recyclé (**GBR**).

Les recommandations de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] pour désigner la catégorie de résistance à la fragmentation des gravillons recyclés pour une utilisation dans le béton sont basées sur le coefficient Los Angeles (**LA**), réalisé selon la norme [NF EN 1097-2, 2010] des gravillons naturels. En général, la valeur du coefficient Los Angeles mesurée sur les matériaux de construction recyclés est comprise entre **20** et **40**. Elle est donc légèrement supérieure aux valeurs typiques des granulats naturels. C'est la teneur en mortier des **GBR** qui explique cette différence [Zega et al, 2010]. Il a été également remarqué que les deux types de granulats, naturel et de **GBR**, présentent une augmentation presque identique de leur **LA** lorsque leur masse volumique diminue, avec un taux de variation très proche [Mueller, 2014].

Pour les granulats recyclés, le coefficient **LA** augmente avec la proportion d'éléments de maçonnerie [Barbudo et al, 2012 ; Cameron et al, 2012], de mortier [Barbudo et al., 2012] et avec la teneur en mortier dans les grains de béton concassé [de Juan et Gutierrez, 2009]. La qualité du béton concassé a aussi un impact important sur la valeur de **LA**. À cet égard, [de Juan et Gutierrez, 2009] signalent une corrélation entre la résistance du béton d'origine et le coefficient **LA** des **GBR** obtenus, alors que la proportionnalité entre la résistance du béton d'origine et la teneur en mortier des grains de **GBR** n'est pas évidente ou avérée.

Même si les différents essais impliquent des mécanismes de rupture différents, les valeurs d'abrasion obtenues pour les **GBR** sont généralement assez bien corrélées : voir par exemple [Butler et al., 2012] pour la corrélation entre l'indice de résistance à l'écrasement (**IRC**) et **MDE**, ou [Dhir et Paine, 2007] pour la corrélation entre **LA** et **MDE**. La corrélation entre **LA** ou **MDE** et la fragmentation dynamique **FD** est toutefois moins probante. Par conséquent, les comportements présentés ci-dessus pour **LA** peuvent également être étendus à **MDE** ou à **IRC**. Par exemple, l'**IRC** est plus élevé pour les granulats recyclés que pour les granulats naturels [Wang et al., 2011] ; pour les granulats recyclés, **FD** augmente lorsque la résistance du béton d'origine diminue [Padmini et al., 2009 ; Liu et al., 2016 ; Wang et al., 2011].

I.7.3.2. Résistance à la compression:

Les modèles usuels de résistance à la compression décrivent le béton comme un matériau biphasique, c'est-à-dire une inclusion inorganique rigide (le granulat) dispersée dans une matrice (la pâte de ciment) considérée homogène à l'échelle mésoscopique. La pâte de ciment est généralement la partie la plus faible du composite et les lois classiques, comme la loi de Féret, définissent la résistance à la compression par le produit d'une constante, qui dépend de la nature du granulat, et d'une fonction qui dépend de la composition de la pâte de ciment :

$$f_{c28} = k_g f_{cm28} \frac{1}{\left[\frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E + \rho_e v_a}{C} \right) \right]^2} \quad (I.1)$$

- K_g : constante granulaire de Féret : $4,5 < K_g < 5,5$ pour les granulats naturels,
- $K_g = 0,0952MDE + 8,3927$ (MDE : Micro Deval en %);
- f_{c28} : résistance à la compression du béton à **28 jours**
- f_{cm28} : classe vraie (ISO) du ciment à **28 jours** ;
- ρ_c et ρ_e la masse volumique du ciment et de l'eau ;
- E et C la masse d'eau et de ciment (kg) pour un mètre cube de béton ;
- V_a le volume d'air pour un mètre cube de béton.

[de Larrard, 1999] propose une modification de la Loi de Féret pour tenir compte de l'influence de l'épaisseur maximale de pâte dans le béton « EMP » (exprimée en mm) sur la diminution de la résistance à la compression :

$$f_{c28} = k_g f_{cm28} \frac{1}{\left[\frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E + \rho_e v_a}{C} \right) \right]^2} (EMP)^{-0.13} \quad (I.2)$$

L'épaisseur maximale de pâte est donnée par la relation I.3 :

$$EMP = D_{max} \sqrt[3]{\left(\frac{g^*}{g} \right) - 1} \quad (I.3)$$

- D_{max} : le diamètre maximal du gravillon ;
- g : la fraction volumique du sable et des gravillons dans le béton ;
- g^* : la compacité du squelette granulaire (sable et gravillons) pour un indice de serrage égal à 9.

Les lois classiques ne prennent pas en compte l'effet plafond de certains granulats, comme par exemple les calcaires pour lesquels, dans le domaine des hautes résistances de pâte, la résistance du béton n'est plus strictement proportionnelle à la résistance de la matrice.

[de Larrard, 1999] propose alors une relation hyperbolique empirique pour modéliser cette non-linéarité :

$$f_{c28} = \frac{p f_{cm28}}{(q f_{cm28} + 1)} \quad (I.4)$$

- f_{c28} : la résistance à la compression du béton à **28 jours** en MPa ;
- f_{cm28} : la résistance à la compression de la matrice à **28 jours** en MPa ;
- p , une constante empirique ;
- q , une constante empirique MPa⁻¹.

La résistance à la compression de la matrice est calculée selon la relation (I.5) :

$$f_{cm28} = 13,4 R_{c28} \left(\frac{V_c}{V_c + V_e + V_a} \right)^{2,85} (EMP)^{-0,13} \quad (I.5)$$

Où :

V_c , V_e , et V_a sont respectivement le volume de ciment, d'eau et d'air dans la matrice. R_{c28} est la résistance du ciment (classe vraie).

Pour les matrices de faible résistance, l'équation (I.4) peut être approchée par la relation (I.6). Le paramètre « p » apparaît comme un paramètre qui décrit la qualité de la liaison entre la pâte de ciment et le granulat :

$$f_{c28} = p f_{cm28}$$

Pour les matrices de très haute résistance, la résistance du béton tend à une valeur asymptotique égale au rapport des deux paramètres p et q (I.6). [S. Rémond, J.M. Mechling, E. Garcia-Diaz, R. Lavaud, R. Trauchessec, B. Cazacliu, 2018]

$$\lim_{f_{cm28} \rightarrow \infty} f_{c28} \rightarrow \frac{p}{q} \quad (I.6)$$

I.8 Le béton recyclé, de la fabrication au durcissement :

Les granulats de béton recyclé (**GBR**) ont des caractéristiques spécifiques qui résultent de la présence de l'ancienne pâte de ciment ou du mortier poreux, mais aussi à la présence d'impuretés telles le plâtre et le gypse, par exemple.

En général, par rapport aux granulats naturels, les **GBR** :

- sont plus légers, plus anguleux et ont des compacités plus faibles ;
- sont plus poreux, plus fragiles et ont une plus grande absorption d'eau ;
- sont susceptibles de réduire l'efficacité des superplastifiants en raison des interactions potentielles avec les sulfates et les impuretés.

Ces caractéristiques spécifiques doivent être prises en compte pour concevoir des bétons ayant des propriétés stables à l'état frais, c'est-à-dire entre le malaxage et la prise. Quel est, selon le type de béton de **GBR** (bâtiment ou génie civil), le niveau critique de substitution des sables et gravillons naturels par des sables et gravillons de **GBR** au-delà duquel ces propriétés sont significativement impactées ? Comme recommandé pour les granulats légers, faut-il ou non pré-saturer les sables et gravillons de **GBR** avant le malaxage ? [Éric Garcia-Diaz, 2018]

I.8.1 Fabrication du béton recyclé :

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

Leur implantation n'est cependant pas toujours facile pour les centrales situées en milieu urbain, là où les **GBR** sont principalement disponibles. Un autre problème délicat est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la rhéologie du béton frais. Il est généralement

admis que l'absorption d'eau élevée des **GBR** génère des difficultés pour un, dosage précis de l'eau efficace de la formule. De même, l'eau absorbée par les **GBR**, entre la fin du malaxage et le coulage sur chantier, peut faire évoluer la consistance du béton durant le transport.

L'utilisation dans de nouveaux bétons des granulats issus de la déconstruction d'anciens bétons n'est pas récente. Le premier État de l'Art sur le sujet, publié par la **RILEM**, remonte à **1978** [Nixon, 1978].

La première utilisation à grande échelle de matériaux provenant de la démolition des bâtiments, en tant que granulats dans le béton frais, date de la Seconde Guerre mondiale. Durant et après la guerre, les décombres issus des bombardements, surtout aériens, ont été utilisés dans les bétons de la reconstruction des villes [Buck, 1972]. Aujourd'hui, dans de nombreux pays, les bétons incorporant des granulats de béton recyclé (**GBR**) ont dépassé le stade de la recherche et sont devenus une réalité concrète [Grübl et Nealen, 1998 ; Koulouris et al., 2004 ; Poon et Chan, 2007b].

I.8.1.1 Fabrication du béton avec des GBR en centrale de BPE :

I.8.1.1.1 Teneur en eau (humidité) :

Une question essentielle est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la consistance et la rhéologie du béton frais. En pratique, il est difficile de mesurer en temps réel la teneur en eau des **GBR**, alors que l'eau qu'ils apportent au mélange est souvent très conséquente. S'il est difficile de mesurer la teneur en eau des gravillons naturels, cela l'est plus encore pour les **GBR** car la mesure est tributaire de leur forte absorption d'eau.

I.8.1.1.2 Pré-saturation des GBR :

Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des **GBR** [Sagoe- Crentsil, 2001 ; Quattrone et al, 2016] et leur hétérogénéité [Joseph et al, 2015] rendent difficile le maintien d'un même dosage en eau d'une gâchée à l'autre. De plus, l'eau absorbée pendant le transport entre la fin du malaxage et la mise en œuvre peut changer la consistance du béton. [Belin et al., 2014] ont étudié des **GBR** qui ont absorbé jusqu'à **5 %** de l'eau du mélange entre **100** secondes et 1 heure. Ils en déduisent que les pertes de maniabilité dues à l'absorption d'eau diffèrent d'un **GBR** à l'autre. Ils signalent également que la cinétique d'absorption d'eau des **GBR** est différente entre eau pure et pâte de ciment. On rejoint ici les travaux de [Bello, 2014] qui a montré que la cinétique d'absorption d'eau des granulats légers, plongés dans une pâte de ciment, dépendait fortement du rapport eau/poudre de la pâte.

Il existe donc une influence de la teneur en eau initiale des **GBR** sur la qualité du malaxage des bétons de **GBR**. Afin d'éviter des variations de consistance, [Gonzalez et al, 2013] ont proposé d'immerger les **GBR** dans l'eau pendant **10 minutes**, suivi éventuellement d'un bref

séchage à l'air, pour éliminer l'eau de surface subséquente. La saturation complète afin d'éviter tout transfert d'eau vers les granulats a aussi été proposée par d'autres auteurs [Hansen, 1992a]. [Barra et Vazquez, 1996] et [Poon et al, 2004] ont étudié l'effet de l'utilisation de GBR séchés à l'étuve, séchés à l'air ou saturés surface sèche avant malaxage, en considérant une quantité d'eau totale constante dans le béton.

Ils concluent que le séchage à l'air des **GBR** donne des bétons de meilleure maniabilité et de meilleure résistance à la compression. Les auteurs proposent que l'état saturé ne doit pas être retenu en raison du risque de ressuage.

Toutefois, pour les sables de **GBR**, [Ji et al, 2013] signalent que la sensibilité à la fissuration du béton augmente avec la teneur en eau initiale des granulats, dans une gradation croissante allant du séchage à l'étuve jusqu'à l'état saturé surface sèche.

La perte d'affaissement n'est pas influencée par la teneur en eau initiale des granulats (quel que soit l'affaissement initial), et elle est comparable à celle d'un béton de granulats naturels. Ce résultat est interprété comme la conséquence d'une absorption rapide des **GBR**, qui se produit probablement pour l'essentiel pendant le temps de malaxage. D'ailleurs, [Salgues et al, 2016] ont confirmé qu'un **GBR** partiellement saturé avait une cinétique d'absorption rapide, conduisant à sa saturation complète durant le malaxage. Cependant, plus récemment, [Khoury et al, 2017] ont montré qu'un **GBR** pré-humidifié plusieurs semaines avant le malaxage contenait une plus grande quantité d'eau absorbée à la fin du malaxage qu'un **GBR** pré-humidifié au même taux, mais juste avant le malaxage.

1.8.1.1.3 Procédure de malaxage – effet de la séquence de chargement :

La technique du sable enrobé de ciment (**SEC**) a été proposée dans les années **1980** pour améliorer la résistance à la compression des bétons ordinaires à base de granulats naturels [Higuchie, 1980 ; Hayakawa et Itoh, 1982].

Cette méthode permet d'accroître jusqu'à **25 %** la résistance, par rapport à un malaxage normal (en une seule étape) et pour la même quantité d'eau totale. Ils expliquent ce gain par une amélioration de l'interface pâte de ciment – granulats [Tamimi, 1994].

À la fin des années **1990**, [Kurowa et al, 1999] ont montré que l'eau absorbée par les **GBR** avant ou au cours du malaxage, pouvait améliorer la résistance du béton. Ce résultat a servi à adapter la méthode **SEC** à la spécificité des **GBR**, en augmentant la quantité d'eau introduite au départ (**50 % de l'eau totale**) et en retardant l'introduction du ciment [Ryu, 2002b ; Otsuki et al, 2003]. Cette méthode de malaxage en deux étapes améliore effectivement le comportement mécanique des bétons de **GBR** (augmentation d'environ **15 %** de la résistance à la compression, et de **20 à 25 %** de la résistance à la traction) et leur durabilité (pénétration des ions chlorure et carbonatation), par comparaison au malaxage en une seule étape. L'effet bénéfique s'explique par

une amélioration des propriétés de la nouvelle auréole de transition (AT) [Otsuki et al, 2003 ; Li et al, 2012]. Cette méthode appelée « approche du malaxage en deux étapes » (**Two-Stage Mixing Approach TSMA**) [Tam et al, 2005] a été reprise ces dernières années. [Tam et al., 2007] ont montré un effet bénéfique qui croit concomitamment au taux de substitution en **GBR**. [Poon et Chan, 2007b] ont utilisé cette procédure pour les bétons incorporant du sable de **GBR**, ce qui a permis de limiter certains effets néfastes, comme la chute de résistance. [Babu et al., 2014] ont confirmé que cette méthode de malaxage améliorerait la résistance à la compression et la durabilité des bétons à haute performance (absorption d'eau, absorptivité, pénétration des ions chlorure, retrait de séchage et résistance à l'abrasion). Cependant, cette méthode de malaxage n'a pas d'effet avéré sur la résistance au gel des bétons de **GBR** à air entraîné [Liu et al, 2016].

I.8.1.1.4 Enrobage des granulats :

Le procédé spécifique de malaxage **TSMA** permet de recouvrir la surface des **GBR** par le coulis cimentaire, conduisant ainsi à une meilleure résistance à la compression des bétons de **GBR**. Il a été observé que l'immersion des **GBR** dans un liquide pouzzolanique augmente la résistance du béton de **GBR**, mais aussi que ce procédé a un effet négatif sur l'ouvrabilité du béton frais [Kurowa et al, 1999]. Plusieurs travaux ont cherché à combiner l'utilisation d'additions minérales avec le procédé de malaxage [Ryu, 2002b]. Par exemple, l'effet d'additions (cendres volantes ou laitier) sur la résistance à la compression et la pénétration des ions chlorure des bétons de **GBR** peut être bénéfique en utilisant une méthode de malaxage en trois étapes, comparé à un malaxage en deux étapes [Kong et al., 2010]. En outre, [Tam et Tam, 2008] ont montré que l'ajout de fumées de silice combiné au procédé **TSMA** développe une épaisse couche interfaciale autour des granulats et donc une plus grande résistance du béton.

Plus radicalement encore, [Liang et al., 2015] ont proposé des prétraitements de surface conduisant à former une nouvelle couche de pâte de ciment enrobant les **GBR**, appliqués sept jours avant la fabrication du béton.

I.8.1.1.5 Méthode de malaxage :

La méthode de malaxage peut également améliorer les propriétés mécaniques ou la maniabilité du béton de **GBR**. Par exemple, [Teramoto et al., 1998] ont proposé de faire pénétrer sous vide partiel de la pâte de ciment fluide dans les microfissures des **GBR**. Ils ont observé que l'utilisation d'un agent haut réducteur d'eau rend le système encore plus efficace vis-à-vis de la résistance à la compression.

Une méthode alternative est celle du malaxage sous vibration. [Heng et al., 2005] ont constaté une amélioration de la résistance à la compression de plus de **20 %** à **91 jours** par rapport à un béton mélangé sans vibration. Cependant, l'effet a été observé uniquement pour des **GBR** de moindre qualité, mais pas pour ceux de bonne qualité.

I.8.1.1.6 Utilisation de pré-mélanges granulaires :

La recommandation japonaise [Noguchi, 2015] définit certains obstacles à l'utilisation des **GBR** dans le béton, l'un d'eux étant la nécessité de silos supplémentaires, condition souvent difficile à réaliser pour les centrales implantées en zone urbaine, là où se trouvent les **GBR** le plus souvent. Pour éviter ce problème, une solution est d'utiliser des pré-mélanges granulaires composés directement en carrière, avec une partie des granulats naturels substituée par des **GBR**. Cette solution, qui permet l'utilisation de **GBR** sans modification de la configuration de la centrale. [J-M. Potier, B. Cazacliu, 2018]

I.9 Liants incorporant des granulats de béton recyclé :

Le sable obtenu lors du concassage du béton recyclé (qui représente environ **50 %** de la masse totale des déchets traités, selon le type et l'utilisation des concasseurs) est moins facile à utiliser dans un nouveau béton, comparativement aux gravillons.

Par conséquent, comme le sable est un « produit fatal » du processus de concassage, une solution alternative est de l'utiliser dans le cru cimentier, ou encore de le broyer et de le transformer en un composant du ciment (en substitution partielle du clinker) ou en un ajout au béton.

Les alternatives mentionnées ci-dessus représentent trois solutions viables pour le recyclage des sables de **GBR** :

- a) comme matière première alternative (**MPA**) pour le cru Portland ;
- b) comme constituant principal du ciment Portland autre que le clinker et ;
- c) comme ajout au béton. La première utilise le sable sans réduction granulométrique (« tel quel »), les deux autres après une nouvelle réduction de la granulométrie (broyage fin). [Laurent Izoret, ATILH, 2018]

I.9.1 Béton recyclé utilisé comme matière première alternative pour la fabrication du clinker portland :

L'utilisation de la fraction fine des granulats de béton recyclé (**GBR**) comme matière première alternative pour la production du clinker Portland est l'une des trois options envisagées pour le recyclage du béton. Elle est basée sur l'hypothèse vraisemblable que la composition chimique et minéralogique d'un sable de **GBR** est principalement contrôlée par la nature des sables et gravillons locaux ayant servi à fabriquer le béton parent, qui sont le plus souvent, en première approximation, de nature silico-calcaire (même si des granulats tout siliceux ou tout calcaire existent dans certaines régions). De ce fait, ils peuvent apporter au système les principaux éléments chimiques souhaités, c'est-à-dire le calcium et la silice.

L'estimation de la valeur potentielle d'un matériau alternatif entrant dans un cru cimentier est un problème classique qui peut être résolu en appliquant une approche semi-expérimentale : connaissant la composition chimique de chaque constituant sélectionné, elle revient à chercher, par itérations successives, les proportions du mélange cru donnant la composition du futur clinker [Bogue, 1929], en respectant divers indicateurs de cuisson. Cette approche a été implémentée dans une feuille de calcul Excel où le solveur sert à trouver le taux optimum de substitution des matières premières traditionnelles par le ou les matériaux alternatifs, en optimisant à la fois la composition potentielle du futur clinker et les indicateurs de cuisson. L'analyse du clinker a montré que ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont très semblables à celles du clinker de référence et qu'il donne des performances mécaniques très acceptables, le clinker étant broyé au moyen d'un broyeur pilote d'usine donnant de bonnes performances.

Cette démonstration montre qu'il est possible de recycler le sable de **GBR** dans le processus de fabrication du ciment Portland, avec de bonnes performances, et elle ouvre la voie à l'optimisation industrielle.

Cela confirme que les pratiques actuelles de l'industrie cimentière française, en termes de substitution des matières premières, sont également valables pour le recyclage des sables de **GBR** [C. Diliberto, L. Barnes-Davin, L. Izoret, A. Lecomte, J.-M. Mechling, P. Natin, 2018]

I.9.2 Béton recyclé utilisé comme constituant du ciment ou comme ajout cimentaire au béton :

Parmi les trois façons de recycler la fraction fine des granulats de béton recyclé (**GBR**) dans le ciment et le béton, la première est une utilisation en tant que matière alternative dans le cru cimentier destiné à la fabrication du clinker. Cette voie ne soulève pas de problème particulier, du moment que la composition minéralogique du mélange initial est bien conçue et donne, après cuisson, le clinker Portland attendu, avec les propriétés d'usage associées. La deuxième et la troisième voie sont respectivement la substitution au clinker, en tant que constituant du ciment et, après broyage, l'ajout direct au béton en tant que matériau cimentaire supplémentaire.

Concernant l'utilisation des fines de **GBR** en tant que constituants du ciment, les essais réalisés [PNRECYCETON., 2018] ont clairement montré que, selon leur composition minéralogique en relation avec la région géologique d'origine (siliceuses, granitiques et silicocalcaires), leur introduction en remplacement des fillers calcaires est une option réaliste qui permet d'obtenir des ciments courants ayant des propriétés d'usage et une résistance mécanique acceptables.

Les essais effectués sur pâtes et mortiers incorporant des fines de dépoussiérage (**fines de GBR-D**) et des fines obtenues par broyage de sables de béton recyclé (**fines de GBR**) ont montré

que ces matériaux se comportent plutôt comme des charges minérales inertes, même s'ils ont une légère activité pouzzolanique.

Enfin, les fines de **GBR-D** se révèlent être peu efficaces en termes de contribution à la résistance des mortiers. Les fines de **GBR** doivent être finement broyées afin qu'elles expriment la meilleure efficacité en tant qu'addition de **type I**. Les sables de **GBR** peuvent aussi être transformés en fines de **GBR** par broyage, et constituer ainsi une voie intéressante pour valoriser les sables de **GBR** dans les bétons, dans l'hypothèse où cette coupure ne serait pas facilement réutilisable en tant que sable dans de nouveaux bétons. [PNRECYCETON., 2018]. [M. Cyr, C. Diliberto, L. Izoret, A. Lecomte, 2018]

I.10 Effet des granulats de béton recyclé sur les propriétés du béton frais :

La plupart des études qui visent à développer l'incorporation des granulats de béton recyclé (**GBR**) dans les bétons ne s'intéressent qu'à l'effet des gravillons de **GBR**, essentiellement sur les propriétés des bétons durcis. Quelques études concernent les sables de **GBR** utilisés dans des mortiers, et leurs effets sur l'étalement et la résistance.

La rhéologie du béton frais est une science relativement récente. Jusqu'à présent, la consistance du béton frais est caractérisée par de nombreux essais technologiques, mais peu de chercheurs ont appliqué la mécanique des milieux continus au comportement rhéologique du béton frais [Bartos, 1992 ; Ferraris, 1996]. Les propriétés rhéologiques du béton sont le plus souvent décrites par le modèle de **Bingham**, dont les paramètres sont le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ces deux paramètres dépendent principalement des propriétés des constituants et de leurs proportions dans le mélange, mais aussi de la température et du temps écoulé depuis la fin du malaxage.

Dans les études classiques, l'analyse scientifique des propriétés d'écoulement du béton frais n'est souvent pas considérée. Cependant, des travaux récents [Tahar et al., 2016] ont montré que la rhéologie du béton de **GBR** est influencée négativement lorsque la substitution en sable de **GBR** dépasse 30 %.[E-H. Kadri, M. Mouret, D. Rogat, Z.A. Tahar, 2018]

I.11 Propriétés du béton recyclé durci :

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

- les **GBR** jouent-ils un rôle spécifique ?
- quels sont les mécanismes impliqués ?
- les méthodologies et les essais habituels, utilisés pour les bétons de granulats naturels, sont-ils adaptés au béton de **GBR** ?

- quelles sont les conditions requises pour produire des bétons de **GBR** ayant des propriétés similaires à celles des bétons de granulats naturels ? [Patrick Rougeau, 2018]

I.11.1 Microstructure du béton recyclé :

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

La conséquence peut être alors l'apparition d'une microstructure spécifique entre l'ancienne et la nouvelle pâte de ciment. L'objectif de ce chapitre est de caractériser par microscopie électronique à balayage (**MEB**) la phase intermédiaire (ou interphase) entre ancienne et nouvelle pâte, par mesures semi-quantitatives réalisées sur des mortiers et des bétons contenant différents sables et gravillons. Des granulats totalement séchés ou sursaturés ont été utilisés pour apprécier l'effet des transferts hydriques entre **GBR** et nouvelle pâte de ciment, dans cette auréole de transition. Finalement la porosité des **AT** est corrélée à la perméabilité au gaz des bétons afin d'identifier le domaine de composition (**rapport Eeff/L**) correspondant à un réseau poreux peu connecté.

L'auréole de transition est la zone située à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment dense. Plusieurs auteurs [Barnes et al., 1978 ; Crumbie, 1994 ; Kjellsen et al., 1998 ; Langton et Roy, 1980 ; Monteiro et al., 1985 ; Olivier et al., 1995 ; Scrivener et al., 1988 ; Scrivener et Gartner, 1987 ; Scrivener et Pratt, 1996 ; Zimbelman, 1985] ont étudié en détail la microstructure de l'auréole de transition et les mécanismes de sa formation. Cette zone est caractérisée par un gradient de microstructure : la porosité augmente progressivement, en allant de la pâte de ciment compacte jusqu'à la paroi des grains. Cette microstructure résulte principalement de « l'effet de paroi » exercé par le granulat (**gros**) sur les particules de ciment (**fin**). En raison de cet effet, à la périphérie du granulat, dans la pâte de ciment, la teneur initiale en eau augmente et la teneur initiale en ciment diminue. L'épaisseur initiale de la zone perturbée par « l'effet de paroi » est de l'ordre de plusieurs dizaines microns (épaisseur initiale de l'auréole de transition). Durant le durcissement, en raison d'un remplissage de la porosité par les produits d'hydratation, l'épaisseur de l'auréole de transition diminue généralement. Durant cette période, un mécanisme de transfert des produits hydratés (Portlandite notamment) s'instaure entre les zones riches et pauvres du ciment. Il induit la formation d'un « film duplex » riche en Portlandite, de quelques microns d'épaisseur, qui peut s'observer à la surface des grains.

Le béton recyclé, en termes de microstructure, se distingue des bétons de granulats naturels par la présence de deux générations de pâte de ciment : celle, adhérente aux **GR**, qui provient de

l'ancien béton dont le concassage a produit les granulats recyclés, et celle qui provient de l'hydratation du nouveau ciment ajouté aux **GR** pour constituer le béton de seconde génération. La figure (**Figure I.5**) ci-dessous montre la co-existence de ces deux pâtes, et leur bonne liaison mécanique. [E. Garcia-Diaz, A. Djerbi, G. Le Saout, 2018]

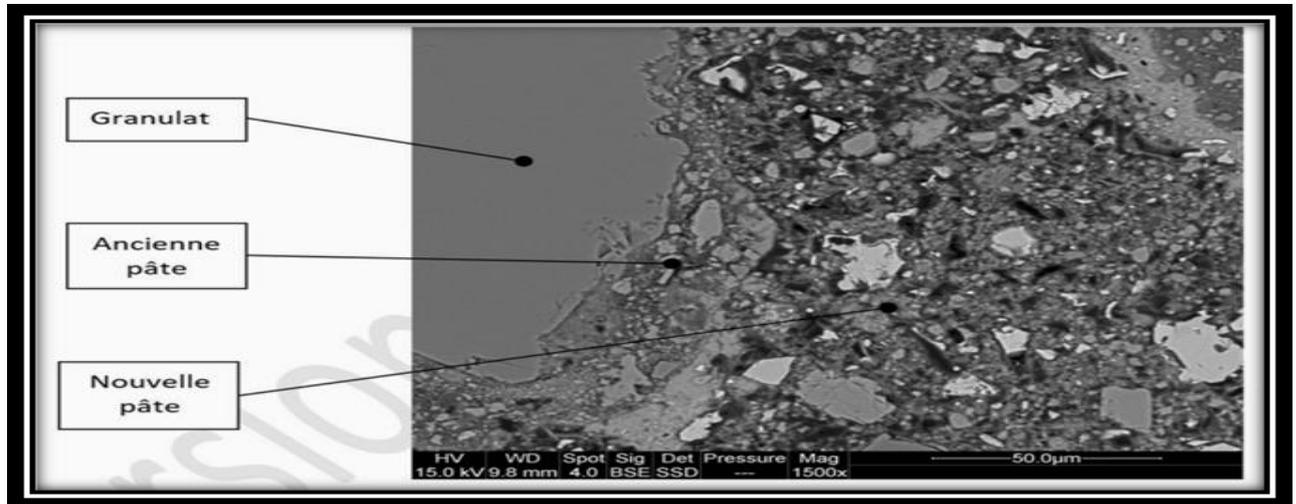


Figure (I.9) : Microstructure du béton recyclé (vue au microscope électronique à balayage) – Crédit photo Ifsttar

I.11.2 Résistance à la compression :

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

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

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

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

- l'augmentation du taux de **GBR** conduit généralement à une diminution de la résistance à la compression, à même E_{eff}/C .
- La diminution peut être amplifiée si l'on garde le même dosage en ciment et la même maniabilité, car l'introduction de **GBR** peut également entraîner une augmentation de la demande en eau ;
- la moindre qualité mécanique des **GBR**, par rapport aux granulats naturels, explique l'essentiel de la diminution des performances. Effectivement, les granulats naturels sont produits à partir de roches dont la résistance à la compression dépasse généralement **50 MPa**, alors que les **GBR** sont généralement obtenus par concassage de bétons dont la résistance est inférieure à cette valeur. Pour un taux de recyclage donné, la diminution de la résistance à la compression est toutefois moindre si les **GBR** proviennent d'un béton parent ayant une résistance à la compression importante. Par exemple, les **GBR** provenant de bétons à ultra hautes performances (**BUHP**) peuvent être recyclés dans des **BUHP**, sans différences significatives par rapport à des granulats naturels [**Sedran et al., 2010**].

I.11.3 Résistance à la traction par flexion et par fendage :

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

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

I.11.4 Module d'élasticité :

Différents auteurs se sont intéressés à la question du module d'élasticité, et tous sont d'accord pour dire qu'il se situe entre **50** et **70%** du module d'élasticité d'un béton naturel, avec une variation en fonction du rapport E/C et du taux de remplacement des granulats [**Oliv 1996**] [**Ajdu 2002**] [**Rao 2005**] [**Kou 2007**] [**Choi 2012**]. Cette perte de module d'élasticité semble principalement liée à la grande porosité des bétons recyclés, mais il a été montré que cette porosité diminue avec le temps [**Gome 2002**] et donc que la différence de module d'élasticité s'amenuise. [**E. Ghorbel, T. Sedran, G. Wardeh, 2018**]

I.12 Propriétés mécaniques différées :

[F. Grondin, 2018 ; C. de Sa, 2018 ; T. Sedran, 2018 ; F. Cassagnabère, 2018 ; F. Benboudjema, 2018 ; A. Z. Bendimerad, 2018 ; M. Guo, 2018 ; A. Loukili, 2018 ; P. Nicot, 2018 ; E. Rozière, 2018 ; B. Fouré, 2018 ;]

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

I.12.1 Influence du taux de substitution des GBR sur le retrait :

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

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

qu'après **6 mois**, elle atteint **4 %**. En revanche, pour des taux de substitution de **50 %** et **100 %**, l'augmentation du retrait est de **12 %** et **70 %**, respectivement.

I.12.2 Influence du taux de substitution des granulats recyclés sur le fluage :

Des observations similaires ont été faites dans des études de fluage : le fluage augmente avec le taux de GBR [Hansen, 1992a ; Hansen, 1992b ; Gomez-Soberon, 2003 ; Domingo-Cabo et al., 2009 ; Domingo et al., 2010 ; Fathifazl et al., 2011b ; WRAP, 2007a ; Marinkovic et Ignjatovic, 2013].

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

Selon l'étude de [Gomez-Soberon, 2002a], les caractéristiques et la composition des bétons de **GBR** influent sur le comportement mécanique à court et à long terme des bétons. En particulier, le fluage de dessiccation est significativement affecté, comparativement à celui du béton de granulats naturels, du moins lorsque le taux de substitution dépasse 30 % .[F. Grondin, C. de Sa, T. Sedran, F. Cassagnabère, F. Benboudjema, A. Z. Bendimerad, M. Guo, A. Loukili, P. Nicot, E. Rozière, B. Fouré, 2018]

I.13 Propriétés liées à la durabilité :

[P. Rougeau, 2018 ; L. Schmitt, 2018 ; J. Nai-Nhu, 2018 ; A. Djerbi, 2018 ; M. Saillio, 2018 ; E. Ghorbel, 2018 ; J.-M. Mechling, 2018 ; D. Bulteel, 2018 ; M. Cyr, A. 2018 ; Lecomte, 2018 ; N. Leklou, 2018 ; R. Trauchessec, 2018 ; I. Moulin, T. 2018 ; Lenormand, O. Amiri, 2018]

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

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

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

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

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

La résistance au gel des **GBR** dépend des caractéristiques du béton parent. Les bétons de **GBR** résistent donc aux cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçages dès lors que les **GBR** sont intrinsèquement résistants au gel et que les règles de formulation habituelles (teneur en liant, rapport **E/L**, teneur en air entraîné, etc.) sont respectées. [P. Rougeau, L. Schmitt, J. Nai-Nhu, A. Djerbi, M. Saillio, E. Ghorbel, J.-M. Mechling, D. Bulteel, M. Cyr, A. Lecomte, N. Leklou, R. Trauchessec, I. Moulin, T. Lenormand, O. Amiri, 2018]

I.14 Comportement au feu:

[F. Robert, 2018 ; A.L. Beaucourt, 2018 ; H. Colina 2018]

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

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

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

Les travaux recensés concernant les bétons de **GBR** soumis à des températures élevées proposent des conclusions variées [Zega et Di Maio, 2006 ; Xiao et al., 2013 ; Sarhat et Sherwood, 2013 ; Vieira et al., 2011 ; Eguchi et al., 2007 ; Zega et Di Maio, 2009 ; Xiao et Zhang, 2007 ; Liu et al., 2016]. Comme pour les bétons de granulats naturels exposés à de fortes

chaleurs, les bétons de **GBR** présentent eux aussi une altération de leurs propriétés mécaniques, par rapport à leurs propriétés initiales :

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

[F. Robert, A.L. Beaucourt, H. Colina, 2018]

I.15 Adhérence entre armatures et bétons de GBR :

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

[Butler et al., 2011] ont aussi étudié l'influence de la substitution des gravillons naturels par des gravillons de **GBR** sur l'adhérence acier-béton. Comme précédemment, ils ont conclu qu'il n'y a pas de différence significative d'adhérence entre bétons traditionnels et bétons de **GBR**.

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

[Seara-Paz et al., 2013] ont étudié l'adhérence acier/béton à partir de bétons de **GBR** pour lesquels différents pourcentages de gravillons naturels ont été remplacés par des gravillons de **GBR** (**20 %**, **50 %** et **100 %**). Ils ont réalisé des essais d'arrachement direct avec des barres crénelées de diamètre **10 mm** ancrées sur cinq fois le diamètre. Ils ont trouvé que la résistance à la compression et la contrainte d'adhérence diminuaient lorsque le pourcentage de gravillons de **GBR** augmentait. La diminution de l'adhérence est de **13 %** pour un taux de substitution de **100 %**. [E. Ghorbel, G. Wardeh, B. Fouré, 2018]

I.16 Domaines d'utilisation des bétons de GBR :

I.16.1 Pont-cadre classique :

Un pont-cadre classique du contournement ferroviaire Nîmes-Montpellier a été partiellement construit avec un béton de granulat recyclé. Le but était de démontrer que les bétons de granulats recyclés pouvaient être utilisés en ouvrage d'art sans modifier la formulation et la mise en œuvre, tout en maintenant les exigences de durabilité spécifiques au domaine. Les études en laboratoire ont montré que l'utilisation de **20 %** ou de **40 %** de gravillons de **GBR** dans le béton permettait de maintenir les indicateurs de durabilité dans la plage attendue.

Bien que le retrait soit favorisé par les **GBR**, il reste cependant dans des limites admises. Aucune préparation particulière du **GBR** n'a été nécessaire, et la mise en œuvre du béton n'a pas nécessité de précautions particulières a été régulière. Plus de deux ans après la construction (**Figure I.10**), aucun défaut particulier n'est apparu et les paramètres de durabilité mesurés sur les échantillons carottés (porosité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, profondeur de carbonatation, etc.) sont conformes aux prévisions. Cette expérience montre que l'emploi des gravillons de **GBR** peut être généralisé sans difficultés majeures, y compris dans les ouvrages d'art et à des taux probablement supérieurs à **20 %**, compte tenu des résultats positifs obtenus avec la formule à **40 %** de **GR type 1**. Une attention particulière doit cependant être apportée à l'augmentation du fluage. [I. Moulin, E. Perin, O. Servan, M. Verbauwhede, 2018]



Figure (I.10) : Vue du pont construit avec un béton de granulat recyclé après 2,5 ans

I.16.2 Bâtiment pour archives administratives :

Première expérience de construction d'un bâtiment utilisant des granulats de béton recyclé (**GBR**), réalisée dans le cadre du Projet National **RECYBETON**.

Aujourd'hui, les matériaux de construction sont au cœur des préoccupations écologiques et du développement durable, et ils en sont devenus l'un des enjeux stratégiques. Le recyclage du béton dans le béton offre une alternative prometteuse à l'épuisement des ressources naturelles.

Dans ce contexte, le Conseil Départemental de Seine-et-Marne (**CD77**) a la volonté d'être un acteur territorial actif en matière d'éco-construction et d'éco-rénovation, en favorisant le rapprochement des différents acteurs locaux dans des projets d'écoconstruction.

Ainsi, le « **Bâtiment CD77** », situé à Mitry-Mory (**Seine-et-Marne**), dans la banlieue Nord-Est de Paris, a été le troisième chantier expérimental réalisé dans le cadre du Projet National **RECYBETON**. Il est probablement le premier bâtiment réalisé en France à base de béton incorporant des granulats de béton recyclé (**GBR**). Ce bâtiment a une superficie de **40 m²** et il est destiné au stockage des archives. C'est un point critique du projet car la charge de service est de **750 kg/m²**. Cette particularité induit des dispositions particulières de dimensionnement de la dalle, compte tenu :

- **de la déformation autorisée** : la surcharge ne doit pas endommager les éléments mobiles pour le stockage des archives ;
- **du fluage** : l'utilisation de granulats recyclés induit une diminution du module différé du béton de **GBR**.

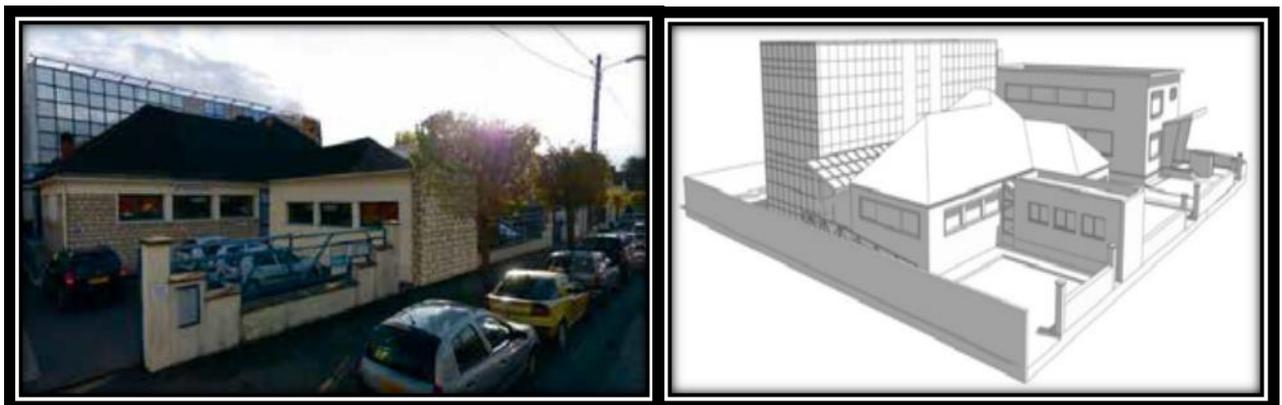


Figure (I.11) : Localisation du bâtiment

La construction, destinée à stocker des archives, comprend des fondations superficielles, une dalle en béton armé, des murs banchés (**avec trois fenêtres**), et une liaison avec le bâtiment existant (**canopée-verrière**). Une rampe en béton armé doit permettre aussi l'accès aux personnes à mobilité réduite.

D'un point de vue technique, la faible quantité de béton requise (**40 m³**) a conduit à n'envisager qu'une seule formule de béton de **GBR**, où **30 %** du sable et **50 %** des gravillons naturels ont été substitués par des **GBR** : **13 m³**, **7 m³**, **13 m³** et **7 m³** ont été les volumes de béton nécessaires pour les fondations, la dalle, les murs banchés et la toiture terrasse, respectivement. La résistance caractéristique exigée à **28 jours** était de **25 MPa**. [Amor Ben Fraj, Sophie Decreuse, 2018]

I.16.3 Immeuble de bureaux / dalle intérieure :

Ce chapitre présente le point de vue conjoint d'un promoteur immobilier – Nacarat (Groupe Rabot-Dutilleul) – et d'un producteur de **BPE** – Lafarge Bétons France – sur l'utilisation expérimentale de granulats de béton recyclé (**GBR**) dans la construction d'un immeuble de bureaux situé en région parisienne.

Une première expérimentation réussie avait été réalisée dans le Nord de la France en **2015**. Elle portait sur l'utilisation d'un laitier de haut fourneau cristallisé. En **2016**, le groupe Rabot **Dutilleul** a souhaité réitérer cette expérience en région parisienne, en utilisant cette fois des granulats issus du secteur du **BTP**, c'est-à-dire provenant de bétons de déconstruction.

Le projet sélectionné était un immeuble de bureau ordinaire. Il ne s'agissait pas de modifier le design du projet, mais simplement d'y inclure l'expérimentation envisagée.

Les entreprises étaient disposées à coopérer, du moment que la mise en œuvre du béton respectait les normes en vigueur et que le prix initialement négocié n'était pas révisé.

Le choix s'est rapidement porté sur la réalisation d'une dalle intérieure de plancher. [R. Deborre, E. Garcia, 2018]



Figure (I.12) : Bâtiment D1 du « Parc de l'Étoile », travaux achevés

I.16.4 Recyclage dans l'industrie des produits préfabriqués en béton :

Depuis plusieurs années, certaines usines de produits préfabriqués en béton proposent des produits incorporant des granulats de béton recyclé (**GBR**). Cette pratique concerne aussi bien des produits non-armés, tels les blocs, les dalles et les bordures que les produits armés, tels les éléments structuraux.

L'industrie des produits en béton est pleinement engagée dans le défi de l'économie circulaire, en recourant notamment à l'utilisation de ressources durables. Il existe une grande variété d'applications concernant l'utilisation de matières premières secondaires en béton [**Petitpain et al, 2017**]. Leur emploi est presque toujours techniquement possible et généralement viable économiquement. Les matières premières recyclées contribuent ainsi à une utilisation plus rationnelle des ressources naturelles, tout en respectant les performances des produits.

Les **GBR** utilisés dans ce contexte proviennent essentiellement de deux sources :

- des bétons issus des usines de préfabrication ;
- des bétons issus de la démolition de structures ou de chantiers de construction. [**P. Francisco, P. Rougeau, 2018**]



Figure (I.13) : Produit préfabriqué avec des GBR



Figure (I.14): Bâtiment utilisant des produits préfabriqués en béton incorporant des GBR

I.19 Conclusion :

Ce chapitre traite le recyclage du béton concassé dans la fabrication de nouveaux bétons. Il résume l'essentiel des acquis du projet national de recherche **RECYBETON**. On commence par présenter la responsabilité environnementale et économie circulaire, et son rôle pour la gestion des ressources naturelles, les gisements potentiels pour des granulats recyclés dans les bétons, les Déchets de Construction et de Démolition, techniques et matériaux de démolition, la fabrication et les propriétés des granulats de béton recyclé. Puis on s'intéresse à la caractérisation des granulats de béton recyclé. Cependant, dans le cas le plus courant, le béton concassé sera utilisé comme granulats de nouveaux bétons. Le béton recyclé ainsi obtenu voit certaines de ses propriétés modifiées, à des niveaux variables selon la propriété choisie et le taux de recyclage adopté.

CHAPITRE II
GENERALITE SUR LES RESISTANCES
MECANIQUES DU BETONS

II GENERALITE SUR LES RESISTANCES MECANIQUES DES BETONS

II.1 Introduction:

Le béton constitue l'un des éléments essentiels de notre civilisation ; sa capacité de prendre des formes les plus divers et sa durabilité le rendent l'un des matériaux les plus utilisés dans le domaine de la construction.

Très vite, depuis son invention, les constructeurs en ont compris l'intérêt au plan de l'économie et les possibilités d'expression architecturale.

Dans les éléments d'une structure, le béton peut se trouver dans les différentes conditions d'exploitation, celui-ci est souvent soumis à des charges de compression, de traction, de flexion, de cisaillements, etc. [A.Guerrin et R.Laveur, 1973]

Ainsi la nécessité est apparue d'un contrôle de qualité rigoureux de ce matériau, particulier en ce qui concerne sa résistance ; les bétons à caractéristiques normalisées sont en effet vendus à la « **résistance** » et au « **dosage** ».

Si les performances du béton sont acceptables en compression, sa résistance à la traction reste faible ; limitant ainsi son utilisation dans ce type de sollicitation ; cette faible résistance à la traction indique surtout une grande fragilité correspondant le plus souvent à une mauvaise adhérence du liant aux granulats. [F.Gorisse, Paris 1982] Il est alors nécessaire et utile pour la sécurité des ouvrages de connaître avec une bonne probabilité cette résistance avant l'utilisation du matériau, celle-ci est obtenue par l'expérience et représente la moyenne des résistances mesurées sur un ensemble d'échantillons fabriqués et conservés dans des conditions aussi voisines que possible de celles de la structure.

Pendant plusieurs années, elle a été déterminée par des essais de traction directe sur les éprouvettes normalisées, ces essais bien qu'ils soient satisfaisants sur le plan théorique, présentent des difficultés énormes au niveau de l'expérimentation rendant parfois les mesures très délicates et aggravant la dispersion des résultats. [B.Radjel et S.Benmedakhen, 1991]

Les chercheurs et ingénieurs se sont alors efforcés d'élaborer des théories, d'effectuer des recherches et essais de substitution et l'en déduire des méthodes de caractérisation permettant l'accès à ce paramètre intrinsèque des matériaux ; ainsi la résistance du béton à la traction peut être mesurée soit par un essai de flexion sur des éprouvettes prismatiques de section carrée soit par un autre mode d'essai classique dit « **brésilien** », ce dernier consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées. [G-Dreux, 1978]

II.2 Définition :

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule à chercher pour un béton : ouvrabilité et résistance sont à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la compression du béton.

II.3 Les types de résistance :

II.3.1 La résistance à la traction :

II.3.1.1 Définition :

La résistance à la traction étant une grandeur caractéristique très importante, elle dépend non seulement de la forme et des dimensions de l'éprouvette, mais aussi à la nature de sa surface et de la rapidité d'application de la charge, ainsi, pour obtenir des résultats comparables, il est nécessaire de suivre scrupuleusement les méthodes d'essais normalisées pour le matériau étudié. [G-Dreux et J.FESTA ,1998]

II.3.1.2 Paramètres de l'essai :

En l'absence d'une normalisation dans notre pays, les fabricants et les utilisateurs industriels du béton adoptent généralement pour les exécutions des essais, les normes françaises **AFNOR** , dont les références concernant les essais de traction sont :[G-Dreux, F .Gorisse, 1978]

- **NF P 18 _400 février 1969 « moules et éprouvettes cylindrique ».**
- **NF P 18 _401 février 1969 « moules et éprouvettes prismatiques ».**
- **NF P 18 _407 février 1969 « essais de traction par flexion ».**
- **NF P 18 _408 février 1969 « essais de traction par fendage ».**
- **NF P 18 _409 février 1969« essais de traction directe ».**

II.3.1.2.1 Moules et éprouvettes :

Les éprouvettes couramment utilisées pour la mesure de la résistance de béton à la traction sont de forme prismatique à section carrée (**essai de traction directe ou par flexion**) ou cylindrique (**essai de traction directe ou par fendage**)

Les dimensions de ces éprouvettes doivent être fixées en fonction de la dimension maximale du plus gros granulats, plus précisément , il a été établi une relation entre la plus petite dimension de l'éprouvette et le calibre maximal du granulat , on observe habituellement la règle dite des «**4D3**» où D désigne le diamètre maximal des granulats [F .Gorisse, Paris 1982], la cote «**a**» de la section de l'éprouvette ne doit pas être inférieure à **4D**.

La normalisation **AFNOR** précise les dimensions pour chaque géométrie d'éprouvette utilisée dans les trois types d'essai de traction.

a) Eprouvettes cylindriques:

Elles sont utilisées principalement pour les essais de traction directe ou traction par fendage, le tableau résume les dimensions de ses éprouvettes fixées selon la norme **NF P18_400**. [G.Dreux et F .Gorisse, Paris 1978] (Tableau II.1)

Tableau (II.1) : Dimensions des éprouvettes cylindriques

FORMAT	Dimensions de fabrication (mm)		Dmax (mm)
	Diamètre a	Hauteur h	
Cylindrique de 11	112,8	220	≤ 25
Cylindrique de 16	159,6	320	≤ 40
Cylindrique de 25	252,5	500	≤ 63

b) Eprouvettes prismatiques:

Ces éprouvettes sont principalement utilisées pour les essais de traction directe ou de traction par flexion, le tableau ci-après indique les dimensions à respecter pour cette géométrie d'éprouvette selon la norme **NF P188_401** . [G.Dreux et F .Gorisse , Paris 1978] (Tableau II.2)

Tableau (II.2) : Dimensions des éprouvettes prismatiques

Prisme de	Dimensions de fabrication (mm)		Section a ² (cm ²)	Distance entre appuis inférieurs 3a (mm)	Dmax (mm)
	Arête de base a	Largeur L=4a			
7	70,7	282,8	50	212,1	≤ 16
10	100,0	400,0	100	300,0	≤ 25
14	141,4	565,6	200	242,2	≤ 31,5
20	200 ,0	800,0	400	400	≤ 50

Généralement, les éprouvettes sont soit sciées à chaque extrémité pour éliminer la zone de béton plus en mois hétérogène, soit carottées d'un bloc de béton pour être expérimentées. [B.Radjel et S.Benmedakhen, 1991]

Concernant l'essai de traction directe, d'autres formes d'éprouvettes ont été développées et utilisée comme par exemple l'éprouvettes allemande de forme **8 classique** (Figure II.1), ces éprouvettes avaient pour but d'éviter les ruptures au niveau des mors d'attache de la machine et de concentrer la rupture finale au niveau de la section médiane , elle permettent de tenir compte de l'influence de la compacité sur la résistance à la traction ainsi que le rôle néfaste des vides intérieurs au béton, lesquels induisent une forte concentration des contraintes, cependant des mesures par photoélasticité montrent que la répartition des contraintes dans la section médiane où

doit se produire la rupture n'est pas uniforme à cause des fortes concentrations de contraintes introduites par le courbure de la section.

L'Anglais **Coker** proposa une autre forme de géométrie d'éprouvette donnant une traction uniforme au centre, enfin l'**Hermite** a développé une éprouvette cylindrique à tête dite en ligne de jet, permettant d'avoir une déformation une dans un volume centrale de hauteur égale à **1,5 d**.

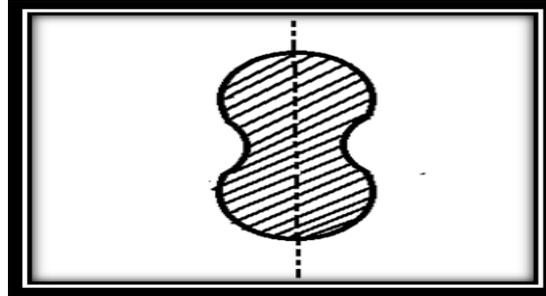


Figure (II.1) : Eprouvette allemande en forme de 8

II.3.1.2.2 Nombres d'éprouvette:

Le béton étant un matériau hétérogène, le phénomène de dispersion observé dans les mesures de la résistance à la traction rend souvent difficile l'interprétation des résultats, l'écart quadratique ou écart type ne peut être vraiment significatif, comme toute statistique, qu'à partir d'un nombre de mesures assez important.

D'après [G.Dreux,1978], douze valeurs constituent un minimum, il reste évident que la connaissance de la résistance d'un béton sera d'autant meilleure que le nombre d'éprouvettes sera plus grand, ainsi le nouveau règlement français du béton précontraint (**août 1973**) préconise un minimum de **30 éprouvettes**.

II.3.1.2.3 Vitesse de sollicitation :

Il est bien connu que la vitesse de mise en charge influe considérablement sur tous les essais de résistance des matériaux.

Dans les essais de mesure de la résistance à la traction du béton, la mise en charge doit s'effectuer d'une manière continue à la vitesse moyenne de **0.5 bar par seconde** avec une tolérance de **± 0.1 bar par seconde**. [G.Dreux,1978]

II.3.1.3 Pratique des essais de traction sur le béton:

Les trois essais les plus fréquemment effectués à l'heure actuelle pour mesurer la résistance du béton à la traction sont les suivants:

II.3.1.3.1 Essai de traction directe:

C'est un essai très délicat à réaliser , qui ne peut être utilisé de manière courante; Cet essai est réalisé sur des éprouvettes cylindrique ou prismatique, et consiste à appliquer à chacune des extrémités de l'éprouvette un effort de traction parfaitement centré afin d'éviter l'apparition du moments de flexion parasite , il nécessite après sciage des extrémités de l'éprouvette sur un ou deux centimètres pour éliminer le béton dont la qualité est toujours perturbée , le collage des têtes de traction au moyen d'une colle dont la résistance est supérieure à celle du béton (**Araldite ou résine Epoxy**).

Le dispositif comporte des tiges de traction centrées et articulées par rotules. (**Figure II.2**)

La résistance à la traction **R**, est donnée par la formule classique de la résistance des matériaux: $R_t = N/S$, N et S représentant respectivement l'effort de rupture et a section de l'éprouvette.

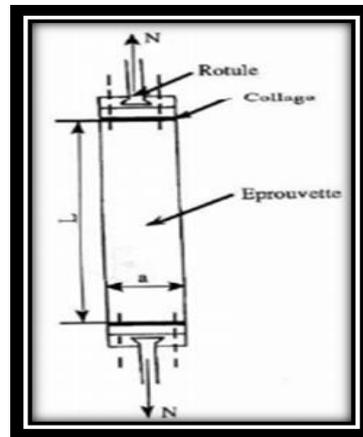


Figure (II.2) : Dispositif de traction directe

Cet essai satisfaisant sur le plan théorique, présente néanmoins certaines difficultés au niveau de l'expérimentation:

➤ Il est assez dispersé dans ses résultats, en raison des ruptures qui se produisent souvent dans les zones de collage ou au niveau des mors de la machine (**pour les appareils équipés de ce dispositif**) ;

Dans cette zone se produit une importante concentration des contraintes provoquée par les forces d'écrasement dues au serrage ;

➤ Il est très coûteux.

Etant donné ces critères, les résultats de cet essai sont surtout pris comme référence en laboratoire.(**Figure II.3**)

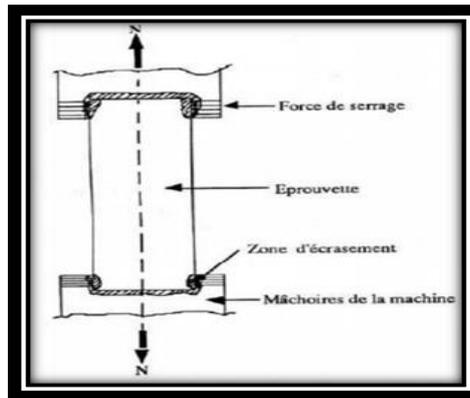


Figure (II.3) : Schéma de fixation d'une éprouvette de traction au niveau des mâchoires de la machine de traction.(zones de serrage)

II.3.1.3.2 Essai de traction par fendage:

D'après [A.Guerrin et R.C Lavour,1973] , cet essai a été imaginé en premier par **Mesnager** en **France** vers **1905** avant d'être repris plus tard par les brésiliens.

Appelé aussi «**essai brésilien**», il consiste à rompre un cylindre entre les plateaux d'une presse de compression suivant deux génératrices opposées , le contact des plateaux de la presse avec l'éprouvette est réalisé par l'intermédiaire de réglettes de contre-plaqué de **5mm** d'épaisseur et de largeur égale au **1/10** du diamètre du cylindre, un centrage parfaite est nécessaire.(**figure II.4**)

Ce type de sollicitation est pratiquement inexistant dans les structures, il est donc purement conventionnel.

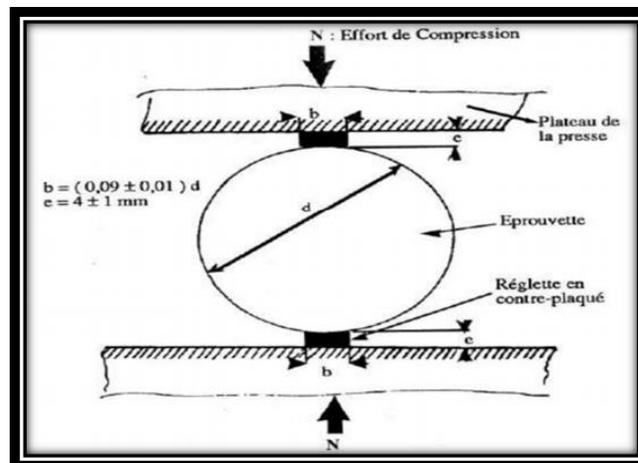


Figure (II.4) : Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage

L'essai nécessite des éprouvettes avec des génératrices rectilignes; Ainsi les moules en cartons sont à éviter en raison des spires de cartons qui laissent des irrégularités le long des génératrices.

L'effort de compression **N** développe des contraintes de traction à l'intérieur de l'éprouvette suivant un plan médian, ces contraintes de traction sont développées sur le plan de fendage au moment de la rupture.(**Figure II.5**)

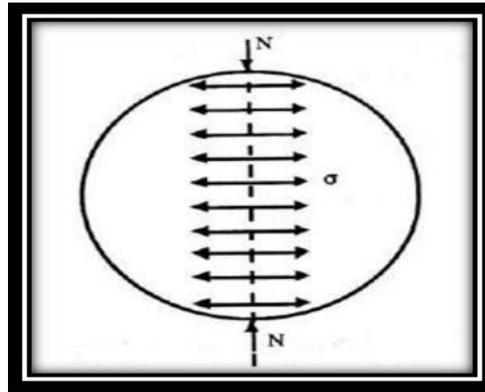


Figure (II.5) : Développement des contraintes de traction suivant un plan médian

Les répartitions des contraintes sur les plans diamétraux verticaux et horizontaux sont indiquées sur la figure. Le cylindre se fend suivant une surface très voisine du plan diamétral qui joint les génératrices. (**Figure II.6**)

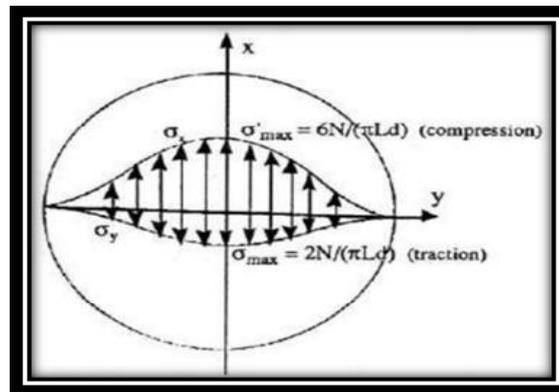


Figure (II.6): Répartition des contraintes sur les plans diamétraux (horizontaux et verticaux)

La résistance du béton en traction par fendage R_{fd} est donnée par la formule suivante, obtenue à partir de la théorie de l'élasticité: [A.Guerrin et R.Laveur, 1973 ; M.Albiges et A .Coin, 1976]

$$R_{fd} = \frac{2N}{(3.14dL)} \quad (\text{II.1})$$

N : charge à la rupture ;

d : diamètre de l'éprouvette ;

L : longueur de l'éprouvette ;

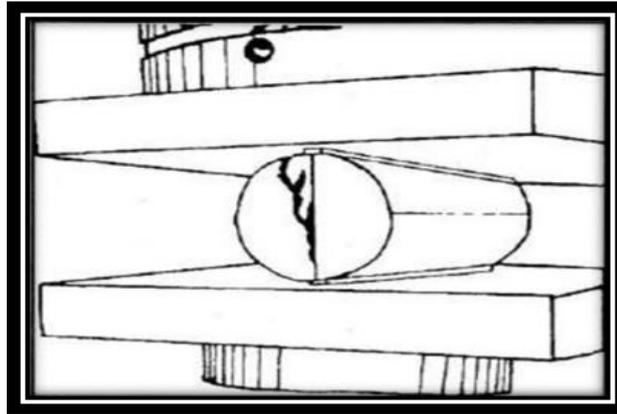


Figure (II.7) : Rupture d'une éprouvette cylindrique dans l'essai de traction par fendage

Sur toute la hauteur du plan diamétral vertical qui n'est autre que le plan de rupture, la contrainte de traction constante (**Figure II.8**). ce qui produit un état de traction pure. Mais l'existence sur ce même plan d'une contrainte de compression augmente sensiblement la résistance du béton à la traction.

Cependant les comparaisons faites avec l'essai de traction directe donnent une assez bonne concordance le rapport R_{tr}/R_{fd} est en moyenne **0.75** et varie de **0.72** à **0.85**. [A.Guerrin et R.Laveur, Paris 1973]

Les recommandations internationales **FIP/CEB** indiquent que l'expression donnant R_{fd} doit être frappé d'un coefficient de minoration égal à **0.85**. [B.Radjel]

La résistance à la traction serait donnée par la formule empirique suivante :

$$R_{fd} = \frac{0.55N}{(dL)} \quad (\text{II.2})$$

[F.Gorisse,1978] affirme que les résultats donnés par cet essai sont un peu optimistes comparativement à la valeur varie de la résistance à la traction directe, déterminé dans de bonne conditions, il semblerait que l'excès de résistance soit de l'ordre de **8** à **10%**.

Depuis sa normalisation, cet essai est très utilisé vu les nombreux avantages qu'il présente:

- On utilise les mêmes moules et les mêmes presses qu'en compression ce qui est important en ce qui concerne l'influence du paramètres forme ;
- Du fait de leur volume plus important, les éprouvettes sont plus représentatives ;
- Les essais peuvent être réalisés sur les carottes prélevées dans l'ouvrage, à condition qu'elle soit très régulière ;
- C'est un essai très économique ;
- C'est un essai de moindre dispersion qu'un essai de traction directe ou de traction par flexion.

Il est signaler que dans certains pays le fendage est effectué également sur des éprouvettes cubique ou prismatique[F .Gorisse,Paris,1982 ; S.Djeghger, Mars 1989], il est alors nécessaire

d'utiliser des échantillons de très bonne rectitude des génératrices, pour cela il faut respecter rigoureusement les tolérances indiquée par la normalisation, en revanche cet essai peut être réalisé sur des éprouvettes de longueur quelconque, ce qui le destine à être pratiqué sur des échantillons prélevés par carottage dans un ouvrage.

La résistance à la traction par fendage R_{fd} d'une éprouvette cubique de côté « a » soumis à un effort de rupture N est donnée par la formule suivante : [S.Djehgher, 1989]

$$R_{fd} = \frac{2NK}{(3.14a^2)} \quad (\text{II.3})$$

K est un coefficient qui prend les valeurs **1.3** et **1.1** respectivement pour les bétons légers et les bétons lourds.

II.3.1.3.3 Essai de traction par flexion :

Il est le plus connu et le plus utilisé des trois essais, il permet de reproduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent dans les ouvrage : **la flexion, peut être réaliser par deux technique :**

II.3.1.3.3.1 Essai sur machine «SIMRUPT»:

L'appareil se compose d'un bâti et d'un bras mobile, portant tous les deux des mâchoires entre lesquelles est disposée l'éprouvette prismatique, une force est appliquée à l'extrémité d'un bras à l'aide d'un dispositifs de chargement spécial, la charge croit jusqu'à la rupture de l'éprouvette qui, au cours de l'essai est soumis à un moment fléchissant constant. (Figure II.8)

La contrainte de traction par flexion est obtenue à l'aide de la formule de la résistance des matériaux:

$$\sigma = \frac{MV}{I} \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$M = N.L$ moment fléchissant maximal ;

V : distance entre le centre de gravité de la section de l'éprouvette et la fibre la plus tendue ;

I : moment d'inertie de l'éprouvette ;

L : bras de levier ;

N : charge de rupture.

Pour une éprouvette prismatique de section carrée, de côté « d », la résistance du béton à la traction par flexion est donnée par :

$$R_{fl} = \frac{6NL}{d^3} \quad (\text{II.5})$$

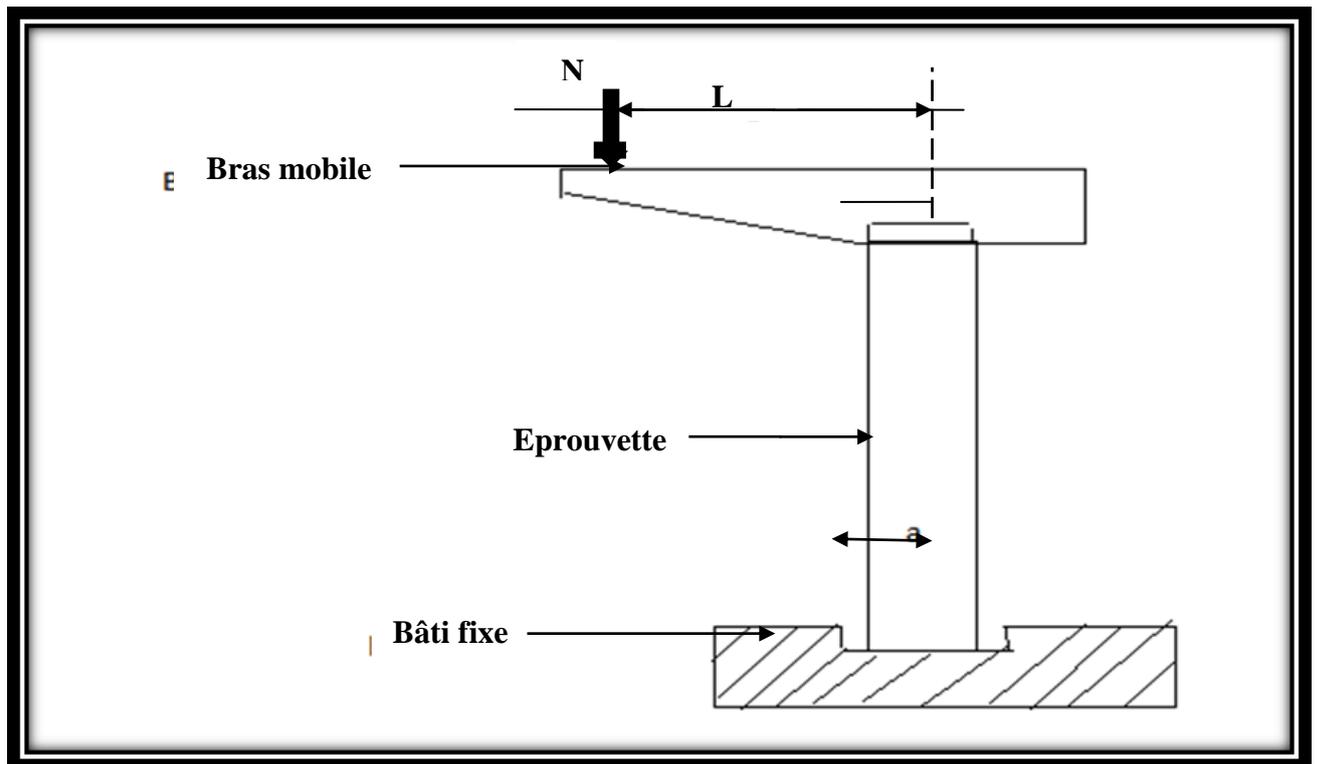


Figure (II.8) : Appareil SIMRUPT pour mesure de la résistance du béton en traction par flexion

II.3.1.3.3.2 Essai sur machine de flexion 3 ou 4 points:

Le dispositif de flexion **4 points** appelé aussi flexion pure est préférable à celui de la flexion **3 points** du fait qu'entre les deux charges, le moment fléchissant est maximale et constant, alors que l'effort tranchant est nul.

Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure (figure II.9 et figure II.10)

Il peut être réalisé, soit sur une machine de flexion équipée de ce montage, soit sur une presse de compression, en disposant des rouleaux d'appuis inférieurs distants d'une fois le côté du prisme, ces derniers appliquent la charge provenant de la plaque de la presse sur l'éprouvette.

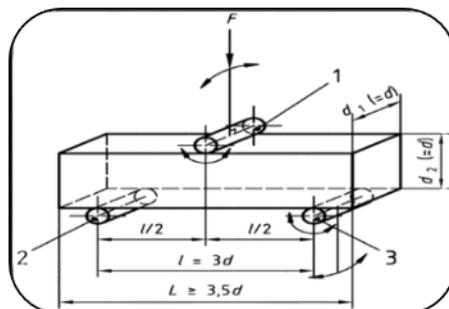


Figure (II.9) : Disposition de flexion 3 points

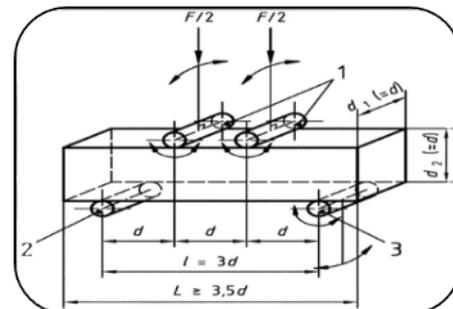


Figure (II.10) : Disposition de flexion 4 points (ou flexion pure)

La résistance à la traction par flexion de l'éprouvette peut être déduite des formules classiques de la résistance des matériaux, et elle est donnée par:

$$R_{fl} = \frac{3N}{d^3} \quad (\text{II.6})$$

Où N est l'effort de rupture et « d » la côté de la section carrée de l'éprouvette.

L'expérience montre que la résistance de béton à la flexion est largement supérieure à celle mesurée par un essai de traction directe, en effet, le calcul de la résistance à la traction à partir de la formule de la résistance des matériaux basée sur la loi de **Hook** suppose que la distribution des contraintes à travers la section est linéaire et triangulaire, dans ce cas: $R_{fl} = B'A'$.

En réalité l'essai s'effectue en dehors de la phase élastique où la formule n'est plus valable, le diagramme réel est vraisemblablement de la forme $B'A'_1$, ainsi, [G.Dreux, 1978] sur la base d'études statistiques propose d'affecter la contrainte calculée par la formule de l'élasticité d'un coefficient **0.6**, on obtient alors, $B'A'_1 = 0.6B'A'$ en supposant, une sorte de plastification précédant la rupture.

La résistance à la traction par flexion d'une éprouvette prismatique en béton de section carrée de côté « d » soumise à un effort de rupture N serait alors:

$$R_{fl} = \frac{1.8N}{d^2} \quad (\text{II.6})$$

La comparaison des résultats d'essais jumelés obtenue par flexion et par traction directe en tenant compte de ce coefficient **0.6** [B.Radjel et S.Benmedakhen] apparaît satisfaisante, actuellement, cette formule est largement utilisée dans les calculs de pièces en béton. Toutefois la valeur de ce coefficient **0.6** est une fonction croissante de la section de l'éprouvette se rapprochant de l'unité lorsque la section augmente [F.Gorisse, Paris 1982], conclue que ce coefficient n'a donc qu'une signification tout à fait approximative et conventionnelle.

[A.Guerrin, 1973] compare les résistances en traction pure R_t et en traction par flexion R_{fl} données par les essais :

$$R_t = kR_{fl} \quad (\text{II.8})$$

Avec : $K \leq 1$

Expérimentalement K varie de **0.555** à **0.625** [A.Guerrin et R.Laveur, 1973], d'après l'auteur K est fonction de la hauteur de l'éprouvette et son expression exacte est:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1}} - \frac{2D}{d} + \frac{4\left(\frac{D}{d}\right)^2}{3} \quad (\text{II.9})$$

Où D représente le diamètre le plus gros granulat, cette formule n'est valable que pour.

$$D < \frac{a}{2} \quad (\text{II.10})$$

Le diagramme (a) représente la phase élastique du comportement du béton, mais en réalité l'essai s'est effectué en dehors de cette phase, le diagramme (b) représentant la période de la plasticité, les contraintes sur la fibre extrême tendue ne pouvant plus croître, ce sont celles de la partie centrale qui interviennent pour soulager la première, et tout fonctionne à peu près selon le

diagramme (b) , a la rupture , on a sensiblement le diagramme (c), où la quasi-totalité de la résistance du béton de la traction est exploitée alors que les fibres comprimées ne travaillent pas encore toutes à leur contrainte maximale.(Figure II.11)

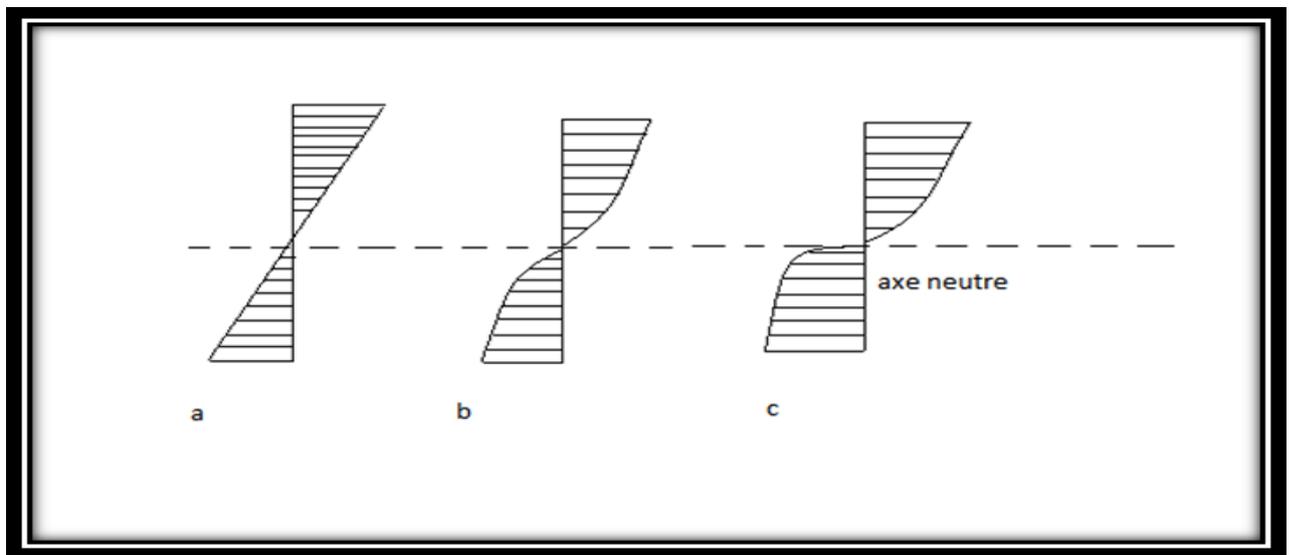


Figure (II.11) : Schématisation de la répartition des contraintes en flexion dans une éprouvette en béton selon.[A.Guerrin et R.Laveur, 1973]

Cette modélisation schématique purement théorique, quoique très proche de la réalité ne traduit pas la véritable réponse du matériau à ce type de sollicitation.

D'autres phénomènes sont en effet à l'origine de la divergence entre les résultats d'essais de traction directe et de traction par flexion.

[Prot, 1947] vérifie sur des éprouvettes prismatique que R_{fl} variait selon l'orientation du pilonnage, ainsi, il note que R_{fl} est plus grande quand la face d'arasement de l'éprouvette est tendue et plus faible quand la face d'arasement est comprimée.

La différence qui atteint souvent 20% serait probablement due au fait que la face d'arasement est mieux lissée et plus soignée que la face en contact avec le fond du moule, sa compacité est alors meilleure et sa résistance à la traction se trouve ainsi plus élevée , il est à noter que ce phénomène a déjà été mis en évidence par [Féret , 1936]sur des éprouvette en mortier avec un sable

A la base de nombreuses études statistiques développées par [Weibull , 1939 ; Weibull 1951], la divergence entre les résultats données par les essais de traction directe et ceux obtenus à partir de l'essai de traction par flexion trouverait aussi une origine dans un effet de taille et de volume .

La densité et la distribution des défauts existants dans le matériau n'est pas uniforme à cœur et à la surface des éprouvettes il est clair que les défauts volumiques qui conditionnent les résultats de l'essai de traction directe sont beaucoup plus nombreux et n'appartiennent pas la même famille statistique que les défauts surfaciques qui eux gouvernent la rupture par flexion.

La probabilité de trouver un défaut critique à cœur de l'éprouvette (**volume**) est beaucoup plus importante que celle de trouver un défaut en surface (**face tendue de l'éprouvette soumise à la flexion**).

A cause de tous ces phénomènes, la résistance à la rupture mesurée par l'essai de flexion est généralement supérieure à celle mesurée par l'essai de traction directe.

Le développement de modèles statistiques prenant en considération l'ensemble des paramètres qui gouvernent la rupture du béton, permettrait probablement de conduire les recherches vers une normalisation de la donnée brute de la résistance de béton à la traction obtenue à partir d'un essai de flexion.

A partir de cette analyse sur la mesure de la résistance du béton à la traction, les conclusions suivantes peuvent être faites:

Dans les sollicitations sous contraintes non homogènes, la résistance du béton aux points les plus sollicités est supérieure à la résistance sous contraintes homogènes.

L'essai de flexion représente le mieux le mode de sollicitation du béton dans les ouvrages, malheureusement ses résultats ne produisent pas fidèlement la contrainte de traction, il reste cependant que malgré son optimisme ses résultats permettent de comparer, classer et hiérarchiser les matériaux.

L'utilisation de coefficient correcteur permet aux ingénieurs et techniciens de bureau d'étude d'utiliser avec sécurité les résultats de cet essai dans des calculs de résistance à la traction

Les résultats de résistances à la traction donnés par l'essai de fendage sont encourageants, cet essai permet dans certaines conditions de remplacer l'essai de traction directe.

Il a l'avantage d'être utilisé quand le choix d'un essai de traction est à faire pour le contrôle d'un ouvrage à condition consacrer suffisamment de soins.

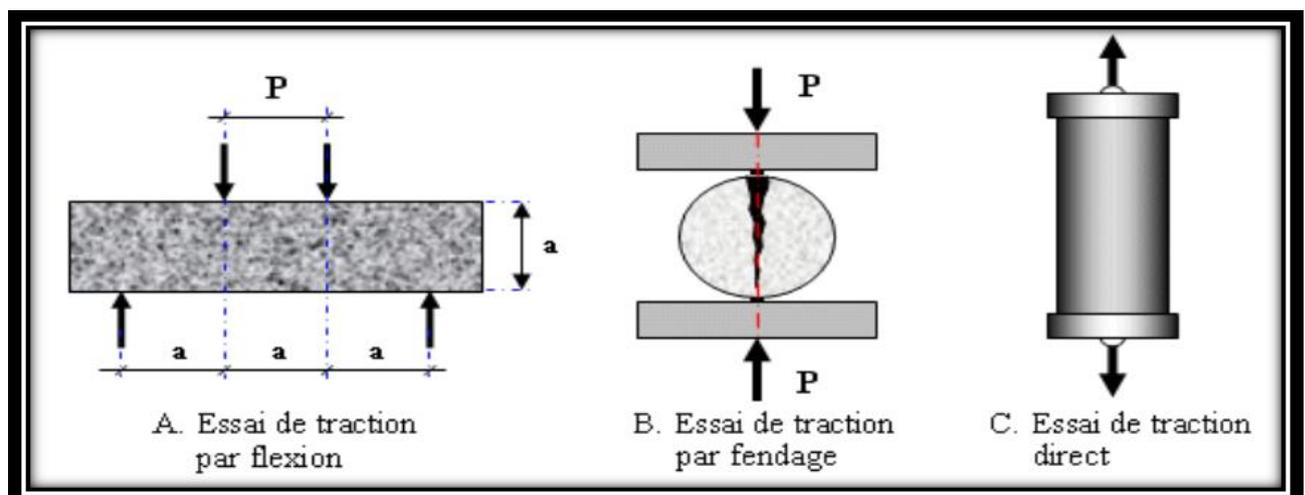


Figure II.12: Différents essais sur les résistances d'un béton en traction

II.3.2 LA Résistance à la compression:

II.3.2.1 Introduction :

La caractéristique de base essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de **28 jours**, de ce fait, la connaissance de cette propriété mécanique est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La compression est le mode usuel de chargement du béton qu'est naturellement résistant à ce type de sollicitation par rapport à sa résistance à la traction. La résistance (**contrainte**) maximale en compression du béton, **F_c**, donnée en **MPa** est par conséquent une des propriétés les plus importantes. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur le béton à **28 jours** d'âge tel que spécifié par la norme **CAN/CSA A23.2-9C** afin de vérifier la qualité du béton produit. La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à **28 jours** d'âge n'est que purement normatif.

Elle est essentiellement régie par les propriétés de la pâte de ciment, du granulat et de leur adhérence.

Dans le cas d'une mauvaise adhérence, par exemple en cas d'utilisation de granulats mal lavés, cette zone de transition va constituer un «**maillon faible**» et influencer négativement les propriétés mécaniques du béton. Par contre, l'emploi de granulats concassés ou l'utilisation d'additions au ciment réactives et finement moulues, telles que la fumée de silice ou le schiste calciné, permettent une nette amélioration de l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment, donc des propriétés mécaniques du béton. Une haute densité de la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment et l'emploi de granulats durs constituent des conditions indispensables à l'obtention d'un béton à haute résistance. La résistance à la compression n'est pas seulement influencée par la composition du béton, mais aussi par la mise en œuvre et le traitement de cure du béton [Holcim (Suisse) SA, 2015]

Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de **16** (**d = 15,96 cm**) dont la section est de **200 cm²**. La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres **d = 15 cm de H=30 cm**. Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées.

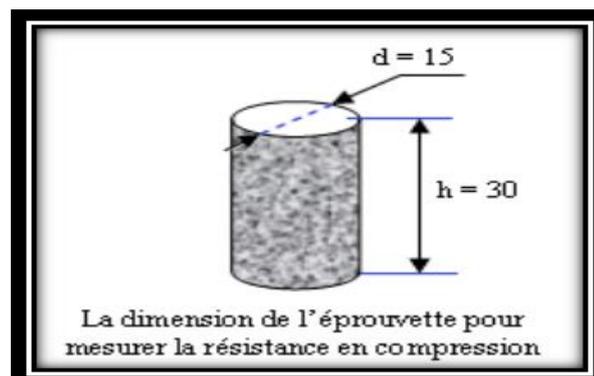


Figure (II.13) : Dimension normalisée d'éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes et la forme (**taille des éprouvettes**) est un paramètre important qui influe sur la détermination de la résistance.

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essai normalisé (**il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes**). La résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (**ou à la référence à la norme utilisée**) et à l'échéance fixée. Si **P** est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en compression du diamètre vertical, la résistance en compression sera :

$$f_{cj} = \frac{P}{S} \quad (\text{II.11})$$

Avec:

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

S : surface du cylindre. [Abdelouhid El Atmioui, 2009]

II.3.2.2 Evolution de la résistance à la compression :

L'évolution de la résistance à la compression décrit la montée en résistance selon l'âge du béton. Elle est importante pour les délais de décoffrage, la durée de cure, la mise en tension de la précontrainte, le déroulement de la construction et le moment de mise en charge. Elle est décrite à l'aide des résistances correspondant à différents âges, exprimées en fonction de la résistance à la compression à **28 jours**. Le classement de la vitesse de l'évolution de la résistance à la compression d'un béton à **20°C** (**Tableau II.3**), sur la base d'une estimation du rapport des résistances selon **SN EN 206-1**. Le rapport des résistances correspondent au rapport entre la résistance moyenne à la compression à **2 jours** (f_{c2}) et la résistance moyenne à la compression à **28 jours** (f_{c28}). Il doit être déterminé lors de l'essai initial ou sur la base du rapport connu d'autres bétons de composition comparables (**p.ex. même ciment, même rapport E/C**).

L'évolution de la résistance dépend non seulement de l'évolution de la résistance de la pâte de ciment, c-à-d du rapport **E/C** et du degré d'hydratation, mais aussi des conditions de mise en œuvre et météorologiques. [**Holcim (Suisse) SA ,2015**]

Tableau (II.3) : évaluation de la résistance du béton et les rapports des résistances à une
Température de 20°C

Développement de la résistance	Rapport f_{cm2}/f_{cm28}
Rapide	≥ 0.5
Moyen	$\geq 0.3 < 0.5$
Lent	$\geq 0.15 < 0.3$
Très lent	< 0.15

II.3.2.3 Évaluation avec l'âge du béton:

Pour l'établissement des projets, dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression à l'âge de **28 jours**, dite valeur caractéristique requise (**ou spécifiée**), il est choisie à priori compte tenu des possibilités locales et des règles de contrôle qui permettent de vérifier qu'elle est atteinte.

Lorsque des sollicitations s'exercent sur un béton dont l'âge de **j** jours (**en cours d'exécution**) est inférieur, on se réfère à la résistance caractéristique f_{cj} obtenue au jour considéré. On peut admettre que pour $j \leq 28$ résistance f_{cj} des bétons non traités thermiquement suivent approximativement les lois suivantes :

$$\triangleright f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} f_{c28} \quad \text{Pour } f_{c28} \leq 40 \text{MPa} / \text{ Pour } j < 28 \text{ jour} \quad (\text{II} .12)$$

$$\triangleright f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} f_{c28} \quad \text{Pour } f_{c28} > 40 \text{MPa} \quad (\text{II} .13)$$

$$\triangleright f_{cj} = f_{c28} \quad \text{pour } j \geq 28 \quad (\text{II} .14)$$

Avec :

f_{cj} : Résistance à la compression à j jours.

f_{c28} : résistance à la compression à **28 jours**.

➤ Vérification de la résistance :

Les bétons à haute résistance des sections, la valeur f_{cj} est conventionnellement bornée supérieurement à f_{c28} pour d'autres types de vérifications, on peut admettre une valeur au plus égale à **1.10 f_{c28}** lorsque l'âge dépasse **28 jours**, à condition que le béton ne soit pas traité thermiquement et que sa résistance f_{c28} atteigne au plus **40 MPa**.

On peut alors évaluer la valeur de f_{cj} par la première formule ci-dessus pour $28 < j < 60$, Avec :
 $f_{cj} = 1.1 f_{c28}$ pour $j \geq 60$ (f_{cj} est exprimé en **MPa** ou **N/mm²**).

La résistance caractéristique minimale f_{c28} doit être de **15MPa** quand on utilise des aciers de haute adhérence et **12MPa** lorsque l'on utilise des aciers lisses. [**Belazougui M. 1993**]

La résistance à la compression d'un béton est 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 :

- 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 tension, 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. L'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé sur la résistance à la compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement. [Vincent BOULAY ,2014]

II.3.2.4 Résistance du béton à l'état frais :

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (**avant prise du ciment**) d'éléments de grande série.

À la suite d'études faites sur ce sujet, il semble que:

- le rapport optimal **E/C** est voisin de **0,40 (béton plutôt sec)** ;
- le pourcentage optimal entre le Granulat et le Sable est d'environ **0,38 (soit : G/S = 2,6 valeur élevée)** ;
- les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés ;
- la fréquence de la vibration est prépondérante (**résistance triplée quand on passe de 3000 à 6000 périodes par minute**).

La résistance en compression peut atteindre **0,3 à 0,4 MPa** tandis que celle en traction ne dépasse guère **1/100e** de ces valeurs, soit **0,004 MPa**.

II.3.2.5 Mesure de la résistance à la compression (NF P 18-406) :

II.3.2.5.1 Confection des éprouvettes :

II.3.2.5.1.1 Dimension des moules (NFP 18-400) :

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques dont les moules ont des caractéristiques définies par la norme **NFP 18-400** pour laquelle les moules plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques.

Mise en place et conservation du béton pour les essais d'étude, de convenance ou de contrôle (**NF P 18-404**) La mise en place dans les moules a lieu par vibration ou par piquage, en fonction des résultats de l'essai d'affaissement et conformément aux normes **NF P 18-421, 422, 423**.

Les moules ayant été munis d'un dispositif s'opposant à l'évaporation, les éprouvettes doivent être conservées sans être déplacées pendant **24 h ±1 h** dans un local maintenu à **20°C ±2°C**. Après démoulage, les éprouvettes doivent être conservées à même température, dans l'eau ou dans une chambre humide (**d'humidité relative supérieure ou égale à 95 %**). (**Figure II.14**)

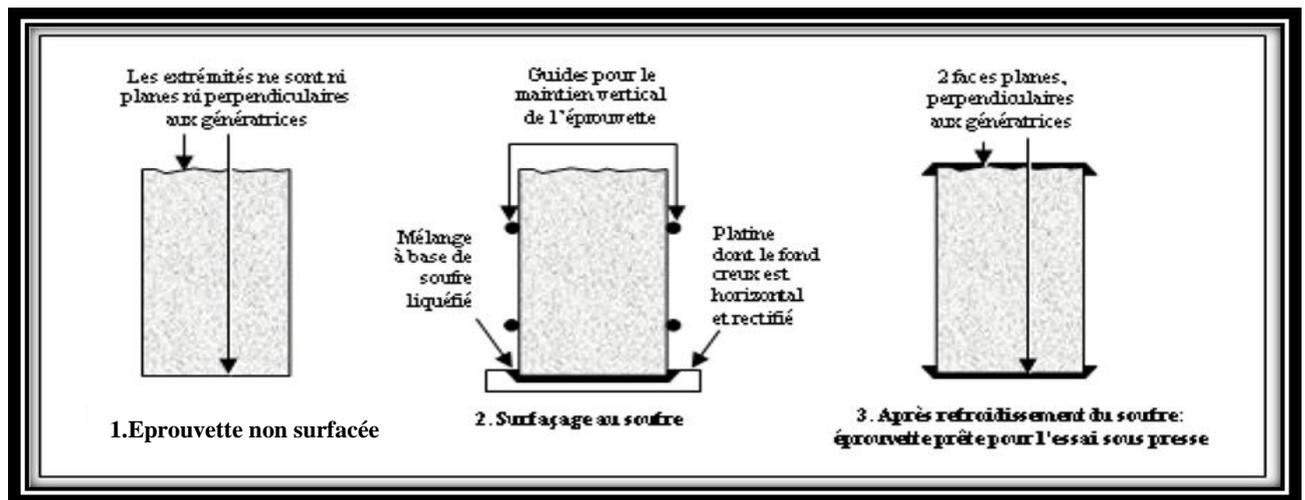


Figure (II.14) : Principe de surfacage au soufre

L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié, l'éprouvette (à laquelle adhère alors la **galette de soufre**) est désolidarisée de la platine et il a procédé au surfacage de la deuxième extrémité. Pour les éprouvettes dont la résistance à la compression ne dépasse pas **50Mpa**, le surfacage peut se faire avec un mélange de **60% (en masse)** de fleur de soufre et **40%** de sable fin de granularité inférieure à **0,5mm**.

Au-delà, et jusqu'à **80 Mpa**, il faudra utiliser un mélange soufré spécialement conçu pour les Bétons Hautes Performances.

Pour des bétons dont la résistance est supérieure, la rectification exigera des moyens matériels plus importants : une rectifieuse équipée d'une meule diamantée. L'éprouvette est alors usinée de manière à rendre les extrémités parfaitement perpendiculaires aux génératrices

II.3.2.5.1.2 Conduite de l'essai de rupture :

L'éprouvette, une fois rectifiée, doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à **1%** de son diamètre. Pour des éprouvettes **11×22** ou **16×32**, cela signifie une précision millimétrique qui ne pourra pas être obtenue sans l'emploi d'un gabarit de centrage prenant appui sur l'éprouvette (**et non sur le produit de surfacage**), comme indiqué sur (**Figure II.15**)

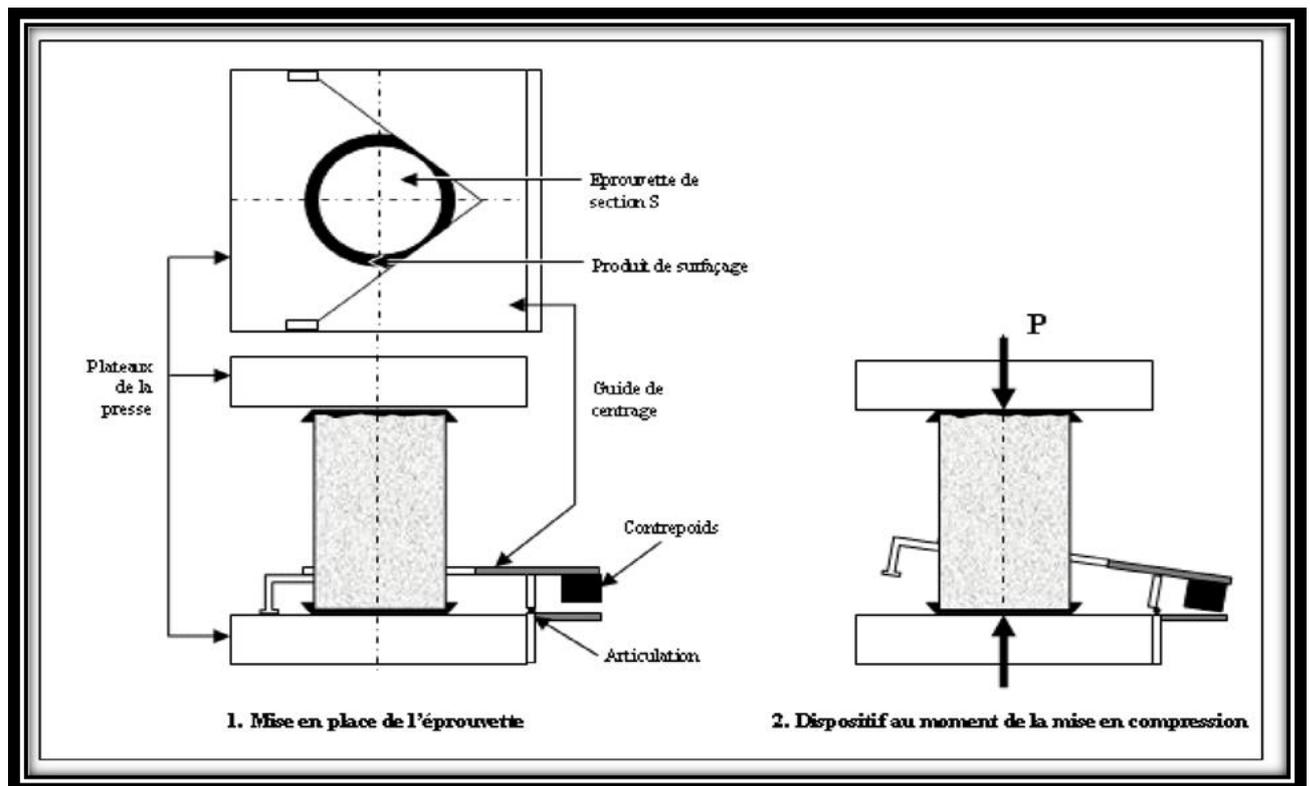


Figure (II.15) : Exemple de dispositif de centrage de l'éprouvette sur la prise

La mise en charge doit être effectuée à raison de **0,5 MPa/s** avec une tolérance de **0,2 MPa/s**. Pour des éprouvettes **11×12** cela signifie une montée en charge de **5KN/s±2KN/s** et pour des éprouvettes **16 × 32** de **10 KN/s ±4 KN/s**.

La charge de rupture, «**P**» est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit **S** la section orthogonale de l'éprouvette; la résistance, «**F_c**» est exprimée en **MPa** à **0,5Mpa** près et a pour expression:

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{II.15})$$

Dans la relation ci-dessus **f_c** est directement obtenue en **MPa** si **P** est exprimée en méganewton (**MN**) et **S** en **m²**.

II.3.2.5.1.3 Particularités de la rupture en compression :

Pour des résistances supérieures à **60Mpa**, et suivant la presse utilisée, la rupture peut être brutale et il est bon d'équiper la presse d'un système de protection pour se protéger des éclats éventuels.

Dans ce type de rupture, deux cônes apparaissent aux extrémités de l'éprouvette rompue. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la formation transversale est libre; elle résulte des contraintes de traction (symbolisées par les flèches notées **t** sur la **(figure II.16 A)** perpendiculaires à la compression **(et à la fissuration)**. Ce sont ces contraintes de traction

qui aboutissent dans la zone centrale à la fissuration longitudinale de l'éprouvette, puis à sa ruine. Les zones extrêmes, protégées par le frettage créé par les plateaux, ne sont pas détruites (**figure II.16 B**).

Le frettage peut être limité en graissant les zones de jonction **plateaux/éprouvettes** ou en y interposant des appuis en téflon. La rupture est alors du type de celle indiquée sur la (**figure II.16 C**). Elle se produit pour une charge (**P3**) habituellement plus faible que celle obtenue dans le cas général (**P2**): en protégeant ses extrémités de l'éclatement, le frettage permet à l'éprouvette d'encaisser des chargements légèrement plus importants' [Abdelouhid El Atmioui ,2009]

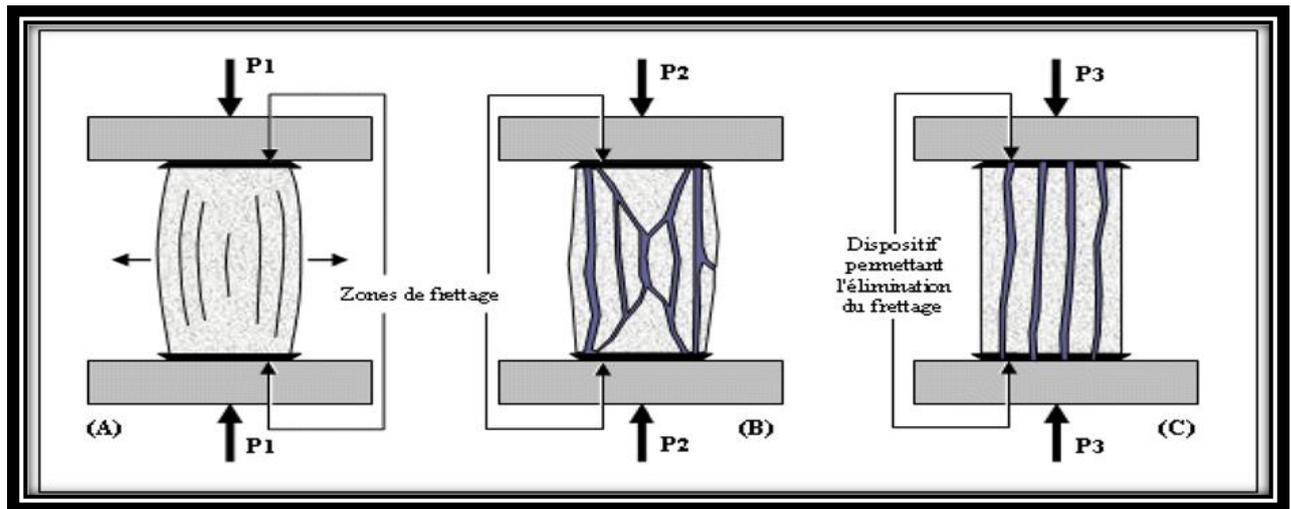


Figure (II.16) : Mode de rupture des éprouvettes cylindriques en compression

II.3.2.6 Autres méthodes expérimentales:

Il existe des méthodes non destructives qui sont développées ces dernières années dans les laboratoires ou bien dans les chantiers pour but de réduire voire à remplacer et à se substituer aux méthodes destructives et contrôler les ouvrages.

Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, rapides, et économiques.

Le contrôle par ultrasons commence à occuper une place importante grâce à sa commodité d'emploi et son coût raisonnable.

Les résultats de test par ultrasons sont représentés à partir des secteurs d'application très diversifiés par exemple : **les industries des transports, travaux publics, le génie militaire et celle d'énergieetc.**

II.3.2.6.1 Dispositifs ultrasonores et d'écrasement :

La méthode ultrasonore est la méthode en transmission en conformité avec la norme **NFP18-418**, capteurs qui sont montés de part et d'autre des surfaces opposées d'éprouvette selon l'axe longitudinal. Les surfaces lisses sont choisies pour le placement des capteurs. Un léger film de gel induit les deux surfaces parallèles pour assurer un bon contact entre les transducteurs et le béton.

Un appareil permet d'enregistrer le temps de transit de l'onde, la vitesse du son dans le béton est calculée par le rapport de la longueur de l'éprouvette convertie en mètres sur le temps convertie en seconde indiqué par l'appareil ultrasonore. La résistance à la compression R_c en MPa, mesurée par cette méthode non destructive est déterminée par la formule suivante en fonction du module de déformation dynamique E_d :

$$R_c = \frac{16.7 \times E_d}{e^{122500}} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$$E_d = V^2 \times \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (\text{II.17})$$

V : représente une vitesse de son **km/s** ;

ν : représente le coefficient de poisson pris dans ce cas égale à **0.2** pour le béton confectionné.

ρ : c'est la densité du béton en **kg/m³** prise égale à la moyenne calculée sur toutes éprouvettes dans le volume a été mesuré et le poids pesé sur une balance électronique.

Pour les essais d'écrasement une presse hydraulique de capacité de **500 KN** a servie a l'enregistrement de la force de rupture, la manipulation a été conduite selon la norme **NF P 18-406** les éprouvettes ont été placées de façon parfaitement centré entre les plateaux de la presse de compression comme l'illustre (**la figure II.15**), le plateau supérieur est mobile de telle sorte à épuiser la surface de l'échantillon, l'essai est conduit jusqu'à la ruine totale de l'éprouvettes à une vitesse lente et constante.

La résistance à la compression R_c est calculée par la formule classique de la résistance des matériaux :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (\text{II.18})$$

F et S représentent respectivement la valeur de la force relevée au moment de la rupture de l'éprouvette sur le cadran de la presse et la section transversale de l'échantillon . [**B. Redjel, W. khelifi et R. Jauberthie, 2014**]

Généralement il existe quelques moyens pour la méthode non destructive:

- On utilise l'appareil qui s'appelle « **scléromètre** ». En fait il s'agit de tester la dureté de surface d'un béton durci (**d'ouvrage**). Cette dureté d'autant plus élevée que le béton est plus résistant, cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné
- On utilise l'appareil qui peut lancer le rayon **X** à travers l'ouvrage. Selon le changement de la vitesse du rayon **X**, il est possible de déterminer la résistance du matériau.
- L'utilisation de l'auscultation sonique: Le Principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton. Cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton est plus résistant; cela permet d'avoir un ordre de grandeur de la résistance atteinte par un béton à un âge donné

II.3.2.6.2 Mesure de la dureté de surface par rebondissement au scléromètre:

Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la « **dureté au choc** » du béton au voisinage de la surface (**Indice sclérométrique**).

Une tige en acier, sortant d'un cylindre, est appuyée sur le béton et comprime un ressort. En fin de course, ce ressort projette une masse sur la tige, sur laquelle elle rebondit. Ce rebondissement est d'autant plus important que le béton est dur. Un index fixé sur l'appareil permet de déterminer l'indice sclérométrique.

La surface de l'ouvrage à tester est divisée en zones d'au moins **400 cm²** chacune. Il est nécessaire de faire une série de **27** mesures sur chaque zone d'essai. La distance entre deux mesures de **3cm** au moins, et aucune mesure n'est effectuée à moins de **3cm** des bords de la surface testée. L'indice sclérométrique I_s de la zone est la médiane des **27** mesures.

Cet appareil mesure le rebond d'une masse projetée contre la surface du béton et permet ainsi d'obtenir de façon indirecte la résistance à la compression. Cette méthode a l'avantage d'être simple, rapide et non destructive, mais elle ne permet qu'une estimation de la résistance d'une zone proche de la surface du béton et elle est sujette à une grande variabilité des résultats. Pour estimer la résistance à la compression, un étalonnage, basé sur des résultats d'essais de compression.

Une autre possibilité d'estimer l'évolution de la résistance à long terme est offerte par le calcul selon le **CEB-fib Model Code 2010**. L'évolution de la résistance de bétons normaux et lourds peut être calculée sur la base de la résistance à la compression moyenne à **28 jours**. Le coefficient dépendant de l'âge t du béton β_{cc} ; tient compte l'équation(II.15), par l'intermédiaire d'un coefficient s , de la classe de résistance du ciment. Pour une conservation à une température de **20C°**, on applique:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (\text{II.19})$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{ \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^2 \right] \right\} \quad (\text{II.20})$$

$f_{cm}(t)$: Résistance à la compression moyenne à un âge t en jours [**N/mm²**].

f_{cm} : Résistance à la compression moyenne à un âge de j jours [**N/mm²**].

β_{cc} : Coefficient dépendant de l'âge t du béton.

t : âge du béton [**j**].

s : coefficient dépendant du type de ciment:

- $s = 0.20$ pour CEM52.5 N et CEM 42.5 R ;
- $s = 0.25$ pour CEM 42.5 N et CEM 32.5 R ;
- $s = 0.38$ pour CEM 32.5 N.

Les résultats donnés par les équations (II.15) et (II.16) sont générés numériquement dans (Tableau II.4) Ces résultats sont approximatifs car ils ne considèrent ni la composition effective ni les conditions de mise en place et de cure du béton.

Tableau (II.4) : Evaluation de la résistance selon CEB-fib Model code 2010

Age t[j]	Rapport $f_{cm}(t)/f_{cm28}$		
	S=0.20	S=0.25	S=0.38
2	≈0.58	≈0.50	≈0.35
7	≈0.85	≈0.78	≈0.68
25	≈1.00	≈1.00	≈1.00
90	≈1.09	≈1.12	≈1.18
365	≈1.16	≈1.20	≈1.32

Le béton possède encore au-delà d'un âge de **28 jours** un potentiel de durcissement.

L'ampleur de ce durcissement à long terme varie notablement en fonction du type de ciment, de la composition du béton et d'autres facteurs d'influence. Il sera d'autant plus grand en comparaison avec la résistance à la compression à **28 jours** que le ciment durcit lentement et que les conditions de conservation sont humides et de basse température.

Pour un ouvrage spécifique, il est possible de fixer le moment, où la classe de résistance à la compression doit être atteinte, à un âge plus grand que **28 jours**. Ceci peut être un avantage pour des éléments massifs de construction, dont on cherche à limiter le développement de la chaleur d'hydratation par une lente montée en résistance. [Holcim (Suisse) SA ,2015]

II.3.2.6.3 Valeurs mesurées :

Le tableau rassemble les valeurs moyennes des résistances mesurées par les deux méthodes ,à savoir la méthode par ultrason et celle par écrasement en compression, ainsi que la mesure de la dispersion par les calculs de l'écart type et du coefficient de variation exprime en pourcentage, les deux techniques se caractérisent par une dispersion, celle-ci est une caractéristique des béton et des matériaux granulaires, il est clair que le caractère hétérogène du béton reste la principale cause de ce facteur handicapant, par ailleurs, il est à signaler que les corps d'épreuve possède rarement des caractéristiques comparables, en effet, d'une éprouvette à une autre, la densité spatiale des différents constituants (**sable, gravier, ciment hydraté**) leur grosseur, leur orientation ,leur distribution, la distribution des microfissures et des porosité préexistantes, ainsi que densité de ces

défauts ne sont pas les mêmes chaque éprouvette peut, par conséquent, constituer en elle-même un matériaux différent.

L'ordre de grandeur de coefficient de variation pour les différents types d'éprouvette ne dépasse pas **4.70%** ce qu'est acceptable cet ordre de grandeur rentre en générale dans la plage tolérée pour les bétons de chantier.(**Tableau II.5**)

Tableau (II.5) : Valeur moyenne de la résistance à la compression mesurée par les méthodes, écart type et la variation en pourcentage

Eprouvette	La valeur moyenne mesuré par méthode non destructive (ultrason) et écart-type en (MPa)	Coefficient de variation(%)	La valeur moyenne mesuré par la méthode destructive (écrasement) et écart-type en (MPa)	Coefficient de variation(%)
Prisme (10*10*15)	26±(1)	3.85	28.3± (0.58)	2.04
Prisme (10*10*20)	25± (0.5)	1.96	27.5± (0.87)	3.16
Prisme (10*10*30)	25±(1)	4.00	26.3± (0.76)	2.85
Cylindre (11*22)	25.5± (0.5)	1.96	26.5± (0.5)	1.88
Cylindre (16*32)	25± (0.8)	3.2	25.5±(1)	3.9

Les rapports entre les résistances montrées ne sont pas importants et ne dépasse pas la valeur de **1.2** il apparait que la résistance mesurée par la méthode destructive est légèrement supérieure à celle pour la méthode non destructive toutefois, ce léger écart n'est pas significatif les mesures obtenue lors de contrôle par ultrason sont raisonnable et satisfaisant et sont par conséquent acceptable par les organismes de contrôle Algérien tel que **CTC**.

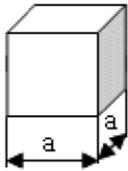
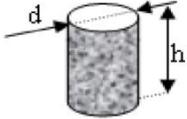
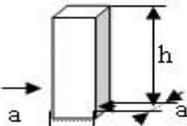
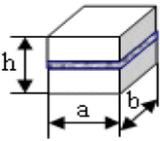
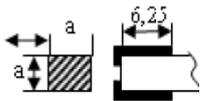
Ces mesures constituent ainsi que justification de la qualité des bétons permettant de contourner les résultats obtenue par écrasement sur les éprouvettes de béton qui n'ont pas souvent une crédibilité apparente suit aux prélèvements des échantillons qui ne sont pas réalisée par les organismes de contrôle et de suivi.

II.3.2.7 Effet de la forme de l'éprouvette:

Les résistances à la compression mesurée par écrasement pour les différentes géométries disponibles indiquent que la forme cylindrique comme forme géométrie donne des valeurs de résistance à la compression légèrement inférieure par rapport à celles mesurées sur les prismes.

Le rapport de la résistance mesurée sur le cylindre (16*32) sur la résistance du cube varie de 0.7 à 0.9.

Tableau (II.6) : Schéma et méthode de détermination de la résistance à la compression

Echantillon	Schéma	Forme de calcul	Matériaux de testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R=p/s$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x 7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R=4p/2d^2$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15. h=30. d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr}=p/a^2$	Béton Bois	a=10;15;20. h=40;60;80. a=2. h=3
Echantillons rassemblés		$R=p/s$	Brique	a=12. b=12,3. h=14.
Moitié d'échantillon de mortier		$R=p/s$	Ciment	a=4. S=25 cm ²

II.3.2.8 Mode de rupture en compression:

a) Cas de prisme:

La photo du prisme montre des exemples de mode de rupture du prisme. Des ruptures avec des plans de fissures parallèles à l'axe de l'effort sont observées. C'est l'exemple de type de la rupture, ainsi, en allongeant d'éprouvette parallèle à effort de compression.

On obtient dans sa partie centrale une zone de sollicitation homogène, soustraite, aux effets des conditions d'appuis, ce qui laisse le prisme se déforme librement dans sa partie centrale avec l'augmentation de l'effet de compression

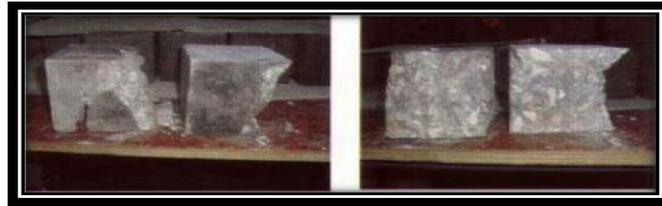


Figure (II.17) : Mode de rupture en compression (Cas de prisme)

b) Cas de cylindre:

Les photos montrent des exemples de rupture en compression du cylindre, ce mode de rupture est similaire à celui observé sur le prisme. La rupture se caractérise par des plans de fissuration et de rupture qui se développent parallèlement à l'axe de l'effet de compression. [B. Redjel, W. Khlifi et R. Jauberthie, 2014]



Figure (II.18) : Mode de rupture en compression (Cas de cylindre)

II.3.3 Développement des résistances:

En plus d'une différence au niveau de la résistance à **28 jours** de béton incorporant des granulats recyclés, plusieurs chercheurs ont observé des différences au niveau du développement de la résistance de celui-ci par rapport au béton contenant des granulats naturels [Chakradhara Rao et al., 2011; Corinaldesi et Moriconi, 2009; Etxeberria et al., 2007; Kou et al., 2011; Rahal, 2007; Rao et al., 2007; Yang et al., 2008]. Il n'y a, par contre, pas de consensus par rapport au mécanisme de gain de résistance des bétons recyclés et des résultats contradictoires sont présentés dans la littérature.

Certains chercheurs ont observé que les bétons ayant de hauts taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé ont des résistances à très jeune âge plus élevées que les bétons témoins [Chakradhara Rao et al., 2011; Etxeberria et al., 2007]. Selon Etxeberria, le mortier résiduel et l'angularité plus grande des granulats recyclés augmentent l'adhésion et l'imbrication entre le mortier et le granulat recyclé et, par le fait même, la résistance à très jeune âge. Selon ces mêmes auteurs [Chakradhara Rao et al., 2011; Etxeberria et al., 2007], il semble que le gain de résistance après **28 jours** soit négligeable pour les bétons ayant un haut taux de remplacement du granulat naturel, alors que les bétons témoins ou ayant un bas taux de remplacement montrent une augmentation d'environ **10 %** de résistance entre **28** et **90 jours** [Chakradhara Rao et al., 2011].

D'autres chercheurs ont observé le phénomène opposé [Baofan, 2013; Rahal, 2007; Rao et al., 2007; Yang et al., 2008]. Selon certains chercheurs, on observe un gain de résistance avant 28 jours plus lents du béton contenant des granulats recyclés par rapport au béton témoin. Ce gain de résistance serait, par contre, plus rapide que pour le béton témoin à long terme. L'étude effectuée par [Rahal, 2007] montre que les bétons témoins développent une plus grande partie De leur résistance à **28 jours** dans les **7 premiers jours** par rapport au béton à granulats recyclés. Les bétons à granulats recyclés ont, par la suite, un gain de résistance plus rapide que les bétons témoins. Par exemple, les bétons à granulats recyclés ont en moyenne une résistance à **56 jours 7%** plus élevée que leur résistance à **28 jours** alors que cette différence est de **4%** pour le béton à granulats témoin [Rahal, 2007]. Cet aspect a aussi été relevé dans l'étude de Yang qui a observé des résistances à la compression relatives à **1 et 3 jours** plus basses pour les bétons à granulats recyclés que le béton témoin. Il a aussi observé que ces résistances relatives sont plus élevées pour le béton à granulats recyclés à **56 et 91 jours**. Ce gain de résistance à long terme peut être expliqué par une hydratation du ciment non hydraté présent dans le mortier résiduel et par la présence d'eau absorbée dans le granulats qui aiderait à la cure interne du béton [Yang et al., 2008]. Une autre explication pour le meilleur gain de résistance à long terme serait le fait que, comme les granulats recyclés ont une absorption élevée, il servirait de source interne d'eau et ainsi permettraient une meilleure hydratation à long terme.

Selon une étude de Corinaldesi et Moriconi, le gain de résistance du béton contenant des granulats recyclés ralenti après **14 jours** par rapport au béton témoin [Corinaldesi et Moriconi, 2009]. Ceci serait dû au fait que le granulats recyclés à des propriétés mécaniques plus faibles que le granulats naturel et son remplacement à un impact plus grand quand le nouveau mortier gagne en résistance. Une autre étude intéressante sur ce sujet est effectuée par Kou et al [S. Kou et al., 2011], cette étude a évalué la résistance à la compression et à la traction d'échantillons de béton recyclés après **5 ans**. Les résultats obtenus à **28 jours** indiquent que la résistance à la compression et à la traction du béton recyclés sont respectivement **21,7%** et **10%** plus faible que le béton témoin. Il est intéressant de constater qu'après **5 ans** cet écart diminue à **6,3%** pour la résistance à la compression et est même inversé pour la résistance à la traction, l'échantillon de béton recyclés étant plus résistant. Selon l'auteur, ce gain plus grand en résistance à long terme pourrait être dû à la présence des granulats recyclés qui, suite à une hydratation continue, améliore la liaison entre la pâte et le vieux granulats recyclés représenterait donc un chemin préférentiel pour la rupture. [Cléo LANEYRIE, 2014]

II.3.3.1 Résistances du béton recyclé:

II.3.3.1.1 La résistance à la compression:

De manière générale, il a été souvent constaté [Butl 2013] [Duan 2014] [Paul 2014] que les bétons formulés à partir de granulats recyclés présentent des résistances à la compression inférieures aux bétons standards.

Et cette diminution de performance varie fortement selon un certain nombre de paramètres, tels que le taux de remplacement de granulats, les conditions de préparation des granulats (**saturés ou non**), la qualité du béton parent, ou encore le rapport eau/ciment (**E/C**).

Il est cependant important de noter que l'inverse a aussi été observé, avec des augmentations de performances mécaniques de l'ordre de **10 à 13%** pour les bétons recyclés par rapport aux bétons naturels [Wang 2010] [Etxe 2007].

Il a été montré par exemple qu'à **E/C** élevé (**entre 0,6 et 0,75**), la résistance d'un béton recyclé est comparable à celle d'un béton standard jusqu'à un taux de remplacement aussi important que **75%**. [Katz 2003]. Rao et al. [Rao, al. 2005] ont également constaté que pourvu que le rapport **E/C** soit supérieur ou égal à **0,55**, les résistances des bétons recyclés étaient comparables à celles des bétons standards même au taux de remplacement de **100%**.

Cette tendance est liée au fait qu'à rapport **E/C** élevé, la résistance en compression est liée à la qualité de la pâte et de l'interface pâte-granulats, moins résistantes que les granulats.

En revanche, avec un rapport **E/C** réduit à **0,4**, la valeur de la résistance chute de **25%**. Le peu d'études réalisées jusqu'à présent cherchant à relier la résistance en compression aux conditions de préparation des granulats (**séchés en étuve, séchés à l'air, imbibés surface sèche...**) n'ont pas donné de résultats très concluants [Poon 2004] [Rao 2005].

De manière générale, on peut dire que plus le rapport **granulats recyclés/granulats naturels** augmente, plus la résistance à la compression diminue, mais qu'en ajustant ce ratio, on parvient toujours à atteindre les résistances requises. [Evan 2007] [Gome 2002] [Topç 2004] [Rao 1996] [Queb 1996]. De Brito a également constaté que la qualité du granulats recyclé joue un rôle très important dans la résistance en compression du béton dans lequel il est incorporé (**Figure II.18**).

De plus, il est extrêmement important de noter que si, à **28jours**, le béton naturel présente clairement une meilleure résistance à la compression, sur le long terme en revanche (**un an**), le béton recyclé présente le meilleur gain de performance, et peut aller jusqu'à dépasser le béton standard sur le très long terme (**5 ans**) [Kou 2011] [Evan 2007] .

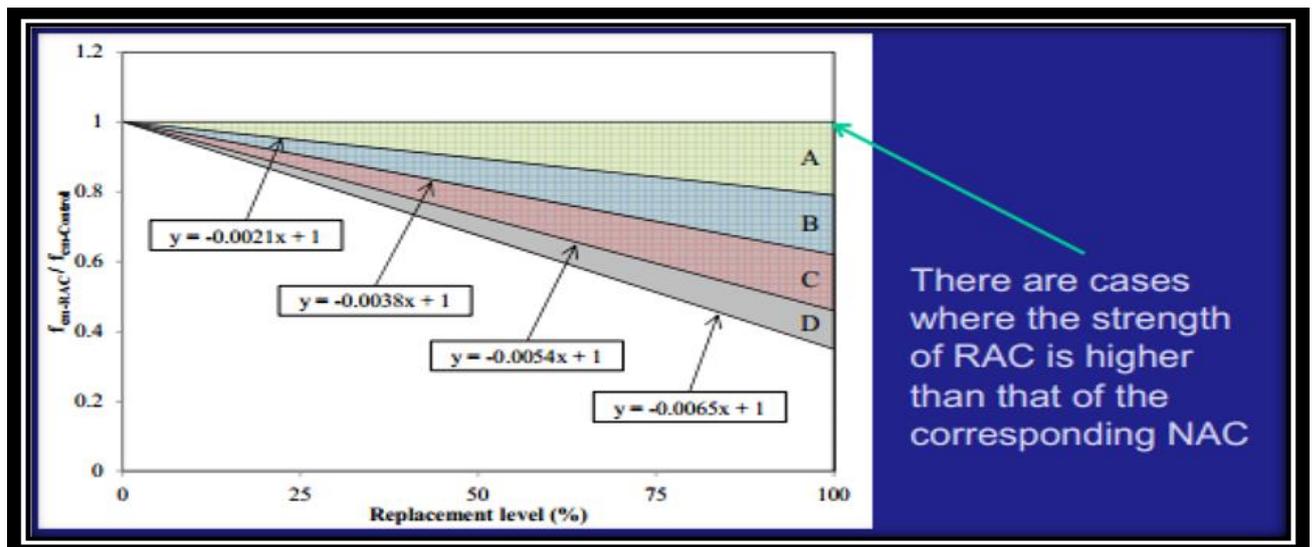


Figure (II.19) : Résistance en compression relative minimum estimée pour des bétons formulés à partir de différentes qualités de granulats recyclés ($A > B > C > D$), à différents taux de substitution [Brit2014] (RAC : Recycled Aggregates Concrete ; NAC : Natural Aggregates Concrete)

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

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

Une importante compilation de **236** articles a récemment été publiée [Silva *et al.*, 2014b]. Elle s'intéresse aux facteurs affectant les différentes propriétés des **GBR** issus des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**) destinés à la production de bétons. Parmi ces articles, **119** dédiés plus spécifiquement à la résistance à la compression ont été analysés de façon plus approfondie [Silva *et al.*, 2014a]. Sur la base d'une démarche statistique, les auteurs ont d'abord développé une classification des **GBR** basée sur l'absorption d'eau et la masse volumique après séchage à l'étuve (Figure II.19). Les gravillons de **GBR** sont principalement classés dans les zones **A** et **B** du diagramme, tandis que les sables de **GBR** sont plutôt classés dans les zones **B** et **C** du

diagramme [Silva *et al.*, 2014b], en raison de leur teneur en pâte de ciment plus élevée. (Figure II.19)

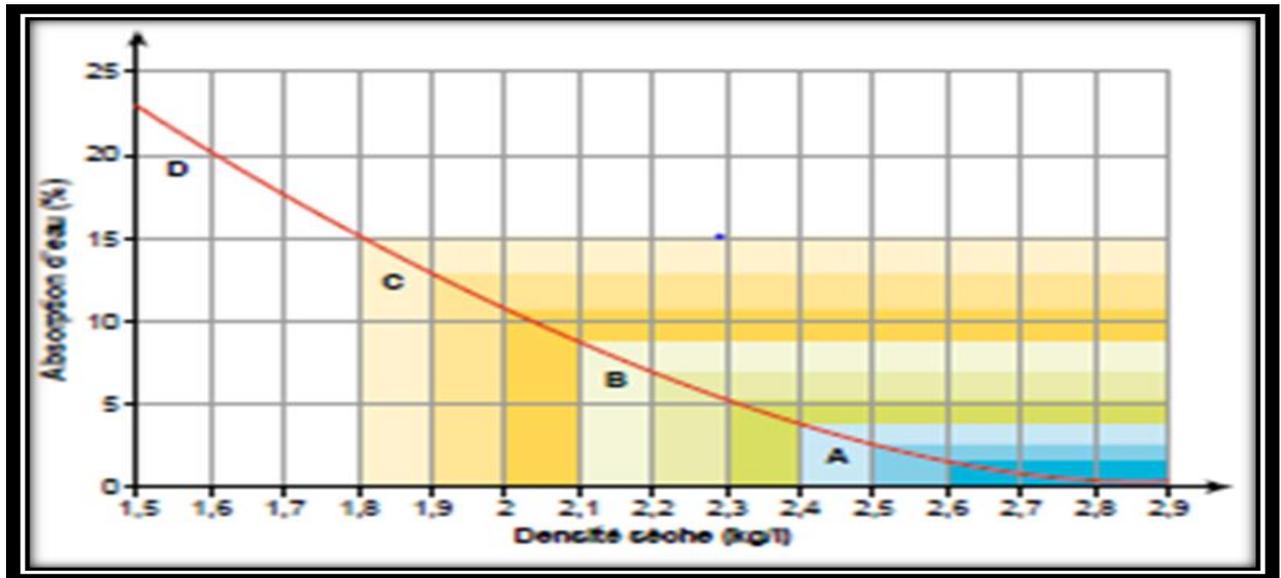


Figure (II.20) : Classification mécanique des granulats issus de Déchets de Construction

Et de Démolition (béton, maçonnerie ou mixte), [adapté de Silva *et al.* 2014b]

Ces graphiques sont intéressants à deux titres. Tout d'abord, ils permettent d'appréhender l'effet attendu d'un **GBR** sur la résistance à la compression du béton, en gardant constant le rapport E_{eff}/C . Ensuite, ils illustrent certaines tendances générales bien connues ;

- l'augmentation du taux de **GBR** conduit généralement à une diminution de la résistance à la compression, à même E_{eff}/C . La diminution peut être amplifiée si l'on garde le même dosage en ciment et la même maniabilité, car l'introduction de **GBR** peut également entraîner une augmentation de la demande en eau ;
- la moindre qualité mécanique des **GBR**, par rapport aux granulats naturels, explique l'essentiel de la diminution des performances. Effectivement, les granulats naturels sont produits à partir de roches dont la résistance à la compression dépasse généralement **50 MPa**, alors que les **GBR** sont généralement obtenus par concassage de bétons dont la résistance est inférieure à cette valeur. Pour un taux de recyclage donné, la diminution de la résistance à la compression est toutefois moindre si les **GBR** proviennent d'un béton parent ayant une résistance à la compression importante. Par exemple, les **GBR** provenant de bétons à ultra hautes performances (**BUHP**) peuvent être recyclés dans des **BUHP**, sans différences significatives par rapport à des granulats naturels [Sedran *et al.*, 2010].

➤ Résultats RECYBÉTON :

[Dao, 2012] a étudié l'influence de différents **GBR** sur la résistance à la compression de bétons de **GBR**. Les **GBR** utilisés provenaient de bétons de différentes résistances, à base de

différents granulats naturels (siliceux arrondi, calcaire concassé et mélange des deux). Les **GBR** obtenus ont été qualifiés de deuxième génération (**G2**) lorsque les bétons parents étaient composés à **100 %** de granulats naturels, et de troisième génération (**G3**) lorsque le béton parent comportait **100 %** de **G2** [Dao, 2012 ; Dao *et al.* 2014]. L'auteur a utilisé une version modifiée du modèle de Féret proposé dans [de Larrard, 1999] pour analyser ses résultats (équations II.21 et II.22).

$$f_{cm} = k_g \cdot R_{c_{28}}^{C_e} \cdot \left(\frac{v_c}{v_c + v_e + 0.5v_a} \right)^2 EMP^{-0.13} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$EMP = D_{max} \sqrt[3]{\frac{E^*}{E} - 1} \quad (\text{II.22})$$

Ou :

- k_g est un paramètre mécanique qui tient compte de l'influence du granulat, selon sa propre résistance et la qualité de sa liaison avec la pâte de ciment ;
- $R_{c_{28}}^{C_e}$ est la classe de résistance à la compression du ciment à **28** jours selon la norme **NF EN 197-1** ;
- v_c, v_e, v_a sont respectivement les volumes de ciment, d'eau et d'air présents dans le mélange;
- EMP est l'épaisseur maximale de pâte [de Larrard, 1999] ;
- D_{max} est le diamètre correspondant à **90 %** du passant du squelette granulaire ;
- $g = \sum v_j$: est la fraction volumique du squelette granulaire dans le mélange ;
- g^* est la compacité du squelette granulaire. Elle peut être calculée à l'aide du Modèle d'Empilement Compressible [de Larrard, 1999].

Pour les besoins de l'analyse, on suppose que le facteur k_g du squelette entier est calculé selon l'équation suivante, où $k_{g,j}$ est le paramètre mécanique de la fraction granulaire j :

$$K_g = \sum_j V K_j K_{g,j} \quad (\text{II.23})$$

Dans le cadre de l'étude de Dao, environ **100** mortiers et bétons différents ont été produits avec **100 %** de **GBR**. Leur résistance à la compression a été mesurée sur cylindres **Ø 16*32 cm**. Connaissant la composition des mélanges et à partir des résultats des mesures, Dao a calculé les paramètres $K_{g,s}$ et $k_{g,g}$ correspondant respectivement aux sables et gravillons des différents **GBR**, selon les équations précédentes. Il a conclu que le paramètre des sables de **GBR** pouvait être approximé par une valeur constante de **4,42**, et que le paramètre $k_{g,s}$ des gravillons de **GBR** pouvait être relié à leur coefficient d'attrition **MDE** (norme **NF EN 1097-1**) selon l'équation (II. 19) :

$$K_{g,g} = 0,0952MDE + 8,3927 \quad (\text{II.24})$$

Avec ce modèle, il a pu prédire les valeurs expérimentales de résistance à la compression avec une erreur moyenne de **5 MPa** pour les bétons de **GBR** composés à **100 %** de **GBR G2** ou de **100 %** de **GBR** multi recyclés **G3**.

La même approche a été utilisée dans le cadre de Projet national **RECYBETON**, pour analyser différents bétons incorporant à divers taux des sables et des gravillons de **GBR** (**Tableau II.8**) avec ces différentes composantes d'un béton **RECYBETON**. Les équations (**II.16**), (**II.17**) et (**II.18**) ont été utilisées pour calibrer les paramètres $k_{g,j}$ (**Tableau II.7**), en cherchant le meilleur ajustement entre la résistance à la compression prévue et la résistance à la compression mesurée expérimentalement, comme confirmé (**Figure II.20**) Il convient de noter que l'équation (**II.17**) surestime le paramètre $k_{g,j}$ des gravillons puisqu'elle conduit à un paramètre $k_{g,j} = 6,2$ pour un **MDE** mesuré de **23**.

Tableau (II.7) : Valeur de $k_{g,j}$ pour chaque type de granulats

Granulats	$K_{g,j}$
naturels (sable, gravillon ,4/10 et 6/20)	5.767
GBR (sable)	4.42
GBR (4/10 et 10/20)	5.173

Ce modèle est intéressant car il sépare l'influence des granulats des autres paramètres (classe du ciment, rapport E_{eff}/C). De plus, en ajustant individuellement les paramètres $k_{g,j}$ des différentes coupures de granulats naturels et de **GBR**, il permet une caractérisation intrinsèque des **GBR** qui ne dépend pas du béton de référence auquel les bétons de **GBR** sont comparés.

Dans le cas présent, la qualité des gravillons de **GBR** est inférieure à celle des gravillons naturels, puisque leur $k_{g,j}$ est inférieur. De même, (**Tableau II.8**) confirme une tendance générale : pour un même volume de substitution, l'effet négatif des sables des **GBR** sur la résistance à la compression est plus important que celui des gravillons de **GBR**.

En supposant sur (**la Figure II.19**), que le béton de référence (qui n'incorpore que des granulats naturels), et que le béton à **100 %** de **GBR** aient (presque) la même **EMP**, il est alors possible de définir des plages statistiques du rapport $k_g\text{-GBR}/k_g\text{-GN}$, où le premier terme représente un squelette entièrement recyclé et le second terme un squelette entièrement naturel. Les plages suivantes sont alors obtenues **[0,46 ; 0,62]**, **[0,62 ; 0,79]** et **[0,79 ; 1]**, pour les **GBR** de classe **C**, **B** et **A** respectivement.

À noter que, dans les cas où le granulat naturel serait de mauvaise qualité et que le **GBR** serait de bonne qualité, le **GBR** peut alors avoir une influence positive sur la résistance à la compression pour un même E_{eff}/C , comme indiqué dans [**Dao, 2012 ; Dao et al., 2014**]

Tableau (II.8) : Composition du béton RECYBETON [Sedran, 2013]

Mélange(Kg/m ³)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Eau ajoutée	190	186	185	313	305	297	245	236	236	227	220
Eau efficace	180	176.2	175.6	206	299.9	194.1	189.2	181.9	183.3	183	178
CEMII/A-L 42.5 N	270	309	351	307	352	403	285	310	353	270	363
Fillers calcaires	45	53	61	47	51	54	32	54	53	45	38
Sable naturel 0/4	780	768	751	-	-	-	803	794	778	531	515
Gravillon naturel 4/10	266	262	257	-	-	-	-	-	-	171	165
Gravillon naturel 6/20	820	807	789	-	-	-	-	-	-	518	802
Sable de GBR 0/4	-	-	-	823	810	798	-	-	-	228	221
Gravillon de GBR 4/10	-	-	-	151	149	146	163	161	157	144	140
Gravillon de GBR 10/20	-	-	-	447	440	433	700	692	687	151	147
Retardateur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Superplastifiant	1.35	2	2.3	1	1.23	2.1	1.5	2	2.29	1	1.6
Sable naturel (%)*	43	43	43	0	0	0	45	45	45	29.5	29.5
Gravillons naturel(%)*	57	57	57	0	0	0	0	0	0	36.3	36.3
Sable de GBR (%)*	0	0	0	60	60	60	0	0	0	15.7	15.7
Gravillons GBR*(%)	0	0	0	40	40	40	55	55	55	18.5	18.5
Γ_m (%)	0	0	0	100	100	100	51.8	51.8	51.8	30	30
Γ_v (%)	0	0	0	100	100	100	55	55	55	33.2	33.2
F_{cm}(sur cylindre Ø 16×32) à 28 Jours	33.9	42	49.9	25.8	31.5	38.3	28.5	37.7	42	27.7	45.2
$F_{ctm,sp}$(sur cylindre Ø 16×32) à 28 Jours	3.3	3.8	4.2	2.2	2.2	3	2.8	3.2	6.6	2.7	4

*Fraction volumique de l'ensemble du squelette granulaire

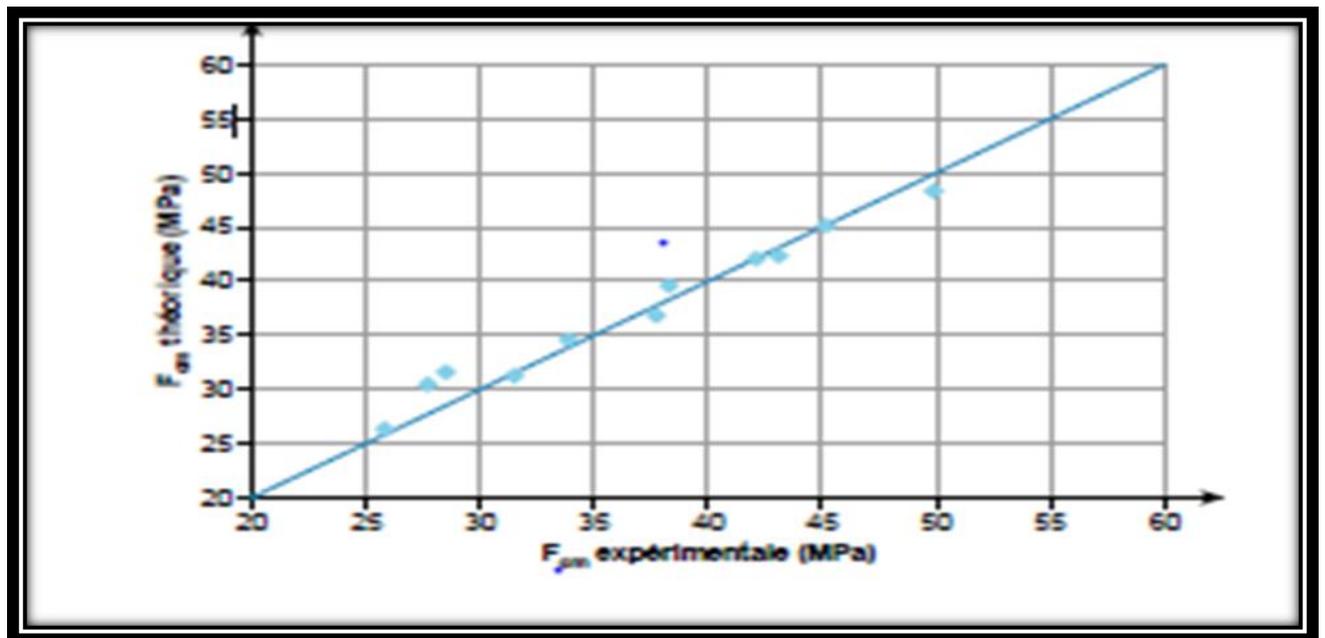


Figure (II.21) : comparaison entre les valeurs expérimentale et théorique de la résistance à la compression, avec une erreur de 1,07 MPa

II.3.3.1.2 Traction par fendage :

Dans la littérature, la résistance à la traction par fendage $f_{ctm,sp}$ du béton à base de granulats naturels est souvent déduite de f_{cm} . Par exemple, (l'équation II.25) a été proposée par [de Larrard, 1999]. Le paramètre k_t décrit le rôle du squelette granulaire global et dépend de la nature de ce squelette. Pour les besoins de l'analyse, on suppose que ce facteur k_t est calculé selon (l'équation II.25), où $k_{t,j}$ est le paramètre mécanique de la fraction granulaire j .

$$f_{ctm,sp} = k_t f_{cm}^{0.57} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$k_t = \sum_j V F_j k_{t,j} \quad (\text{II.26})$$

Ce modèle a été testé sur les mélanges présentés dans le **Tableau II.8**, où divers taux de recyclage des sables et gravillons ont été réalisés. [équations (II.20) et (II.21)] ont été utilisées pour étalonner les termes $k_{t,j}$ de granulats naturels et des **GBR (Tableau II.9)**, en ajustant le modèle aux résistances à la traction expérimentales mesurées. La très bonne qualité de la prédiction est illustrée (**figure II .21**). Une autre validation a été faite sur la base des travaux de [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007] (**Tableau II.9 et Figure II.26**).

Concernant la résistance à la compression, l'ajustement des termes $k_{t,j}$ pour les granulats naturels et les **GBR** pris individuellement permet une caractérisation intrinsèque des **GBR**, qui ne dépend pas du béton de référence auquel le béton de GBR est comparé. Dans le cas présent, les gravillons de **GBR** sont de qualité inférieure au gravillons naturels car leur $k_{t,j}$ est inférieur.

Tableau (II.9): Valeurs ajustées de $k_{t,j}$ en supposant que tous les granulats naturels et que tous les GBR aient chacun la même valeur constante

Granulats	$k_{t,j}$
Sable naturel	0.453
GBR (4/10,10/20)	0.364

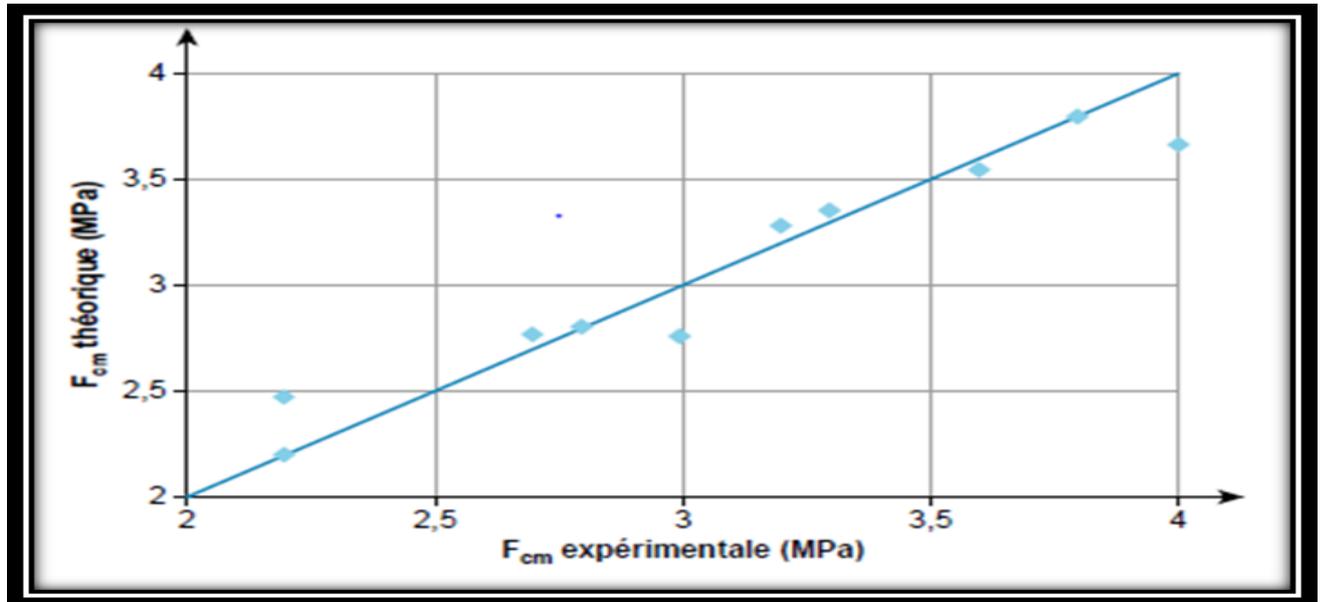


Figure (II.22) : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage pour les mélanges du Tableau II.8, avec les valeurs $k_{t,j}$ du (Tableau II.9) Erreur moyenne = 0,12 MPa

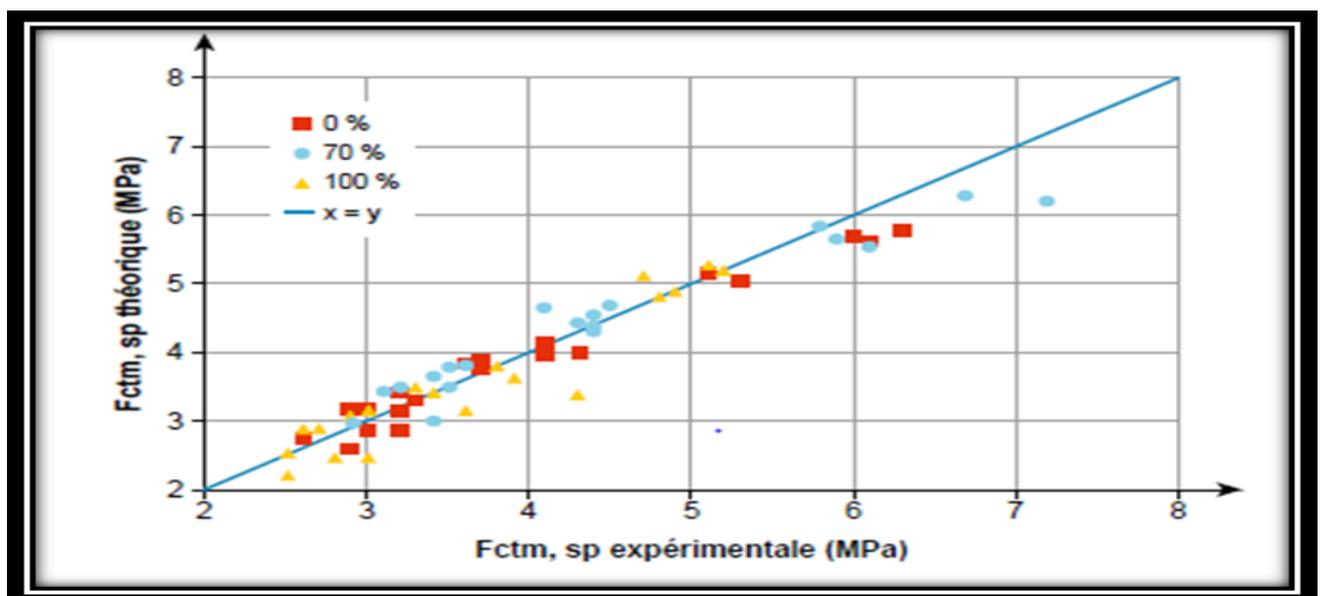


Figure (II.23) : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de la résistance à la traction par fendage tirée de [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007]. Erreur moyenne = 0,23 MPa. Dans la légende Γ_v

Dans [Silva *et al.*, 2015], les auteurs analysent **600 mélanges** issus de plusieurs articles et ils concluent que le taux de recyclage n'a aucun effet sur la relation entre $f_{ctm,sp}$ et f_{cm} . [Khoshkenari *et al.*, 2014] arrivent à la même conclusion en étudiant **7 bétons** à **3 âges** différents, bétons contenant **100 %** de gravillons de **GBR** et jusqu'à **100 %** de sable de **GBR**. La même conclusion est obtenue par [Sanchez de Juan et Aleajos, 2004] sur **24 bétons** avec **0, 20, 50 ou 100 %** de gravillons de **GBR**. Comme le montre la (Figure II.23), d'autres études mettent en relief une influence positive ou négative significative sur la résistance à la traction (c'est-à-dire sur k_t). En fait, l'influence des **GBR** dépend de la qualité relative des granulats naturels auxquels ils sont comparés. Les valeurs de k_t calculées à partir de ces études sont résumées dans les (Tableaux II.10 et II.11). Les résultats montrent que, contrairement aux attentes, les **GBR** n'héritent pas directement des valeurs k_t des granulats naturels correspondant : leurs paramètres k_t sont inférieurs de **7 %** et **13 %** respectivement à ceux des granulats naturels parents, sans réelle corrélation. La même conclusion peut être observée (Figure II.23),

avec les données de [Fathifazl *et al.*, 2011b], où les **GBR** proviennent également des granulats naturels avec lesquels ils sont comparés. De plus, Dao n'a pas pu mettre en relation les valeurs k_t qu'il a obtenues pour les GBR avec d'autres propriétés classiques des granulats naturels (LA, MDE, etc.). L'influence de la résistance à la compression du béton d'où proviennent les **GBR** n'est pas claire non plus (négative dans [Dao, 2012], positive dans [Ajdukiewicz et Kliszczewicz, 2007], pour une nature donnée de granulats naturels).

Il est difficile de conclure sur l'effet réel du taux de recyclage dans la relation entre f_{cm} et $f_{ctm,sp}$. Les valeurs k_t des **GBR** et des granulats naturels doivent donc être ajustées au cas par cas sur des données expérimentales si une optimisation précise de la formulation du béton est nécessaire. Pourtant, on peut noter que les **GBR** présentent généralement une valeur k_t inférieure (jusqu'à **13 %**) à celle des granulats naturels dont ils sont faits. Enfin, un examen complet de tous les résultats disponibles montre le plus souvent un effet négatif du recyclage sur la relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression. [E. Ghorbel, T. Sedran, G. Wardeh, 2018]

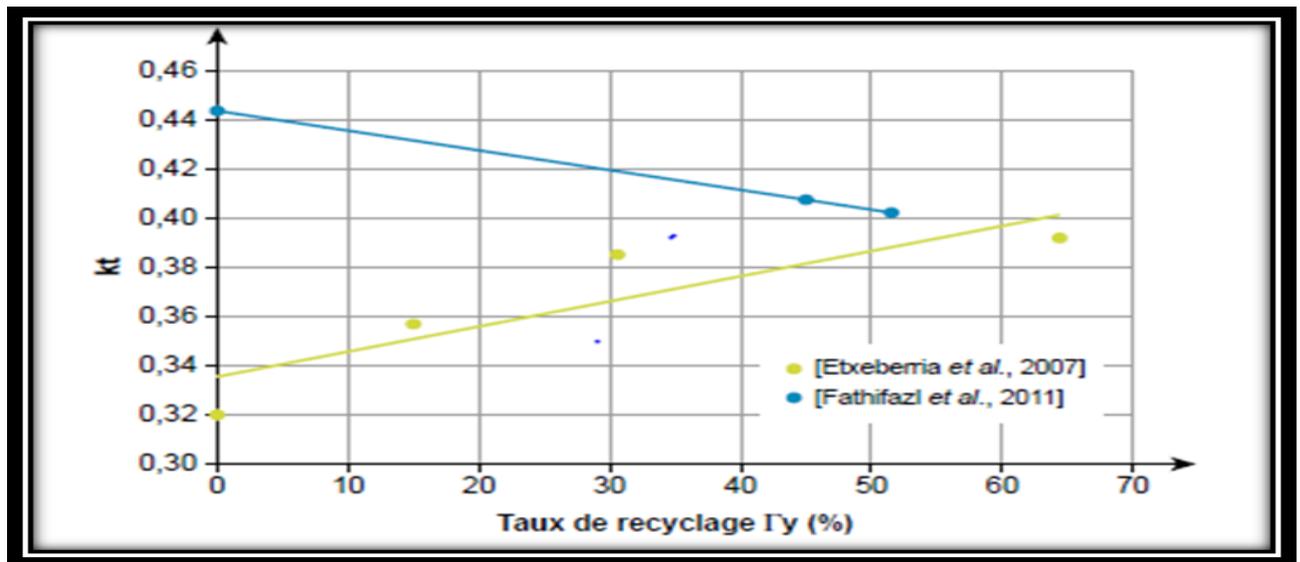


Figure (II.24) : Valeurs de k_t global pour des bétons ayant différents taux de recyclage (seuls les gravillons sont des GBR), selon [Etxeberria *et al.*, 2007b] et [Fathifazl *et al.*, 2011]

Tableau (II.10) : Coefficient de traction de [Dao,2012], obtenus avec des GBR1 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 45 MPa et des GBR2 provenant d'un béton de résistance à la compression d'environ 65 MPa

Nature du granulats naturel	K_{tGN}	K_{tGBR1}	K_{tGBR2}	Moyenne K_{tGBR}/K_{tGN}
Sable et gravillons siliceux	0.435	0.44	0.417	0.985
Sable et gravillons calcaires	0.431	0.376	0.377	0.874
Sable siliceux et Gravillons calcaires	0.471	0.446	0.433	0.933
			Moyenne	0.931

Tableau (II.11) : Coefficient de traction selon [Ajdukiewicz et Kliszczewicz,2007]

Nature du granulats naturel	Kt					f_{cm} du béton source (MPa)	
	GN	GBR1	GBR2	Moyenne k_{tGBR}/k_{Tgn}	GBR1	GBR2	
Quartzite roulée	0.373	0.312	0.365	0.908	30	45	
Granite concassée	0.423	0.371	0.389	0.898	60.5	73.1	
Basalte concassée	0.445	0.345	0.382	0.817	72.4	110.1	
	Moyenne			0.874			

II.4 Conclusion :

La résistance décrit la charge nécessaire à la rupture du matériau rapportée à la surface d'application de cette charge. La résistance à la compression correspond donc à la contrainte de compression que le béton peut supporter. La résistance à la compression constitue la principale, voire souvent l'une des caractéristiques exigée d'un béton à l'état durci.

La fabrication des éprouvettes d'une même gâchée et dimensions, ainsi de le mode de conservation et les essais identiques, assure la possibilité de déterminer avec justesse et précision la valeur vraie de la résistance du béton.

La résistance à la traction avec ces trois type (traction direct, par fendage et par flexion) à des faibles valeurs par rapport à celle de compression.

Le béton tire sa résistance à la compression de la nature de ces composants, de leur dosage relatif et des conditions de mise en œuvre, elle provient aussi du mélange de ciment et de l'eau qui permet de coller les granulats entre eux. Cette colle est le principe d'une réaction chimique entre le ciment et l'eau et qui se déroule majoritairement pendant les **28** premiers jours de l'âge du béton. Durant cette période la résistance n'a pas fini de s'accroître, elle est de moins de **1 MPa** après quelque heure. Il attendre jusqu'à une valeur 30 fois plus importante après **28 jours**.

Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance à la compression, une méthode destructive et une autre non destructive, qui sert à donner des valeurs légèrement inférieures à celle pour la méthode non destructive.

Des nombreux paramètres influent sur la résistance d'un béton à base des granulats recyclé comme le taux de recyclage, la condition de préparation des granulats, la qualité de béton d'origine et le rapport **E/C**.

Lorsque le rapport des granulats recyclé sur les granulats naturel augmente, la résistance diminue.

Le rapport **E/C** diminue lorsqu'en introduisent des granulats d'un béton recyclé, puisque ils demandent une quantité d'eau élevé.

Le béton incorporant des granulats recyclé, a long terme atteint une meilleure résistance qui peut dépasser les valeurs d'un béton standard.

La valeur de **K_t** pour les **GBR** et **GN** dépend des données expérimentale pour la formulation du béton, mais on peut désigner que la valeur de **k_t** de **GBR** est inférieur au moyenne de **13%** par rapports aux granulats naturels.

CHAPITRE III

MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS

III MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS

III.1 Introduction :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages volumétrique sou, 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.

Ces méthodes sont dites à granularité continue lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue ; autrement dit, du plus petit grain de ciment de dimension $d_c \approx 6,3 \mu\text{m}$; au plus gros grain D des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées ;(exemple : béton constitué d'un sable **0/5 mm** et de deux graviers **5/20 mm** et **20/50 mm**.)

On dit par contre que l'on a une granularité discontinue lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires (exemple : béton constitué d'un sable **0/5 mm** et d'un gravier **20/50 mm**).

Ces deux types de béton, continu et discontinu, ont eu chacun leurs chauds partisans ou détracteurs. À notre avis, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, et malgré les apparences, de profondes différences justifiant la querelle encore persistante à leur égard; d'ailleurs, dans la plupart des cas, la continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités; nous pensons que la granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité; par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant, en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité.

Il semble toutefois que la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue. Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition calculée ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influent directement sur la qualité du béton: forme, angularité, porosité, adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc. C'est pourquoi, comme beaucoup de spécialistes en la matière, nous pensons que le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais qui permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré.[**Georges Dreux , 1982**]

La recherche ne se fait pas si nous ne connaissons plus certain principe et règle déjà énoncés dans l'une ou dans l'autre des méthodes existant, car nous devait chercher à appliquer une méthode simple et pratique, mais d'autre part, faire face les développements en cour de la connaissance actuelle du béton dont les méthodes existantes sont évidemment la base, tout ce qui nous a semblé valable, de-ci de-là, dans les méthodes connues de nous :

Plusieurs méthodes comme, [Bolomey 1925], [Caquot 1937], [Valette 1940],[Faury 1942], [Joisel 1952], cités dans la référence [Dreux et Festa 1998], règle du module de finesse d'abrams , ont développé des méthodes de formulation de bétons. Selon le pays et l'école de pensée, les plus utilisés sont la méthode **Américaine (1994)**, la méthode [Britannique 1988], la méthode française [Dreux 1970], la méthode,[Barron Lesage France, 1976], la méthode basée sur le modèle d'empilement compressible [France, 2000], la méthode des plans d'expériences (Louvet F.) cité dans [Baron et Olliver 1996] ,la méthode des volumes absolus de facteur spécifique gravité.

III.2 Comment déterminer la composition du béton ?

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases.

Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de **Faury** ou de **Dreux**, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode **LCPC** de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.

La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance). [Ghomari Fouad]

III.3 Critères en fonction de la destination des bétons :

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tants dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte; il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné. À notre avis, quatre critères principaux doivent être retenus :

- la dimension maximale des granulats ;
- la résistance ;
- l'ouvrabilité ;

➤ l'agressivité du milieu ambiant.

Ces critères sont retenus dans la norme **P18-305** concernant bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans notre méthode de composition des Bétons. [G Dreux ,1982]

En générale il n'existe pas une méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure, la composition de béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

L'étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression ;
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes Utilisées sur le chantier ;
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important ;
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible ;
- Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de Ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier.

Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées:

- minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée ;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité ;
- résistance chimique ;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe: **2/3** de gros éléments et **1/3** d'éléments fins, soit **800 litres** de gravillons et **400 litres** de sable par mètre cube de béton pour **350 à 400 kg** de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ces performances et par son aspect.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

Dans la composition d'un béton, les deux relations importantes suivantes interviennent :

➤ La somme des poids des constituants de 1m³ de béton fini est égale au poids de 1m³ de béton fini, si le ciment (C), l'eau (E) et des granulats (G_i) sont des poids de constituants en kg par m³ de béton fini et Δ la densité définie en place, on a :

$$C+E+(\sum G_i) =1000 \tag{III.1}$$

➤ Le volume occupé par la constituant de 1m³ de béton est égale à 1 m³.si(C), (E) et (G_i) sont les volumes absolus des constituants en litre par m³ de béton fini [Abdelouhid El Atmioui , 2009], on a :

$$C+E+(\sum G_i) +V=1000 \tag{III.2}$$

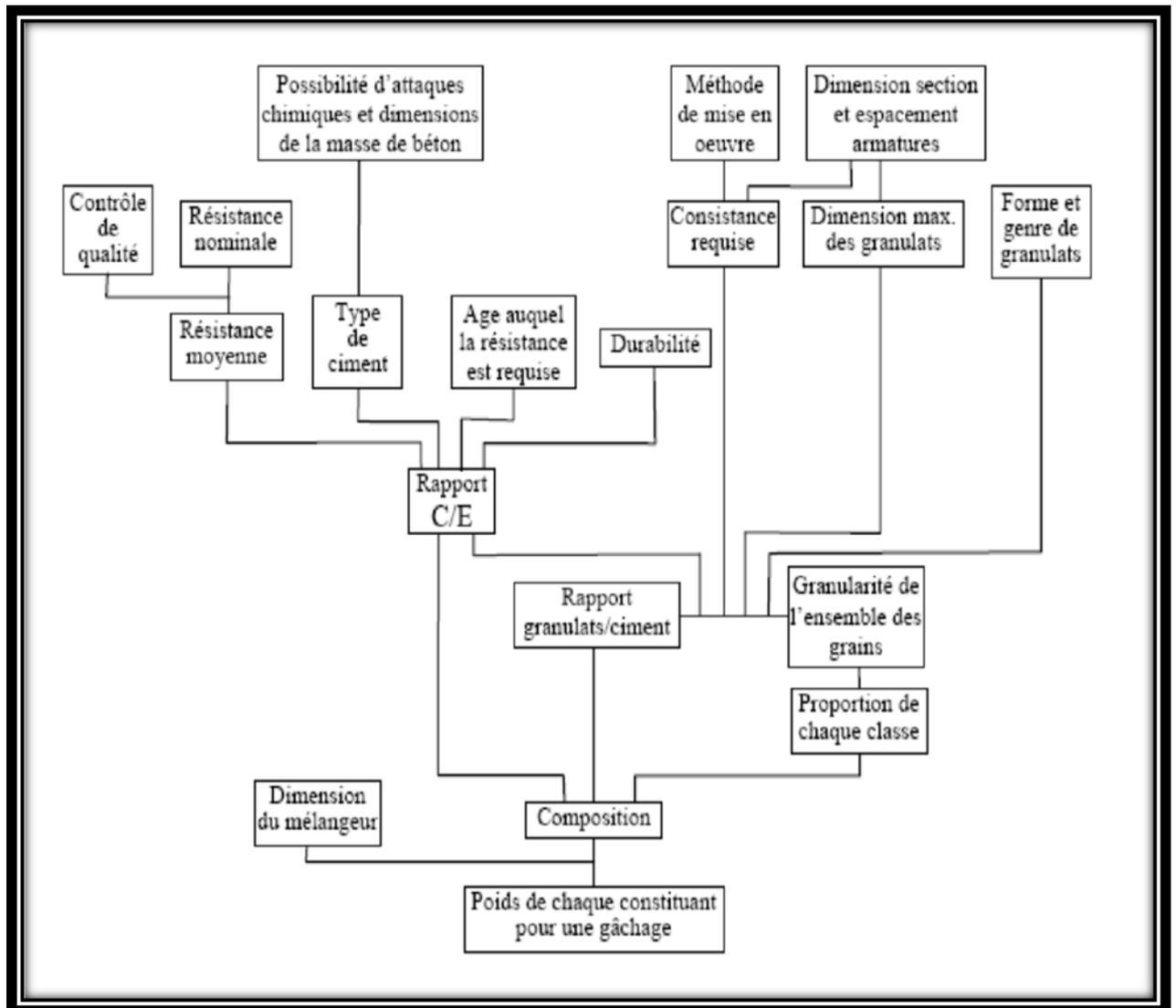


Figure (III.1) : Les données et facteurs de base de la composition du béton

III.3.1 Dimension maximale **D** des granulats :

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

Pour définir approximativement une valeur admissible de **D** nous préconisons l'application des règles résumées dans le tableau:

Tableau (III.1) : Démentions admissible D pour les plus gros granulats

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de D
e : espacement entre armatures principales	E
r : rayon moyen des mailles de ferrailage	R
R : rayon moyen du moule	0,8R
hm : épaisseur minimale de la pièce	Hm/8

Le rayon moyen **r** d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface périmètre.

Le rayon moyen **R** du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton.

De plus, par rapport à la couverture **c**, épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage, on pourra adopter la règle inspirée des recommandations du Comité Euro-international du béton **CEB**.

III.3.2 Résistance souhaités :

D'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé.

Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur éprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne **k** fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée d'après les règlements en vigueur, on prend pour **k** la valeur **0,85** à **1,2** en général et selon les cas ; il convient donc de viser une résistance moyenne d'environ **15** à **20** % supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport **G/S** (proportion gravier/sable).

III.3.3 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en œuvre pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et sans ségrégation.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au **cône d'Abrams** selon les valeurs indiquées dans le tableau

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

Tableau (III.2) : Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usage fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Béton extrudés béton de VRD
5 à 9	Plastique	P	normale	Génie civil Ouvrage d'art Béton de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrage courants
>15	Fluide.	F	Léger Piquage	Fondation profonde dalles et voiles minces

III.3.4 Agressivité du milieu ambiant :

Le milieu ambiant dans lequel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton.

La présence d'eaux agressives (eaux de mer, gypseuses, acides, très pures, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrages soumis à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant. [G Dreux, 1982]

III.4 Méthodes expérimentales :

III.4.1 Objectif :

Déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier de charge, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (**eau E, ciment C, sable S 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 ;
- La résistance du béton ;
- La nature du ciment ;
- Le type de granulats.

III.4.2 Critère de maniabilité :

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par la valeur d'affaissement (l'essai au cône **d'Abrams**).

III.4.3 Critère de résistance :

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

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

$$\sigma'_{28} = 1,15 \cdot f_{c28} \quad (\text{III.3})$$

III.4.4 Choix de ciment :

Le choix de type de ciment est en fonction de la valeur de sa classe vraie et des critères de mise en œuvre (**vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc.**).

La classe vraie de 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 (**Tableau III.3**).

Le ciment remplit deux fonctions essentielles dans le béton :

a) fonction de liant :

La nature du ciment et la résistance de l'évolution de son durcissement, influe sur la résistance du ciment.

b) fonction filler :

Il appartient aux éléments fins, qui servent à diminuer la porosité du béton et améliore notablement sa durabilité.

Tableau (III.3) : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments

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

III.4.5 Choix des granulats :

L'utilisation des granulats dans la fabrication des bétons a pour but de réaliser un squelette granulaire à minimum de vides .donc il faut utiliser les granulats de toutes tailles pour que le plus petit élément viennent remplacer les vides laissées par les plus gros. Pour une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats **D** max ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage.

III .4.6 Choix des classes granulaires :

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type **0/4** et un gravillon **5,6/12,5 ; 5,6/16** ou **5,6/20**, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes. [Ghomari Fouad]

III .4.6. Les facteurs influents sur le Choix des granulats :

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton:

- la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur **G/S** que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à **2** ;
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre **2,2** et **2,8**.

III.4.7 Dosage en eau :

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On pressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (**évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats**).

Par exemple, avec un **E/C**, couramment utilisé, de **0,55**, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci. Toutes ces raisons soulignent l'importance de l'optimisation du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression **C/E** précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier. [Tome, 2013]

III.4.8 Dosage d'adjuvant :

Selon la propriété recherchée pour le béton, on recourt à l'adjuvant approprié: (accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air, etc....).

Produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

III.5 Les différentes méthodes applicables au béton :

III.5.1 Méthode de Bolomey :

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (**ciment compris**) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. Elle est applicable aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre **2.5** et **2.7 kg/m³**.

III.5.1.1 Considération expérimentale :

On se réfère dans ce cas aux courbes granulométriques des constituants secs. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies a lui aussi une courbe granulaire, en fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques, le problème est de trouver qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter ; cette courbe sera dite (courbe optimale) on applique l'équation (III.4).

La formule de base est la suivante :

$$\rho = A + (100 - A) \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

p : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre **d**.

D : Diamètre du plus gros grain.

A : Varie de **8** à **16**, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

III.5.1.2 Calcule du pourcentage des constituants :

➤ Cas de ciment :

il faut que :

$$C(\%) = \frac{\text{masse de ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100 \quad (\text{III.5})$$

➤ Cas des granulats :

Une méthode graphique nommée la méthode de **Joisel** est appliquée cette dernière est universelle, applicable à tous granulats; toutes les courbes optimales et tous modes de graduation des axes.

Si on considère le cas le plus simple, mélange de deux granulats (**d1/d2**) ;(**d3/d4**) ; ces courbes tracées :

Trois seulement sont possibles :

- **D3** coïncide **d2**: juxtaposition des deux granulats ;
- **D3** à gauche de **d2**: superposition partielle ;
- **D3** à droite de **d2**: discontinuité des deux granulats.

Le béton contient aussi l'eau donc faut déterminer ce quantité, il n'existe pas une méthode rigoureuse pour cette détermination; il est donc nécessaire de faire un calcul en fonction de la relation empirique :

Petites constituants (**D < 16mm**):

$$E_1 = 0,23 \cdot \text{poids des éléments secs} < 0,16 \quad (\text{III.6})$$

Gros éléments (**D ≥ 16mm**) :

$$E_2 = \frac{k \cdot \text{éléments secs} \geq 0,16}{1,17 \cdot \sqrt[3]{0,16 \cdot D}} \quad (\text{III.7})$$

S'il s'agit de passoire au lieu de tamis le coefficient **1,17** serait remplacé par **1**.

Le coefficient k sera tiré du tableau suivant :

Tableau (III.4) : Les valeurs du K

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassées
Béton damé	0.08	0.095
Béton vibré	0.09 à 0.095	0.1 à 0.11
Béton coulé	0.1 à 0.11	0.12 à 0.13

La quantité d'eau doit être exprimé en comme pour ciment et les granulats, par rapport au total des éléments secs ;

$$E(\%) = \frac{E_1 + E_2}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (\text{III.8})$$

Le rapport de E/C est important dans la composition de béton ; cette constant doit ce rapprocher le plus de **0.5**, cette quantité d'eau calculée n'est qu'une estimation, Le gâchée d'essai, fournie une valeur plus précise.

Après le mélange du constituant secs on ajoute l'eau jusqu'à la consistance voulue soit obtenue.

La quantité d'eau qui y correspondant est multipliée par le facteur de réduction pour déterminer la quantité réelle d'eau de gâchage pour **1m³**de béton.

L'expérience montre que si la valeur absolue de la différence entre la quantité réelle et la quantité calculée est inférieure ou égale à **5kg/m³**, les résultats trouvés sans modification .dans le cas contraire, en refait les calculs avec la valeur trouvée par l'essai de gâchage.

$$E(\%) = \frac{\text{quantité réelle d'eaude gachage}}{\text{masse des éléments secs}} \times 100 \quad (\text{III.9})$$

Le calcul du poids des éléments secs s'effectuer en supposant connu la densité apparent du béton :

- La masse des éléments secs =masse totale –masse de l'eau de gâchage ;
- La masse des granulats =masse des éléments secs –masse du ciment ;
- La masse de granulats =% calculé × masse des granulats ;

Cette méthode donne des bétons riches en éléments fins, donc maniable, susceptible de rester bruts de décoffrage .on l'emploiera lorsque ces quantités sont recherchées, la résistance mécanique devant simplement être bonne son emploi est fréquent pour les travaux routiers et pour le béton devant être mis en place par pompage. [Ghomari Fouad]

III.5.2 Méthode d'Abrams :

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum.

Nota :

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par **Abrams**, sont indiqués dans le (Tableau III.5), en fonction du dosage en ciment et de la dimension **D** du granulat le plus gros. Nous rappelons ici la règle du mélange **d'Abrams** ; elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse **Mf1** et **Mf 2** pour obtenir un module **Mf** choisi pour le mélange.

Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser (avec les granulats seuls).

Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que: forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désiréesetc.

Cette méthode est plus particulièrement pour les l'étude de la granularité des sables ($D \leq 5\text{mm}$ en principe). [**Geaorge Dreux, Jean Festa, 1998**].

Tableau (III.5) : Valeurs optimales du module de finesse des Compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams)

Dosage en ciment kg/m^3	dimension maximale D des granulats (mm)					
	10	15	20	30	40	60
275	4.05	4.45	5.60	5.60	5.80	275
300	4.20	4.60	5.65	5.65	5.85	275
375	4.30	5.7.	5.73	5.73	5.88	275
400	4.40	4.80	5.80	5.80	5.90	275

III.5.3 méthode de Faury:

En 1942, **J. Faury** proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu. [**FAURY.J,1958**]

La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravie, ces béton sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas disponible, Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi **Faury** adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$.

La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, **Faury** a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros

grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{D}$.

L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (**roulés ou concassés**) et de la puissance du serrage. [**George Dreux, Jean Festa 1998**]

III.5.3.1 Particularité de la méthode :

- Application de tout granulats, quelle qu'en soit la masse volumique ;
- Faury à étudier l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$;
- Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, **Faury** introduit.

La notion d'effet de paroi et de rayon moyen du moule

$$\delta p = \frac{D}{R} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$R = \frac{\text{volume de béton (aciers déduits)}}{\text{surface de tout ce qui en contact du béton (coffrage + acier)}}$$

Il faut vérifier que :

Tableau (III.6) : La nature des bétons avec le diamètre maximum de D

Nature des bétons	Diamètre maximum $D \leq$			
	0,8e	0,7c	1,6r	R
Granulats concassées	0,8e	0,7c	1,6r	R
Granulats roulée	0,9e	0,8c	1,8r	1,2R

Avec :

e : espacement horizontal entre les armatures horizontal ;

c : enrobage moyen des armatures ;

r : rayon moyen d'une maille armature ;

b : espacement vertical entre les armatures longitudinales.

$$r = \frac{e \times b}{2(e + b)} \quad (\text{III.11})$$

III.5.3.2 Courbe optimale :

Ce n'est pas un segment de droite ; mais deux segments formant une ligne brisée.

Il faut définir :

- **Origine** : Points de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0.0065mm. on présente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis (rapport) et sur l'axe des ordonnées le pourcentage des tamisât cumulés en valeur absolue ;
- **extrémité : point d'abscisse D et d'ordonnée 100** ;
- **Point de brisure** : abscisse $D/2$; ordonnée $YD/2$ donnée par la formule :

$$YD/2 = A + 17.8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\left(\frac{R}{1.25 \cdot D}\right)^{-0.75}} \quad (\text{III.12})$$

Si au lieu de tamis, on utilise des passoirs le point de brisure est exprimé par :

$$YD/2 = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D}^{-0.75}} \quad (\text{III.13})$$

A : constante traduisant la maniabilité du béton ;

B : constant traduisant l'importance du serrage du béton ;

Lorsque le serrage est particulièrement énergétique $B=1$, $B=1.5$ dans tous les autres cas (**Tableau III.7**)

(**Tableau III.7**) : Consistance de béton en fonction de D

D ≥ 25mm : béton armé courant pour bâtiments et ouvrage d'arts			
Consistance de béton	Sable roulé		Sable concassé
	Gravier roulé	Gravier concassé	
Assez plastique	24 à 26	26 à 28	30 à 32
Plastique	26 à 28	28 à 30	32 à 34
25 < D ≤ 50 : béton légèrement armé		A=15 à 20	
50 < D ≤ 80 : granulats roulés		A=15 à 20	
D > 80 : granulats roulés		A=12	
Béton de piste		A=15	

III.5.3.2.1 Calcul de D :

C'est la dimension du tamis qui laisserait tout juste passer la tonalité du granulat. Considérons la courbe de plus gros granulats du béton que nous allons étudier. la valeur de D_{est} un peu supérieure à d_{n-1} ; c'est-à-dire :

$$D = d_{n-1} \left(\frac{x}{2y} \right) \quad (\text{III.14})$$

III.5.3.2.2 Calcul de l'indice de vide et de la quantité d'eau du gâchage :

Pour un béton de consistance donnée avec des matériaux donnée, il y a un volume maximal de matière solide auquel correspond un vide minimal ; celui-ci est donné par :

$$n = k / \sqrt[5]{D} + \frac{K}{R - 0.75} \quad (\text{III.15})$$

Tableau (III.8) : les valeurs de k et k'

Consistance de béton	Moyenne de mise en œuvre	Matériaux utilisées			Valeur de k'
		Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé	
Molle	Piquage et damage sans vibration	>0,34	>0,36	>0,38	0,004
Normale	Vibration moyenne	0,26	0,28 à 0,30	0,30 à 0,34	0,003
Ferme	Vibration poussée	0,25 à 0,27	0,26 à 0,28	0,28 à 0,30	0,002
Très ferme	Vibration puissante	<0,24	<0,25	<0,25	0,002

La quantité d'eau E devrait remplir les vides est en pratique insuffisante pour une mise en œuvre commode, il faut donc rajouter de **20** à **30%** d'eau supplémentaire en fonction de l'ouvrabilité désirée :

$$1.2 n (\text{béton ferme}) \leq E \leq 1.3 n (\text{béton molle}) \quad (\text{III.16})$$

III.5.3.2.3 Composition pondérale des constituants solides :

Dans 1 m^3 de béton, on a un volume absolu total de constituant solide égal à $1-E$, nous avons donc :

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = 1-E \quad (\text{III.17})$$

Le volume absolu du ciment : $V_{\text{ciment}} = \text{dosage en ciment} / \text{Masse volumique absolue du ciment}$.

$$C(\%) = v_{\text{ciment}} / (1000 - E) \quad (\text{III.18})$$

Les volume de sable, ciment et gravier sont déterminés à partir de la courbe granulométrique et la méthode de **Joisle**.

La procédure qui suit est similaire à celle de **Bolomey** :

- composition granulométrique du mélange.

- composition d'un mètre cube de béton. [Ghomari Fouad]

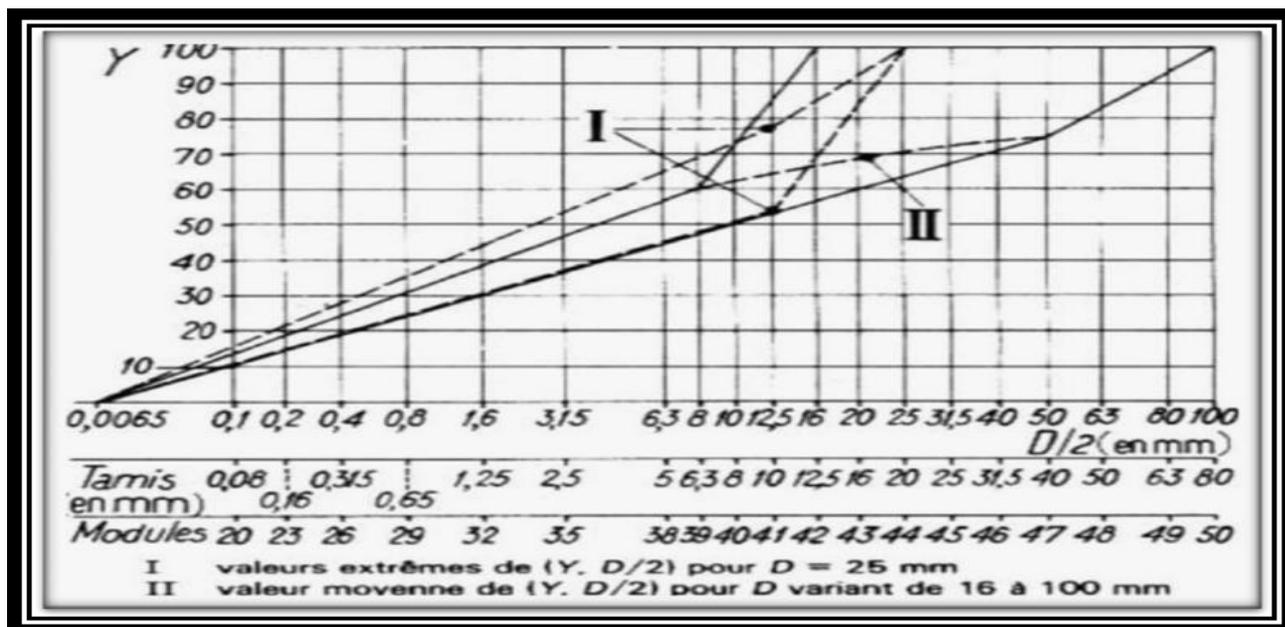


Figure (III.2) : Courbes de référence Faury. [Georges Dreux ,1982]

III.5.4 Méthode de Vallette :

R. Vallette [1963] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par dosage des bétons à compacité maximale ou dosage des bétons à minimum de sable ou dosage des bétons à granularité discontinue.

La méthode **Vallette** proprement dite est quelque fois utilisée avec certaines variantes.

Voici sommairement résumé le principe de cette méthode :

Dans les cas les plus courants on partira, en général, de deux granulats (bétons binaires) : un sable **0/5 mm** et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un **16/25 mm** par exemple.

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner, en principe, le mortier plein à minimum de ciment; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier.

C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur en ce qui concerne la convenance du béton ; il doit donc être un praticien connaisseur en la matière. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment).

Les dosages en ciment auxquels on aboutit ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées, la plasticité nécessaire, l'étanchéité ou autres qualités. Pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe a priori dans certains cas, ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein de sable mouillée. [Vallete .R,1963].

III.5.5 Méthode de Baron et Lesag:

Elle a pour objet d'obtenir sur chantier le béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite soit à partir de Mesures de compacité (par exemple, par la méthode Vallette), soit à partir de mesures de temps d'écoulement, base de la présente méthode.

Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton, quelles que soient les conditions de mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que ladite fonction soit maximale.

Le meilleur béton possède trois qualités :

- minimum de vides ;
- minimum d'eau ;
- minimum de ségrégabilité (ou meilleure homogénéité). [Georges Dreux , 1982]

III.5.6 Méthode de Dreux et Gorisse :

III.5.6.1 Énoncé du problème :

Nous avons adopté comme critères de base les quatre critères mentionnés au-dessus :

- la dimension maximale D des granulats doit être fixée en premier lieu ;
- la résistance souhaitée R' (rupture en compression à **28 jours** sur éprouvettes cylindriques) est prise égale pour la valeur moyenne visée à la résistance caractéristique demandée majorée de **15%** ;
- l'ouvrabilité désirée est fixée par l'affaissement A à obtenir par l'essai au cône ;
- la nature du ciment à utiliser doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant.

III.5.6.2 Principe de la méthode :

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau.

Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants: **dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, palpabilité, etc.**

Une remarque importante est à signaler :

Il faut prendre en compte le temps d'attente éventuel sur chantier, entre la fin du malaxage et le début de la mise en place (**la maniabilité diminue**).

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose.

Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

Reste à exécuter, bien entendu, quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires. [**Georges Dreux ,1982**]

III.5.6.3 Les différentes étapes :

- détermination du dosage en ciment ;
- détermination de dosage en eau ;
- contrôle de qualité de granulat (sable) ;
- trace de la courbe granulaire ;
- trace de la ligne de partage ;
- détermination du dosage des granulats ;
- densité thermique du béton frais.

Remarque importante :

Cette méthode est une synthèse de ce qui nous est apparu comme le plus valable et le plus intéressant dans les méthodes existantes connues de nous. De plus, elle tient compte des résultats d'une grande enquête sur les dosages les plus usuels pour divers bétons jugés aujourd'hui satisfaisants. Elle n'a donc pas de bases scientifiques mais bénéficie sans restriction partisane de l'expérience déjà acquise par d'autres dans ce domaine et, de plus, bien entendu, de nos recherches au **CEBTP**. On pourra trouver les justifications concernant les abaques, les formules, les coefficients,etc. [**DREUX.J,1978**]

III.5.6.4 Dosage en ciment et en eau :

On commence par évaluer le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée (à **28 j**) ; on utilise pour cela une formule inspirée des études de **Bolomey** :

$$R'_{28} = G \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (\text{III.19})$$

Avec :

R'_{28} (MPa) : résistance moyenne souhaitée ;

G:coefficient granulaire (densité, adhérence, dimension) que l'on peut choisir dans le tableau III.9; à défaut de connaissance du granulat et en première approximation, on pourra adopter la valeur moyenne : **G = 0,50** ;

C (kg/m³) : dosage en ciment ;

E (litres/m³) : dosage en eau totale ;

σ'_c (MPa) : classe de résistance moyenne réelle du ciment.

Tableau (III.9) : La connaissance ou l'évaluation de, G et permet de calculer la valeur de **C/E**

Valeur approximative du coefficient granulaire G			
Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D<16mm)	Moyenne (25<D<40mm)	Gros(D≥50mm)
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 sera effectué dans la bonne condition (par vibration en principe)

L'application de l'abaque de (**fig.III.3**) permet, en fonction de cette valeur de **C/E** et de l'affaissement souhaité **A**, de déterminer le dosage en ciment **C**; la connaissance de ce dosage **C** et de la valeur **C/E** permet d'évaluer approximativement le dosage en eau **E** qui sera ultérieurement corrigé expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (affaissement **A** au cône).

Toutefois, pour une appréciation un peu moins aléatoire, on fera une première correction en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leur surface spécifique, en appliquant la correction indiquée au tableau.

En effet, les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est environ **D = 25 mm (dimension la plus courante)**.

Si l'on a **D < 25 mm** la surface spécifique des granulats augmente et, à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice versa.

Tableau (III.10): Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 25\text{mm}$)

Dimension max D des granulats mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

III.5.6.5 Dosage en eau réel :

La quantité d'eau totale (**sur matériaux supposés secs**) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats) ; cette appréciation est une difficulté sur le chantier et la meilleure façon de respecter le dosage en eau totale est de réaliser la plasticité prévue par l'affaissement au cône.

III.5.6.6 Courbe granulaire de référence :

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (**sables + graviers mais ciment non compris**) peut être schématisée suivant une ligne brisée tracée sur un graphique granulométrique normalisé ; son origine basse est à **0 %** de tamis pour la dimension **0,08 mm** correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable, et son extrémité haute à **100 %** pour la dimension **D** correspondant aux plus gros granulats utilisés [Figure. III.9].

Son point de brisure a pour coordonnées :

- **X** qui est égal à la graduation **D/2** ;

Si $D \leq 20$ ou au milieu du segment graviers.

Si $D \geq 20$; ce segment graviers se trouve sur l'abscisse, de **5 mm** à **D** :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad (\text{III.20})$$

Avec :

K : coefficient à choisir dans le tableau,

K_s : coefficient tenant compte du module de finesse du sable **M_f** :

$$K_s = 6 M_f - 15 \quad (\text{III.21})$$

K_p: coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité pompable; on peut prendre en général :

$$K_p = +5 \text{ à } +10 \% \quad (\text{III.22})$$

➤ **Cas des gros bétons :**

Dans ce cas, lorsque $D \geq 50$, le risque de ségrégation augmente et il est donc conseillé de charger un peu plus en sable pour diminuer cet inconvénient. Cela peut se faire en remontant un peu le point de brisure,

En ajoutant à la valeur de Y la correction $(D-25)/5$ en pour-cent, D étant exprimé en millimètres.

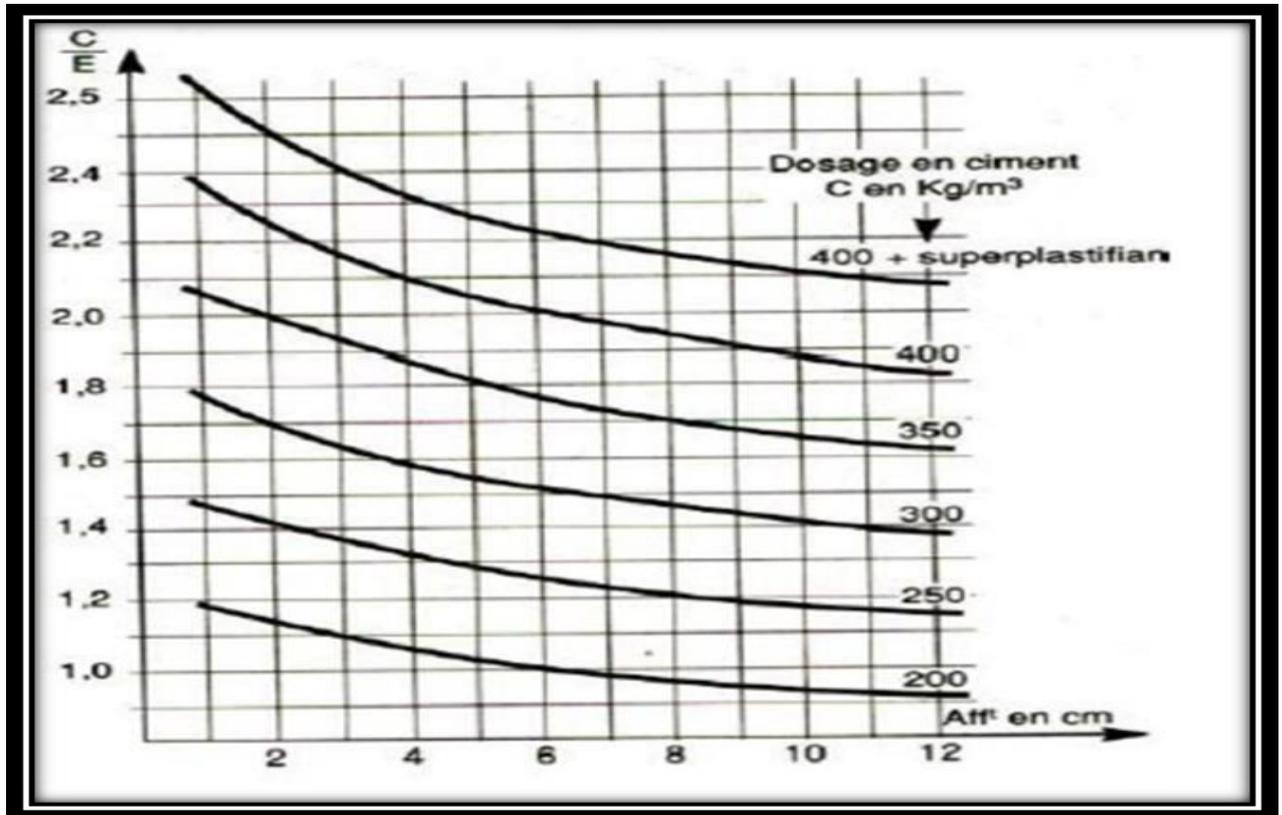


Figure (III.3) : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône A)

La détermination du point de brisure permet de tracer alors la ligne brisée dite courbe de référence (**ligne brisée 0YD sur [Figure. III.5]**).

III.5.6.6 Proportion des granulats :

Sur le même graphique, on trace les courbes granulaires des différents granulats à utiliser. Les droites joignant le point à 95 % (d'un granulat au point à 5 % du granulat suivant (**et ainsi de suite**)) sont appelées lignes de partage. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs.

Il s'agit de pourcentages en volumes absolus dans l'unité de volume de béton frais en œuvre après serrage.

III.5.6.7 Masse des granulats :

Il convient alors de faire appel à la notion de coefficient de compacité du béton. On définit celui-ci comme le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (**granulats**

et ciment) et le volume de béton correspondant en œuvre que l'on prend ici égal à **1000 litre** on a donc :

$$\gamma = \frac{V_g + V_c}{100} \quad (\text{III.23})$$

Avec :

V_g et **V_c** (en litres) volumes absolus des granulats d'une part et du ciment d'autre part dans un mètre cube de béton en œuvre.

La connaissance du dosage en ciment **C** déjà fixé permet le calcul de **V_c** en supposant que la masse volumique du ciment est de **3,1 kg/litre**. Le choix de la valeur de **γ** (**Tableau III.11**) ,il permet de calculer le volume absolu **V_g** de l'ensemble des granulats: la connaissance du pourcentage de chacun d'eux permet alors de calculer leurs volumes absolus respectifs en litres pour un mètre cube de béton en œuvre. La connaissance de la masse volumique de chacun d'eux est alors nécessaire et permet de calculer la masse de chacun d'eux dans la formule de composition qui est alors complètement définie et qui, par addition des masses des différents constituants, donne la masse volumique théorique du béton frais en œuvre **Δ0** en **kg/m³**.

Tableau (III.11) : La valeur du coefficient de γ

Consistance	serrage	Dimension D des granulats (en mm)						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=60	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.765	0.780	0.795	0.805	0.810	0.820
	Vibration Faible	0.755	0.770	0.785	0.800	0.810	0.815	0.825
	Vibration Normale	0.760	0.775	0.790	0.805	0.815	0.820	0.830
Plastique	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	0.820	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	Vibration Faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration Normal	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 les granulats roulés sinon conviendra d'apporter les corrections suivantes :

-sable roulés et gravier concassé :-0,01.

-sable et gravier concassé :-0,03.

Tableau (III.12) : coefficient k en fonction de la forme des granulats ; du mode de vibration et du dosage en ciment. [Georges Dreux ,1982]

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (kg/m³)	400 + fluidifiant	-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

III.5.7 Méthode de Féret :

Féret a réalisé de nombreux travaux sur des mortiers, faisant varier la nature du sable et les quantités des différents constituants (sable, ciment et eau). Il a mesuré la compacité des bétons frais et la résistance en compression des bétons durcis. À partir des résultats obtenus, il a mis au point une méthodologie capable de déterminer les proportions de ces différents matériaux permettant d'obtenir les performances mécaniques désirées.

Il a constaté que la résistance moyenne en compression, f_{cm} , des mortiers est directement liée à la quantité d'eau, de ciment et d'air dans celui-ci. Cette dernière est également prévisible connaissant les volumes en ciment, eau et sable. Ainsi, connaissant une formulation, il est possible de prédire ses performances mécaniques :

$$f_{cm} = k \left(\frac{v}{V_c + V_e + V_a} \right)^2 \quad (\text{III.24})$$

Avec :

- V_c , V_e et V_a : respectivement les volumes de ciment, d'eau et d'air occlus.
- K : constante dépendant de la nature du ciment ainsi que des conditions et de la durée de la cure. Elle doit être déterminée par des expériences préalables.

Il a alors mis en évidence un système d'équation qui doit permettre d'obtenir le mélange sec optimal pour une résistance en compression donnée. Celui-ci nécessite de fixer la quantité de ciment ou de sable et de connaître la valeur de la constante **K** correspondant au ciment et aux conditions de cure utilisés. Une fois, le mélange sec déterminé, une équation permet de calculer la masse d'eau permettant d'obtenir une rhéologie fixe (pâte ferme mais bien liée, brillante et plastique) et la compacité maximale du béton. Cette méthodologie permet de déterminer les quantités optimales de ciment, sable fin, sable grossier et eau donnant un mortier présentant une consistance et une résistance voulue.

L'équation présente la version originale de **Feret**. Celle-ci a évolué par la suite pour s'adapter aux bétons et gagner en robustesse. Elle est encore très utilisée de nos jours, mais il est possible de remarquer certaines difficultés concernant son emploi pour les bétons de bloc:

- La consistance étudiée par **Feret** dans ses travaux ne correspond pas à celle d'un béton frais à démoulage immédiat, or celle-ci va influencer la compacité du béton à l'état frais. En effet, la fermeté d'un matériau empêche l'évacuation de l'air présent dans la pâte.
- De même, seul l'air occlus présent dans la pâte est pris en compte par la méthode de **Feret**.
- Or, dans le cas des blocs, l'état de l'art a mis en évidence la présence d'air crée par un volume de pâte insuffisant pour remplir l'espace inter-granulaire. [**Laure Abdul Le Brun ,2018**]

III 5.8 méthode de Joisel:

Inspirée comme celle de **FAURY** de la théorie de **CAQUOT**, la méthode **JOISEL** est plus généralisant. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{D}$, ou « **m** » dépend de la compacité avec :

Laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « **m** » peut alors varier de **3** à **10**. En utilisant $\sqrt[m]{D}$ comme graduation des abscisses **Joisel** utilisa une courbe de référence de forme linéaire.

La courbe optimale est encore une droite. Mais les ordonnées sont les pourcentages du volume total du béton de référence, fluide compris («**fluide**» = **eau** + **air**), et les abscisses, qui comportant **3** segments (**OA**, **AB** et **BC**) dont les longueurs sont données par des abaques, sont graduées proportionnellement à **d**, **m** pouvant varier de **0.16** à **0.32** (**BOLOMEY :0.5**, **FAURY : 0.20**).

Cette méthode tient compte de la compacité du béton étudié, et de l'effet de paroi. Elle conduite, comme la méthode de **VALLETTE**, à un faible dosage en ciment : on rectifier là encore en enlevant une quantité de sable en rapport avec le ciment qu'on doit ajouter.

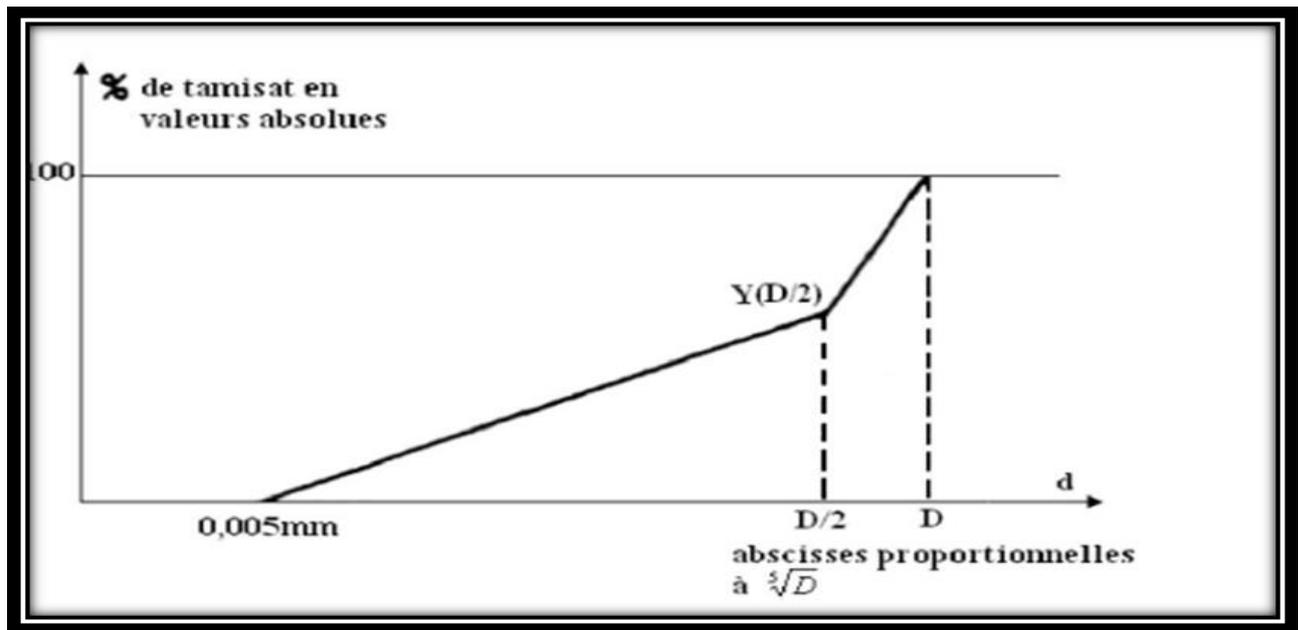


Figure (III.4) : Courbe optimale de Joisel

III.5.9 Méthode britannique :

La méthode du département de l'environnement révisée en 1988 (BRE1988, citée par Neville1995) est appliquée en cinq étapes.

Aussi cette méthode compose le béton sur la base des étapes suivantes.

Étapes successives de la méthode :

Étape 1 : déterminer du rapport eau/ciment une première contrainte concerne la durabilité (valeur maximale du rapport e/c). Le rapport eau/ciment est ensuite déduit de la résistance à la compression requise, pour des âges compris entre 2 et 91 jours. Le type de ciment (durcissement lent ou durcissement rapide) et de granulats, (concassé ou roulé) est aussi pris en compte dans une table et un abaque ;

Étape 2 : détermination de la quantité d'eau. Le principe est très similaire à celui adopté dans la méthode ACI 211 un raffinement supplémentaire consiste à considérer la forme des grains (anguleux ou non), qui est supposée contrôler la demande en eau, en plus de D_{\max} et de l'affaissement requis ;

Étape 3 : calcul de la quantité de ciment, en divisant la quantité d'eau par le rapport eau/ciment. À ce stade, une limite inférieure concernant la durabilité est prise en compte ;

Étape 4 : détermination de la masse totale de granulat. L'utilisateur peut lire dans un tableau la « densité du béton à l'état frais » en fonction de la quantité d'eau et de la densité, les masses (pour une unité) de ciment et d'eau sont soustraites ;

Étape 5 : détermination du rapport (sable/sable+gravillon). Dans une série de tables, on trouve ce rapport en fonction de la maniabilité requise. (Exprimée par l'affaissement ou par temps

.D'écoulement Verbe), de **D_{max}** du rapport eau/ciment et de la quantité et passants du sable au tamis de **0.6 mm**. Quand le gravillon est livré en plusieurs coupures, les pourcentages de chaque coupure par rapport à la masse totale de gravillon sont proposés dans une autre table.

III.5.10 Méthode américaine :

Cette méthode (**ACI 211**) est probablement l'une des plus populaires monde. Elle est basé essentiellement sur les travaux de chercheurs américains (**ABRAMS et POWERS**) est applique huit étapes.

Cette méthode composée le béton sur la base des étapes suivant :

Etape 1 : choix de l'affaissement,

Etape 2 : choix de taille maximale des granulats (**D_{max}**) ,

Etape 3 : estimation de la quantité d'eau et l'air. L'eau est déterminée par **D_{max}** et par l'affaissement requis alors que l'air dépend **D_{max}** ;

Etape 4 : sélection du rapport eau / ciment, ce rapport est choisie en tenant compte de durabilité (valeur maximale spécifiée) et de la résistance à la compression, pour cette dernière, un table est donnée pour trouver le rapport eau/ciment en fonction de la résistance requise ;

Etape 5 : calcul de la quantité de ciment ce calcul est simplement fait à partir de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment déterminé précédemment ;

Etape 6 : estimation de la quantité gravillon. La masse volumique on vrac du gravillon, mesurée selon une méthode normalisée (piquage à sec), est déterminée en premier. Elle est alors multipliée par un coefficient tabulé, qui dépend de la taille maximale du granulats et de module de finesse du sable ;

Etape 7 : calcule de la quantité de sable. Cette quantité est calculée par différence entre le volume unité de le gâchage et les autres volumes calculés précédemment ;

Etape 8 : ajustements finaux. [françois de larrard, 1999]

III.6 Formulation des bétons recyclés:

III.6.1 Conséquences des spécificités des granulats recyclés sur la formulation:

Les granulats recyclés sont obtenus par **concassage/criblage** et sont composés des granulats naturels et de mortier résiduel du béton d'origine. Ceci leur confère une texture rugueuse et frottant, comme c'est le cas pour la plupart des granulats naturels concassés.

C'est pourquoi, l'incorporation de granulats recyclés (**sables, ou gravillons à fort taux**) peut conduire à augmenter la teneur en eau efficace **E_{eff}** pour maintenir le niveau d'affaissement visé, avec des effets négatifs sur les performances mécaniques et la durabilité.

Pour éviter d'augmenter la teneur en eau efficace, on utilise des adjuvants réducteurs d'eau (**plastifiants ou superplastifiants**), au prix d'une certaine augmentation de la viscosité (**à valeur d'affaissement constante**).

Il est à noter que l'incorporation d'un sable recyclé dans une formule existante peut conduire à adapter l'adjuvantation, en termes de dosage, voire de choix des adjuvants. Selon la qualité du béton d'origine et l'objectif de résistance du nouveau béton, la substitution volumique à eau efficace constante peut affecter ou non la résistance.

En cas d'effet négatif, il faut alors diminuer le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$.

Ceci peut conduire à augmenter la teneur en ciment ou en liant équivalent, ce que l'on constate principalement sur les chantiers où on a pratiqué le recyclage à fort taux.

Enfin, les granulats recyclés héritent du béton d'origine d'une absorption plus importante (**typiquement entre 5 à 10%**) que celle des granulats naturels (**plutôt entre 0 et 3%**).

Il est donc nécessaire de porter une attention encore plus importante que pour les granulats naturels à la prise en compte de l'eau absorbée dans le calcul de l'eau à ajouter réellement au mélange pour garantir l'eau efficace visée. Les granulats recyclés ont une masse volumique plus faible (**de l'ordre de 2200 kg/m³**) que celle des granulats naturels.

Il est important de prendre ceci en compte lors de la remise au mètre cube d'une formule de béton.

III.6.1.1 Absorption d'eau :

Les **GBR** présentent une absorption d'eau importante héritée du béton parent par rapport aux granulats naturels qui présentent généralement une absorption d'eau plus faible. Cette différence ne soulève pas de problème particulier pour la formulation. Elle a toutefois deux conséquences pratiques importantes.

En effet, les deux propriétés du béton les plus importantes, à savoir la consistance (**affaissement**) et la résistance à la compression, sont fortement dépendantes de la quantité d'eau efficace E_{eff} . Sa valeur correspond à l'eau apportée dans le mélange (**eau de gâchage, eau des granulats et des adjuvants**), diminuée de l'eau absorbée par les granulats (**supposée ne pas servir à lubrifier le mélange ni à hydrater le ciment**). Lors de la substitution des granulats naturels par des **GBR**, il faut considérer qu'une plus grande quantité d'eau sera absorbée par les granulats.

Il est donc nécessaire d'augmenter l'eau totale lorsqu'une quantité d'eau efficace particulière est visée. Par exemple, dans un mélange contenant **1 400 kg/m³** de **GBR** ayant une absorption d'eau de **7,5 %**, l'eau absorbée représente **105 l/m³**.

Ainsi, pour une teneur en eau efficace visée de **200 l/m³**, l'eau totale doit être **305 l/m³**. Par comparaison, la correction d'eau pour un béton contenant **1 700 kg/m³** de **GN** ayant une absorption d'eau de **1 %** est de **17 l/m³** seulement.

Lors de la fabrication du béton, les GBR sont généralement utilisés dans un état proche de la saturation. En effet, si les granulats sont secs, leur absorption n'est pas satisfaite instantanément, ce qui conduit à une évolution de l'eau efficace du béton dans les premières minutes et heures qui suivent le malaxage, et donc à des variations incontrôlées de la maniabilité. En outre, lorsque les grains ne sont pas saturés, il est plus difficile de mesurer précisément leur teneur en eau réelle à la centrale, ce qui n'est pas acceptable d'un point de vue industriel.

III.6.1.2 Propriétés mécaniques :

Les granulats naturels sont essentiellement issus de roches ayant des résistances à la compression supérieure à **50 MPa**, alors que les **GBR** sont obtenus par concassage de bétons de résistance généralement moindre. En outre, le concassage des **GBR** peut endommager la pâte résiduelle et réduire son adhérence au granulat naturel. Par conséquent, pour une nouvelle pâte de qualité fixée (**c'est-à-dire pour un rapport E_{eff}/C fixé**), l'augmentation de la teneur en granulats recyclés conduit généralement à une diminution de la résistance en compression du béton. Comme les sables de **GBR** contiennent une plus grande quantité de pâte résiduelle, leur effet néfaste est plus conséquent que celui des gravillons de **GBR**. Ce problème peut être compensé par une diminution du rapport E_{eff}/C , ce qui revient à augmenter la teneur en ciment et/ou à diminuer l'eau efficace grâce à l'utilisation d'un superplastifiant. Il faut noter aussi que le remplacement des granulats naturels par des **GBR** peut parfois augmenter la résistance à la compression des bétons de résistance modérée, lorsque le granulat naturel est de moindre qualité ou grâce à la bonne adhérence des **GBR** à la nouvelle pâte de ciment, compte tenu de la présence de la pâte résiduelle associée aux **GBR**.

III.6.1.3 Compacité :

La compacité d'un matériau granulaire est définie comme le rapport V_s sur V_t où V_s est le volume solide occupé par le squelette après compactage, et V_t le volume du contenant.

Les méthodes de formulation des bétons visent le plus souvent à obtenir un squelette granulaire de forte compacité, en considérant les gravillons, le sable et parfois le liant et les additions minérales (**Caquot, Faury, Baron- Lesage, Dreux-Gorisse, ACI 211...**). En effet, augmenter la compacité permet de diminuer le volume des vides entre les grains du squelette. Par ailleurs, l'eau efficace ajoutée au béton joue deux rôles : remplir les vides restant dans le squelette, puis suspendre les grains et les séparer les uns des autres. Seule l'eau supplémentaire aux vides du squelette confère la maniabilité au béton, alors que l'eau présente dans la porosité du squelette est, en quelque sorte, inutile sur ce point. Ainsi, augmenter la compacité du squelette permet de minimiser la quantité d'eau « inutile » et, par conséquent, l'eau efficace, tout en gardant la même maniabilité. Enfin, parce que la résistance à la compression est une fonction décroissante du

rapport E_{eff}/C , une compacité granulaire plus élevée conduit à une plus faible teneur de ciment pour une résistance et une maniabilité visée, et donc à un moindre coût en matériaux.

Les **GBR** résultent du concassage de bétons recyclés et ils sont constitués d'un mélange de granulats naturels et de pâte de ciment résiduelle. Leur surface est donc irrégulière et rugueuse. Par conséquent, ils présentent généralement une faible compacité, à cause des frottements entre grains. Par exemple, [Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014] ont étudié la compacité de GBR provenant de divers bétons de résistances à la compression variables et confectionnés à base de deux types de granulats naturels : un granulat roulé siliceux semi-concassé (**S**) et un calcaire concassé (**C**). Les GBR obtenus ont été désignés « de seconde génération (**G2**) » lorsque le béton source contenait **100 %** de **GN**, et de « troisième génération (**G3**) » lorsque le béton source contenait **100 %** de **G2**.

III.6.2. Performances visées par le formulateur :

Comme pour les bétons de granulats naturels, il est nécessaire de fixer a minima un affaissement et une résistance à la compression caractéristique. Par nature, les granulats recyclés ont des propriétés plus variables que celles des granulats naturels, aspect qui doit être pris en compte lorsqu'on travaille avec des recyclés d'origines multiples.

Ainsi, en l'absence d'expérience sur la dispersion sur de grands chantiers, il paraît raisonnable de prendre une marge de sécurité plus importante sur la résistance moyenne à viser par rapport à des granulats naturels.

L'augmentation suggérée de marge est de **50%** pour un taux de recyclage de **100 %** et on peut supposer qu'elle évolue proportionnellement pour des taux de recyclage inférieurs.

Lorsque l'on adopte de très forts taux de recyclage, il est nécessaire de démontrer la durabilité du béton par des essais performantiels adaptés.

A noter que pour une même résistance à la compression, la résistance à la traction d'un béton avec **100%** de recyclés est en général plus faible (**de l'ordre de 11% en moyenne**), ainsi que le module élastique (**de l'ordre de 27%**) alors que le retrait et le fluage peuvent pratiquement doubler.

Ces propriétés devront être vérifiées lorsqu'elles sont critiques pour le projet, au moins au stade de l'étude de formulation.

III.6.2.1 Approche générale classique :

Les méthodes de formulation des bétons visent à déterminer la composition ayant le coût le plus faible, pour un jeu de propriétés visées. Ces méthodes comportent plus ou moins les mêmes étapes :

- définition d'un cahier des charges ;
- détermination du rapport E_{eff}/C pour atteindre la résistance attendue et/ou la durabilité

requis ;

- optimisation de la compacité du squelette granulaire pour réduire la demande en eau du mélange ;
- ajustement des dosages en pâte et en superplastifiant pour atteindre l'ouvrabilité désirée ;
- utilisation éventuelle d'un retardateur pour maintenir l'ouvrabilité.

En France, la méthode **Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1995]** est souvent utilisée pour la formulation des bétons. C'est une méthode essentiellement empirique, basée sur une courbe granulaire de référence. Cette courbe a été obtenue dans les années **1960**, à partir de l'analyse de mélanges granulaires de bétons de la région parisienne ayant donné satisfaction. L'estimation de la quantité d'eau et du point **Y** (ordonnée du point de brisure de la courbe granulaire de référence, voir **Figure III.6**) sont tabulées, mais les valeurs proposées dans la méthode d'origine doivent être souvent adaptées aux constituants locaux.

Dans les paragraphes qui suivent, chaque étape de cette méthode de formulation est détaillée, en expliquant les difficultés de son adaptation au cas des **GBR**, et en montrant la nécessité d'une méthode de formulation plus rationnelle.

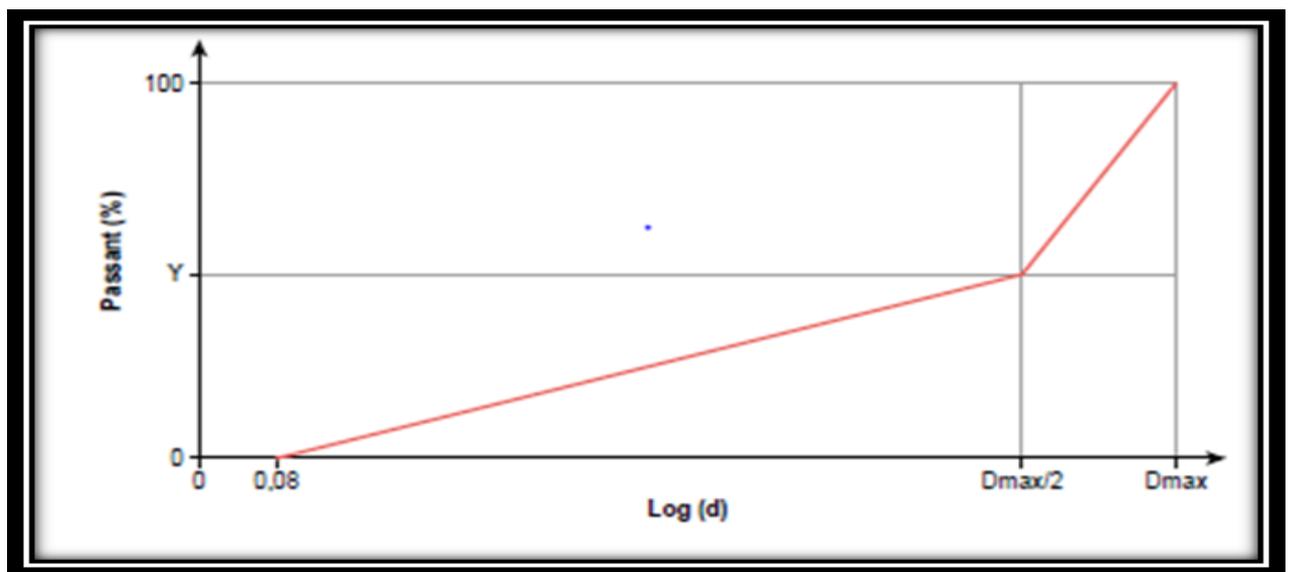


Figure (III.5) : Forme de la courbe granulaire de référence de la méthode Dreux-Gorisse

III.6.2.2 Définition du cahier des charges :

Les spécifications du cahier des charges traduisent a minima des objectifs en termes de maniabilité, de résistance à la compression à **28** jours et de durabilité.

Comme déjà signalé, lors de la formulation des mélanges de référence du Projet National RECYBETON ([Sedran, 2013] et annexes de ce livre), et dans l'étude spécifique sur le comportement à l'état frais des bétons, l'augmentation de la teneur en sable de **GBR** induit une perte importante d'affaissement au cours du temps, alors que cet effet est plus modéré quand des

gravillons de **GBR** sont utilisés. Il est donc important d'intégrer cet aspect durant le processus de formulation.

Afin d'obtenir sur chantier les valeurs de résistance à la compression requises, une marge supérieure à la résistance moyenne est prise en compte au moment de la formulation en laboratoire. Cette différence permet en principe de couvrir les fluctuations de qualité des constituants et les variations de composition du béton (**dosage en eau principalement**). Les GBR ont par nature des propriétés physico-mécaniques moins constantes que les granulats naturels. Cela peut induire des variations supplémentaires dans les propriétés des bétons de **GBR**, et cet aléa doit être pris en compte lors de la définition de la résistance à la compression moyenne visée. En première approximation, une augmentation de **50 %** de la marge de sécurité utilisée pour les bétons de granulats naturels peut être suggérée lorsque **100 %** de gravillons de GBR sont utilisés. Mais cela implique que la composition des GBR, selon la norme [NF EN 933-1, 2012], soit relativement stable et que le rapport E_{eff}/C soit bien maîtrisé, même si l'absorption d'eau du GBR fluctue.

La durabilité du béton peut être traitée selon une approche performancielle ou selon une approche prescriptive. En Europe, l'approche prescriptive est le plus souvent considérée, au regard de la norme **EN 206**. Elle définit des classes d'exposition et impose des prescriptions sur la composition du béton, selon l'agressivité de l'environnement (dont la teneur minimale en ciment et le rapport E_{eff}/C maximum). En effet, en raison de leur nature et de leurs propriétés spécifiques, les **GBR** peuvent avoir un fort impact sur la durabilité du béton de **GBR**.

La résistance à la compression et à la traction par fendage d'un béton de GBR diminue généralement avec le taux de substitution en GBR. La diminution peut typiquement atteindre **13 à 17 %** environ pour un taux de substitution de **100 %**, du moins si le **GBR** est constitué du même granulat naturel qu'il remplace. L'effet des **GBR** sur la résistance à la traction peut être neutre, négatif ou même positif, selon les propriétés respectives du **GBR** et du granulat naturel.

III.6.2.3: Evaluation du $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$:

Le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{equi}}$ peut être estimé à partir de la résistance à la compression visée à l'aide d'une formule de type Féret comme ci-dessous, où k_g traduit la qualité des granulats et **Rc28** est la résistance moyenne du ciment suivant la norme **NF EN 197-1**.

Pour des questions de durabilité, il doit également respecter les spécifications de la norme **NF EN 206/CN :2014**.

$$f_{\text{cm}} = k_g R_{\text{C28}} \left(\frac{1}{1+3,1 \frac{E_{\text{eff}}}{L_{\text{equi}}}} \right)^2 \quad (\text{III .25})$$

Cette formule peut s'appliquer à des bétons avec granulats recyclés en écrivant :

$$\mathbf{k}_g = V_{sn} \mathbf{k}_{g,sn} + V_{gn} \mathbf{k}_{g,sn} + V_{sr} \mathbf{k}_{g,sr} + V_{gr} \mathbf{k}_{g,gr} \quad (\text{III.26})$$

où les termes V représentent la proportion volumique (**par rapport au volume total de granulats**) du sable naturel (**sn**), du gravillon (**gn**) naturel, du sable recyclé (**sr**) et du gravillon recyclé (**gr**).

On calibre classiquement les termes $\mathbf{k}_{g,sn}$ et $\mathbf{k}_{g,gr}$ sur des mortiers et bétons dont on connaît la composition et ne contenant que des granulats naturels.

Par simplification, on considère souvent que $\mathbf{k}_{g,sn} = \mathbf{k}_{g,gr}$

Les termes $\mathbf{k}_{g,sr}$ et $\mathbf{k}_{g,gr}$ peuvent être calibrés de la même façon sur des mortiers et bétons ne contenant que des recyclés.

En l'absence de données expérimentales, on peut les estimer, en première approche, par les formules suivantes :

$$\mathbf{k}_{g,gr} = 4,42$$

$$\mathbf{k}_{g,gr} = -0,0952 \text{ MDE} + 8,3927 \quad (\text{III.27})$$

Avec

MDE: est le coefficient **Micro-Deval** décrit dans la norme **NF EN 1097-1**.

Seul le résultat de l'essai de résistance à la compression garantit la bonne valeur du rapport **E_{eff}/Le_{qui}** choisi.

III.6.2.4 Optimisation de la compacité :

Dans la méthode **Dreux-Gorisse**, la valeur de **Y** est calculée selon l'équation **(III.28)**. **X** est égale à $D_{\max}/2$. **D_{max}** est la taille maximale du granulat (**en mm**), **M_f** est le module de finesse de sable et **K** une valeur tabulée qui dépend de la nature du granulat (roulé ou concassé, sans distinguer le sable des gravillons), de la teneur en ciment et de l'énergie de vibration. Lorsque la courbe granulaire de référence est tracée, il est facile de trouver les proportions de sable et gravillons qui donnent le mélange qui s'en rapproche le plus.

$$Y = 50 - D_{\max} + K + (6M_f - 15) \quad (\text{III.28})$$

La méthode Dreux-Gorisse paraît suffisante pour définir la courbe granulaire optimisée d'un béton contenant **100 %** de **GBR**, du moment que le calcul de la valeur **Y** est fait en considérant des granulats concassés.

La méthode de formulation Baron-Lesage [**Baron-Lesage, 1976**] est comparable à celle de **Dreux-Gorisse**, Elle peut être appliquée telle qu'elle pour les bétons contenant des GBR, mais uniquement si le taux de substitution du sable et des gravillons est prédéfini, car la méthode ne permet d'optimiser que deux composants à la fois. Par conséquent, il serait nécessaire de répéter la procédure si le taux de recyclage était modifié, ce qui peut devenir rapidement rédhibitoire.

III.6.2.4 Optimisation du rapport G/S :

Cette optimisation peut se faire facilement en utilisant par exemple le modèle d'empilement compressible, puisque la spécificité des granulats recyclés est implicitement prise en compte dans la mesure de leur compacité.

On peut également, pour une estimation plus rapide (mais moins précise), utiliser une méthode courante comme celle de **Dreux-Gorisse**.

Dans ce cas, on évalue de façon classique la valeur Y_{Bn} de la méthode (**passant à $D_{max}/2$**) pour le béton de base avec des granulats naturels.

On détermine de la même façon Y_{Br} pour un béton à **100%** de recyclés en considérant que les granulats recyclés se comportent comme des granulats concassés.

Enfin, pour des taux de recyclages intermédiaires, on propose les variations suivantes :

➤ pas de variation de Y avec Γ_{gr} , la fraction massique de gravillon recyclé par rapport à la masse totale de gravillon;

$$Y = Y_{Bn} (1 - \Gamma_{sr}) + Y_{Br} \quad (\text{III .29})$$

où Γ_{sr} est la fraction massique (**entre 0 et 1**) de sable recyclé par rapport à la masse totale de sable.

III.6.2.5 Ajustement de la teneur en eau :

Il est d'autant plus nécessaire d'augmenter l'eau efficace lorsque l'on introduit des granulats recyclés que les granulats recyclés ont une compacité dégradée par rapport à celle des granulats naturels qu'ils remplacent.

Ainsi, lorsqu'un granulats concassé est remplacé par un granulats recyclé, la variation d'eau est moindre que lorsque c'est un granulats roulé qui est remplacé.

De même, l'effet du sable recyclé est plus marqué que celle du gravillon recyclé.

C'est ainsi que sur la base des données du **PN RECYBETON**, on propose les corrections d'eau suivantes par rapport à une formule en granulats naturels (**où ΔE_{eff} est exprimé en l/m^3**) :

$$\Delta E_{eff} = 8 \Gamma_{gr} + 10 \Gamma_{sr}^2, \text{ quand le sable et le gravillon naturels sont roulés .}$$

$$\Delta E_{eff} = 10 \Gamma_{sr}^2, \text{ quand le sable naturel est roulé et le gravillon naturel est concassé.}$$

$$\Delta E_{eff} = 8 \Gamma_{gr}, \text{ quand le sable naturel est concassé et le gravillon naturel est roulé.}$$

III.6.3 Optimisation du taux de recyclage :

III.6.3.1 Apport d'un modèle scientifique de formulation :

Le paragraphe précédent a montré qu'il était possible de formuler un béton de **GBR** en adaptant la méthode empirique de **Dreux-Gorisse**. Le processus est lourd, car il nécessite de

nombreux essais d'étalonnage sur gâchées de laboratoire, mais il peut néanmoins s'avérer suffisant pour concevoir un béton lorsque le taux de recyclage est fixé a priori.

Comme déjà mentionné, un outil scientifique de formulation des bétons a été développé et implémenté dans un logiciel [de Larrard et Sedran, 2007]. La méthode est basée sur une série d'équations permettant d'optimiser d'une part le squelette granulaire en utilisant le Modèle d'Empilement Compressible (MEC), et d'autre part de calculer un certain nombre de propriétés d'usage des bétons, comme l'affaissement, le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité.

Le Modèle d'Empilement Compressible s'applique aussi aux **GBR** [Dao, 2012 ; Dao *et al.*, 2014 ; Pepe, 2015 ; Sedran, 2013]. Le caractère frottant des **GBR** est pris en compte directement par le biais de la mesure de la compacité granulaire, qui est une donnée d'entrée du modèle. De même, les équations utilisées pour prédire l'affaissement ou la rhéologie du béton peuvent être utilisées directement car l'impact négatif des **GBR** sur ces propriétés est aussi pris en compte via la compacité. Pour prédire la résistance à la compression, à la traction par fendage ou le module d'élasticité du béton, les modèles restent valables, du moment que certaines propriétés (k_g , k_t , E_g) des granulats recyclés sont définies en amont. Cet ensemble d'équations est donc adapté à la formulation des bétons de **GBR**. Même s'il est toujours nécessaire de valider les mélanges en laboratoire, il rend la conception des bétons plus rapide et plus précise qu'avec les méthodes empiriques, car il prend en compte les propriétés réelles des constituants (notamment leur compacité). Il fournit également un dimensionnement plus complet du béton, puisqu'il ne prédit pas que l'affaissement et à la résistance à la compression, et il est conçu pour intégrer des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, fillers calcaires, etc.).

Ce type d'approche devient nécessaire lorsqu'il s'agit non seulement d'optimiser un béton ayant un taux de recyclage donné, mais surtout pour optimiser le taux de recyclage afin que le bénéfice, économique ou environnemental, soit maximisé. C'est d'ailleurs l'objectif fondateur du Projet National **RECYBETON**, et il est clair que cet optimum ne correspond pas nécessairement au maximum du recyclage puisque, par exemple, pour des taux élevés, l'augmentation induite de la teneur en ciment neutralise le gain sur les granulats naturels. Pour répondre à cette problématique avec la méthode empirique de **Dreux-Gorisse**, il faut multiplier les essais pour formuler des bétons avec des taux variables de **GBR**, ce qui est prohibitif. La méthode scientifique parvient très vite à la solution, à l'aide d'un « solveur ».

Par exemple, [Figure III.7] montre la consommation en ciment calculée avec la méthode scientifique pour différents taux de recyclage, pour un Dosage en ciment calculé pour différents taux volumiques de substitution en GBR, pour un béton d'affaissement 10 cm et de résistance à la compression 35 MPa (selon [Dao, 2012]). À noter que, dans ce cas, le remplacement des

gravillons naturels par des GBR diminue la demande en ciment béton d'affaissement **10 cm** et de résistance à la compression **35 MPa** [Dao, 2012]. Les calculs fournissent de la même façon les quantités nécessaires de chaque constituant. Il devient alors facile, en intégrant le coût financier ou environnemental de chaque constituant, de trouver le dosage optimal en granulats recyclés. Ainsi, si les granulats naturels sont localement rares ou chers, la tendance sera de mettre plus de **GBR**. De même, la teneur optimale en **GBR** sera influencée par la nature des granulats naturels qu'il remplace. Si les granulats naturels sont localement de moindre qualité (**faible compacité et/ ou moindres propriétés mécaniques**), l'augmentation de la quantité de ciment liée à présence des **GBR** sera minimisée et le taux de recyclage optimum sera plus important.

En conclusion, l'utilisation d'un modèle scientifique, tel que celui présenté dans ce chapitre, permet explicitement de prendre en compte les conditions locales afin d'optimiser le recyclage des **GBR** dans le béton. [T. Sedran¹, 2018]

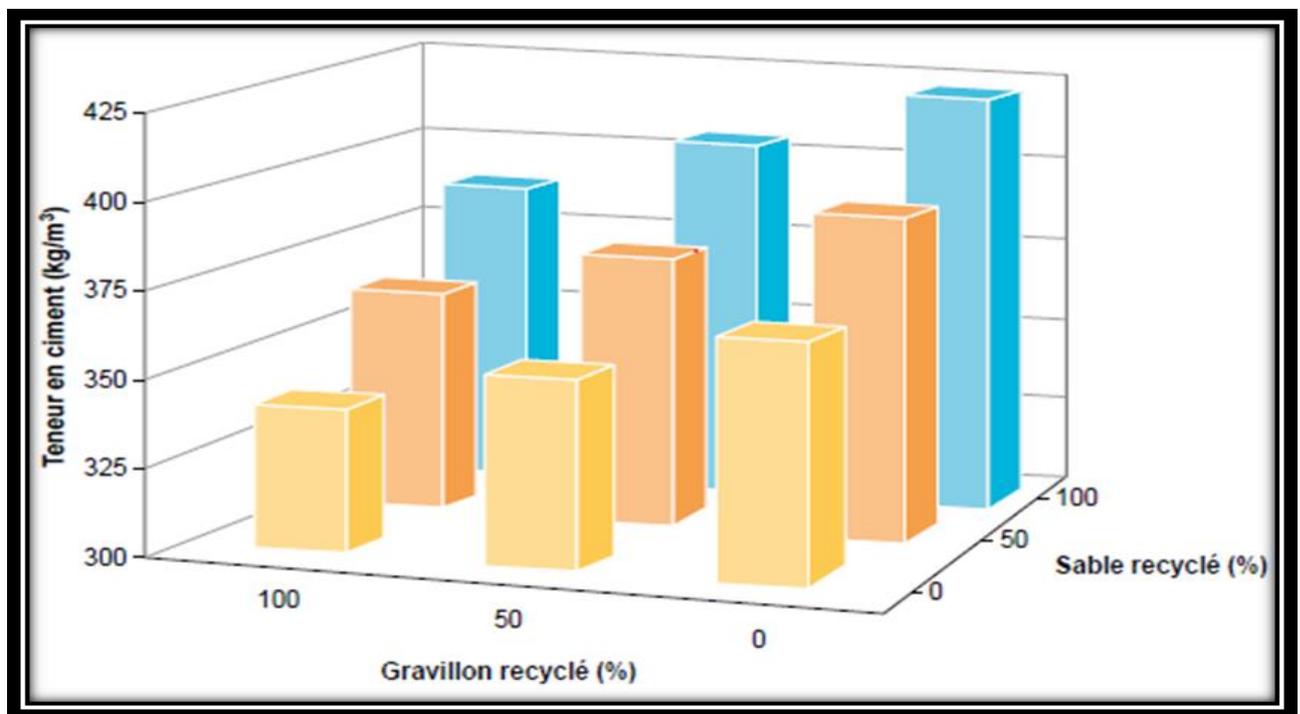


Figure (III.6) : Dosage en ciment calculé pour différents taux volumiques de substitution en GBR

III.7 Conclusion :

Pour formuler un béton c'est-à-dire la mise au point de la composition qui se fait de façon expérimentale en se basant sur les études graphiques, parmi ces méthodes on peut citer ; la méthode de **Faury**, le but de cette méthode est basé sur la recherche d'une compacité maximale du mélange.

La détermination de la composition du mélange de béton n'est qu'une première approche. Des essais qui permettront de corriger expérimentalement la composition calculé comme : essais de l'ouvrabilité « L'affaissement au cône d'Abrams ».

Aussi en a vu que la majorité des méthodes sont basés sur les analyses granulométriques pour les composons granulaire.

Dans la formulation du béton il faut choisir une méthode simple et pratique qui répond à l'exigence et à la condition réelle du chantier.

Quelle que soit la méthode de la formulation utilisée, la composition d'un mélange calculé ne peut correspondre parfaitement à un béton désiré, puisque il n'est pas possible de déterminé avec précision ces composants grâce aux qualités des constituants qui influent sur la qualité du béton : la forme, angularité, porosité, type de granulats et la classe vrais du ciment.

l'expérience montre qu'il est possible de formuler des bétons avec des taux élevés de **GBR**, tout en gardant des dosages en ciment raisonnables , La faible compacité des **GBR**, en particulier celle des sables, liée au processus de concassage inhérent à leur mode de production, et leur caractère frottant hérité de la pâte de ciment résiduelle, conduit à augmenter la teneur en eau efficace des bétons de **GBR**. Le dosage en eau totale augmente donc en raison de l'augmentation de l'eau efficace, mais en grande partie aussi pour compenser l'absorption d'eau des **GBR**, qui est généralement beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels (surtout pour les sables). Il est important de faire la différence entre ces deux effets et d'identifier clairement la teneur en eau efficace pour contrôler la formulation du béton. Cela est vrai pour les bétons de granulats naturels, mais plus encore pour les bétons de **GBR** .

Cependant, l'objectif principal n'est généralement pas de formuler un béton avec un taux de recyclage donné, mais plutôt d'optimiser le taux de recyclage afin que le bénéfice, qu'il soit économique ou environnemental, soit maximisé. C'est l'objectif fondateur du Projet National **RECYBETON**, et il est clair que cet optimum ne correspond pas nécessairement au maximum du recyclage puisque, par exemple, pour des taux élevés, l'augmentation nécessaire de la quantité de ciment, pour garantir la durabilité, contrebalance le gain sur les granulats naturels.

Dans un processus de formulation, il y a toujours un aspect durabilité. C'est aujourd'hui la principale raison qui empêche les forts taux de recyclage, en raison d'un manque de recul à long terme. Une approche prescriptive (normative) peut être utilisée pour assurer cette durabilité, mais elle limite le taux de recyclage. [T. Sedran1 ,2018]

CHAPITRE IV
ÉSSAIS SUR BÉTONS

IV ÉSSAIS SUR BÉTONS

IV.1 Introduction :

Le béton est un mélange de plusieurs composants (**ciment, sable, gravier, eau**) très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes [Georges Dreux, Jean Festa, 1998]. Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants.

Les caractéristiques essentielles des différents constituants entrant dans la composition du béton, la connaissance de ces caractéristiques est primordiale à toute recherche ou étude il faut les déterminer, puisque chacune de ces caractéristiques peut influencer sur les résultats de l'étude. C'est pour cette raison que nous allons procéder à la caractérisation de chaque constituant de notre béton.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents essais sur les constituants du béton recyclé et du béton ordinaire ainsi que les essais sur les bétons réalisés (essai de compression).

On a tenté dans cette partie d'indiquer un cheminement permettant d'élaborer une formulation en utilisant les matériaux locaux ce cheminement passe par deux phases :

Le choix des constituants et leur dosage, c'est-à-dire les aspects qualitatifs puis quantitatifs.

IV.2 Les matériaux utilisés pour réaliser les essais:

a) Le ciment :

Le ciment utilisé dans la confection du béton ordinaire et le béton recyclé est un **ciment portland CPJ** de classe **CEM II-42,5** **GUELLET** sidi Saad, El-Beida, Wilaya de **LAGHWAT(AWTED)**



Figure (IV.1) : Ciment AWTED

b) Le sable :

Le sable utilisé dans la confection du béton ordinaire et le béton recyclé est le sable naturel **GTF** de **ELGUELTA**



Figure (IV.2) : sable GTF

c) Le gravier :

- Un gravier prélevé de la station de bétonnage **GBS** provenant de la carrière **RECHAIGA** (voire ANNEXE C) ;
- Un gravier **recyclé**.



Figure (IV.3) : Gravier (8/15)



Figure (IV.4) : Gravier (3/8)



Figure (IV.5) : Gravier R(3/8)



Figure (IV.6) : Gravier R(8/15)

d) L'eau de gâchage :

L'eau utilisée lors de la fabrication des bétons est l'eau distribuée par le réseau du service public (eau du robinet).

IV.3 Liste des essais réalisés :

Divers essais ont été réalisés pour apprécier l'intérêt de la qualité des constituants dans la confection du béton ordinaire ou béton recyclé. De même, des essais de compression pour déterminer et comparer la résistance caractéristique du béton recyclé, on a commencé par :

- Analyse granulométrique par tamisage (gravier GBS de RECHAIGA «3/8 et 8/15» et gravier recyclé) (NA 2607) 1992-08-01 (Sable nature GTF de EL-GUELTA (NA 2607) 1992-08-01 ;
- Mesure de coefficient d'aplatissement (gravier GBS de RECHAIGA) (NA 256/1990) ;
- Equivalent de sable (NEP 18-598) ;
- Mesure des masses volumiques apparentes de «GN», «sable GTF», «ciment». (NF EN 1097-3) ;
- Mesure des masses volumiques réelle de «GR» ;
- Mesure des masses volumiques absolues «GN», «GR» (NA 255/1990) ;
- Propreté superficielle (NEP 18-591) ;
- Essai los – Angeles (NA 485/1990) ;
- Essai Micro-Deval (NA 457/1990) ;
- Poids spécifiques des grains solides (NA 255/1990) ;
- Essai d'évaluation des carbonates (sable et gravier GBS 3/8 et 8/15) (NA -2789) ;
- Essai au bleu de méthylène (P18.592) ;
- L'affaissement en cône d'Abrams (NF P 18-451) ;
- La résistance mécanique (la compression) (NF EN 12390-3)

IV.3.1 Analyse Granulométrique par Tamisage du sable et gravier :

a) But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à **63 mm**, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

b) Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés l'un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du

haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

c) Préparation des échantillons :

L'objectif de la préparation de l'échantillon avant analyse est d'obtenir un échantillon représentatif dans lequel la concentration en polluants est aussi proche que celle présente dans le sol. C'est souvent l'étape la plus longue et celle qui génère le plus de sources d'erreur dans la chaîne analytique.

Elle comprend :

- **Le séchage :**

À une température compatible avec les caractéristiques des composants recherchés. Pour les métaux, le séchage des échantillons de sol est le plus souvent réalisé à l'air libre, puis à l'étuve à une température inférieure à **40°C**.

- **Remarque pour l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage des granulats recyclés :**

Cet essai a été réalisé sur les différents lots par tamisage par voie sèche **sans lavage**, les granulats recyclés contenant du mortier tout autour du granulats parent ne sont pas lavés avant l'essai, comme les fines seront conservées dans la formulation des bétons et des mortiers, le lavage engendrerait leur évacuation. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs interdit une hydratation préalable.

d) Matériel nécessaire :

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle.

Pour les sables, on utilisera les tamis de modules **20, 23, 26, 39, 32, 35, 38**. Pour les matériaux plus grossiers, tous les tamis au-delà du module 38 seront utilisés.

Et pour les graviers, on utilisera les tamis de modules **38, 39, 40, 41, 42, 43, 44**.

Les passoires, qui comportent des trous ronds percés dans une tôle, ne sont plus utilisées actuellement.

Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.

La dimension nominale de tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée.

Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison $\sqrt{10}$, depuis le tamis **0.08 mm** jusqu'au tamis **80 mm**. Pour des ouvertures inférieures à **0.08 mm**, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée et l'on peut procéder par sédimentométrie.

L'existence antérieure de passoires (trous ronds) a conduit à une double classification de tamis et des passoires, tout en conservant pour chaque famille d'appareil la même progression géométrique des ouvertures.

Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents ont été désignés par un même numéro de module. Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes :

Tableau (IV. 1) : Dimensions nominales des tamis

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.40	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.0	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		



Série des tamis pour l'analyse du sable



Série des tamis pour l'analyse du gravier



Un fond



Un récipient



Une balance



Une cuillère

Figure (IV.7) : Matériels nécessaires pour l'analyse granulométrique

A la fin des essais on doit :

- Calculer le pourcentage des tamisât cumulées pour chaque tamis ;
- Tracer la courbe granulométrique des différents échantillons des granulats analysés et donner la nature des courbes (**continues ou discontinues**) ;
- Déterminer le module de finesse du sable, et on déduit sa nature (**fin, moyen ou grossier**).

IV.3.1.1 Module de finesse :

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**). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules **23, 26, 29, 32, 35, 38**. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

a) Mode opératoire :

- sécher d'abord les granulats prélevés de manière progressive et à température d'environ **105°C** ;
- Emboîter les tamis utilisés les uns sur les autres, les dimensions croissant de bas en haut. Mettre au-dessous un récipient à fond plein pour recueillir les éléments fins, et au-dessus un couvercle pour éviter la dispersion des poussières ;
- La charge placée sur les tamis doit être d'autant plus faible que les couvertures sont plus petites au besoin, la quantité à tamiser sera traitée en **2** ou **3 fois**, ou d'avantage ;
- Verser le granulat sur le tamis supérieur, mettre le couvercle, et appliquer à l'ensemble une série de secousses ;
- Le granulat sera ainsi réparti sur les différents tamis, mais cette répartition ne sera pas complète, et il faudra reprendre chaque tamis séparément ;
- Prendre le tamis supérieur seul avec, avec son contenu. Au-dessus d'un plateau propre agiter ce tamis horizontalement, en le tenant d'une main et on le frappant contre l'autre main ;
- Le refus est pesé à **0.1 %** près, et le tamisât versé sur le tamis suivant, avec ce qui s'y trouve déjà ;
- De même avec le **2 tamis**, et le nouveau refus est placé sur la balance avec le premier ; le nouveau tamisât est versé sur le **3 tamis**. On pèse donc les refus cumulés ;
- De même jusqu'au dernier tamis. Le dernier tamisât (récipient à fond plein) est ajouté sur la balance aux refus précédents. On doit retrouver le poids pesé au départ, aux pertes près.

IV.3.2 Mesure du Coefficient d'aplatissement des granulats :

a) But de l'essai :

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser un béton très compact, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

b) Matériel nécessaire :

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, pour le même échantillon de granulat ;

- Une série de tamis normalisés à maille ;
- Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées.



Une balance



Une série de tamis normalisé à maille

Figure (IV.8) : Matériels nécessaires pour la détermination du coefficient d'aplatissement

c) Principe de l'essai :

L'essai consiste en une double opération de tamisage :

➤ Le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D=1,25d$;

➤ Les classes de grosseurs G ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique ;

➤ Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à une sur une grille à fentes parallèles d'écartement $e=d/1,58$ (ce qui correspond aussi à : $E=d/2$) ;

➤ On peut donc associer à chaque classe granulaire d/D un tamis fente correspondant de largeur E , ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i partiels. Il est ensuite possible de déterminer un coefficient d'aplatissement global A ;

La correspondance entre classes granulaires d/D et grilles à fentes de largeur E est donnée dans le tableau ;

Tableau IV.2 : Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées

Classe granulaires d/D (mm).	31,5/40	25/31,5	20/25	16/20	12,5/16	10/12	8/10	6,3/8	5/6,3	4/5
Ecartement E des grilles à fentes (mm)	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	3,15	2,5

d) Mode opératoire :

On opère, comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon représentatif de masse $M = 0,2D$;

D : étant le diamètre maximum des granulats en millimètres ;

M la masse de l'échantillon, exprimée en **kg**.

➤ L'échantillon est tamisé sur un tamis de **4 mm** d'ouverture et le refus de masse M_0 , qui est pesé au gramme près, est utilisé pour la détermination de A ;

➤ Le tamisage est effectué de telle manière que l'essai **IV.3.1** et chaque fraction d/D est pesée au gramme près, puis tamisée sur le tamis à fentes d'écartement E correspondant ;

➤ Le passant à travers chaque grille est pesé au gramme près.

e) Expression du coefficient d'aplatissement A :

Pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel :

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

M_{gi} = masse de la classe granulaire d/D ;

M_{ei} = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire:

$$A = \frac{\sum_1^i M_{ei}}{\sum_1^i M_{gi}} \quad (\text{IV.2})$$

Il faut que la perte de matériaux pendant le tamisage soit telle que $\sum_j^i M_{gi} \geq 0,98M_0$

M_0 : étant la masse de l'échantillon d/D écrêté de sa fraction 0/0,4 mm.

IV.3.3 Détermination de la masse volumique absolue d'un gravier:

a) But de l'essai:

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

b) Définition :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 .

La masse volumique absolue moyenne des granulats silico-calcaires est prise égale, en première approximation, à $2,65 t/m^3$ ou $2,65 g/cm^3$.



Balance



Masse sou d'eau



Paneau
suspendu



Tamis de 4 mm

Figure (IV.9) : Matériels nécessaires pour l'essai de la masse volumique absolu

c) Le mode opératoire :

- Echantillon prélevé ;
- Prendre une masse entre $200 < M < 600$ (Ms) ;
- Peser la masse sèche de l'échantillon pour le passer dans un tamis de **4mm** ;

- Immerger l'échantillon dans d'eau ;
- Noter la masse dans l'eau **Ma**.

La masse volumique absolue est noter par :

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{M_s - M_a} \quad (IV.3)$$

IV.3.4 Mesure de la propreté des granulats (l'essai d'équivalent de sable):

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que l'essai au bleu de méthylène, d'équivalent de sable à **10 %** de fines etc., mais dans cet essai, on va présenter seulement l'essai d'équivalent de sable.

a) But de l'essai :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les floccules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

b) Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction **0/2 mm** du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de **20 minutes**, on mesure les éléments suivants :

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

On en déduit l'équivalent de sable qui permet de déterminer le degré de propreté du sable, par convention:

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100 \quad (IV.4)$$

Selon que la hauteur **h₂** est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston. On détermine:

- ESV** (équivalent de sable visuel) ;
- ES** (équivalent de sable au piston) .

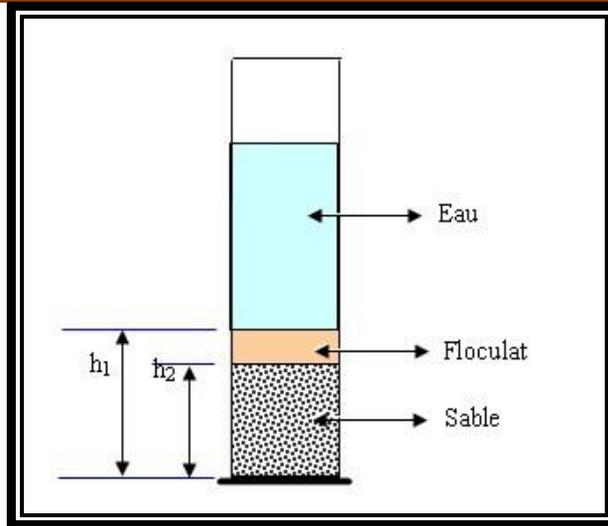


Figure (IV.10) : Définition de l'équivalent de sable



un piston taré de 1kg



2 éprouvettes cylindriques
avec 2 traits de repère



un flacon de 5 litres



une règle métallique
graduée



une machine agitatrice

Figure (IV.11) : Matériels pour l'essai de l'équivalent de sable

Nota :

Le flacon de **5 litres** muni d'un siphon (**placé à 1 mètre au-dessus de la table de travail**) contenant une solution lavant à base de solution concentrée (**chlorure de calcium + glycérine + solution aqueuse de formaldéhyde**).

IV.3.5 Essai au bleu de mythylene :

a) But de l'essai :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments. On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par **100 g** de fines.

b) Principe de l'essai :

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai.

On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre. Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

c) Appareillages :

Appareillage d'usage courant :

- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de **0,1 %** ;
- Chronomètre au **1/10 s** ;
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau ;
- Tamis de **0,08 mm** et **0,5 mm** ayant un diamètre de **150 mm** ;
- Pissette de **500 ml** ;
- Bécher plastique de 3 l ayant un diamètre intérieur de **155 mm**.

d) Appareillage spécifique :

- Une burette de capacité **100 ml** ou **50 ml** et de graduation **1/10 ml** ou **1/5 ml** ou une micropipette de **5 ml** et une de **2 ml** ;
- Papier filtre: quantitatif et sans cendre (**<0,010**); grammage: **95g/m²**; épaisseur: **0,20 mm**; vitesse de filtration **75** ; rétention : **8 micromètres** ;
- Une baguette de verre : longueur **300 mm** ; diamètre **8 mm** ;
- Un agitateur à ailettes, tournant entre **400** et **700 tr/min**. Le diamètre des ailettes est compris entre **70 mm** et **80 mm** ;
- Un bac carré en matière plastique de **150 mm** de côté et **60 mm** de hauteur.



Appareillage



Papier filtre

Figure (IV.12) : Matériels pour l'essai de bleu de méthylène

e) Produits utilisés :

- Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à **10 g/l ± 0,1 g/l** ;
- La durée maximale d'utilisation de la solution est de un mois ;
- Elle doit être conservée à l'abri de la lumière ;
- Eau déminéralisée ou distillée ;
- Kaolinite séchée à **105 °C**.



Figure (IV.13): Solution de bleu de méthylène

f) Préparation de l'échantillon pour l'essai :

- Connaissant les teneurs en eau **w** et en fines **f**, la masse de sable **0-2 mm**, à sa teneur en eau en l'état, qu'il faut laver pour en extraire les fines est donnée par la formule :

$$M_h = f'(w + 100) \quad (IV.5)$$

- ajustée au gramme près ; **f'** : représentant la quantité de fines, en grammes, qu'il est souhaitable d'avoir dans la prise d'essai (environ **30 g**) ;
- La masse de sable **M_h** ne doit pas dépasser **300 g**.

g) Exécution de l'essai :

- Mise en place de la prise d'essai Mettre **500 ml** d'eau distillée ou déminéralisée dans la pissette. Placer le sable dans le bac plastique, ajouter à l'aide de la pissette environ **100 ml** d'eau déminéralisée ou distillée pour recouvrir le matériau. Bien agiter l'ensemble avec la spatule ;
- Verser en plusieurs fois le contenu du bac sur le tamis de **0,08 mm** surmonté du tamis de décharge de **0,5 mm**, l'ensemble étant placé au-dessus du bécher de **3 l** ;
- Rincer, pour faire passer la totalité du matériau restant dans le bac avec l'eau qui reste dans la pissette ;
- Sécher et peser les refus des deux tamis, soit **M** cette masse ;
- La masse réelle **q** de fines soumises à l'essai est donnée par la formule :

$$q = \left(\frac{100M_h}{100+W} \right) - M \quad (\text{IV.6})$$

- Après avoir isolé les fines ajoutées dans le bécher **30 g** de kaolinite de valeur de bleu connue ;
- Le volume **v'**, exprimé en **ml**, de solution de bleu adsorbée par cette kaolinite est donné par la formule :

$$v' = 30VB_{\text{taK}} \quad (\text{IV.7})$$

- L'ensemble eau + fines + kaolinite, est soumis à une agitation de cinq minutes à **600 tr/min**, puis permanente à **400 tr/min**, pendant toute la durée de l'essai à l'aide de l'agitateur, les ailettes étant situées à **1 cm** au-dessus du fond du récipient ;
- Détermination par dosage de la quantité de bleu adsorbée.

h) Définition du test à la tâche :

- Après chaque injection de bleu, ce test consiste à prélever, à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore ;
- La goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre **8 et 12 mm** ;
- Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante. Il est dit négatif si l'auréole est incolore.

i) Dosage :

- À l'aide de la burette injecter **v'** millilitres de solution de bleu dans le récipient ;
- Après **2 min**, ajouter une dose de **5 ml** de solution de bleu, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre ;
- On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, sans rien ajouter, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée, tout en effectuant des tests de minute en minute ;

- Si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième tache on procède à de nouvelles additions élémentaires de bleu de **2 ml** ;
- Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute ;
- Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives : le dosage est alors considéré comme terminé ;
- On procède au nettoyage de l'appareillage dès que l'on a terminé les essais, les dépôts de bleu se détachant facilement quand ils sont récents ;
- Le matériel se nettoie très bien à l'eau. Si l'on a utilisé des produits détergents, on doit terminer par un rinçage abondant à l'eau.

j) Expression des résultats :

➤ Valeur de bleu :

La valeur de bleu des fines **VB_{ta}** exprimée en grammes de bleu pour **100 g** de fines est donnée par la formule :

$$VB_{ta} = \frac{V_1 - V'}{q} \quad (IV.8)$$

V₁ : étant le volume final de solution injectée, en ml ;

V' : volume de solution de bleu kaolinite ;

q : masse réelle de fines soumises à l'essai.

Contrôle de conformité par rapport à une spécification donnée :

La spécification est exprimée en valeur de bleu pour **100 g** de fines, soit **s** cette valeur. Le volume de la solution de bleu à injecter en une seule fois est alors :

$$V_2 = q_s + v' \quad (IV.9)$$

Le test de la tâche est effectué après huit minutes d'agitation. S'il est positif, le sable est conforme à la spécification ; s'il est négatif, on ajoute un volume de solution de bleu égal à :

$$\frac{q_s}{10} \quad (IV.10)$$

Si le test est toujours négatif, après cinq minutes, on effectue le dosage conformément. Si le test est positif, on considère que le sable est conforme à la spécification.

➤ Précision :

La répétabilité a été mesurée sur des niveaux de valeur **0,3** à **1,5**.

IV.3.6 Essai de l'évaluation des carbonates :

a) Objet :

L'essai a pour objet de mesurer la teneur en carbonate (**CaCO₃**) contenue dans un matériau.

b) Principe :

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique (HCl) en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.



Eprouvette gradué



Spatule + récipient



Un flacon



Une burette gradué



Une balance



Acide chlorhydrique

Figure (IV.14) : Matériels nécessaires pour l'essai de l'évaluation des carbonates

c) Mode opératoire :

- Prendre un échantillon de **50g** environ ;
- Après un séchage préalable, le matériau est broyé dans un mortier afin d'obtenir une poudre passant en totalité au tamis d'ouverture **0.4mm** ;
- Après homogénéisation, prélever deux prises d'essai de masses identiques conformes au tableau suivant :

Tableau (IV.3) : le pourcentage carbonaté présumé et sa masse de la prise d'essai

%Carbonaté présumé	<4	4 à 9	10à19	20 à 39	40 à 70	≥80
Masse de la prise d'essais (g)	10	5	2.5	1	0.5	0.25

- En absence d'information sur la teneur en carbonate présumée, choisir des prises d'essai d'une masse d'environ **1 g** ;
- Introduire la prise d'essai, une fois pesée (**m**) dans le flacon à réaction propre et sec ;
- Remplir le flacon et la burette d'eau distillée. Faire coïncider le niveau bas du flacon avec le zéro en partie haute de la burette ;
- Introduire environ **10 cm³** d'acide chlorhydrique concentré dans un tube à essai placé dans le

flacon à réaction ;

- Ouvrir le robinet. Obturer le flacon à réaction au moyen de son bouchon ;
- Régler le niveau du flacon sur le zéro de la burette ;
- Fermer le robinet et mettre en contact l'acide chlorhydrique avec le matériau. Au fur et à mesure que le dégagement gazeux exerce une pression sur l'eau de la burette, faire coïncider, en déplaçant le flacon, le niveau dans celui-ci et la burette ;
- Agiter le flacon d'essai jusqu'à ce que le niveau d'eau ne varie plus. Attendre **5 mn** environ et placer celui-ci dans le bac d'eau de refroidissement à la température ambiante ;
- Après l'équilibre de la température, amener les niveaux dans le même plan horizontal et lire le volume **V_b** correspondant sur la burette ;
- Noter la température **θ_b** de la salle d'essai et la pression atmosphérique (**p**). Dans le cas où l'on veut s'affranchir de la mesure de la pression atmosphérique, le processus d'essai décrit ci-dessus est appliqué à un échantillon témoin de carbonate de calcium pur (**de masse m_t = 0.25g**). Noter, après exécution du processus, le volume du gaz dégagé **V_t** et la température de la salle **θ_t**.

d) Expression des résultats :

La teneur en carbonate est calculée par:

- Cas de l'échantillon témoin :

$$\frac{m_t V_b (\theta_t + 273)}{m V_t (\theta_t + 273)} \quad (IV.11)$$

- Cas de la pression atmosphérique :

$$\frac{1,2 \cdot V_b \cdot p}{m (\theta_b + 273)} \quad (IV.12)$$

- **p** en **K pascal**.
- **m** et **m_t** en **g**.
- **θ_b** et **θ_t** en **°C**.
- **V_b** et **V_t** en **cm³**.
-

IV.3.7 L'essai de poids spécifique des grains solides :

a) But de l'essai

La détermination du poids spécifique des grains solide consiste à mesurer le volume propre des grains à l'exclusion des vides à calculer le rapport entre leurs poids et leur volume.

b) Domaine d'application :

Il est réservé aux sols dont les plus gros grains sont maximum de la dimension de sable fin et présentant une cohésion déjà important

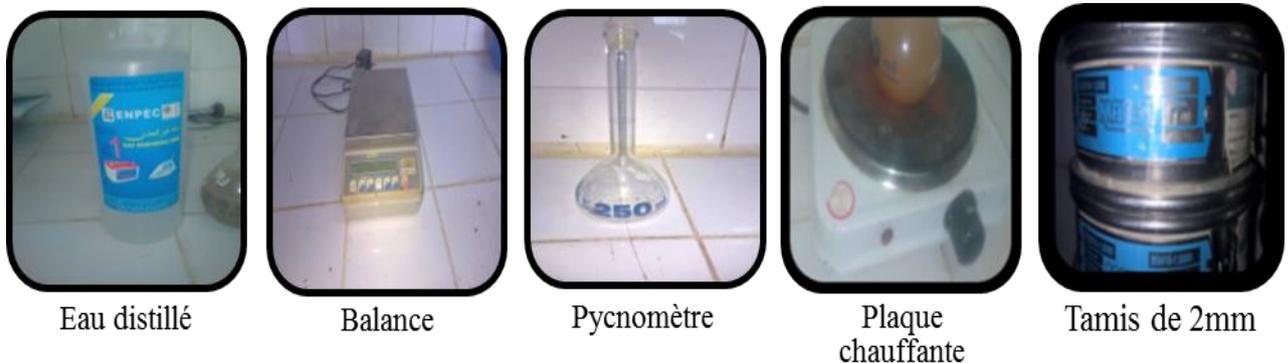


Figure (IV.15) : Matériel nécessaire pour l'essai de poids spécifique des grains solide

c) Procédure :

Il faut préparer quatre (4) pesées :

- pesée du pycnomètre vide : m_1 ;
- pesée du pycnomètre contenant le sol préalablement séché : m_2 ;
- le pycnomètre contenant le sol et remplie d'eau jusqu'à la graduation 250 cm^3 , et le placer le tous sur la plaque chauffante jusqu'à l'ébullition, le refroidir, puis peser le pycnomètre de nouveau : m_3 ;
- pesée du pycnomètre contenant uniquement l'eau jusqu'à la graduation 250 cm^3 : m_4 .

IV.3.8 Essais los Angeles :**a) Définition et But de l'essai :**

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.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

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.

b) Principe :

Cet essai permet de savoir la dureté d'un matériau en calculant un coefficient de los Angeles. Mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats grasse à une charge de boulets.

L'essai consiste à mesurer la masse **m** d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre **4** et **50 mm**) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisée, dans le cylindre de la machine los Angeles en **500** rotations et **M** la masse du matériau soumis à l'essai.

La résistance à la fragmentation par chocs (ou le coefficient los Angeles **LA**) s'exprime par :

$$LA = \frac{100m}{M} \quad (IV.13)$$

c) Charge de boulets :

Ce sont des boulets sphériques de diamètre **47mm** en acier, de masse comprise entre **420** et **470g** (ecole des mines douai)

d) Matériel utilisé :

➤ **La machine Los Angeles comporte :**

- un cylindre creux en acier de **12 mm ± 0,5 mm** d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de **711 mm ± 1 mm** et une longueur intérieure de **508 mm ± 1 mm**. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être Horizontal ;
- une ouverture de **150mm** de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon. Pendant l'essai, cette ouverture est obturée d'une façon hermétique aux poussières par un couvercle amovible tel que la surface intérieure reste bien cylindrique ;

Cette dernière est coupée par une tablette en saillie placée à une distance de **40 cm** du rebord du couvercle, distance mesurée le long du cylindre dans le sens de la marche. Cette tablette démontable, en acier dur est de section rectangulaire (longueur égale à celle du cylindre, largeur de **90 mm ± 0,5 mm**, épaisseur de **25 mm**). Elle repose, suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales ;

Elle doit avoir des arêtes vives,

- la charge est constituée par des boulets sphériques de **47 mm** de diamètre environ et pesant **420 et 445 g**. Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière ;
- un moteur d'au moins **0,75 kW**, assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre **30** et **33** tours/minute ;
- un bac destiné à recueillir les matériaux après essai ;
- un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre le tour voulu ;
- un jeu de tamis de **1,6 – 4 – 6,3 – 10 – 14 mm**. Leur diamètre ne devra pas être inférieur

250 mm ;

- une balance précise au gramme, de portée au moins égale à **10 kg** ;
- une étuve à **105 °c** ;
- des bacs et des truelles ;
- des bacs d'environ **40 x 30 x 5 cm**, à perforation inférieure à 1,6 mm.



Une série de tamis



Balance



Appareil de los Angles



Un moteur



Des bolets



Une étuve

Figure (IV.16) : Matériels nécessaires pour l'essai Los Angles

e) Préparation du matériau :

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des six classes granulaires type, lavé et séché à l'étuve à **105°C** jusqu'à poids constant (**5 heures au minimum**).

La prise d'essai sera de **5 kg**. La préparer de la façon suivante :

- si deux essais sont envisagés, préparer, à partir de **15 kg**, deux échantillons identiques par quartage à sec ;
- sinon, tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Recueillir dans un bac **5100 g** environ du matériau tamisé. Ce poids supplémentaire de **100 g** servant à compenser celui des poussières ou de la gangue terreuse. Laver cette quantité recueillie sous un jet d'eau et la remuer à la truelle jusqu'à ce que l'eau soit claire. Après lavage, verser le matériau dans un bac perforé et égoutter quelques instants.

Sécher l'ensemble à l'étuve à **105 °c**, jusqu'à poids constant. Retirer le bac perforé de l'étuve et laisser refroidir. Enlever l'excédent de matériau pour ajuster le poids à **P= 5 kg ± 2 g**, exigé pour l'essai.

f) Mode opératoire :

Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie (**Tableau IV.4**).

Tableau (IV.4) : La charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie

Classe granulaire (mm)	Fraction	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids de fractions (g)
4-6.3		7	3080±20	5000±2
6.3-10		9	3960±25	5000±2
10-14		11	4840±25	5000±2
10-25	10-16	11	4840±25	3000
	16-25	11	4840±25	2000
16-31.5	16-25	12	5280±25	3000
	25-31.5	12	5280±25	2000
25-50	25-40	12	5280±25	3000
	40-50	12	5280±25	2000

Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine **500** rotations à une vitesse régulière comprise entre **30** et **35 tr/mn** pour toutes les classes à l'exception de la classe **25–50 mm** où le nombre de rotations est de **1000**. Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat. Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de **1,6 mm** ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

Laver le refus à **1,6 mm** dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.

Peser ce refus une fois séché.

Soit **P'** le résultat de la pesée

$$\rho = P - P' = 5000 - P' \quad (\text{IV.14})$$

$$\text{CLA} = \frac{100 \times (5000 - P')}{5000} \quad (\text{IV.15})$$

Le résultat sera arrondi à l'unité.

Tableau (IV.5) : Nombre de rotation des boulets correspondant à chaque classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Nombres de boulets	Nombres de rotation
4-6.3	7	500
6.3-10	9	500
10-14	11	500
10-25	11	500
16-31.5	12	500
25-50	12	1000

IV.3.9 Essais micro Deval :

a) But de l'essai :

L'essai a pour objet de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats.

b) Principe :

L'essai s'effectue sur les gravillons entre **4** et **14mm** et entre **25** et **50mm**. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à **1.6mm** produite par frottements réciproques, dans un cylindre en rotation, en présence des charges abrasives (**par contact avec billes et de l'eau**).

La résistance à l'usure est mesurer par la quantité d'éléments inférieurs à **1.6mm** produite par frottement réciproques, appelé coefficient micro Deval en présence de l'eau (**MDE**), définie par :
MDE = Masse des éléments inférieurs à 1.6mm produits au cours de l'essai x 100/ Masse du matériau soumis à l'essai .



Figure (IV.17) : Matériels nécessaires pour l'essai Micro Deval

c) Mode opératoire :

- Choisir la classe granulaire qui va être soumise à l'essai parmi les quatre classes suivantes : **4-6.3 mm, 6.3-10 mm, 10-14 mm et 25-50 mm**. La classe **25-50 mm** doit contenir **60%** de **25 40mm** ;
- Prendre un échantillon de masse égale au moins à **2 Kg** si la classe choisie est comprise entre **4 et 14 mm**, et **40 Kg** si la classe choisie est **25-50 mm** ;
- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à **105°C** ;
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie ;
- La masse **M** de l'échantillon pour essai (**5000g ± 2g** pour les classes entre **4 et 14 mm**, et **10000g ± 20g** pour la classe **25-50 mm**) ;
- Introduire dans le cylindre d'essai la charge abrasive, puis la quantité du matériau préparé et de l'eau et en suite mettre en rotation l'ensemble à une vitesse de **100tr/mn**, ceci conformément aux indications du tableau suivant :

Tableau (IV.6) Caractéristique de l'essai MDE pour chaque classe granulaire

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)	Quantité d'eau(l)	Durée de rotation (tours par h)
4-6.3	2000±5	2.5	12000 tr ou 2h
6.3-10	4000±5	2.5	12000 tr ou 2h
10-14	5000±5	2.5	12000tr ou 2h
25-50	10000±5	2.5	14000tr ou 2h 20mm

Une fois le nombre de rotations est terminé, laver le matériau, après avoir recueilli la charge Abrasive, sur le tamis **1.6 mm** ;

- Sécher le refus sur ce tamis à **105°C** et en suite le peser, soit m 'sa masse.

d) Expressions des résultats:

- Calculer la masse (m) des éléments inférieurs à **1.6mm** produits au cours de l'essai par :

$$m = M - m' \quad (\text{IV.16})$$

- Calculer le coefficient micro-Deval par :

$$\text{MDE} = 100 \left(\frac{m}{M} \right) \quad (\text{IV.17})$$

avec :

$$M = 5000\text{g ou } 10000\text{g}$$

IV.5.9 Essai de Propreté superficielle:

a) Objet :

L'essai a pour objet de déterminer la propreté superficielle des granulats supérieurs à **2mm**.



Balance



Tamis de 500 μm



Etuve

Figure (IV.18) : Matériels nécessaires pour l'essai de la propreté superficielle

b) Principe :

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à **0.5mm** (ou **1.6mm** pour les ballasts) mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à **2mm**.

Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

c) Mode opératoire

- Prendre un échantillon de laboratoire de masse M supérieure à **0.2D** (M en **Kg** et D , la Plus grande dimension spécifique, en **mm**) ;

- Préparer deux échantillons à partir de l'échantillon de laboratoire : l'un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai, l'autre de masse M_h pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à **0.5mm** ou **1.6mm** pour les ballasts. Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai : - peser les deux échantillons M_{1h} et M_h ;
- Peser, après séchage à **105°C**, le premier échantillon de masse M_{1h} . Soit M_{1s} sa masse sèche;
- La masse sèche M_s de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$M_s = M_h \left(\frac{M_{1s}}{M_{1h}} \right) \quad (\text{IV.18})$$

Détermination de la masse sèche des éléments inférieurs à 0.5mm ou 1.6mm :

- Tamiser sous eau l'échantillon de masse M_h sur le tamis **0.5mm** ou **1.6mm** jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire ;
- Récupérer le refus et le sécher à **105°C** ;
- Tamiser à sec ce refus séché sur le tamis **0.5mm** ou **1.6mm** pendant une minute et le peser, soit m sa masse sèche.

d) Expression de résultats :

- Calculer la masse sèche (m) des éléments inférieurs à **0.5mm** ou **1.6mm** par :

$$M = M_s - m' \quad (\text{IV.19})$$

- Calculer la propreté superficielle (P) par :

$$P = 100 \left(\frac{m}{M_s} \right) \quad (\text{IV.20})$$

IV.3.10 Essai de la masse volumique apparente :

a) Objet :

La masse volumique ou masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume totale y compris les vides entre les grains de ce corps (**volume apparent**).



Balance.



Spatule.



Un récipient pour gravier.



Un récipient pour ciment et sable.

Figure (IV.19) : Matériels nécessaires pour l'essai de la masse volumique apparent

b) Les procédures :

- Prendre le granulat dans les deux mains formant un entonnoir ;
- Placer les deux mains à **10 cm** environ au-dessus d'une mesure d'un litre (**V_{app} = 1l**) et laisser tomber ce granulat, ni trop vite, ni trop lentement ;
- Verser le granulat au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde en formant un cône ;
- Araser à la règle ;
- Peser le contenu, soit **M**.

La masse volumique apparente est donnée par:

$$\rho_{app} = \frac{M}{V_{app}} \quad (IV.21)$$

IV.4 La formulation d'un béton ordinaire :

Les méthodes de formulation sont très nombreuses puisque les paramètres à prendre en compte dans l'étude de la composition d'un béton sont nombreux ; les plus utilisés sont associés aux noms de : **Bolomey , Abrams , Faury , Valette , Joisel et Dreux-Gorisse**

IV.4.1 La méthode utilisée :

Pour définir le meilleur mélange pouvant garantir la résistance et l'ouvrabilité requises, nous avons utilisé la méthode de **FAURY**, qui permet de formuler le béton. Pour dessiner la courbe, nous utilisons **l'Origine pro 8**

Méthodologie de la détermination des paramètres de la courbe de référence (composition de béton ordinaire) voir « **ANNEXE A** »

Tableau (IV.7) : Composition du béton ordinaire en poids et en volume

Composant	%	(1000-eau)/100	Volume absolu	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	Composants en volume
1	2	3	4	5	6	7
Ciment	14	8.23	113	3.10	1	350
Sable	28	8.23	230	2.513	1.44	402
3/8	30	8.23	247	2.778	1.53	448
8/15	28	8.23	230	2.799	1.5	430
Eau	177			1	1	177

Tableau (IV.8) : Composition d'un mètre cube de béton ordinaire en kg/m³

Composant	Ciment	Eau(L)	Sable (kg)	G3/8 (kg)	G8/15 (kg)	Le rapport E/C
	CPJ CEM II	Robinet	ELGEULTA	RECHAIGA	RECHAIGA	E/C
Les composants en masse	350	177	579	686	645	0,51

IV.5 Origine des granulats recyclés :

Les granulats recyclés proviendront de stocks de déchets de béton des échantillons écrasés au laboratoire (LTPO) triés avant concassage.

On a utilisés les mêmes matériaux, ciment sable, et on a remplacé les granulats naturels par des granulats recyclé avec substitution de **100%**.

IV.5.1 Elaboration et préparation des granulats recyclés :

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

Fragmentation des blocs du béton de démolition (éprouvettes cylindriques de béton déjà comprimés) 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. On a procédé ensuite à l'aide des tamis, à séparer les différentes classes granulaires **3/8** et **8/15**.



Figure (IV.20) : Concassage et Calibrage des Granulats Recyclés

IV.6 La formulation d'un béton recyclé :

Les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans le mélange de **100 %**. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison. Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses,

chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique et mécanique des bétons

Méthodologie de la détermination des paramètres de la courbe de référence (composition de béton recyclé) voire « ANNEXE B »

Tableau (IV.9) : Composition de béton recyclé en poids et en volume

Composant	%	(1000-eau)/100	Volume absolu	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	Composants en volume
1	2	3	4	5	6	
Ciment	14	8.16	113	3.1	1	350
Sable	26	8.16	212	2.513	1.44	370
3/8	29	8.16	237	2.509	1.11	535
8/15	31	8.16	253	2.556	1.3	497
Eau efficace	184			1	1	184

Tableau (IV.10) : Composition d'un mètre cube de Béton Recyclé en kg/m³

Composant	Ciment	Eau(L) efficace	Sable (kg)	G3/8 (kg)	G8/15 (kg)	Le rapport Eeff/C
	CPJ CEM II	Robinet	ELGEULTA	RECHAIGA	RECHAIGA	Eeff/C
Les composants en masse	350	184	533	594	647	0.52

IV.7 :Fabrication des échantillons :

Les bétons est fabriqué dans un malaxeur axial vertical d'une capacité **50** litres et peut être coulé un ensemble de **6** éprouvettes cylindriques.

Le cycle de fabrication que nous suivons est défini comme suit

Introduction dans le malaxeur:

Gravier **8/15** ;

Gavier **3/8** ;

Le sable ;

Le ciment .



Figure (IV.21) : Malaxage à sec des ingrédients du béton

Mélange à sec les ingrédients pendant **90 s** ;

Introduire l'eau de gachage ;

Le tout malaxé pendant trois minutes .



Figure (IV.22) : Malaxage de béton après introduction d'eau de gachage

IV.8 Propriétés de béton à l'état frais :

IV.8.1 Affaissement au cône d'Abrams.

Cet essai (**slump-test**) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier.

L'appareillage est complètement décrit dans la norme **NF P 18-451** . Il se compose de **4** éléments:

- Un moule tronconique sans fond de **30 cm** de haut, de **20 cm** de diamètre en sa partie inférieure et de **10 cm** de diamètre en sa partie supérieure;
- Une plaque d'appui;
- Une tige de piquage;
- Un portique de mesure.
-



Une règle

Un moule tronconique

Une tige de piquage

Figure (IV.23) : Matériels nécessaire pour l'essai de l'affaissement

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la **consistance** d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au (**Tableau III.1**) (**chapitre III**)



Figure (IV.24) : Mesure de l'affaissement

IV.9 Propriétés de béton à l'état durci :

IV.9.1:Préparation des éprouvettes (essais de compression) :

Pour effectuer ces essais, on a préparé trois éprouvettes cylindriques (16*32) (cm) pour chaque âge (7,4, 21 et 28 jours) pour le béton ordinaire et deux éprouvettes cylindriques pour le béton recyclé pour chaque âge (7 ,4 , 21 et 28 jours), dans le but de prendre une valeur moyenne.



Figure (IV.25) : Identification des éprouvettes (date de coulage et date d'écrasement pour les bétons élaborés)

Les moules ayant été munis d'un dispositif s'opposant à l'évaporation, les éprouvettes doivent être conservées sans être déplacées pendant **24 h \pm 1 h** dans un local maintenu à **20°C \pm 2°C**.



Figure (IV.26) : Démoulage des éprouvettes cylindriques

Après démoulage, les éprouvettes doivent être conservées à même température, dans l'eau.

Cette opération est effectuée pour éviter l'évaporation d'eau au cours de la phase de prise du ciment et assurer le bon déroulement du durcissement, afin de maintenir les caractéristiques réelles du béton.



Figure (IV.27) : Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20 C

IV.9.2 Réparation et positionnement des éprouvettes :

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai ;
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés, et les corps étrangers situés à surface de l'éprouvette, doivent être retirés ;
- Centrer l'éprouvette sur le plateau avec une précision de $\pm 1\%$ de la dimension du diamètre de l'éprouvette cylindrique ;
- La rectification consiste à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette , pour parvenir à ce résultat on a employé le disque néoprène.

La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient les génératrices de l'éprouvette perpendiculaires au fond rectifié du moule.



Figure (IV.28) : Disque en néoprène Ø 16 cm (surfaçage)



Figure (IV.29) : Chargement et rupture des éprouvettes

IV.10 Conclusion :

Dans cette partie de l'étude, les différentes propriétés physiques et mécaniques des composants ont été déterminées. Les comportements des bétons frais ainsi que les performances des bétons durcis sont évalués, présentés et discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

V RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

V.1 Introduction :

Les résultats des tests nous permettant de générer un ensemble de données qui sera utilisé pour valider la section de catégories de particules spécifiques, pour cela la formulation de divers mélanges de béton (béton ordinaire et béton à base des granulats recyclés) sont élaborés, les caractéristiques de la granulométrie et du béton ont été étudiées.

a) Essai d'analyse granulométrique par tamisage :

Les analyses granulométriques des gravillons sont indispensables dans la formulation des bétons afin d'obtenir la meilleure compacité possible lors de la fabrication des mélanges.

D'après l'essai de l'analyse granulométrique on a obtenu les résultats présentés dans les tableaux suivants [Tableau V.1, V.2, V.3, V.4, V.5]

Tableau (V.1) : Analyse Granulométrique par Tamisage : Gravier (GBS 8/15) de RECHAIGA

Masse sèche : M= 3 Kg		Gravier : Classe granulaire 8/16 (9/14)		
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus M_i (g)	Masse des refus cumulés M_c (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(M_c/M) 100$	Pourcentage des tamisât cumulés $Pt=100-Pr$
20	00	00	00	100
16	27	27	01	99
12.5	803	830	28	72
10	1505	2335	78	22
8	618	2953	98	02
6.3	38	2991	100	00
5	3	2994	100	00
Fond	00	3000	100	00

Tableau (V.2): Analyse Granulométrique par Tamisage : Gravier (GBS 3/8) de RECHAIGA

Masse sèche : M= 1.6 Kg		Gravier : Classe granulaire 3/8		
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisats cumulés Pt=100-Pr
10	00	00	00	100
8	135	135	08	92
6.3	400	535	33	67
5	327	862	54	46
4	357	1219	76	24
2	358	1577	99	01
1	4	1581	99	01
0.500	11	1592	100	00
0.400	6	1598	100	00
Fond	2	1600	100	00

Tableau (V.3) : Analyse Granulométrique par Tamisage (Sable nature GTF) de EL-GUELTA

Masse sèche :M= 500 g		Sable : Classe granulaire 0/3		
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisats cumulés Pt=100-Pr
6.3	00	00	00	100
5	02	02	00	100
4	05	03	01	99
2	16	11	03	97
1	25	9	05	95
0.5	56	31	11	89
0.4	87	31	17	83
0.315	161	74	32	68
0.2	340	179	68	32
0.1	472	132	94	06
0.080	485	13	97	03
Fond	500	15	100	00

À partir des résultats de l'analyse granulométrique de **Sable de GTF de EL-GUELTA**, nous obtiendrons le module de finesse par la norme **NA 2607) 1992-08-01**, comme suit :

Calcul de module de finesse **Mf** :

$$Mf = \frac{\sum \text{refus tamis (5-4-2-1-0.5-0.4-0.315-0.2-0.1)}}{100} \quad (V.1)$$

$$Mf = \frac{(1+3+5+11+17+32+68+94)}{100}$$

$$Mf = 2.31$$

La valeur de module de finesse pour le sable de **GTF de EL-GUELTA** est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités car :

2,20 ≤ Mf = 2.31 ≤ 2,80 (La mise en œuvre facile et la résistance élevée).(voir ANNEXE D)

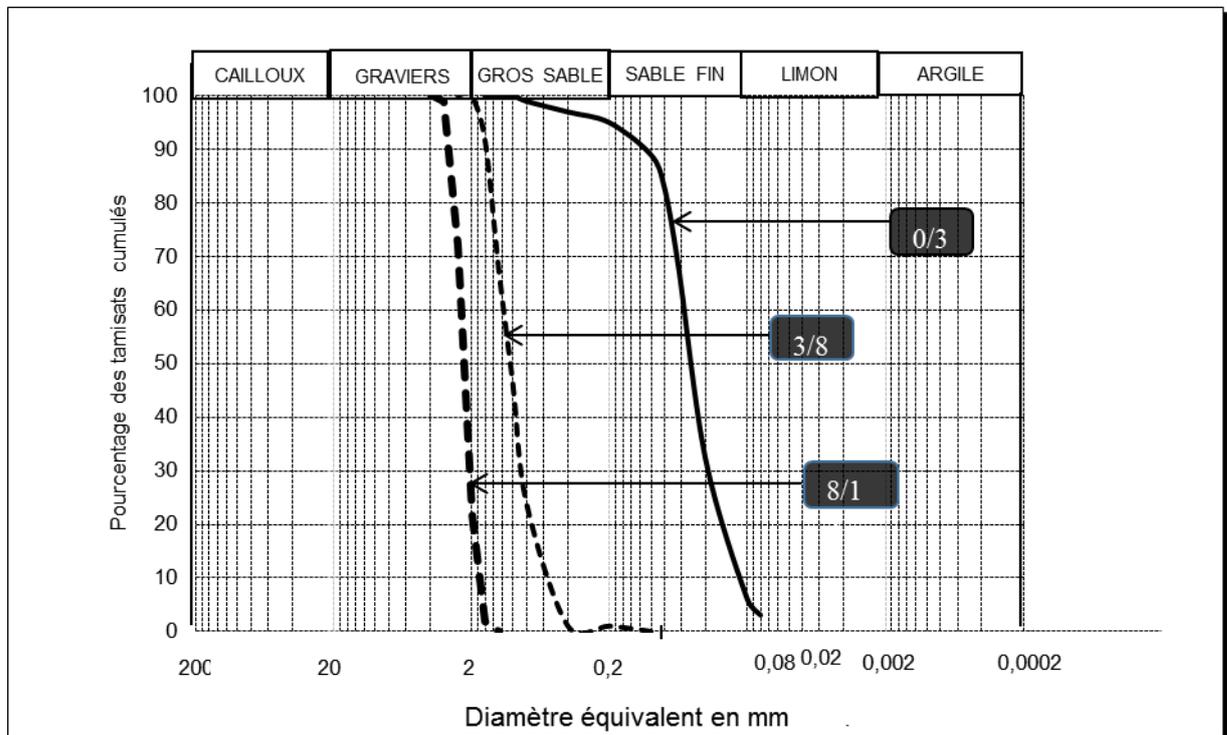


Figure (V.1) : Analyse granulométrique des graviers (3/8, 8/15) et le sable 0/3 (les pourcentages des tamisats cumulés en fonction du diamètre)

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

La courbe est série tracée de manière continue et ne peut pas passer rigoureusement par tous les points.

Tableau (V.4) : Analyse Granulométrique par Tamisage Gravier (8/15) BR

Masse sèche : M= 3 Kg		Gravier : Classe granulaire 8/15		
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisât cumulés Pt=100-Pr
16	00	00		
12.5	525	525	00	100
10	1596	1071	17	83
8	2431	835	53	47
6.3	2906	475	81	19
5	2932	26	97	3
4	2933	1	98	2
2	2934	1	98	2
Fond	3000	00	100	00

Tableau (V.5) : Analyse Granulométrique par Tamisage. Gravier (3/8)BR

Masse sèche :M= 1.6 Kg		Gravier : Classe granulaire 3/8		
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Pr=(Mc/M) 100	Pourcentage des tamisâts cumulés Pt=100-Pr
10	00	00	00	100
8	21	135	1.3	99
6.3	398	535	25	75
5	683	862	43	57
4	991	1219	62	38
2	1572	1577	99	01
1	1593	1581	100	00
Fond	1600	1600	100	00

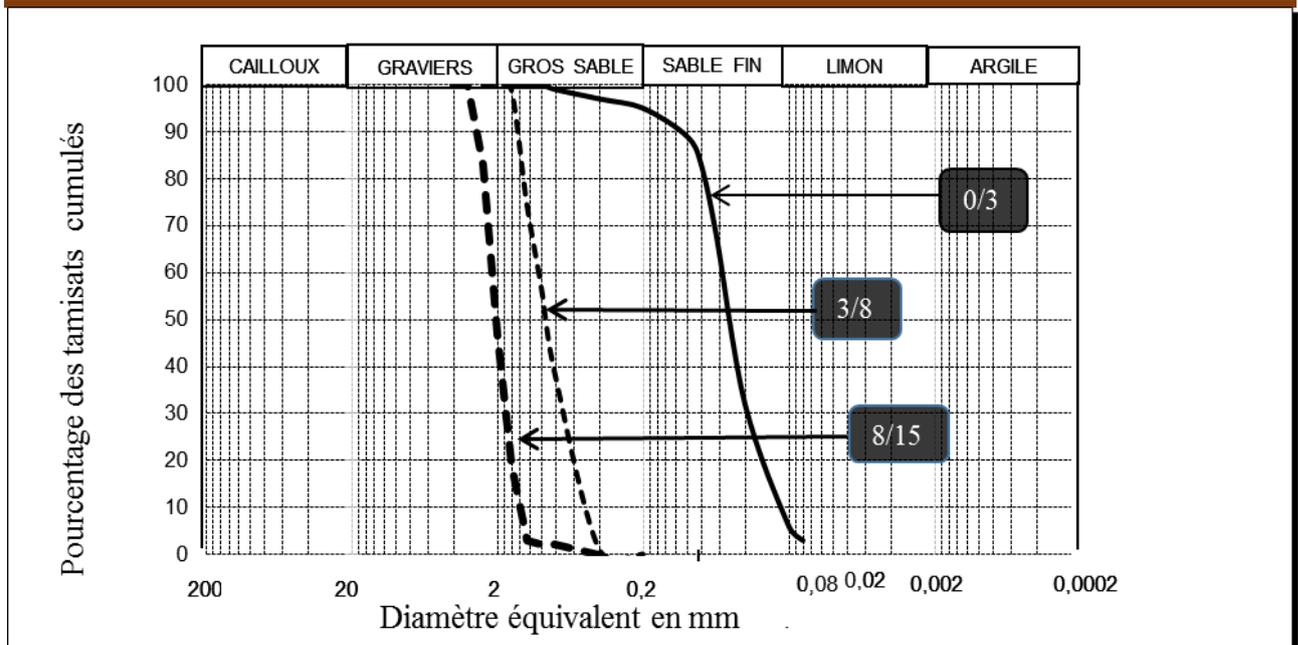


Figure (V.2) : Analyse granulométrique des graviers recyclés (3/8, 8/15) et le sable 0/3 (les pourcentages des tamisats cumulés en fonction du diamètre)

Les courbes granulaires (**Figure V.1**) et (**Figure V.2**) ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de granulats et selon les conditions décrites dans la norme **NF P18-545**.

Ces courbes permettent d'illustrer une caractéristique très commune aux granulats recyclés : leur friabilité. En effet, dans le cas des deux types de granulats, les courbes obtenues sont continues.

b) l'essai de la détermination du coefficient d'aplatissement :

Les résultats de l'échantillon **8/15** gravier **GBS** de **RECHAIGA** sont présentés dans (**Tableau V.6**) .

Tableau (V.6) : Détermination du coefficient d'aplatissement

Détermination de coefficient d'aplatissement				
Tamisage pour tamis		Tamisage pour grille		
Classe granulaire d/D(mm)	Mg(g)	Ecartement des grilles (mm)	Passant Me(g)	$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} 100$
31.5/40		20		
25/31.5		16		
20/25		12.5		
16/20	27	10	00	00
12.5/16	803	8	37	4.6
10/12.5	1505	6.3	44	2.92
8/10	618	5	16	2.58
6.3/8	38	4	00	00
5/6.3	03	3.15	00	00
4/5		2.5		
$\sum M_{gi} = 2994$		$\sum M_{ei} = 97$		
$A = \sum_j M_{ei} / \sum_j M_{gi} * 100 = 3.24$				

D'après le résultat obtenu la valeur de **CA** de gravier **8/15** est **3.24**, on conclue que le matériau est angulaire cette caractéristique est indispensable pour les agrégats sachant que la spécification de **CA** ($CA \leq 30\%$).

Pour l'échantillon 3/8 C'est un essai non mesurable.

c) l'essai de la masse volumique absolue du GN et GR :

Tableau (V.7) : les résultats obtenus pour l'essai de la masse volumique absolue du GN et GR

Echantillon		La masse volumique absolue (gr/cm ³)
Gravier GBS	3/8	2.778
	8/15	2.799
Gravier recyclé	3/8	2.509
	8/15	2.556

D'après les résultats trouver on remarque que la masse volumique absolue du gravier **GBS** varie de (**2.778 et 2.799 gr/cm³**) par contre le gravier recyclé un peu moins de valeur varie de (**2.509 et 2.556 gr/cm³**) ce qui indique que les deux types de gravier ne sont pas de même origine, et ceux de gravier **GBS** sont plus dense (densité élevée) par rapport aux graviers recyclés car ils ont

une pate cimentaire rattaché au granulats et en général sont courants car les valeur obtenus sont entre **2 et 3 t/m³**.

d) l'essai de l'équivalent de sable

Tableau (V.8) :Résultats d'essai de l'équivalent de sable

	Ech 1	Ech 2
Mesure h1	13.5	14.00
Mesure h2	8.30	9.40
Mesure h'2	10.40	10.50
ES(PISTON)=100*h1/h2	ES1=61%	ES2=67%
ESmoyen(PISTON)=64%		
ES(VISUEL)=100*h'2/h1	ES1=77%	ES2=75%
ESmoyen(VISUEL)=76%		

D'après les résultats qu'on a trouvé **75% ≤ ESV ≤ 85%** et **60% ≤ ESP ≤ 70%** selon la norme le sable utilisé est sable propre convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité de propreté admissible pour les bétons de qualité courante.(voir ANNEXE D)

e) l'essai de bleu de méthylène :

Tableau (V.9) : Résultats d'essai de bleu de méthylène

Nature	Masse de refus (g)	W (%)	q(g)	V(ml)	VB
Sable nature	283	/	17	10	0.59

Notre sable est conforme à la spécification car la valeur de bleu est inférieure à **1g /100** de fines.

Tableau (V.10) : Résultats d'essai d'évaluation des carbonates

Ech N	Nature	Profondeur(m) /PK	Volume(cm ³)	Masse m ² (g)	Teneur en calcaire(%)
01	Sable	GTF	10	0.05	9
02	3/8	GBS	Lent	/	89
03	8/15	GBS	Lent	/	89

Les résultats obtenus de gravier **3/8** et **8/15** indique que la roche est contient du carbonate et notre gravier de la même roche.

f) l'essai du poids spécifique des grains solide :

Tableau (V.11) : Résultats d'essai du poids spécifique des grains solide

Sable nature GTF	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	Le poids spécifique (g/cm ³) P _s = m ₂ - m ₁ / m ₄ + m ₂ - m ₁ - m ₃
Masse =50g	97.3	147.2	377.8	347.8	2.513

D'après les résultats le sable est dense.

g) l'essai de los angle :

Tableau (V.12) : Résultats d'essai Los Angles

L'échantillon	LA (%)	
	BO	BR
3/8	14	38
8/15	16	43

Les le coefficient de los Angles des agrégats utilisée dans notre béton varie de **14** à **16%** inférieur à la valeur spécifiques supérieurs (V_{ss}) demander par ce genre de béton (**30%**) confirmant une bonne résistance au choc.

Le matériau est très dure (<**20%**) est conforme pour l'introduire dans le mélange de béton.

Pour les agrégats recyclés **3/8** le matériau est mis dure (**30 à 40 %**)

Pour les agrégats recyclés **8/15** le matériau est tendre (40 à 50 %) (**voir ANNEXE D**)

h) L'essai MICRO DEVAL :

Tableau (V.13) : Résultats obtenus pour l'essai de MDE

L'échantillon	MDE(%)	
	BO	BR
3/8	9	33
8/15	13	34

Les coefficients **MDE** des agrégats utilisés dans notre béton varie de **9** à **13%** inférieur à la valeur spécifiques supérieurs (V_{ss}) demandé par ce genre de béton (**20%**) confirmant une bonne résistance à l'usure sous l'eau, tandis que les granulats obtenus à partir des bétons démolis présentent de faibles résistances de **33** à **34%**. Ceci est probablement la conséquence de la quantité

de mortier que le béton recyclé contient, et la nature (dureté) des roches mères des granulats d'une part et l'âge, la dégradation des bétons démolis (la carbonatation, l'alcali-réaction,...) d'autre part. Toutefois, ces granulats présentent des valeurs à la limite de celles prescrites par les normes pour le béton hydraulique.

i) l'essai de la propreté superficielle

Tableau (V.14) : Résultats obtenus pour l'essai de la propreté superficielle

L'échantillon (g)	La propreté (%)
3/8	2.46
8/15	0.53

D'après les résultats obtenus les valeurs de la propreté **2.46** et **0.53%** $\leq 3\%$ donc les agrégats sont propres.

j) l'essai de la masse volumique apparente :

Tableau (V.15) : Résultats obtenus pour l'essai de la masse volumique apparente

Echantillons					
Masse volumique apparente (g/cm ³)			Masse volumique réelle (g/cm ³)		
GN (GBS)		Sable GTF	Ciment	GR	
3/8	8/15			3/8	8/15
1.531	1.5	1.440	1.1	1.11	1.3

Les masses volumiques des granulats recyclés que ce soit apparentes (M_v app) sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels. Ceci peut être expliqué par l'existence de la pâte cimentaire collée aux granulats recyclés qui est poreuse d'un part et la nature des roches sources de ces granulats d'autre part.

Après avoir terminé les essais d'identifications sur les granulats naturels et recyclé, le sable et le ciment, on va maintenant déterminer les essais sur le béton ordinaire et recyclé à l'état frais (l'essai d'affaissement) (**Tableau V.15**) et par la suite l'essai sur béton ordinaire et recyclé à l'état durci (l'essai de compression à **7, 14, 21 et 28 jours** de durcissement) . (**Tableau V.1**)

k) L'essai de l'affaissement :

Tableau (V.16) : Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement

Type de bétons	Age (jours)	Affaissement
BO	7	7.00
	14	7.10
	21	7.20
	28	7.30
BR	7	5.50
	14	6.00
	21	6.30
	28	6.50

Les valeurs des affaissements obtenus, correspondent à un béton de consistance plastique, celles-ci varient de **5 à 7 cm** avec une tolérance de ± 2 cm.

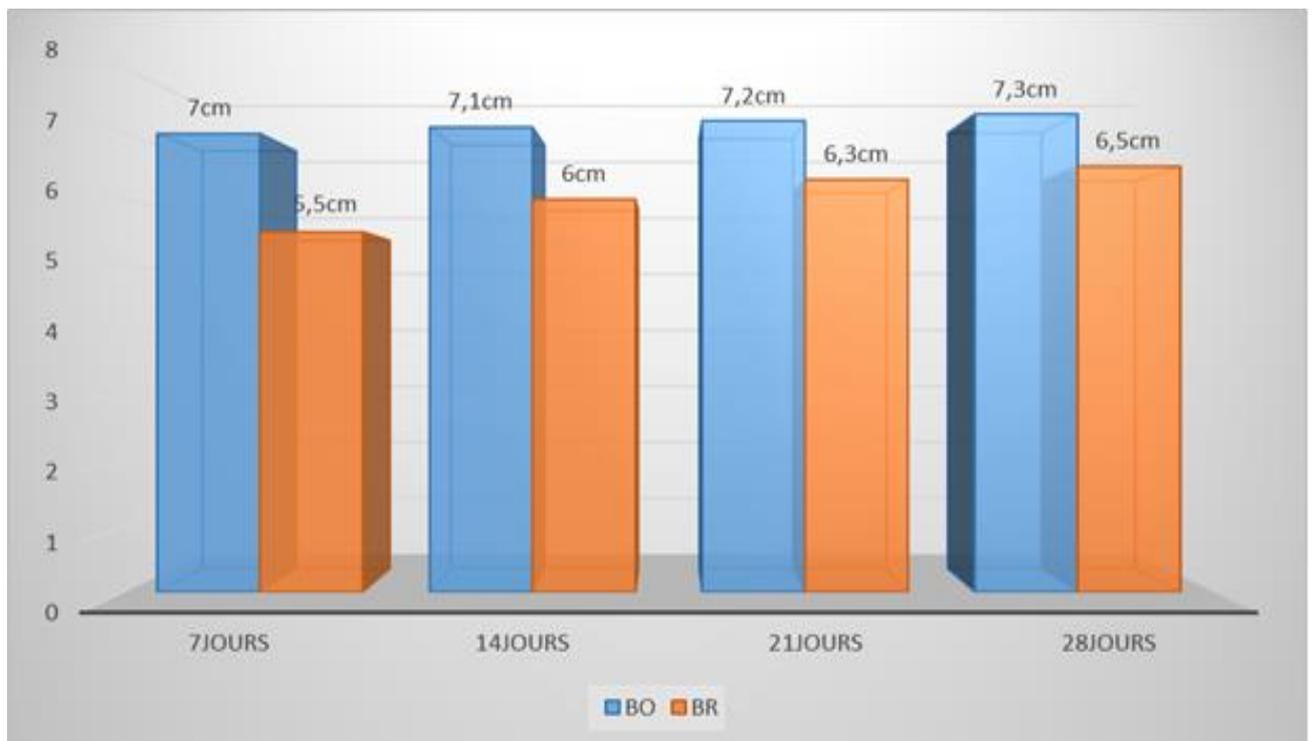


Figure (V.3) : L'affaissement en fonction de l'âge des bétons élaborés

L'utilisation des granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton de granulat naturel pour un même rapport E/C . Cette baisse d'affaissement est due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés.

Nous déterminons par la méthode de **Faury** la composition du squelette granulaire du béton, soit **30%** de gravier **3/8** naturel, **28 %** gravier **8/15** naturel et **28%** de sable pour les bétons ordinaires **BO** (témoins) et **29%** gravier **3/8** recyclé , **31%** gravier **8/15** recyclé, **26%** de sable pour les bétons recyclés **BR**. Ces valeurs seront utilisées dans la formulation de nos différents bétons.

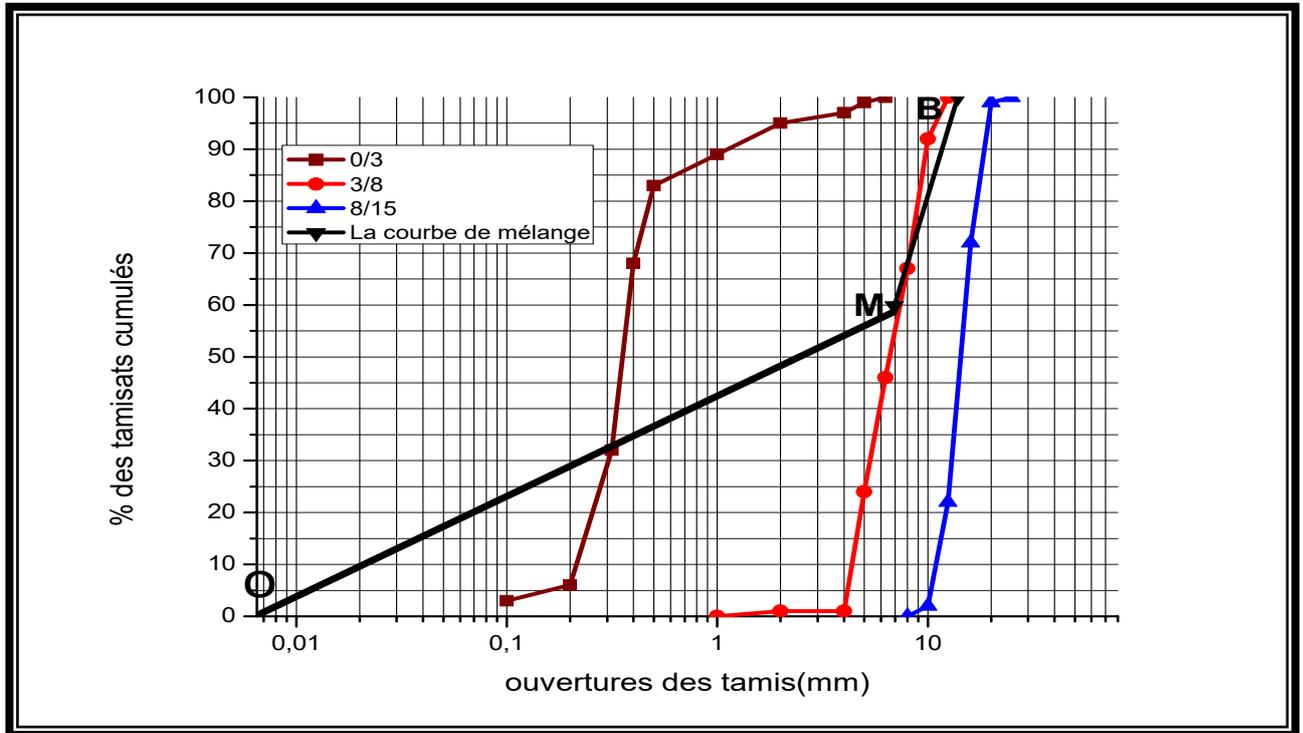


Figure (V.4) : Courbe du mélange d'un béton ordinaire

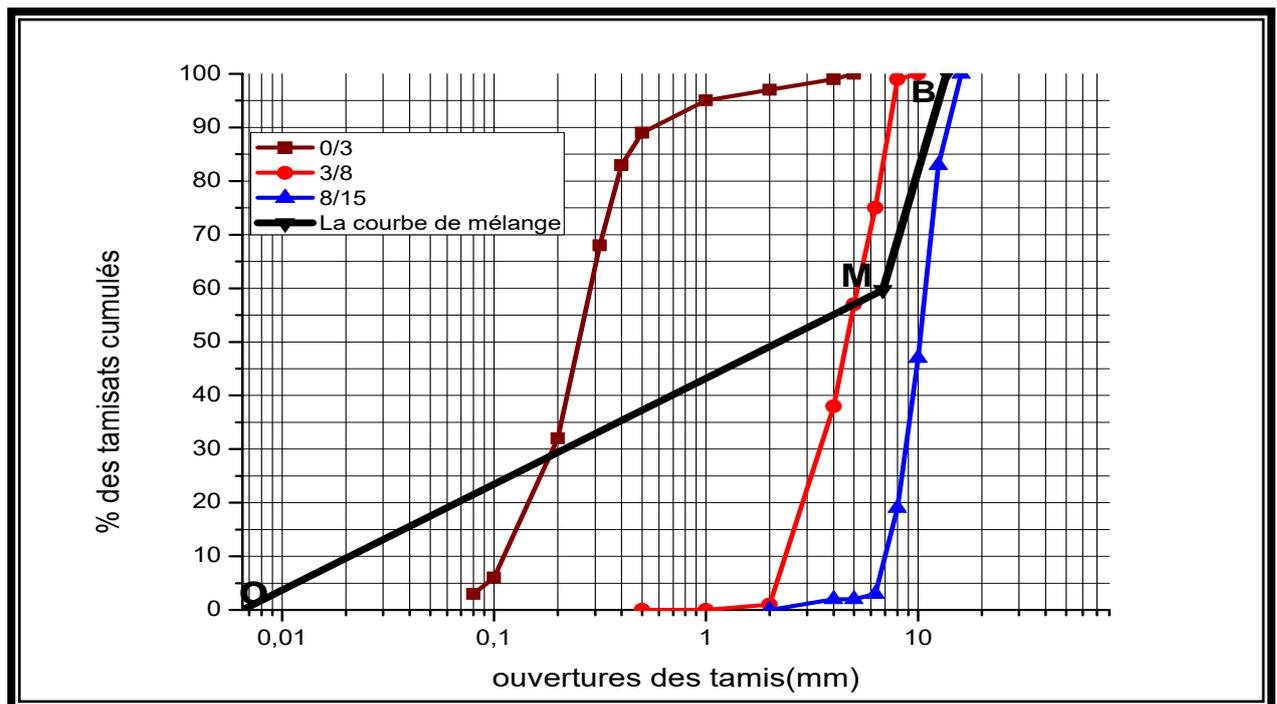


Figure (V.5) : Courbe de mélange d'un béton recyclé

1) Résistance en compression simple:

Un certain nombre d'éprouvettes ayant été prélevés pour un béton donné, la moyenne arithmétique de l'ensemble des résistances trouvées à un âge donné (**7, 14, 21,28 jours**) donne une idée de la résistance moyenne probable pour l'ouvrage.

Mais cela n'est pas suffisant ; Il est en effet de toute évidence qu'il sera préférable d'avoir une moyenne de **35 MPa** par exemple, avec des résultats s'étalant de **32 à 38 MPa** plutôt que **36MPa** avec un étalement de **26 à 46 MPa**, d'où la nécessité de la connaissance d'un coefficient de variation **V**, calculé d'après l'écart type fonction de la dispersion.

Nous rappelons que pour un nombre **n** de mesures **m**, soit : **m₁, m₂, m₃,,.....m_n** la moyenne arithmétique étant :

$$m_a = \frac{\sum m_i}{n} \quad (V.2)$$

L'écart type sera :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (m_i - m_a)^2}{n-1}} \quad (V.3)$$

S : écart type calculé à partir de l'expression suivante :

n : égale au nombre de mesures ;

m_a : est la moyenne arithmétique étant .

V : le coefficient de variation calculé à partir de l'expression suivante :

$$V = 100 \frac{s}{m_a} \% \quad (V.4)$$

Concernant la dispersion qui affecte plus ou moins mais inévitablement les mesures de résistance des bétons , nous laisse à penser que la résistance moyenne de toute une série de mesures n'est pas un critère suffisant de la résistance mais qu'il convient de tenir compte également de la dispersion dont l'écart type **S** est particulièrement représentatif et permet de faire un contrôle.

L'écart entre les diverses valeurs moyenne correspondant chacune au contrôle diverses charges ou gâchées d'un même béton, mais espacées sur temps assez long, la dispersion entre les valeurs trouvées pour des éprouvettes de contrôle d'une même charge ou gâchée est assez faible **<5%** donc les précautions et stipulation normalisées sont bien observées.

Il est à note que d'une manière générale toute variation dans les résultats expérimentaux de mesure de la résistance en compression entre les cylindres provenant de l'échantillon est causée par des écarts sur la fabrication de plusieurs gâchés, donc la précision des résultats de résistance en compression obtenus sur les cylindres de béton prélevé, en laboratoire découle des soins apportés à leur fabrication et leur préparation avant leur mise à l'essai. Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes retenues sont récapitulés dans (**Tableau V.16**)

Tableau (V.17) : Résultat de la résistance en compression de béton

Type de béton	Age (jours)	Résistance à la compression f_{cj} (MPa)			Résistance moyenne f_{cm} (MPa)	Ecart type $S = \frac{\sqrt{\sum(m_1 - m_2)^2}}{n - 1}$	Résistance caractéristique $f_{cj} = m_2 - 1.64 S$	Coefficients De variation $V = 100 \frac{s}{m_2}$ (%)	La masse volumique du béton durci $\rho = \frac{m}{v}$ (g /cm ³)
BO	07	28	25	24	25.66	1,47	23.27	5,72	2.39
	14	29	27	34	30	2.54	25.84	8.46	2.45
	21	37	30	37	34.66	2.85	29.65	8.22	2.38
	28	38	40	37	38.33	1,08	35.38	2.81	2.36
BR	07	20.7	20.2		20.45	0.35	19.87	1.71	2.29
	14	26.9	22.9		24.9	2.82	20.27	1.13	2.26
	21	26.1	30		28.05	2.75	23.54	9.80	2.30
	28	32	30		31	1.41	28.68	4,54	2.29

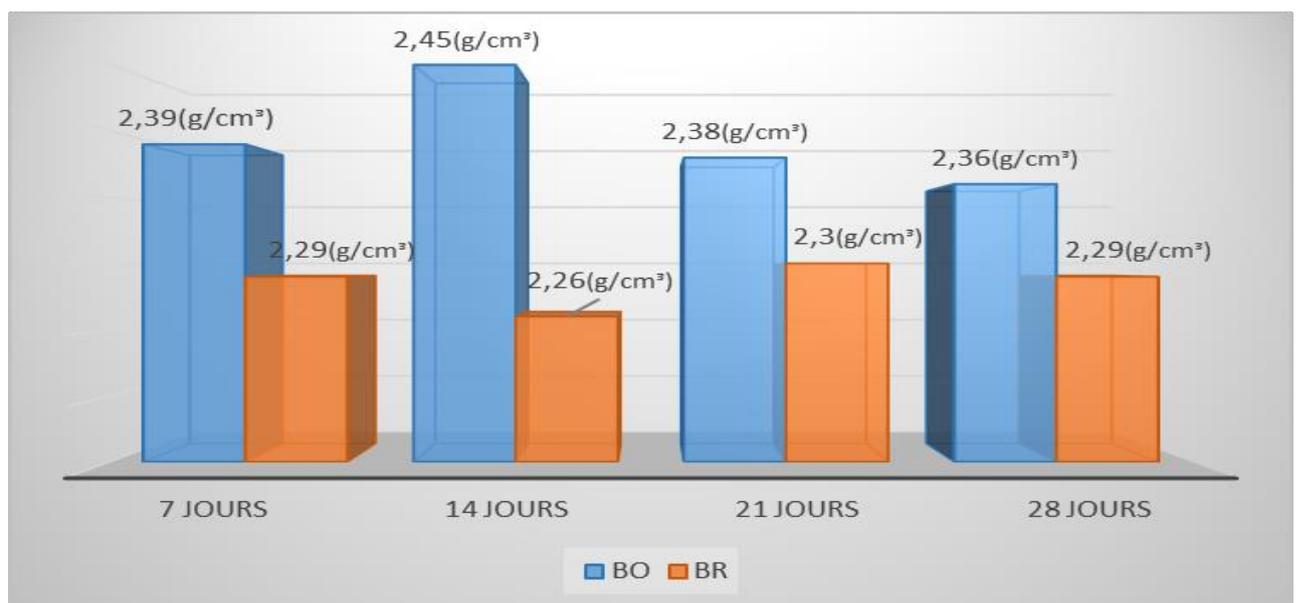


Figure (V.6) : La masse volumique entre un BO et BR

D'après (la Figure V.6) qui montre l'effet de la nature des granulats sur la masse volumique des béton ordinaire et béton recyclé à l'état durci on peut constater que la formulation avec les

granulats recyclés, la masse volumique des béton recyclé est légèrement inférieur à celle du béton ordinaire, elle est due essentiellement à la différence de densité de deux granulats naturels est recyclés

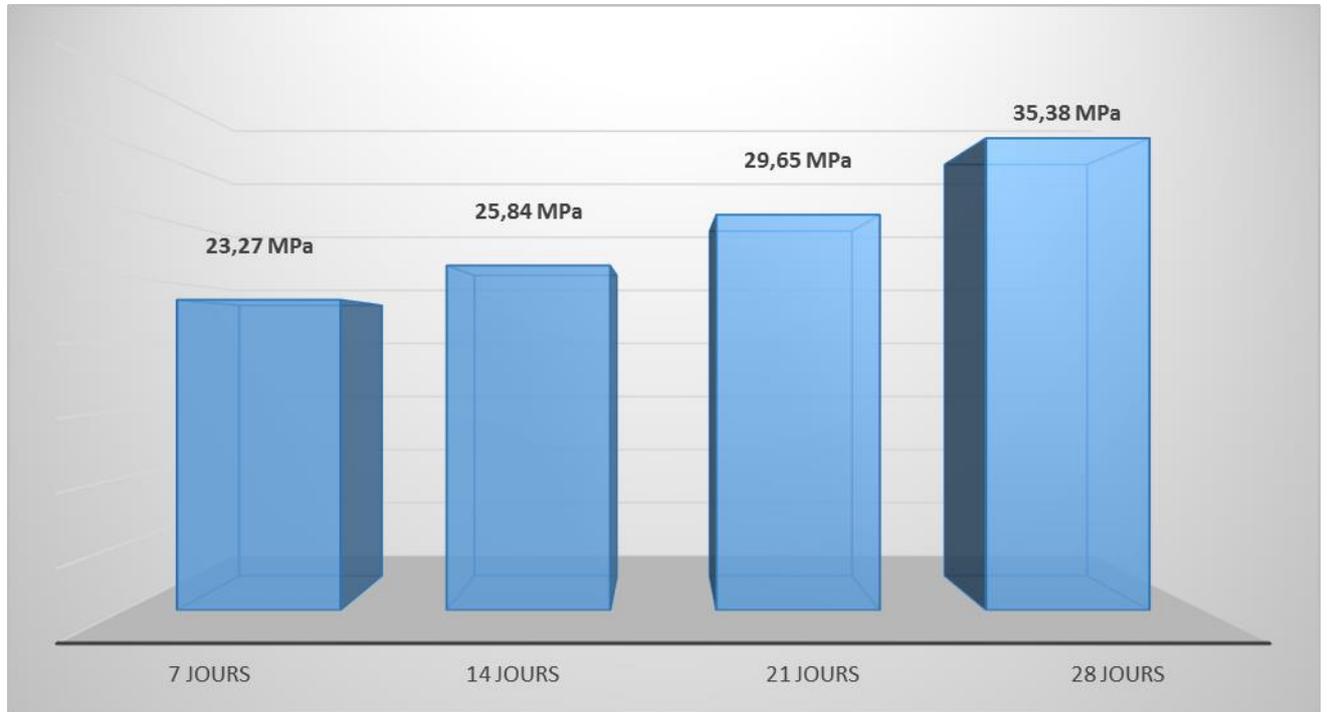


Figure (V.7) : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge d'un Béton Ordinaire (témoin) (BO)

Figure (V.7) représente la résistance à la compression à **7 , 14 , 21 et 28 jours**, du béton témoin élaboré. Nous remarquons que la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement. Cela est dû à l'hydratation des minéraux du clinker, qui donne la formation des hydrosilicates et des hydrol minâtes de calcium(**CSH**), contribuant à l'amélioration de la résistance du béton.

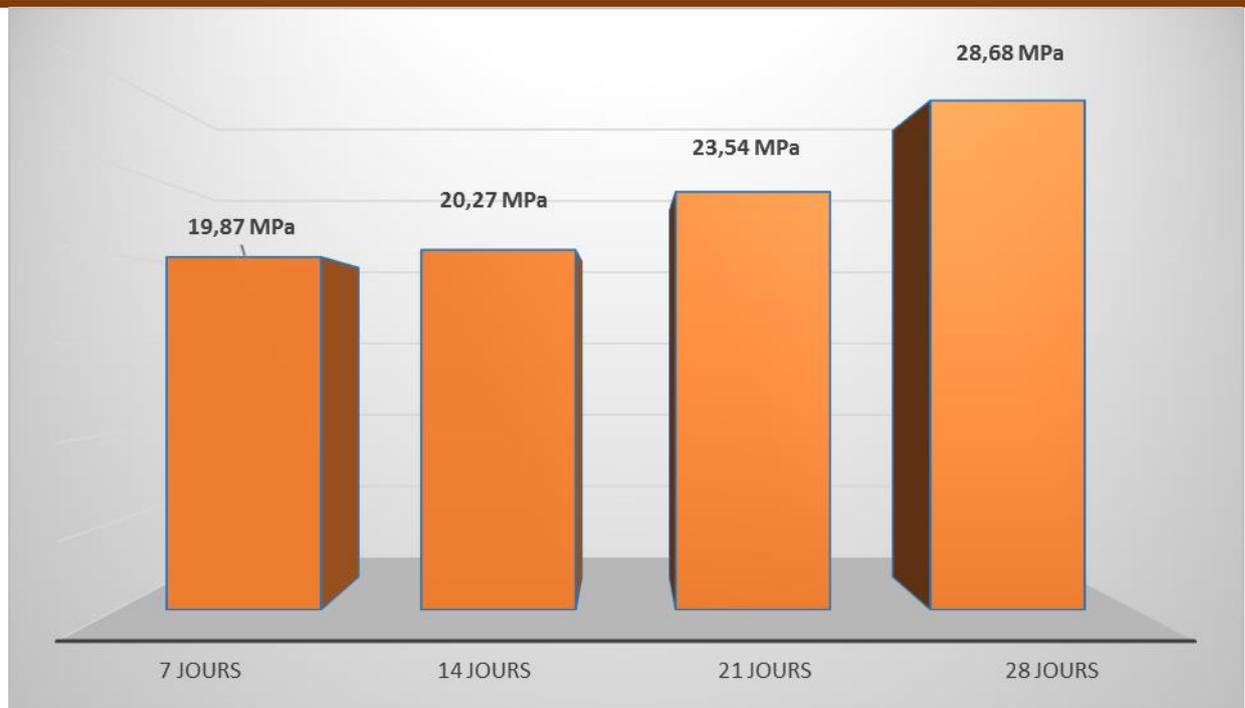


Figure (V.8) : Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge d'un Béton Recyclé(BO)

(Figure V.8) représente la résistance à la compression à 7, 14, 21 et 28 jours, du béton recyclé élaboré. Nous remarquons que la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement.

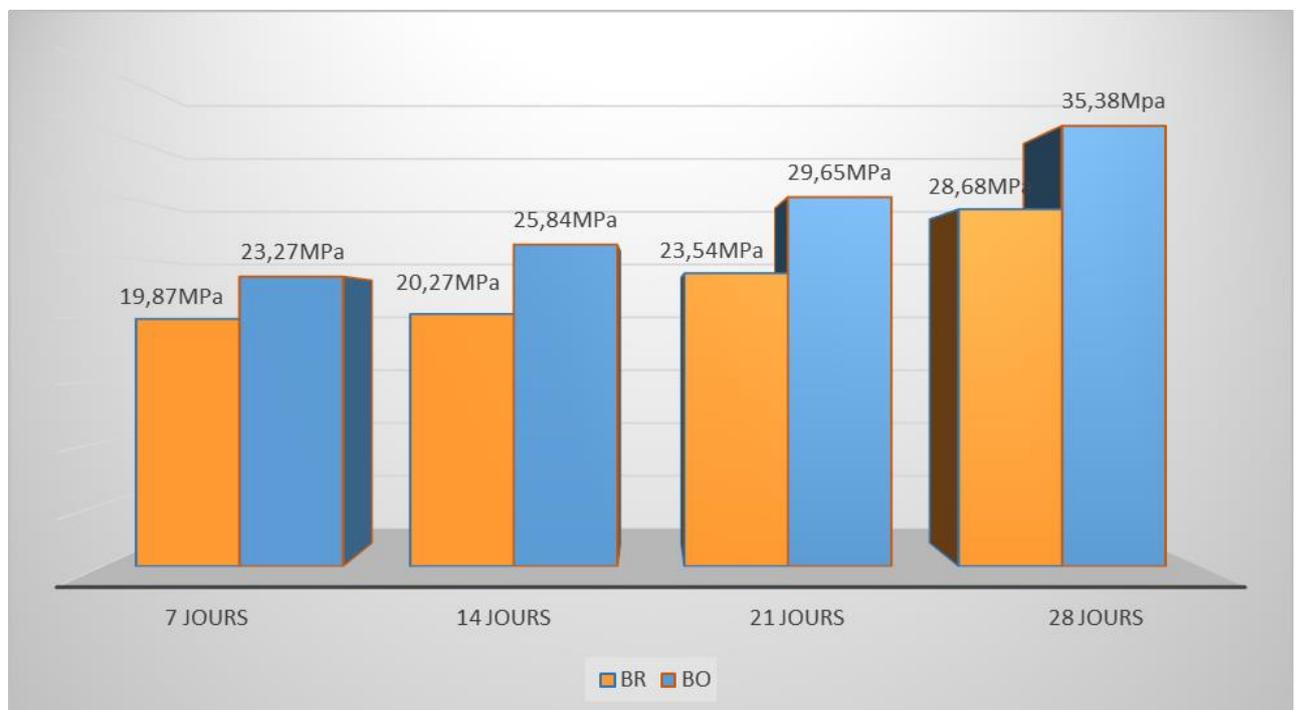


Figure (V.9) : Comparaison entre les bétons élaborés (BO, BR)

(Figure V.9) présente les valeurs de la résistance en compression de béton à base des granulats recyclés et celles de béton ordinaire, on remarque que le béton recyclé a une résistance inférieure à celle de béton ordinaire.

Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons recyclés est généralement moindre.

Les agrégats recyclés sont subis déjà aux charges (la charge de compression de béton avant le concassage, la charge de concassage, la nouvelle charge de compression)

D'après les résultats trouvés la résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats.

Les bétons fabriqués avec des granulats recyclés obtiennent de bonnes résistances mécaniques et peuvent atteindre des résistances à la compression équivalentes à celles d'un béton conventionnel.

Ces résultats sont acceptables par rapport à celles des bétons naturels.

V.6 Conclusion :

Un granulats recyclés a été considéré « granulats recyclés» (**GR**) issus d'un béton naturel concassé au laboratoire (déchets des bétons de laboratoire **LTPO**).

Les propriétés des bétons qui les contiennent (béton recyclé) sont comparées à celles de bétons de granulats naturels (béton ordinaire).

L'étude des caractéristiques des granulats recyclés a montré dans quelle mesure la présence de mortier attaché au granulats d'origine modifiait les propriétés physiques des granulats recyclés. Leur densité est en effet plus faible de près de **10%** que celles des granulats naturels.

Les granulats étudiés ont été incorporés dans des bétons à matrice cimentaire ordinaire, avec un rapport **E/C** égal à **0.52**

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

La qualité du granulats recyclé dépend en effet de la qualité de son béton parent. Il n'est théoriquement pas possible de formuler un béton recyclé avec une résistance à la rupture en compression supérieure à celle du béton parent des granulats utilisés.

Les granulats de béton recyclé (**GBR**) contiennent non seulement les granulats naturels originaux, mais aussi de la pâte de ciment hydraté. Cette pâte réduit la masse volumique, augmente

la porosité et donc l'absorption d'eau des **GBR**, et par conséquent diminue la résistance en compression.

Les bétons à granulats recyclés offrant de faible résistance en compression peuvent être utilisés en tant que bétons de propreté et béton cyclopéens, ainsi que dans les travaux routiers comme les bordures et les pavés de trottoirs, les murs poids, les canaux et dans d'autres constructions ne nécessitant pas des résistances élevés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ces travaux de mémoire de fin d'étude était de contribuer expérimentalement à la compréhension du comportement des bétons de granulats recyclés (résistance à la compression), afin, notamment, d'aider à la conception d'ouvrages moins impactant d'un point de vue environnemental et plus sûrs. Nous nous sommes intéressés à l'influence du granulat recyclé sur le comportement du béton.

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux de démolition en tant que source de granulats pour les bétons hydrauliques. Dans ce contexte, il est aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation des granulats recyclés.

L'étude bibliographique a permis de dresser une vue globale des connaissances acquises sur l'utilisation des matériaux issus de bétons recyclés, y compris les granulats recyclés (gravillons), des caractéristiques (physicochimique, mécanique) comparées à celles mesurées sur les granulats naturels. Ainsi, l'incorporation de granulats recyclés dans de nouvelles matrices cimentaires (bétons) peut engendrer des altérations des propriétés d'usage à l'état frais et à l'état durci.

➤ **A l'état frais** : Le coefficient d'absorption d'eau élevé est un paramètre essentiel qui provoque une chute de maniabilité lors de l'emploi des granulats recyclés, un autre paramètre important est la condition de préparation des granulats, surtout l'état hydrique au moment du malaxage. En considérant les granulats à l'état sec, saturé ou partiellement saturé, cela peut donner des modifications sur le rapport E_{eff}/C final du mélange et donc sur le comportement à l'écoulement.

➤ Néanmoins, l'influence des granulats recyclés sur l'aptitude à l'écoulement à l'état frais se limite essentiellement aux essais "empiriques" ce qui consiste à mesurer l'affaissement. Des études plus approfondies sur la rhéologie semblent nécessaires.

➤ **A l'état durci** : Il ressort de manière unanime qu'une incorporation de granulats recyclés engendre une perte de résistance à la compression. Toutefois, cette perte pourrait être atténuée à condition de modifier plusieurs paramètres comme ceux de la formulation (qualité du béton d'origine, taux de substitution, état hydrique des granulats) ou de malaxage. Parmi ces paramètres, l'état hydrique initial des granulats recyclés paraît essentiel et influence directement le rapport E_{eff}/C . Malgré des études sur cette thématique, les conclusions ne semblent pas claires. Il est donc nécessaire d'approfondir ce point.

➤ La fabrication des éprouvettes d'une même gâchée et dimensions, ainsi du mode de conservation et les essais identiques, assure la possibilité de déterminer avec justesse et précision la valeur vraie de la résistance du béton.

➤ Le béton tire sa résistance à la compression de la nature de ces composants, de leur dosage

➤ relatif et des conditions de mise en œuvre, elle provient aussi du mélange de ciment et de l'eau qui permet de coller les granulats entre eux. Cette colle est le principe d'une réaction chimique entre le ciment et l'eau et qui se déroule majoritairement pendant les **28** premiers jours de l'âge du béton.

➤ Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance à la compression, une méthode destructive et une autre non destructive, qui sert à donner des valeurs légèrement inférieures à celle pour la méthode non destructive.

➤ Des nombreux paramètres influent sur la résistance d'un béton à base des granulats recyclé comme le taux de recyclage, la condition de préparation des granulats, la qualité de béton d'origine et le rapport **E/C**.

➤ Lorsque le rapport des granulats recyclé sur les granulats naturel augmente, la résistance diminue.

➤ Le rapport **E/C** diminue lorsqu'on introduit des granulats d'un béton recyclé, puisque ils demandent une quantité d'eau élevée.

➤ Le béton incorporant des granulats recyclé, à long terme atteint une meilleure résistance qui peut dépasser les valeurs d'un béton standard.

➤ La valeur de **K_t** pour les **GBR** et **GN** dépend des données expérimentales pour la formulation du béton, mais on peut désigner que la valeur de **k_t** de **GBR** est inférieure à la moyenne de **13%** par rapport aux granulats naturels.

➤ La formulation d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants dont on dispose afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la réalisation d'un ouvrage résistant avec une durabilité accrue.

➤ Nous avons étudié la résistance à la compression du béton en utilisant la méthode de formulation à savoir la méthode de **FAURY**.

➤ Les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression) des granulats recyclés de cette étude sont sensiblement inférieures à celles des granulats naturels, selon les seuils proposés dans la littérature, ils peuvent être qualifiés de qualité moyenne. Cela est dû à l'existence de la pâte cimentaire attachée aux granulats recyclés qui est poreuse et friable et de la nature des granulats naturels employés antérieurement d'une part et à la dégradation du béton démolé par des pathologies telles que la carbonatation d'autre part.

➤ Par rapport au béton naturel, et à tout âge, la résistance à la compression du béton sans additifs (béton à base de granulats recyclés à **100%** de substitution) est acceptable. Cela peut être dû à la qualité du béton structurel utilisé comme source d'agrégats. Les études montrent qu'en l'absence de technologie adéquate, le granulats recyclé peut faire en sorte que la résistance à la compression du béton atteigne la valeur caractéristique en **28 jours** de l'ordre de **25 à 30 MPa**.

-
- L'utilisation d'agrégats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse au problème
 - de l'élimination des déchets. Le béton recyclé peut être utilisé dans des structures à faible charge et dans des conditions de faible d'agressivité.
 - De la mise en valeur des ressources naturelles, aux aspects environnementaux et économiques, nous avons démontré la faisabilité des agrégats renouvelables pour remplacer les agrégats naturels.

Pour favoriser le recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (**DCD**), il faut que les granulats obtenus soient de bonne qualité. En outre, pour favoriser l'augmentation du taux de recyclage et l'utilisation de granulats de béton recyclé (**GBR**) dans de nouveaux bétons, il faut disposer aussi de déchets triés et de bonne qualité.

Il est important de préciser que l'utilisation de **GBR** mène à plus de vigilance et donc à plus d'essais de contrôle, notamment dans la phase de leur production, afin de garantir une bonne qualité et la durabilité du béton. Néanmoins, les **GBR** sont soumis au même essai de contrôle que les granulats naturels.

Après avoir testé le recyclage des bétons, il apparaît que cette pratique n'est ni nouvelle, ni techniquement difficile. Avec des granulats de béton recyclé (**GBR**) appropriés, le recyclage à un taux limité peut être effectué en toute confiance, conformément à l'état actuel de la normalisation. En fait, le principal obstacle est plutôt d'ordre économique. Concasser des morceaux de béton armé déconstruits n'est pas moins cher que concasser des blocs de roche naturelle, de sorte que le coût de production des **GBR** est au moins aussi élevé que celui des granulats naturels. On peut donc affirmer que le recyclage du béton se développera en priorité là où le coût des granulats naturels devient prohibitif, en raison du transport sur de longues distances et/ou d'une pénurie anticipée de granulats naturels locaux. Cependant, l'industrie de la construction est un grand navire qui a besoin d'incitations importantes pour s'écarter de sa route. Pour relever pleinement le défi de l'économie circulaire, il faudra donc souvent recourir à des politiques publiques orientées (marchés publics écologiques, taxes, incitations, etc.).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

[A.Guerrin et R.Laveur, Paris 1973] « Traité de béton armé »

[Abdelouhid El Atmioui ,2009] essais labo béton .

[Amor Ben Fraj, Sophie Decreuse], 2018, Bâtiment pour archives administratives : CD 77. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

B

[B. Cazacliu, L. Le Guen, E. Hamard, S. Roux, S. Braymand, 2018, Élaboration des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[B. Redjel,W. khelifi et R. Jauberthie, janvier 2014], mesure de la résistance à la compression du béton influence des méthode destructive (encrassement) et non destructive (ultrason) et géométries des corps d'épreuve . Ed Algérie équipement N 53.

[B.Radjel et F.X de Charentenay ,Octobre 1987]-« Utilisation des statistique de Weibull à la caractérisation des résines phénoliques et des matériaux composites SMC » Matériaux et Technique N°10-11.

[B.Radjel et S.Benmedakhen, juin 1991] « La pratique des essais destructifs : l'essai de traction »-Technique et Sciences-Revue Maghrébine N°8.

[B.Radjel et S.Benmedakhen] « La pratique des essais destructifs . Article paraitre ».

[B.Radjel] « Essai et expérimentation : cours de 1 èr année post-graduation »,Dépt Matériaux-Institut de Génie Civil – Université de Annaba.

[Belazougui M.,1993] règle de conception de calcul des structures en béton armé C.B.A 93.

[Butl 2013] L. Butler, J. S. West, S. L. Tighe, Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength, Construction and Building Materials 47 (2013) 1292–1301.

C

[C. Diliberto, L. Barnes-Davin, L. Izoret, A. Lecomte, J.-M. Mechling, P. Natin], 2018, Béton recyclé utilisé comme matière première alternative pour la fabrication du clinker portland. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[Cléo LANEYRIE, décembre 2014] Thèse de Doctorat « Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement des bétons de granulats recyclé.

D

[Duan 2014] Zhen Hua Duan, Chi Sun Poon, Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, Materials and Design 58 (2014) 19–29.

E

- [E. Garcia-Diaz, A. Djerbi, G. Le Saout], 2018, Microstructure du béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [E. Ghorbel, G. Wardeh, B. Fouré], 2018, Adhérence entre armatures et bétons de GBR. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [E. Ghorbel, T. Sedran, G. Wardeh], 2018, Propriétés mécaniques instantanées. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [E-H. Kadri, M. Mouret, D. Rogat, Z.A. Tahar], 2018, Effet des granulats de béton recyclé sur les propriétés du béton frais. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [Éric Garcia-Diaz], 2018, Le béton recyclé, de la fabrication au durcissement. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [Etxe 2007] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 735–742.
- [Evan 2007] L. 49] [Gome 2002] Jose M.V. Gomez-Soberon, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate An experimental study, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1301– 1311.
- [Evan 2007] L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 397–401.
- [Evangelista, J. de Brito, Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 397–401.

F

- [F .Gorisse,Paris 1978] « essai et contrôle du béton ».
- [F .Gorisse,Paris 1982] « les essais mécaniques in :le béton hydraulique » .Presse de l’Ecole National des ponts et Chaussées
- [F. Grondin, C. de Sa, T. Sedran, F. Cassagnabère, F. Benboudjema, A. Z. Bendimerad, M. Guo, A. Loukili, P. Nicot, E. Rozière, B. Fouré], 2018, Propriétés mécaniques différées. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [F. Robert, A.L. Beaucourt, H. Colina], 2018, Comportement au feu. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.
- [Ferret, de mars à novembre 1936] « La relation entre la résistance à la traction et compression des mortiers et bétons » *Revue des matériaux de construction et de travaux publics* .

[François de Larrard, Horacio Colina, 2018, Introduction. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[François de Larrard, 1999] structures granulaires et formulation des bétons.

G

[G-Dreux, éd Eyrolles Paris 1978] « Nouveau guide du béton ».

[G-Dreux, J.FESTA 1998] « Nouveau guide du béton ».

[Georges Dreux, 10 mai 1982] composition des bétons .Ghomari Fouad matériaux de construction .http://www.academia.edu/8249126/UNIVERSETE_ABOUBAKR_BELKAID_FACULTE_DE_TECHNOLOGIE_DEPARTEMENT_DE_GENIE_CIVIL_MAT%C3%A9riaux_de_Construction_Resbonsanle_Pr_GHOMAR . Date de la dernière consultation du site: 08/06/2020.

H

[Holcim (Suisse) SA ,Janvier 2015] Guide pratique du béton Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables Ed suisse.

I

[I. Moulin, E. Perin, O. Servan, M. Verbauwheide], 2018, Ouvrage d'art : contournement ferroviaire de Nîmes-Montpellier I. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[IREX Novembre 2018 COMMENT RECYCLER LE BETON DANS LE BETON RECOMMANDATIONS DU PROJET RECYBETON.

J

[J-M. Potier, B. Cazacliu], 2018, Fabrication du béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

K

[Kou 2011] Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon, Miren Etxeberria, Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete, Cement & Concrete Composites 33 (2011) 286–291.

L

[Laure Abdul Le Brun le 23 mai 2018]. Mise en point d'une méthodologie pour la formulation des bétons secs à démoulage immédiat.

[Laurent Izoret, ATILH], 2018, Liants incorporant des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton

recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

M

[M. Cyr, C. Diliberto, L. Izoret, A. Lecomte], 2018, Béton recyclé utilisé comme constituant du ciment ou comme ajout cimentaire au béton. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[M.Albiges et A .Coin, Paris 1976] « Résistance des matériaux appliqués » Toma 1, Collection UTI-ITBTP.

P

[P. Francisco, P. Rougeau], 2018, Recyclage dans l'industrie des produits préfabriqués en béton. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[P. Rougeau, L. Schmitt, J. Nai-Nhu, A. Djerbi, M. Saillio, E. Ghorbel, J.-M. Mechling, D. Bulteel, M. Cyr, A. Lecomte, N. Leklou, R. Trauchessec, I. Moulin, T. Lenormand, O. Amiri], 2018, Propriétés liées à la durabilité. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[Patrick Rougeau], 2018, Propriétés du béton recyclé durci. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[Paul 2014] Paula Folino, Hernán Xargay, Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, Construction and Building Materials 56 (2014) 21–31.

[Poon 2004] C.S Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, Construction and Building Materials, 18 (2004) 461-468.

[Prot,30 janvier 1947] « Recherches sur les essais du ciment »-Circulaire série F,N°35.

R

Recyclage beton colloque recybeton2015 .pdf [https:// www.infociments. fr](https://www.infociments.fr). Date de la dernière consultation du site: 02/05/202.

[R. Deborre, E. Garcia], 2018, Immeuble de bureaux : dalle intérieure. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

Recyclage du béton — [Wikipédia fr.wikipedia.org](https://fr.wikipedia.org) Date de la dernière consultation du site: 10/05/2020

[R.Lacroix,A.Fuentes,A .Thonier, éd Eyrolles Paris 1982] « Traité le béton armé ».

S

[S. Benmedakhen ,juin 1991] « Relation entre les résultats d'essais de flexion et de traction sue les matériaux » Mémoire de fin d'étude de licence d'enseignement technique en Génie Civil –Université de Annaba .

[S. Decreuse, N. Comte, C. Raillon, 2018, Techniques et matériaux de démolition . Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[S. Rémond, J.M. Mechling, E. Garcia-Diaz, R. Lavaud, R. Trauchessec, B. Cazacliu], 2018, Caractérisation des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[S.Djehgher,Mars 1989] « La vibration de haute fréquence dans la technologie des bétons lourds à base de granulats naturels et des déchets de l'usine d'EL Hadjar » - thèse de Magister – Dépt Matériaux-Institut de génie Civil – Université de Annaba.

T

[T. Sedran1 ,2018] Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recyclés. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le Béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4.

[Tome janvier 2013] le béton : formulation fabrication et mise en œuvre.

[Topç 2004] Ilker Bekir Topçu, Selim Sengel, Properties of concretes produced with waste concrete aggregate, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1307–1312.

V

[VALLETTE (R.), Eyrolles (1963).]– Manuel de composition des bétons. Méthode expérimentale.

[Vincent BOULAY ,octobre 2014] Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel mémoire du master université de sharbrooke canada.

[Vincent BOULAY, Octobre 2014] Mémoire de maitrise « Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel.

W

[W.Weibull,1939] « A statistical theory of the strength of materials» ing Vefenskaps Akad Handl (Royal Swedish Inst .Eng.Research .Proc.

[W.Weibull,1951] « A statistical distribution function of wide applicability» J.of Applied Mechanics, vol 18

[Wang 2010] Wang XT, Yang DJ. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading. Civil engineering in china – current practice and research report (2010) 787–90.

ANNEXES

ANNEXE A

➤ **Méthodologie de la détermination des paramètres de la courbe de référence (composition de béton ordinaire) :**

➤ **La courbe de référence :**

Pour l'étude du béton, nous devons tracer la courbe de référence ; cette courbe caractérise le mélange optimal du béton ; elle passe par trois (03) points :

Point O (0;0) qui caractérise la réparation maximale du béton.

Point M (X; Y) qui caractérise la réparation du béton en deux parties égales

➤ Est celle où on retrouve les gros éléments et les éléments moyens du béton ;

➤ Est celle où on retrouve les éléments moyens et les éléments fins du béton.

Point B (Dmax;100%) qui est l'origine de la courbe.

a) Calcul de la dimension maximale (D max)

Ouverture du tamis (mm)	%des refus cumulés
12.5	28
10	78

$$d_1 = 12.5$$

$$d_2 = 10$$

$$x = 28$$

$$Y = 50$$

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{Y}$$

$$D_{\max} = 13.90$$

$$X = \frac{D_{\max}}{2} = \frac{13.90}{2} = 6.95 \text{ mm}$$

b) Calcul de l'ordonnée Y :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{\max}}$$

$$A = 31; \sqrt[5]{D_{\max}} = \sqrt[5]{13.9} = 1.6927$$

$$Y = 59.78$$

Sachant que :

A: est le coefficient des granulats (**roulé ou concassée**), il dépend du niveau de consistance de béton.

c) Dosage en eau

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} = \frac{0.300}{1.6927} = 0.177$$

Sachant que :

K: est obtenu du tableau de valeur d'après notre consistance de béton et la qualité des matériaux ;

I: est l'indice des vides ;

Le volume d'eau est donc :

$$V_{\text{eau}} = I \times 1000 = 177 \text{ Litre}$$

Quantité du béton frais 1000 L ;

Quantité d'eau : **177 L** ;

Le volume de matériaux secs :

$$V_{\text{MS}} = 1000 - I$$

Quantité de matière sèche : **823 L**

d) Dosage du ciment

Dans notre étude, nous avons utilisé la quantité de **350kg/m³**.

Le volume du ciment est donc :

$$V_{\text{AC}} = \frac{P_C}{D_C} = \frac{350}{3.1} = 112,9\text{L} \approx 113\text{L}$$

Le pourcentage du ciment nécessaire qu'on doit utiliser dans notre béton est :

$$\%C = \frac{V_{\text{AC}}}{V_{\text{MS}}} \times 100 = \frac{113}{823} \times 100 = 13,7\% \approx 14\%$$

Le pourcentage de gravier et de sable est donc:

$$\%G+S = 86\%$$

➤ Méthodologie de la détermination des paramètres de la courbe de référence (composition de béton recyclé):

a) Calcul de la dimension maximale (D_{max}) :

Ouverture du tamis (mm)	% des refus cumulés
12.5	17
10	53

$$d_1=12.5$$

$$d_2=10$$

$$x=17$$

$$Y=36$$

$$D_{max} = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{Y}$$

$$D_{max}=13.68$$

$$X = \frac{D_{max}}{2} = \frac{13.68}{2} = 6.84 \text{ mm}$$

b) Calcul de l'ordonnée Y :

$$Y=A+17\sqrt[5]{D_{max}}$$

$$A=31; \sqrt[5]{D_{max}}=\sqrt[5]{13.68}=1.6874$$

$$Y=59.69$$

$$M(6.84; 59.69)$$

Sachant que :

A : est le coefficient des granulats (**roulé ou concassée**), il dépend du niveau de consistance de béton.

c) Dosage en eau efficace:

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{max}}} = \frac{0.310}{1.6874} = 0.1837 \approx 184 \text{ L}$$

Sachant que :

K:est **obtenu** du tableau de valeur d'après notre consistance de béton et la qualité des matériaux,

I:est l'indice des vides.

Le volume d'eau est donc :

$$V_{eau}=I \times 1000=184 \text{ Litre}$$

Quantité du béton frais **1000 L**

Quantité d'eau efficace : **184 L**

Le volume de matériaux secs :

$$V_{MS} = 1000 - I$$

Quantité de matière sèche : **816 L**

d) Dosage du ciment :

Dans notre étude, nous avons utilisé la quantité de **350kg/m³**.

Le volume du ciment est donc :

$$V_{AC} = \frac{P_C}{D_C} = \frac{350}{3.1} = 113L$$

Le pourcentage du ciment nécessaire qu'on doit utiliser dans notre béton est :

$$\%C = \frac{V_{AC}}{V_{MS}} \times 100 = \frac{113}{816} \times 100 = 13,8\% \approx 14\%$$

Le pourcentage de gravier et de sable est donc:

$$\%G+S = 86\%$$

L'ensembles des carrières qui se trouve à Rechaïga

➤ Situation géographique :

L'ensemble des carrières qui se trouvent à **Rechaïga** appartiennent au plateau du **Sersou** qui y est géographiquement situé à l'Est de la ville de Tiaret. Il est limité au Nord par l'Oued **Nahar Ouassel**, à l'Ouest par la région de **Tiaret**, au Sud par les piémonts du **Djebel Nador**, et à l'Est par les montagnes de **Chellala Rebeïll**. Sa superficie est de **2215 km²**.

➤ Aperçu géologique de la zone de carrières :

D'une manière générale, dans le plateau de **Sersou** les terrains anciens occupent les reliefs de bordure, tandis que les terrains plus récents (**Plio- Quaternaire**) forment le remplissage qui recouvre le plateau. Les formations rencontrées dans la région du **Sersou** sont constituées de bas en haut par :

✓ Le Trias :

Représenté par de nombreux diapirs dont certains traversent la couverture quaternaire. Ce sont des schistes et des grès rouges, renfermant des gypses et du sel gemme. Dans le **Djebel Nador**, il forme l'axe du massif.

✓ Le Jurassique :

Il est surtout présent dans le **Djebel Nador**, il débute par le Trias à faciès de dolomie et de calcaires marneux. Le Jurassique moyen est constitué de calcaires marneux. Le Jurassique moyen est constitué de calcaires marneux et grès quartzeux dans le **Djebel Nador** et dolomies cristallines dans les monts de **Chellala**. La partie inférieure du Jurassique supérieure est à dominance marneuse ou **marno-calcaire (Callovo-Oxfordien-Séquanien)**. Le **Kimméridgien** et le **Portlandien** sont constitués respectivement par des dolomies massives, des calcaires marneux et des dolomies.

✓ Le Crétacé :

Dans la plaine de **Sersou**, le Crétacé affleure au Sud, au niveau du versant **Nord de Djebel Es Selah**. Il est subdivisé en deux ensembles représentés de la base au sommet par :

Le Crétacé inférieur constitué d'un Albien continental **gréso-sableux** affleurant à l'Est à **Ras Nokra** et un Albien marin constitué de calcaires oolithiques et de marnes visibles dans le versant Sud de **Djebel Rechaïga**.

Le Crétacé supérieur regroupant le Cénomaniens formé de calcaires et de marnes, le Turonien marneux et le Sénonien essentiellement calcaire. Le Crétacé supérieur est recouvert en discordance par les formations **mio-plio-quaternaires**.

✓ L'Eocène :

Affleure au Nord du plateau. Il est représenté par le **Lutétien** supérieur et l'**Eocène** inférieur comprenant un **Lutétien** inférieur et l'**Yprésien-Thanétien**.

Le Lutétien supérieur est distingué par deux unités. La première, caractérisée par des minces lames d'argiles brunes ou ocre, et la deuxième constituée d'argiles brunes ou ocre s'intercalant avec des lumachelles, des calcaires blancs rognon eux, des grès sableux tendres et des grès glauconie.

L'Eocène inférieur est formé à la base par quelques silex et des passées glauconio-phosphatées, au sommet par des marno-calcaires blancs. Ces derniers sont surmontés par des calcaires gréseux à **Silex** de faible épaisseur et par des calcaires gréseux et des marnes d'une épaisseur comprise entre **30** et **70 m**. La partie supérieure se caractérise par une alternance de calcaires marneux blancs, de marnes et de calcaires à silex.

✓ **L'Oligocène :**

Est présent à l'extrémité nord-est et nord-ouest de la région de **Sersou**. Il débute localement par des conglomérats à galets de calcaires et des silex attribués à l'**Yprésien**, et sur lesquels repose une épaisse série de marnes ou argiles blanchâtres et de grès.

✓ **Le Miocène:**

Au Nord du plateau du **Sersou**, le **Miocène** inférieur est représenté par plusieurs faciès.

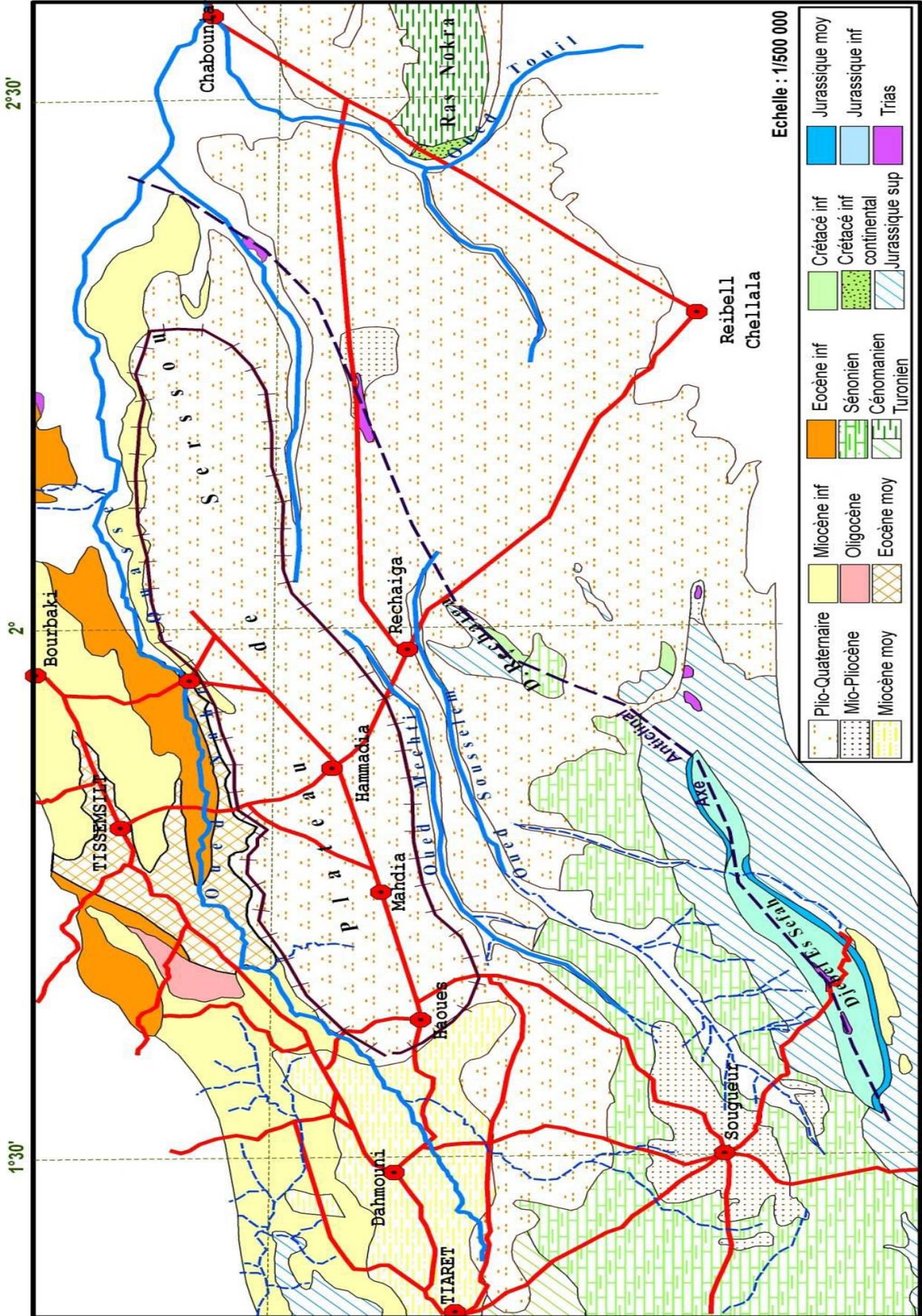
Tandis qu'au centre de la plaine, le **Miocène** est transgressif et discordant sur n'importe quel niveau stratigraphique. Il est constitué par des marnes grises ou verdâtres qui peuvent passer localement à des grès calcaires. Ces formations dont l'épaisseur varie entre **40** et **135 m** (**selon les logs forages**) sont attribuées au **Miocène** inférieur marin. Sur la bordure sud de la plaine, les forages ont montré l'existence d'un complexe gréseux et argileux d'origine continentale sous les marnes grises du **Miocène** inférieur marin.

✓ **Le Pliocène:**

A un faciès continental, formé de poudingues, graviers et sables argileux et constituant les terrains de remplissage de la plaine.

✓ **Le Quaternaire:**

Il s'agit principalement de terrains de recouvrement **fluvio-lacustres** constitués par des marnes crayeuses plus ou moins sableuses et argileuses couvertes par des lits de sables et de galets. Les alluvions récentes régulièrement réparties le long des principaux cours d'eau, appartiennent également au Quaternaire.



➤ Les résultats des analyses au laboratoire des différents agregats provenant des carrières de rechaiga :

Carrière BEN BRAHIM										
Echantillons	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à10% (%)	LA (%)	MDE (%)	Imp. (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0.42	N.M	55	/	/	/	/	90	1.56	2.63
3/8	/	/	/	28	10	3.75	/	94	1.45	2.69
8/15	/	/	/	22	12	0.37	9.16	94	1.47	2.78
15/25	/	/	/	21	15	0.56	15.36	/	/	/

Carrière BEN BRAHIM										
Echantillons	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à10% (%)	L.A (%)	M.D.E (%)	Imp. (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0.46	N.M	65	/	/	/	/	90	1.78	2.72
3/8	/	/	/	25	24	0.62	/	82	1.47	2.75
8/15	/	/	/	24	22	0.25	17.98	82	1.444	2.76
15/25	/	/	/	20	22	0.20	16.82	82	1.479	2.77

Carrière BEN BRAHIM										
Echantillons	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à10% (%)	L.A (%)	M.D.E (%)	Imp. (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0.65	N.M	48	/	/	/	/	66	1.679	2.73
3/8	/	/	/	28	16	2.12	/	82	1.47	2.73
8/15	/	/	/	27	17	0.80	14.49	70	1.49	2.75
15/25	/	/	/	25	14	0.65	7.55	80	1.46	2.74

Carrière CAROMA

Echantillons	Classes réelles	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à 10 (%)	L.A (%)	M.D.E (%)	Imp. (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0/4	0.48	N.M	66	/	/	/	/	94	1.72	2.38
3/8	5/7	/	/	/	25	12	0.74	/	/	1.46	2.78
8/15	8/14	/	/	/	24	12	0.48	05	/	1.50	2.79

Carrière CAROMA

Echantillons	Classes réelles	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à10% (%)	L.A (%)	MDE (%)	Imp (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0/3	0.20	N.M	67	/	/	/	/	90	1.72	2.84
3/8	4/6	/	/	/	23	17	0.25	/	94	1.440	2.76
8/15	8/14	/	/	/	26	19	0.50	9.04	94	1.460	2.70

Carrière CAROMA

Echantillons	Vb (g/100g)	IP (%)	E.S à10 % (%)	L.A (%)	M.D.E (%)	Imp. (%)	C.A (%)	CaCO ₃ (%)	γ_{app} (t/m ³)	γ_{abs} (t/m ³)
0/3	0.36	N.M	67	/	/	/	/	44	1.779	2.84
0/3	0.33	N.M	67	/	/	/	/	32	1.553	2.83
3/8	/	/	/	28	16	2.12	/	82	1.476	2.75
8/15	/	/	/	27	17	0.80	14.49	70	1.493	2.75
15/25	/	/	/	25	14	0.65	7.55	80	1.463	2.74

Classification des sables en fonction du module de finesse.

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

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

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

Classification des roche en fraction du coefficient L_a

Coefficient L _a	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre