

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL**

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

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

**Présenté par :**

BETTARCHA KHADIDJA

BOUABDELLI AICHA

*Sujet du mémoire*

***VARIATION DU DOSAGES D'UN  
SUPERPLASTIFIANT SUR LA RÉSISTANCE EN  
COMPRESSION DU BÉTON***

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

Mr, H.BEKKI

Président

Melle, Z.RENNAK

Rapporteur

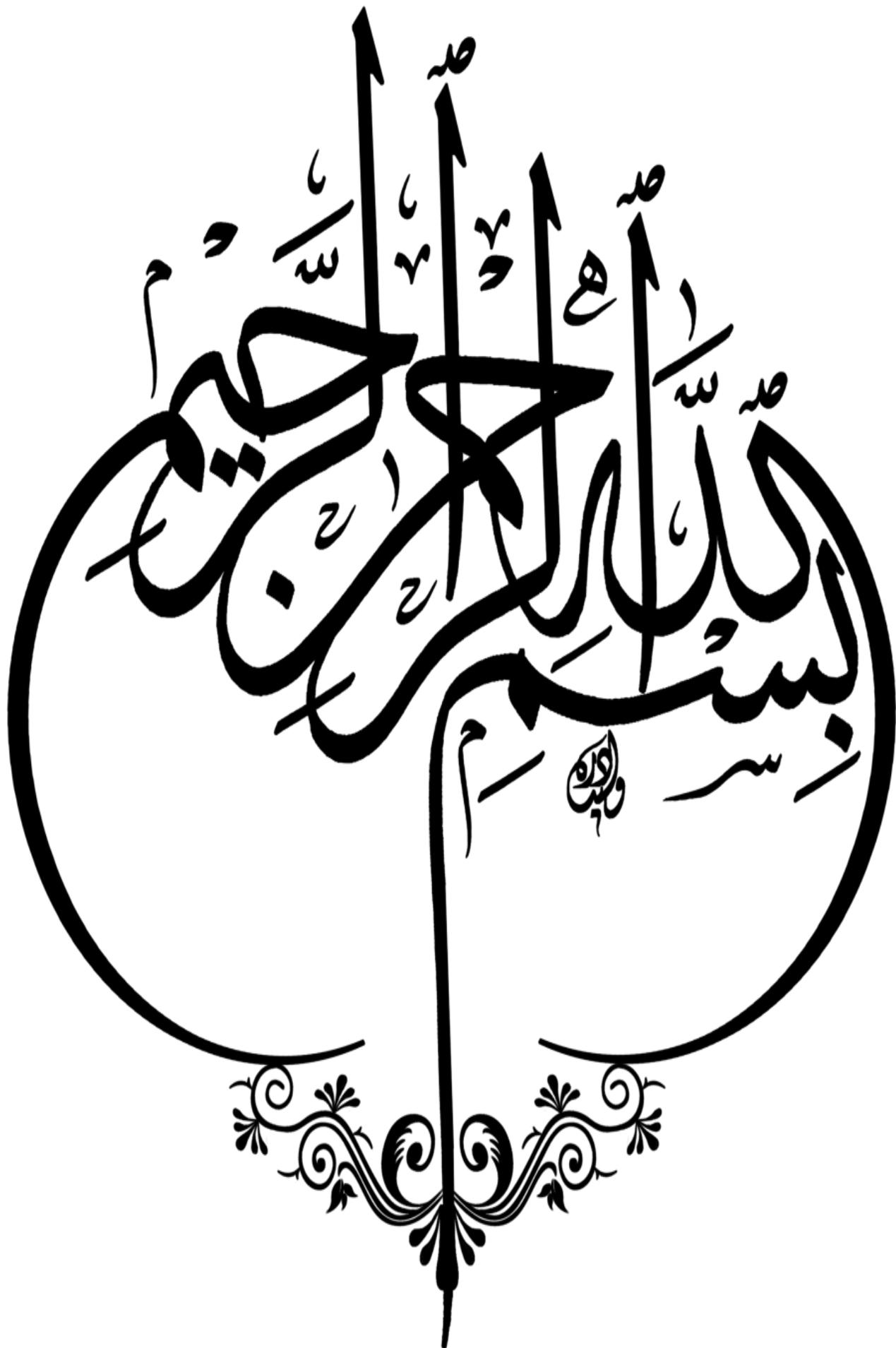
Mr, B.SERBAH

Examineur

Mme, A.DRAOUI

Examineur

PROMOTION : 2019/2020



# Dédicace

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...  
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...aussi, c'est simplement que je dédie ce modeste travail...*

*À mes très chers parents*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer la profondeur des sentiments d'affection, d'estime et de respect que je vous porte, pour l'amour dont vous m'avez toujours comblé, l'éducation et le bien être que vous m'assurez, pour votre soutien, vos sacrifices et vos prières. Aussi fière d'y appartenir, aussi déterminé à en être digne*

*À mes chers frères ET ma chère sœur*

**ADDA, MOHAMED NOUR EL-ISLEM, MAROUA ROUMAÏSSA**

*Je vous souhaite tout le succès et la prospérité dans votre vie*

*À tous les membres de la famille (BETTARCHA, ZITOUNI).*

*À tous mes chers amis chacun par son nom*

**BOUALI IMENE.SEHABET FATIMA .BOUAKKAZ MAROUANE**

**AEK .....**

*À tous les employés DE LTPO*

**NOUAR ABD EL KADER, HAMER AL AIN SAFIA**

**.DAGHMICHE AZZEDDINE BOURASSE DJILALI.BOUMEDIENE**

**RACHID....**

**BETTARCHA KHADIJA**

# Dédicace

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point le remercier  
Comme il se doit, Ton affection me couvre, la bienveillance me  
Guide et la présence à mes côtés a toujours été ma source de force  
Pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père*

*Tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager,  
Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mon très cher frère Oussama*

*Qui partage avec moi tous les moments d'émotion lors de la  
Réalisation De ce travail, il me chaleureusement supporté et  
Encouragé tout au long De mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et a ceux qui me donnent de l'amour  
Et de la vivacité,*

*Atous mes amis chacun par son nom, BOUALI IMAN, MILOUDI  
BOUCHRA, MILOUDI NOUR EL HOUDA, BRAHIMI FATIMA,  
KADARI KARIMA, qui mon toujours encouragé et à qui je  
souhaite  
Plus de succès.*

**BOUABDELLI AICHA**



# REMERCIEMENT

*A l'issue du cycle de notre formation*

*Nous tenons à remercier dieu le tous puissant.*

*Nos remerciements les plus sincères vont à:*

*Mademoiselle Rennak Zohra*

*Pour leurs conseils précieux*

*Et leurs suivis qu'il nous prodigué*

*Durant tout notre travail*

*Nos vifs remerciements vont aux membres*

*De jury pour avoir accepté de juger*

*Notre présent travail*

*En fin toute personne qui a participé de près*

*Ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire*

*Soit sincèrement remerciée.*

**BETTARCHA KHADIDJA**

**BOUABDELLI AICHA**



# Résumé

## المخلص

يهدف العمل المقدم في هذه الرسالة إلى إجراء دراسة تجريبية على السلوك الميكانيكي للخرسانة العادية والخرسانة مع إضافة الملدنات المتفوقة المخفضة للماء.

يقارن هذا العمل اختبارات الضغط التي أجريت على عينات اسطوانية  $16 \times 32$  سم من الخرسانة العادية والخرسانة التي تحتوي على الملدن المتفوق Master Ease 3666 تحت الأحمال المتزايدة حتى الانكسار.

أجرينا التحليلات الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية على مكونات الخرسانة لدينا، وكذلك اختبارات على الخرسانة الطازجة مثل الركود وقمنا بمقارنة قيم الركود لخرسانة الشاهد والخرسانة مع المادة المساعدة لدراسة قابلية تشغيل الخرسانة.

تعمل إضافة الملدن المتفوق Master Ease 3666 بجرعة 1.2% (من وزن الأسمنت) على زيادة مقاومة الانضغاط للخرسانة في أعمار مختلفة (7 ، 14 ، 21 ، 28 يومًا).

**الكلمات المفتاحية:** السلوك الميكانيكي، المادة المساعدة، الخرسانة ، قوة الضغط.

## RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire vise à mener une étude expérimentale sur le comportement mécanique du béton ordinaire et béton avec adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau.

Ce travail compare les essais de compression effectués sur des échantillons de béton ordinaire cylindrique 16 x 32 cm et du béton avec unsuperplastifiantMasterEase 3666 sous des charges accrues jusqu'à la rupture.

On a effectué des analyse physiques, mécaniques et chimiques sur les constituants de notre béton, ainsi que des essais sur le béton frais comme l'affaissement, on a comparé les résultats des valeurs d'affaissement du béton témoin et béton avec adjuvant pour étudier l'ouvrabilité de béton.

L'ajout de l'adjuvant MasterEase 3666 de dosage (1,2% du poids du ciment) augmente la résistance en compression du béton à différents âge (7, 14, 21 et 28 jours).

**Mots Clés :** Comportement mécanique, adjuvant, béton, résistance en compression.

## Abstract

The work presented in this thesis aims to carry out an experimental study on the mechanical behavior of ordinary concrete and concrete with high water-reducing superplasticizer admixture.

This work compares the compression tests performed on 16 x 32 cm cylindrical plain concrete samples and concrete with MasterEase 3666 superplasticizer under increased loads to failure.

We performed physical, mechanical and chemical analyzes on the constituents of our concrete, as well as tests on fresh concrete such as slump, we compared the results of the slump values of control concrete and concrete with admixture to study workability of concrete.

The addition of MasterEase 3666 dosing admixture (1.2% by weight of cement) increases the compressive strength of concrete at various ages (7, 14, 21 and 28 days).

**Keywords:** Mechanical behavior, admixture, concrete, compressive strength

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	I
<b>Table de matières</b> .....	V
<b>Liste des tableaux</b> .....	XII
<b>Liste des figures</b> .....	XIV
<b>Liste des notations</b> .....	XVIII
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur le béton</b> .....	6
I.1 Histoire du béton.....	7
I.2 Introduction.....	8
I.3 La composition du béton.....	8
I.3.1 Le ciment .....	9
I.3.2 L'eau de gâchage .....	9
I.3.3 Les granulats .....	10
I.4 Fabrication du béton .....	11
I.5 Propriétés du béton .....	11
I.6 Qualités essentielles d'un béton.....	12
I.7 Béton frais.....	12
I.8 Du béton frais au béton durci : Ouvrabilité et consistance .....	14
I.8.1 La Ouvrabilité .....	14
I.8.2 Caractérisation de la rhéologie du béton frais.....	15
I.8.3 Importance de l'ouvrabilité.....	15
I.8.4 Dès la fin du malaxage, l'ouvrabilité change.....	15
I.9 Méthodes de mesure de la consistance .....	16
I.9.1 Classe de consistance.....	16
I.9.2 Contrôle de la consistance en début de bétonnage.....	16
I.9.3 Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance.....	17
I.10 Béton durci.....	18
I.11 Béton et dosage.....	19
I.12 Classification du béton.....	19
I.13 La déformation des bétons .....	21
I.13.1 Le retrait.....	21
I.13.2 La dilatation .....	22
I.13.3 Le fluage .....	22
I.14 Les domaines d'emploi du béton .....	23
I.14.1 Le bâtiment .....	23
I.14.2 Les travaux publics .....	23
I.14.2.1 Les ponts .....	23
I.14.2.2 Les tunnels .....	23
I.14.2.3 Les barrages .....	23
I.14.2.4 Les route .....	23
I.14.3 Autres ouvrages .....	24
I.15 Conclusion .....	24

<b>Chapitre II : Résistances du béton</b> .....	25
II.1 Introduction .....	26
II.2 Résistance à la compression .....	27
II.3 Paramètres influençant la résistance.....	31
II.3.1 Influence du rapport eau/ciment .....	31
II.3.2 Influence du dosage en ciment .....	34
II.3.3 Influence du type de ciment.....	34
II.3.4 Influence de la porosité.....	36
II.3.5 Influence de rapport granulats/ciment (G/C) .....	38
II.3.6 Influence de la taille maximale du granulats.....	39
II.3.7 Influence du volume du granulats .....	39
II.3.8 Influence de la forme de granulats .....	40
II.4 Résistance à la traction .....	41
II.4.1 Essai de résistance à la traction par flexion .....	43
II.4.2 Essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien .....	44
II.4.3 Résistance à la traction par fendage.....	44
II.5 Conclusion .....	46
<b>Chapitre III : Les adjuvants</b> .....	47
III.1 Un peu d'histoire.....	48
III.2 Introduction .....	48
III.3 Définitions des adjuvants .....	49
III.4 L'intérêt des adjuvants .....	49
III.5 Rôle des adjuvants.....	50
III.6 Les fonctions .....	50
III.6.1 La fonction principale .....	50
III.6.2 Les fonctions secondaires.....	51
III.7 Les fonctions principales de classification d'adjuvants .....	51
III.7.1 Classification .....	51
III.7.1.1 Plastifiants réducteurs d'eau .....	52
III.7.1.2 Superplastifiants hautement réducteurs d'eau .....	53
III.7.1.3 Rétenteurs d'eau .....	54
III.7.1.4 Entraîneurs d'air .....	54
III.7.1.5 Accélérateur de prise et durcissement .....	58
III.7.1.6 Retardateurs .....	59
III.7.1.7 Hydrofuges .....	60
III.7.1.8 Antigels et antigelifs.....	61
III.7.1.9 Produits divers .....	62
III.7.1.10 Autres types d'adjuvants .....	62
III.7.2 Les fonctions principales des adjuvants .....	65
III.7.2.1 «Ouvrabilité».....	65
III.7.2.2 «Prise» .....	65
III.7.2.3 «Autres propriétés » .....	66
III.8 Actions des adjuvants.....	66
III.8.1 Amélioration des conditions de mise en œuvre-Ouvrabilité .....	66
III.8.2 Amélioration des performances mécaniques.....	67
III.8.3 Amélioration de la durabilité.....	67

III.9 Domaines d'utilisation .....	70
III.9.1 Plastifiants .....	70
III.9.2 Superplastifiants .....	71
III.9.3 Retardateurs de prise .....	71
III.9.4 Accélérateurs de prise .....	71
III.9.5 Entraîneurs d'air .....	72
III.9.6 Hydrofuges .....	72
III.10 Dosage des adjuvants .....	73
III.10.1 Doses d'emploi.....	73
III.10.2 Méthodes d'introduction .....	73
III.10.3 Effets secondaires défavorables .....	74
III.11 Précautions à prendre .....	76
III.12 Modalités de l'utilisation des adjuvants.....	77
III.13 La normalisation des adjuvants .....	78
III.14 Nouveaux types de béton rendus possibles grâce aux adjuvants .....	80
III.14.1 Bétons autoplaçants .....	80
III.14.2 Bétons à haute performance .....	80
III.15 Un béton amélioré par des adjuvants est-il recyclable? .....	81
III.16 Conclusion.....	82
<b>Chapitre IV : Les superplastifiants .....</b>	<b>83</b>
IV.1 Introduction.....	84
IV.2 Les superplastifiants « haut réducteurs d'eau » .....	84
IV.3 Classification des superplastifiants .....	84
IV.3.1 Superplastifiant à base de sulfonâtes.....	85
IV.3.1.1 Lignosulfonate modifiés (LSM).....	85
IV.3.1.2 Polynaphtlènes sulfonâtes (PNS) .....	85
IV.3.1.3 Polymélamine sulfonâtes .....	86
IV.3.2 Superplastifiant à base de carboxylate .....	86
IV.4 Modes d'action des superplastifiants .....	90
IV.4.1 Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment.....	90
IV.4.2 Répulsion électrostatique .....	91
IV.4.3 Encombrement stérique.....	91
IV.4.4 Facteurs affectant l'action des superplastifiants.....	92
IV.4.5 Effets rhéologiques .....	93
IV.5 Applications des superplastifiants.....	94
IV.5.1 Performances technologiques des superplastifiants .....	94
IV.5.2 Nouveaux bétons.....	95
IV.5.3 Avantages économiques et écologiques.....	97
IV.6 Conclusion .....	98
<b>Chapitre V : Les méthodes de formulation du béton.....</b>	<b>100</b>
V.1 Introduction .....	101
V.2 Méthode de formulation du béton .....	101
V.2.1 Méthode de Bolomey .....	102
V.2.2 Méthode d'Abrams .....	103
V.2.3 Méthode de Vallette .....	103

V.2.4	Méthode de Baron et Lesage .....	104
V.2.5	Méthode de Joisel : .....	105
V.2.6	Etude théorique de Caquot .....	105
V.2.7	Méthode de FULLER-THOMPSON.....	106
V.2.8	Méthode pratique de « DREUX-GORISSE » .....	106
V.2.8.1	Dosage en ciment et en eau .....	106
V.2.8.2	Ajustement du dosage en eau .....	108
V.2.8.3	Dosage en pourcentage des granulats.....	109
V.2.8.4	La ligne de partage .....	110
V.2.8.5	Dosage en masse des granulats .....	111
V.2.9	Méthode Américaine (ACI 211).....	113
V.2.10	Méthode Britannique (BRE 1988): .....	116
V.2.11	Méthode de Seramtaïev .....	117
V.2.12	Méthode de Faury.....	117
V.3	Conclusion.....	122
<b>Chapitre VI</b>	<b>: Les essais sur béton .....</b>	<b>123</b>
VI.1	Introduction.....	124
VI.2	Matériaux utilisés.....	124
VI.2.1	Le ciment.....	124
VI.2.2	Les Granulats (NF P 18-541) .....	125
VI.2.3	L'eau de gâchage .....	125
VI.3	Les différents essais effectués au sein de laboratoire.....	126
VI.3.1	Les analyses physiques .....	126
VI.3.1.1	Essai d'équivalent de sable (NF P18-598).....	126
VI.3.1.2	La propreté superficielle des graviers (NF P18-591) .....	131
VI.3.1.3	Essai d'analyse granulométrique par tamisage (NA 2607) 1992-08-01 .	132
VI.3.1.4	Module de finesse (NF P18-540) .....	134
VI.3.1.5	Mesure du coefficient d'aplatissement (NA. 255/1990).....	135
VI.3.1.6	La masse volumique apparente (NF 18-555).....	136
VI.3.1.7	La masse volumique absolue (NA 255/1990).....	138
VI.3.1.8	Mesure de masses volumique des gravillons (NA.255/1990).....	140
VI. 3.2	Analyses chimiques.....	140
VI.3.2.1	Essai de bleu de méthylène « valeur de bleu » (NF P 18-592) .....	140
VI.3.2.2	Essai de la teneur en carbonate «Calcimètre» (NF P 94-048).....	143
VI.3.3	Les analyses mécaniques .....	146
VI.3.3.1	Essai de l'usure Micro-Deval (NFP 18-572) .....	146
VI.4.	L'adjuvant .....	148
VI.4.1	Description.....	148
VI.4.2	Innovation .....	148
VI.4.3	Recommandation d'usage .....	149
VI.4.4	Caractéristiques et Avantages .....	149
VI.4.5	Propriétés .....	149
VI.4.6	Application.....	150
VI.4.7	Dosage.....	150
VI.4.8	Compatibilité :.....	150
VI.5	Formulation des bétons .....	150

VI.5.1 Formulation du béton ordinaire.....	151
VI.5.2 Formulation du Béton avec adjuvant BA.....	153
VI.5.3 Confection des bétons ordinaires (BO) et bétons avec adjuvant (BA).....	153
VI.5.4 Malaxage du béton.....	153
VI.6 Caractérisation du béton à l'état durci.....	157
VI.6.1 Résistance en compression.....	157
VI.7 Conclusion : .....	158
<b>Chapitre VII : Résultats et interprétations.....</b>	<b>159</b>
VII.1 Introduction.....	160
VII.2 Analyses physiques.....	160
VII.2.1 Essai d'Equivalent de Sable.....	160
VII.2.2 Propreté superficielle.....	160
VII.2.3 Analyse Granulométrique par tamisage.....	161
VII.2.3.1 Sable.....	161
VII.2.3.2 Gravier (3/8).....	161
VII.2.3.3 Gravier (8/15).....	162
VII.2.4 Module de finesse.....	163
VII.2.5 Coefficient d'aplatissement CA.....	163
VII.2.6 Essai de la masse volumique absolue et la masse volumique apparente.....	164
VII.2.6.1 La masse volumique apparente $M_{vapp}$ .....	164
VII.2.6.2 La masse volumique absolue $M_{vabs}$ .....	165
VII.2.6.3 La masse volumique des graviers 3/8 et 8/15.....	165
VII.3 Analyses chimiques.....	166
VII.3.1 Valeur de bleu de méthylène pour le sable.....	166
VII.3.2 Détermination de la teneur en carbonate «Calcimètre» « $CaCO_3$ ».....	166
VII.3.2.1 Pour le sable.....	166
VII.3.2.2 Pour les graviers (3/8) et (8/15).....	166
VII.4 Analyse mécaniques.....	167
VII.4.1 Essai de l'usure Micro-Deval (MDE).....	167
VII.5 Formulation de béton.....	168
VII.5.1 Calcul de la dimension maximale ( $D_{max}$ ).....	168
VII.5.2 Calcul de l'ordonné Y.....	169
VII.5.3 Calcul de l'indice des vides I.....	169
VII.5.4 Calcul du volume des matériaux secs $V_{MS}$ .....	169
VII.5.5 Volume absolue de ciment.....	169
VII.5.6 Le % du volume absolu du ciment.....	169
VII.5.7 Le % en volume absolu des granulats.....	169
VII.6 Compositions de béton.....	169
VII.6.1 Béton ordinaire.....	170
VII.6.2 Béton avec adjuvant :.....	170
VII.6.3 La consistance.....	171
VII.7 Résistance en compression.....	173
VII.8 Conclusion.....	176
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>177</b>
<b>Annèxes.....</b>	<b>177</b>

---

<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>177</b>
<b>Liste des normes .....</b>	<b>177</b>

# Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I.1	Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton	13
Tableau I.2	Classe de consistance	17
Tableau I.3	Influence des paramètres de formulation sur la consistance et les résistances	17
Tableau I.4	Dosage pour 1 m <sup>3</sup> de béton	19
Tableau I.5	Classe de résistance de béton	21
Tableau I.6	Causes et constatation avec les remèdes de retrait	21
Tableau II.1	Résistance à la compression de quelques matériaux courants	27
Tableau II.2	Composition, caractéristiques et condition de conservation des mortiers différents rapports (0,5 ; 0,8)	30
Tableau II.3	Méthodes d'essai de la résistance à la traction	45
Tableau IV.1	Réduction d'eau pour les différents superplastifiants	95
Tableau V.1	Valeurs de coefficient A	102
Tableau V.2	Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams)	103
Tableau V.3	Valeurs approximatives du coefficient granulaire G	107
Tableau V.4	Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire	108
Tableau V.5	Valeur correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.	110
Tableau V.6	Coefficient de compacité	112
Tableau V.7	Valeur de « A »	119
Tableau V.8	Valeur de « K »	120
Tableau VI.1	Composition chimique d'eau de gâchage (mg/l)	126
Tableau VI.2	Valeurs de l'ES	130
Tableau VI.3	Les valeurs de module de finesse	134
Tableau VI.4	Valeurs de la consistance A	152
Tableau VII.1	Résultats d'équivalent de sable visuels et par piston	160
Tableau VII.2	Résultats de propreté superficielle de gravier	161
Tableau VII.3	Résultats d'analyse granulométrique de sable	161
Tableau VII.4	Résultats d'analyse granulométrique de gravier (3/8)	162
Tableau VII.5	Résultats d'analyse granulométrique du gravier (8/15)	162
Tableau VII.6	Coefficient d'aplatissement de gravier (8/15)	164
Tableau VII.7	Les masses volumiques apparentes de ciment, sable (0/5) et graviers (3/8;8/15)	164
Tableau VII.8	Les masses volumiques absolues de ciment et sable	165
Tableau VII.9	Résultats de la masse volumique de gravier 3/8 et 8/15	165
Tableau VII.10	Valeurs des Ca Co <sub>3</sub> des sable, graviers (3/8 ; 8/15)	167
Tableau VII.11	Résultats de l'essai de Micro-Deval	167
Tableau VII.12	Composition du béton ordinaire en poids et en litres	170
Tableau VII.13	Composition du béton avec adjuvant MasterEase3666 en poids et en litres	170

Tableau VII.14	Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement	171
Tableau VII.15	Résultat de la résistance en compression aux différentes échéances des bétons témoin ordinaire (BO) et bétons avec adjuvant (BA) MasterEase3666.	174

# Liste des figures

N°	Titre		Page
Figure I.1	Test du cône d'Abrams		13
Figure I.2	Exemple d'évolution de la consistance et délai de mise en œuvre garanti d'un béton		16
Figure I.3	Déformation du béton dû aux fluages		22
Figure II.1	Représentation schématique de la densité de compactage de ciments avec différents constituants principaux		28
Figure II.2	La zone de transition des granulats dans différent type de ciment		28
Figure II.3	Essais de compression simple sur deux échantillons de mortier		31
Figure II.4	Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport		32
Figure II.5	Valeurs des résistances en fonction du rapport		32
Figure II.6	Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E		33
Figure II.7	Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton		33
Figure II.8	Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton		34
Figure II.9	Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme		35
Figure II.10	Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m <sup>3</sup>		36
Figure II.11	Développement de la résistance de bétons de rapport de 0,49 confectionnés avec différents ciments		36
Figure II.12	Confrontation résultats expérimentaux et modèles de la relation porosité-résistance en compression des bétons selon kumar		37
Figure II.13	Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment.		39
Figure II.14	Effet de volume de granulat, d'après Stock et Hannant D.J et Williams R.I.T		40
Figure II.15	Mode de rupture en traction directe d'une éprouvette dont les granulats sont principalement déchaussés		42
Figure II.16	Courbes contrainte-déformation du granulat, spécifiques à la pâte de ciment, au mortier et au béton		43
Figure II.17	Schéma de principe de l'essai de traction par fendage.		44
Figure II.18	Evolution de résistance à la traction en fonction de celle à la compression		46
Figure III.1	Schéma explique le rôle d'ajout de plastifiant		52
Figure III.2	Schéma explique le rôle d'ajout de superplastifiant		54
Figure III.3	Pourcentage d'air entraîné recommandé suivant la grosseur des granulats		55
Figure III.4	Schéma explique le rôle d'ajout entraîneur d'air		55
Figure III.5	Influence du pourcentage d'air entraîné sur les résistances en compression d'un béton		57
Figure III.6	Influence de la granulométrie des particules sur le mécanisme d'entraînement d'air		57
Figure III.7	Schéma explique le rôle d'ajout d'accélérateur de prise		58
Figure III.8	Schéma de l'influence comparée d'un mortier ou béton avec et sans accélérateur sur l'évolution des résistances		59
Figure III.9	Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances		59

Figure III.10	Schéma explique le rôle d'ajout d'un retardateur de prise	60
Figure III.11	Schéma de l'influence comparée d'un mortier ou béton avec et sans retardateur sur l'évolution des résistances	60
Figure III.12	Schéma comparée d'un mortier ou béton avec et sans Hydrofuges	61
Figure IV.1	Structure chimique des polynaphtalènes sulfonâtes $\alpha$ et $\beta$	86
Figure IV.2	Structure chimique des polymélamines sulfonâtes	86
Figure IV.3	Structure schématique d'un superplastifiant de type polycarboxylate, polymère de type « peigne »	87
Figure IV.4	Structure chimique d'un polycarboxylate de première génération (R = H, CH <sub>3</sub> )	88
Figure IV.5	Structure chimique d'un polycarboxylate de deuxième génération de type éther D'allyle	88
Figure IV.6	Structure chimique d'un polycarboxylate de deuxième génération développé par W.R. Grace	89
Figure IV.7	Structure chimique d'un polycarboxylate de troisième génération	89
Figure IV.8	Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule	90
Figure IV.9	Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique	91
Figure IV.10	Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique	92
Figure IV.11	Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment	93
Figure V.1	Dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée	108
Figure V.2	Exemple d'étude de la composition granulaire d'un béton	111
Figure VI.1	Ciment utilisé de type C.P.J CEM II/A-L 42.5N de marque AWTED	124
Figure VI.2	Granulats utilisés	125
Figure VI.3	Machine d'agitation électrique	127
Figure VI.4	Piston taré	127
Figure VI.5	Procédure de l'essai d'équivalent de sable	129
Figure VI.6	Mesure de ES	129
Figure VI.7	Composants de la solution lavante	130
Figure VI.8	Bonbonne de la solution lavante	131
Figure VI.9	Séries des tamis	133
Figure VI.10	Balance électrique	133
Figure VI.11	Essai d'analyse granulométrique	134
Figure VI.12	Grilles en fente	135
Figure VI.13	Détermination des masses volumiques	137
Figure VI.14	Détermination des masses volumiques absolues	139
Figure VI.15	Agitateur mécanique	141
Figure VI.16	Papier filtre	141
Figure VI.17	Solution bleu de méthylène	141
Figure VI.18	Test négatif	142
Figure VI.19	Test positif	142
Figure VI.20	Procédure d'essai de VB	143
Figure VI.21	Calcimètre	144
Figure VI.22	Procédure d'essai de carbonates	145

Figure VI.23	Machine de l'essai Micro-Deval	146
Figure VI.24	Charge abrasive	146
Figure VI.25	Procédure de l'essai Micro-Deval	147
Figure VI.26	L'adjuvant MasterEase 3666	150
Figure VI.27	Réparation des ingrédients secs pour la confection des mélanges de béton	153
Figure VI.28	Préparation des éprouvettes de béton (lubrification des moules)	154
Figure VI.29	Essai de l'affaissement (Annexe IV)	154
Figure VI.30	Préparations des ingrédients liquides	155
Figure VI.31	Malaxage du béton réalisé	155
Figure VI.32	Remplissage des moules (16x32) cm	156
Figure VI.33	Eprouvettes avant démoulage	156
Figure VI.34	Eprouvette après démoulage	156
Figure VI.35	Conservation des éprouvettes dans l'eau	156
Figure VI.36	: Machine d'essai d'écrasement	158
Figure VI.37	Chargement des éprouvettes cylindriques pour essai de compression	158
Figure VI.38	Eprouvettes après écrasement	158
Figure VII.1	Courbe granulométrique [sable et gravier (3/8 ; 8/15)]	163
Figure VII.2	Courbe de mélange (la courbe de référence) Méthode deFaury	168
Figure VII.3	Evolution d'affaissement en fonction du l'âge d'un béton témoin ordinaire (BO) et un béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA)	171
Figure VII.4	L'affaissement de béton témoin ordinaire (BO) et béton avec adjuvants MASTEREASE 3666 (BA) en fonction du l'âge	172
Figure VII.5	Evolution des résistances à la compression en fonction du temps d'un béton témoin ordinaire (BO) et un béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA)	174
Figure VII.6	Résistance en compression du béton témoin ordinaire (BO) et béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA) en fonction du temps	175

# Liste des notations

Symbole	Signification
<b>D</b>	Diamètre le plus grand du granulat
<b>d</b>	Diamètre le plus petit du granulat
<b>f<sub>ckey</sub></b>	La résistance caractéristique mesurée sur cylindre
<b>f<sub>ck</sub>cube</b>	La résistance caractéristique mesurée sur cubes
<b>Δl</b>	Le raccourcissement
<b>l</b>	Longueur de l'élément
<b>σc</b>	La classe vraie du ciment à 28 jours
<b>C</b>	Le dosage en ciment
<b>E</b>	Le dosage en eau
<b>G</b>	Le coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats
<b>ε</b>	La porosité
<b>ε<sub>0</sub></b>	La porosité lorsque la résistance en compression est nulle
<b>R<sub>c0</sub></b>	La résistance en compression lorsque la porosité est nulle
<b>E</b>	Module d'élasticité
<b>σ</b>	Contrainte
<b>ε'</b>	Déformation
<b>l</b>	Longueur de l'éprouvette sans charge
<b>Δl</b>	Changement de longueur de l'éprouvette sous charge
<b>P'</b>	Charge maximale
<b>L</b>	Portée libre
<b>b</b>	Largeur
<b>h</b>	Hauteur du prisme
<b>d</b>	Diamètre du cylindre
<b>ζ</b>	Potentiel de valeur approchée de la force électrostatique
<b>p</b>	Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d
<b>A</b>	Constante traduisant la maniabilité du béton
<b>Mf</b>	Modules de finesse
<b>σ'c</b>	Classe vraie du ciment en MPa
<b>K</b>	Optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment
<b>Kp</b>	Ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton
<b>Ks</b>	Ajustement de la granularité du sable,
<b>γ</b>	Coefficient de compacité
<b>V<sub>C</sub></b>	Volume absolu du ciment
<b>ρ<sub>c</sub></b>	Masse spécifique du ciment
<b>P<sub>s</sub></b>	Le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique
<b>P<sub>g</sub></b>	Le % du gravier obtenu à partir de la courbe granulométrique.
<b>M<sub>s</sub></b>	Masse spécifique du sable
<b>V<sub>s</sub></b>	Volume absolu de sable
<b>ρ<sub>s</sub></b>	Masse spécifique du sable
<b>M<sub>g</sub></b>	Masse spécifique du gravier
<b>V<sub>g</sub></b>	Volume absolu de gravier
<b>ρ<sub>g</sub></b>	Masse spécifique du gravier
<b>γ'</b>	Masses spécifiques ou masses volumiques absolues du ciment, eau, sable et gravier
<b>K'</b>	Coefficient dépendant de la puissance de serrage
<b>d<sub>1</sub></b>	Diamètre de l'ouverture du plus grand tamis sur lequel on obtient un refus
<b>d<sub>2</sub></b>	Diamètre de l'ouverture du tamis immédiatement inférieur
<b>x</b>	Proportion des grains retenus sur le tamis correspondant à d <sub>1</sub>

<b>y</b>	Proportion des grains retenus entre d1 et d2
<b>I</b>	L'indice des vides
<b>R</b>	Rayon moyen du moule.
<b>Pc</b>	Poids spécifique du ciment
<b>ES</b>	Equivalent de sable
<b>ESv</b>	Equivalent de sable visuelle
<b>ESp</b>	Equivalent de sable piston
<b>h<sub>1</sub></b>	Hauteur de sable + flocculat
<b>h<sub>2</sub></b>	Hauteur de sable
<b>h'<sub>2</sub></b>	Hauteur de sable au piston
<b>P</b>	Quantité d'éléments fins
<b>M</b>	Masse de gravier
<b>MS</b>	Masse de gravier après séchage
<b>Ri</b>	Masse des différents refus cumulés
<b>CA</b>	Coefficient d'aplatissement CA
<b>Me</b>	Masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement correspondant
<b>Mg</b>	Masse de la classe granulaire d/D
<b>Mvapp</b>	La masse volumique apparente
<b>M1</b>	Masse de récipient vide
<b>M2</b>	Masse de récipient + matériau
<b>V</b>	Volume du récipient
<b>M3</b>	Masse de pycnomètre avec le matériau après séchage
<b>M4</b>	Masse de pycnomètre + l'eau distillée
<b>Ma</b>	Masse de l'échantillon dans l'eau
<b>Vb</b>	Volume de bleu de méthylène
<b>V<sub>MS</sub></b>	Volume des matériaux secs
<b>V<sub>AC</sub></b>	Volume absolue de ciment
<b>Dmax</b>	Le point correspondant à la dimension maximale du béton
<b>Y</b>	L'ordonnée optimisée du point de brisure
<b>COPLA</b>	Commission Permanente des Liants hydrauliques et des Adjuvants de béton
<b>SYNAD</b>	Syndicat National des Adjuvants
<b>MDE</b>	Mecro-Deval
<b>MPEG</b>	Méthacrylate polyéthylène glycol

# Introduction générale

## INTRODUCTION

Les bétons font partie des matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction. Ces matériaux composites sont constitués de granulats lesquels sont liés par une pâte de ciment hydraté. Encore aujourd'hui, les mécanismes de l'hydratation du ciment ne sont pas complètement compris. La quantité d'eau exigée par les réactions d'hydratation représente environ 30 % de la masse du ciment. Or, l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante du béton pour les opérations de mise en œuvre exige une quantité d'eau supplémentaire. Avec le temps, l'eau excédentaire s'évapore laissant des vides dans la pâte de ciment durcie. La porosité diminue la résistance mécanique et la durabilité du matériau. Les performances du béton évoluent donc avec sa porosité et, par conséquent, avec l'excès d'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais [31].

Depuis les soixante dernières années, la technologie du béton exige une ouvrabilité et une résistance mécanique des matériaux toujours plus élevés. Afin de contrôler des propriétés spécifiques du béton, des adjuvants chimiques organiques et inorganiques sont aujourd'hui massivement introduits dans les formulations. La nécessité d'améliorer les performances mécaniques du béton, et donc de diminuer la quantité d'eau de gâchage pour limiter la porosité, conduit à utiliser des superplastifiants. La fonction principale de ces composés organiques est de disperser les particules de ciment, ce qui confère une plus grande fluidité à la pâte de ciment. Cette fluidité se traduit par une meilleure ouvrabilité du béton et par une diminution de la ségrégation et le ressuage. Et d'excellentes propriétés mécaniques et une grande durabilité à l'état durci [31].

Une large gamme de superplastifiants variés existe sur le marché. Le développement de la technologie des superplastifiants a commencé dans les années 1960 avec l'apparition de polycondensats de type lignosulfonate, polyméline sulfonate et polynaphtalène sulfonate.

À partir de 1980, des superplastifiants, dits de nouvelle génération, de type polycarboxylate ont été élaborés. Ces matériaux, fabriqués par polymérisation radicalaire, se distinguent par leur diversité structurale. De plus, ils présentent un effet dispersif plus fort que celui des adjuvants à base de polysulfonates et sont donc devenus plus populaires.

Les mécanismes d'action des superplastifiants ont fait l'objet de nombreuses études. Elles ont établi que la dispersion des grains de ciment est directement liée à

l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules. En s'adsorbant, les polymères engendrent une répulsion, laquelle neutralise les forces attractives entre les grains. Les floculats de ciment se dissocient en fractions individuelles, ce qui a pour conséquence une diminution notable de la viscosité des mélanges. Le genre de répulsion que les superplastifiants génèrent entre les grains de ciment dépend de leur nature. Les superplastifiants de type polysulfonate engendrent des interactions électrostatiques, alors que ceux de type polycarboxylate créent un encombrement stérique du fait de leur structure [31].

De bonnes performances peuvent être obtenues avec un grand nombre de superplastifiants. Cependant, les adjuvants ne sont pas tout-puissants. Des expériences en laboratoire ont montré que les propriétés rhéologiques de certains ciments se comportent de façon plus sensible en fonction du type et de la quantité de superplastifiant ajouté par rapport à d'autres combinaisons. Cela peut s'exprimer par un effet fluidifiant plus faible, une rapide perte d'affaissement, un retard de prise, de la ségrégation... Dans les cas sévères, ces phénomènes sont appelés incompatibilités ciment/superplastifiant. Une définition des combinaisons compatibles et incompatibles a été proposée par Aïtcin et al. [31]: « Si une combinaison ciment/superplastifiant permet de fabriquer un béton ayant un grand affaissement initial et de conserver cet affaissement dans le temps, il s'agit d'une combinaison compatible. Par contre, si l'affaissement initial obtenu avec le superplastifiant se perd très rapidement, il s'agit d'une combinaison incompatible ».

Les superplastifiants de type polycarboxylate présentent un fort pouvoir dispersant initial, cependant le temps pendant lequel ils sont actifs peut se révéler bref. Cela se traduit par l'apparition d'un raidissement dans le béton et une grande perte de l'affaissement. Il est alors nécessaire de rajouter une ou plusieurs fois du superplastifiant sur le chantier, ce qui peut poser quelques problèmes pratiques sur le site de construction et pour le transport du béton frais. Afin de réduire ces risques, il est nécessaire d'identifier les processus chimiques mis en jeu dans les variations rhéologiques observées dans les cas d'incompatibilité.

**Objectif de ce travail:** est d'évaluer expérimentalement l'influence d'un adjuvant de type superplastifiant « **MasterEase 3666** » sur la résistance en compression du béton.

**Finalité de sujet:** faire une comparaison entre les résistances en compression des bétons adjuvés et des bétons témoins ordinaires.

**CHOIX DE SUJET:** Nous avons choisi ce thème par curiosité de savoir plus sur les adjuvants et aussi par amour des travaux expérimentaux.

**PROBLEMATIQUE:** Quel est l'impact et l'effet de superplastifiant sur la résistance en compression du béton ?

**HYPOTHESE :** D'après les travaux réalisés auparavant le dosage de superplastifiant a un impact d'améliorer l'ouvrabilité et la maniabilité du béton à l'état frais et l'état durci augmente la résistance par rapport au béton ordinaire.

**METHODOLOGIE:** D'abord on va préparer des éprouvettes cylindriques (16\*32) cm<sup>2</sup> de béton ordinaire " témoin" et d'autres de béton adjuvantés avec des dosages différents de superplastifiant .Ensuite après 24heures on démoule les éprouvettes et les conserver dans un bac d'eau a une température de 20°C. Enfin on mettre les éprouvette au machine de compressions et appliquer des charges jusqu'à la rupture partielle ou totale de l'éprouvette aux différentes âges (7j; 14j ; 21j ; 28j).

**PLAN DE TRAVAIL:** Ce mémoire est structuré en deux partie, la première partie consacrés à la recherche bibliographique qui constitué cinq chapitres :

- **Le premier chapitre:** Donne un aperçu général sur les principaux constituants du béton.
- **Le deuxième chapitre:** Concerne les différents paramètres qui influent sur la résistance en compression du béton.
- **Le troisième chapitre:** Regroupe des généralités sur les adjuvants concernant des définitions, le rôle, fonctions principales, classification et les domaines d'utilisation... etc.
- **Le quatrième chapitre:** Traite superplastifiants (définitions, structure chimique, les types, mode d'action, mode d'emploi ...etc.)
- **Le cinquième chapitre :** Détaille les méthodes de formulation de béton:méthode Bolomey, Valette, Dreux Gorisse, Faury...etc

La deuxième partie c'est la partie expérimentale constitue deux chapitres:

- **Le sixième chapitre** : Identification des matériaux et formulation du béton ordinaire et avec adjuvant.
- **Le septième chapitre** : Est dédié à l'analyse des résultats et l'interprétation.

**Etat de l'art** : Les recherches réalisées auparavant montrent que l'ajout d'adjuvant améliore le comportement du matériau béton vis-à-vis de la résistance d'une manière appréciable.

**CONCLUSION** : L'ajout d'adjuvant au béton donne une meilleure ouvrabilité, une amélioration des performances mécaniques du béton, une grande durabilité et résistance à l'état durci.

# Chapitre I

## Généralité sur le béton

## I.1 Histoire du béton

Employé dès la haute antiquité, le béton romain était fabriqué avec une sorte de ciment et a laissé quelques édifices exemplaires toujours visibles aujourd'hui comme le Panthéon de Rome, édifice bâti au début du deuxième siècle de notre ère, qui supporte la plus grande coupole de toute l'Antiquité (43,3 m de diamètre à l'intérieur) et qui reste la plus grande du monde en béton non armé, le pont du Gard... Tombé dans l'oubli ensuite, c'est en 1817 que le ciment moderne est inventé par Louis Vicat qui découvre le procédé et la composition du ciment Portland en cherchant à améliorer la résistance et une certaine durabilité des mortiers. Très vite, le béton devient le matériau révolutionnaire de la construction au vingtième siècle. François Coignet, François Hennebique, puis Auguste Perret et ses frères entrepreneurs sont les inventeurs du béton armé. Celui-ci compte parmi les piliers fondateurs dans cette voie révolutionnaire de l'art de construire et occupe une place incontournable dans l'histoire de l'architecte [1].

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière offshore. Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques. Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix :

- Il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre.
- Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée.
- Il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes.
- Sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles.
- Sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en œuvre, il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier,

aux actions agressives de l'eau de mer, il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies.

- Son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence [2].

## I.2 Introduction

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, et sa formulation, jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la science des matériaux. Le béton est un matériau artificiel obtenu en mélangeant en proportions convenables et de manière homogène, du ciment (liant), un granulat (sable + gravier), de l'eau et éventuellement des adjuvants. Le liant peut être « hydraulique » (car il fait prise par hydratation ; ce liant est couramment appelé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux. Le coulis est un mélange très fluide de ciment et d'eau. Enfin, lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de mortier. La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est lente : à peine 50% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale). Il est possible de modifier (accélérer ou, au contraire, retarder) la vitesse de prise en incorporant au béton frais des adjuvants (additifs). Il existe d'autres types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons [3].

## I.3 La composition du béton

Avant d'entrer dans les détails de sa composition, il est nécessaire de donner une définition au béton ce dernier est ce qu'on appelle un matériau composite il est le résultat de différents constituants mélangés dans des proportions pouvant varier.

De manière générale, les principaux ingrédients employés sont le sable, le gravier, le ciment, le tout gâché avec de l'eau.

Economique et facilement manipulable, le béton peut être utilisé dans divers domaines tels que dans la construction ou l'art. A la fois résistant et durable, il répond à de nombreux critères de performance, ce qui explique son omniprésence actuelle. Sa composition variant en fonction des différents constituants présents dans le mélange, il est dorénavant possible de fabriquer le béton de vos envies [4].

### I.3.1 Le ciment

Le ciment est le liant hydraulique par excellence. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton, liant ses constituants entre eux, et lui confère certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance.

La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

- Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants [4].

### I.3.2 L'eau de gâchage

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient

toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m<sup>3</sup>. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples connus. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances : résistance mécanique à la compression, durabilité [5].

### I.3.3 Les granulats

Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulat utilisé ne doit donc pas être fait à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts.

On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule d/D.

- **d** : diamètre le plus petit du granulat ;
- **D** : diamètre le plus grand du granulat.

Exemple: Si un granulat possède peu de masse passant à travers un tamis de 6mm et beaucoup de masse passant par un tamis de 10mm, on le désignera « granulat 6/10 ». Quand  $d < 2\text{mm}$ , on désigne le granulat « 0/D » [4].

Étendue ; à côté des granulats courants, des granulats spéciaux sont apparus pour des usages spécifiques :

- Durs pour des bétons soumis à une forte usure : sols industriels, routes à grande circulation ;
- Légers pour isolation thermique et allégement des structures ;
- Réfractaires, à faible coefficient de dilatation thermique ;
- De couleur pour les bétons apparents ;

- Les granulats doivent être des matériaux de qualité et satisfaire notamment deux exigences ;
- La propreté, particulièrement importante pour les sables, la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
- La granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact ;
- Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent permettre d'une part de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures ;
- Au voisinage des parois, il est nécessaire de limiter la taille maximale des grains [5].

#### **I.4 Fabrication du béton**

Avant d'aborder la fabrication du béton, il n'est pas inutile de rappeler qu'il s'agit d'un matériau obtenu en mélangeant un ensemble de constituants présentant des états et des caractéristiques très différents [5] :

- Un liant : le ciment, poudre d'une très grande finesse ;
- Des granulats de forme et de densité variée ;
- Un liquide : l'eau de gâchage ;
- Éventuellement des adjuvants soit liquides, soit en poudre ;
- L'air qui se trouve enfermé dans le béton frais lors de sa fabrication, joue un rôle non seulement sur sa plasticité, mais également sur ses déformations et ses propriétés finales ;
- Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE, dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.

#### **I.5 Propriétés du béton**

- Mouillable, c'est-à-dire qu'on peut lui faire prendre facilement des formes volumiques assez simples, une grande variété des formes qu'il peut épouser c'est la Maniabilité ;
- Durcit, avec le temps le béton doit devenir un matériau dur et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant ;

- Compacité, la résistance à la compression d'un béton contenant suffisamment de liant croit avec sa compacité.

Maniabilité et résistance mécaniques sont deux (02) objectifs contraires [3]:

- Eau en excès bonne maniabilité, mauvaise résistance ;
- Granulat roulé bonne maniabilité, mauvaise résistance ;
- Granulats concassés mauvaise maniabilité, bonne résistance.

Pour réaliser un béton qui réponde aux deux critères, il faut optimiser tous les facteurs.

## I.6 Qualités essentielles d'un béton

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

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisante pour permettre la mise en œuvre souhaitée deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques [7].

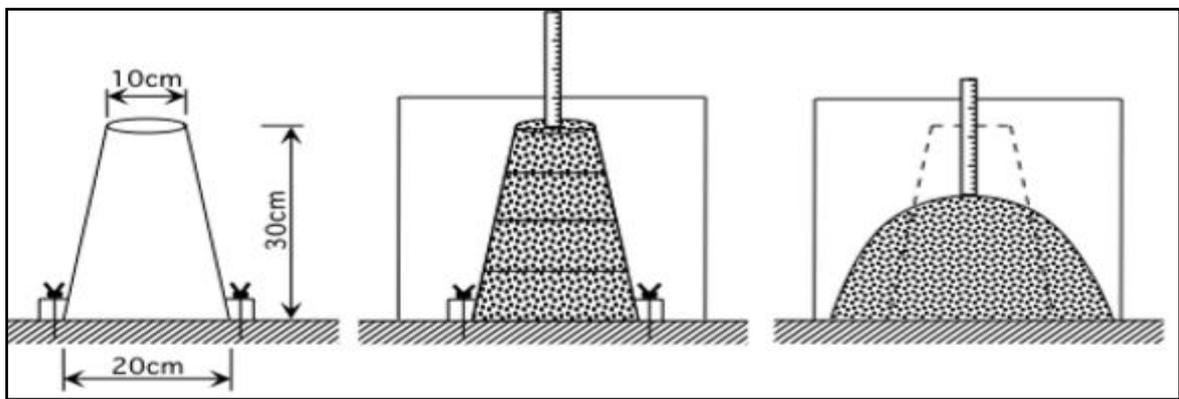
## I.7 Béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures de nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité: type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

- La diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
- Une porosité accrue ;
- Un risque de ségrégation des constituants du béton ;
- Un retrait augmenté ;
- Un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

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

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique [38].



**Figure I.1** : Test du cône d'Abrams [3]

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

**Tableau I.1** : Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton [3]

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

## I.8 Du béton frais au béton durci : Ouvrabilité et consistance

### I.8.1 La Ouvrabilité

La maniabilité d'un béton est considérée comme un critère essentiel pour caractériser les performances des bétons par la norme (NT 21.195). En effet, ce paramètre conditionne la confection et la mise en place du béton, et par conséquent il est en relation étroite avec les propriétés du béton à l'état frais et durci (consistance, viscosité, porosité, résistances...)[8].

Après le malaxage, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité, l'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange Dreux et Festa[7] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ». Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction en effet, selon ces auteurs, la plupart des qualités de l'ouvrage telles que la compacité et la résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, l'enrobage et l'adhérence des armatures, les parements de belle apparence, l'étanchéité, etc., dépendent de l'ouvrabilité. Au-delà de la mise en place sur le chantier, Faury[7] souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de maifaçons ces propriétés doivent donc être classées en deux groupes distincts suivant qu'elles s'appliquent au transport ou à la mise en œuvre du mélange dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de transport (en bétonnière, en wagonnette, en benne, en camion...) et plusieurs processus de mise en œuvre (pompage, vibration, projection, compactage...) c'est pourquoi de nombreux tests technologiques ont été proposés pour s'adapter à cette diversité. ces essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses pour les bétons très secs, on pourra utiliser l'essai V.B., qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un cône de béton se mette à l'horizontale dans un récipient cylindrique périphérique, une fois soumis à une vibration le maniabilimètre L.C.L fonctionne sur le même principe, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. Un temps long signifie que le béton est ferme.

### **I.8.2 Caractérisation de la rhéologie du béton frais**

Plusieurs essais sont utilisés pour caractériser la rhéologie du béton. En effet; la consistance du béton peut être évalué par des paramètres technologiques faciles à déterminer même sur chantier, et d'autres spécifiques qui décrivent le comportement à l'état frais et demandent un matériel de laboratoire bien approprié [8].

### **I.8.3 Importance de l'ouvrabilité**

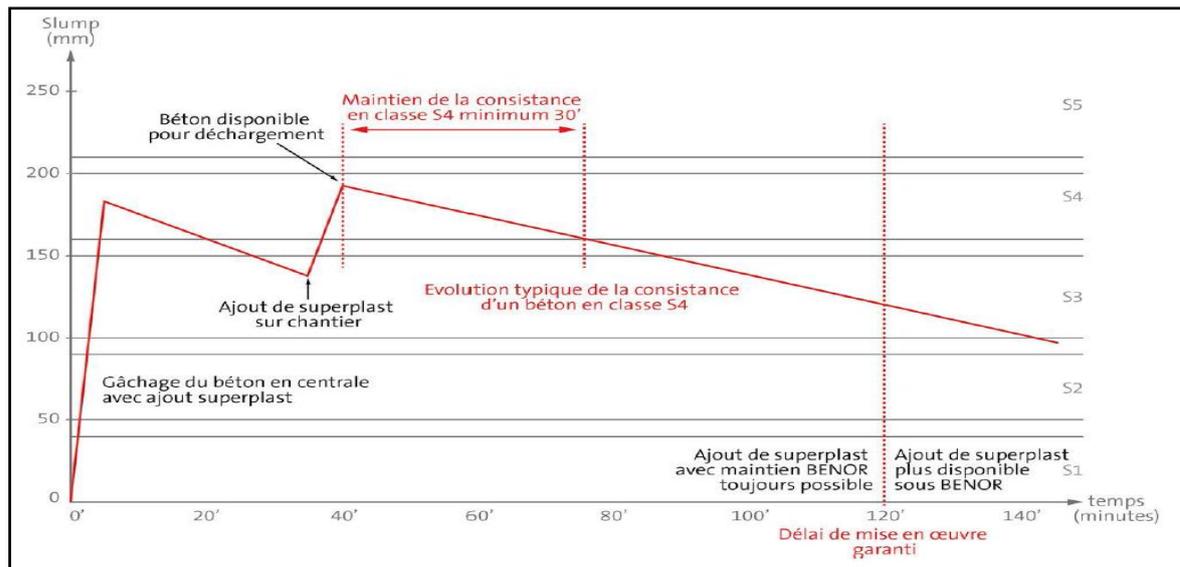
Une bonne ouvrabilité facilite les transbordements et la mise en œuvre du béton, c'est-à-dire sa mise en place dans les coffrages et son compactage, elle influence aussi favorablement le coût de ces opérations. Quant au béton durci, sa résistance et surtout sa durabilité dépendent directement d'une bonne mise en place, de l'enrobage parfait des armatures et d'un compactage soigné, toutes qualités qui ne peuvent être obtenues qu'avec une bonne ouvrabilité [9].

### **I.8.4 Dès la fin du malaxage, l'ouvrabilité change**

Il est inévitable qu'à partir de la fin du malaxage la consistance évolue, ce qui se traduit par une lente perte de l'ouvrabilité.

Le "délai de mise en œuvre garanti" mentionné sur le bon de livraison (généralement 100' pour du CEM I et CEM II et 120' pour du CEM III et CEM V) indique le temps pendant lequel la prise du béton ne démarre en aucun cas.

Ceci ne signifie pas que la consistance (fluidité) n'évolue pas pendant ce temps. La figure I.2 montre un comportement normal de béton durant le transport et le déchargement. Le béton doit rester au moins 30 minutes après le début du déchargement dans la même classe (S4 dans ce cas). Le béton est plus sensible à une perte d'ouvrabilité par temps chaud, tout comme dans le cas d'un ciment à prise plutôt rapide [9].



**Figure I.2:** Exemple d'évolution de la consistance et délai de mise en œuvre garanti d'un béton [9]

## I.9 Méthodes de mesure de la consistance

En Belgique, on utilise couramment deux méthodes pour évaluer la consistance du béton. Ce sont les mesures de l'affaissement ("slump") et de l'étalement ("flow"). Ces deux méthodes sont limitées à certains domaines de consistance [9].

### I.9.1 Classe de consistance

Le tableau I.2 donne les classes d'affaissement et d'étalement définies par la norme NBN EN 206 et indique également la méthode de mesure la plus appropriée pour chaque domaine. Des indications détaillées pour la conduite de ces essais se trouvent dans les normes NBN EN 12350-2 et NBN EN 12350-5[9].

### I.9.2 Contrôle de la consistance en début de bétonnage

Des valeurs de consistance semblables pour des bétons provenant d'installations différentes ne garantissent pas une ouvrabilité rigoureusement identique. Les résultats peuvent être influencés par le choix des constituants et par le malaxeur utilisé. Il est donc indiqué de vérifier l'ouvrabilité au début du bétonnage et de corriger la consistance si nécessaire. Par la suite, lors d'un éventuel changement dans la fourniture des granulats, il faudra contrôler la valeur de la consistance prescrite pour l'ouvrage en cours [9].

**Tableau I.2** : Classe de consistance [9]

Domaine de consistance	Affaissement (slump)-S		Etalement (flow)-f	
	Classe	Mesure en mm	Classe	Mesure en mm
<b>Rigide ou ferme</b>	S1	10 à 40	F1 <sup>(1)</sup>	(≥340)
<b>Semi-plastique</b>	S2	50 à 90	F2	350 à 410
<b>Plastique</b>	S3	100 à 150	F3	420 à 480
<b>fluide</b>	S4	160 à 210	F4	490 à 550
<b>Très fluide</b>	S5 <sup>(1)</sup>	(≤220)	F5	560 à 620
			F6 <sup>(1)</sup>	(≤630)
<sup>(1)</sup> Mesure non approprié dans le domaine de consistance				

### I.9.3 Influence des autres caractéristiques du béton sur la consistance

En dehors des adjuvants, d'autres facteurs ont une influence sur la consistance. La modification de l'un ou de plusieurs d'entre eux n'agit pas uniquement sur la consistance, mais également sur la résistance (et bien sûr d'autres propriétés) du béton, souvent en sens opposé. Le tableau I.3 montre les effets auxquels on peut s'attendre sur la consistance et la résistance, lorsque l'on fait varier certains paramètres de base du béton [9].

**Tableau I.3:**Influence des paramètres de formulation sur la consistance et les résistances [9]

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

## I.10 Béton durci

Le béton durci est un matériau hétérogène : un 'squelette' de granulats gros et fins est enveloppé et lié par un 'tissu' de fibres d'hydrates de ciment. La qualité du béton à l'état durci dépend des caractéristiques du squelette pierreux, de la pâte de ciment durcie, et de l'adhérence entre les deux. L'obtention des performances théoriquement possibles du béton est déterminée en grande partie par une mise en œuvre correcte. Après durcissement, la 'peau' du béton est composée principalement de ciment hydraté. Par rapport au noyau, la zone superficielle du béton fraîchement coulé contient moins de gros granulats, mais plus de sable, plus de grains de ciment et plus d'eau. La qualité de cette zone, dont l'épaisseur correspond à environ la moitié du  $D_{max}$ , est essentielle pour la durabilité du béton. Un béton compact c.-à-d. dont le rapport E/C est le plus bas possible et qui a été serré selon les règles de l'art, résistera le plus longtemps aux diverses agressions. Dans les processus chimiques et physiques qui influent sur la durabilité, le transport d'eau, de vapeur d'eau et de matières dissoutes (par ex. des sels) à l'intérieur du béton joue un rôle crucial. La vitesse, l'ampleur et l'effet de ce transport dépendent surtout de la structure des pores capillaires de la pâte de ciment durcie. L'évaporation de l'eau des capillaires entraîne le retrait du béton (retrait hydraulique ou de dessiccation). L'humidification fait à nouveau gonfler le béton, mais sans qu'il n'atteigne son volume original. L'eau se trouvant dans les pores de gel et entre les lamelles des hydrates (eau interstitielle) n'est expulsée qu'à de hautes températures [6].

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

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

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

## I.11 Béton et dosage

Pour commencer, il faut savoir que le béton est un matériau composite. On peut l'obtenir en mélangeant différents constituants dont les ingrédients de base sont le sable, le gravier, le ciment, le tout gâché avec de l'eau.

Lorsque vous cherchez à fabriquer du béton ou à vous en faire livrer, gardez en mémoire qu'il est possible de doser le béton de différentes manières. Il vous suffit simplement de savoir de quel béton vous avez besoin.

Il est en outre possible de rajouter au béton ce qu'on appelle des « adjuvants », afin de modifier certaines caractéristiques du matériau [4].

Comment faire du béton ? Avant tout, il faut savoir pourquoi on en a besoin car le dosage change en fonction des nécessités ! Voici donc une liste non-exhaustive de dosages pour différents usages tableaux I.4.

**Tableau I.4** : Dosage pour 1 m<sup>3</sup> de béton [4]

	<b>Bé ton de fondation</b>	<b>Dallage béton</b>	<b>Béton armé</b>
<b>Ciment</b>	350 kg	300 kg	400 kg
<b>Granulat</b>	1050 kg	1100 kg	980 kg
<b>Sable</b>	800 kg	830 kg	720 kg
<b>Eau de gâchage</b>	175 L	155 L	195 L

## I.12 Classification du béton

Le béton fait partie de notre cadre de vie, il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique:

- Béton très lourd:  $> 2500 \text{ kg/m}^3$ ;
- Béton lourd (béton courant):  $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$ ;
- Béton léger:  $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$ ;
- Béton très léger:  $< 500 \text{ kg/m}^3$ .

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants:

- Béton de ciment (le ciment);
- Béton silicate (la chaux);
- Béton de gypse (le gypse);
- Béton asphalte.

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

- a. Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de  $2000 \text{ kg/m}^3$  environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.
- b. Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre  $6000 \text{ kg/m}^3$  servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- c. Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.
- d. Les bétons cellulaires (bétons très légers) dont les masses volumiques sont inférieures de  $500 \text{ kg/m}^3$ . Ils sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- e. Les bétons de fibres, plus récents, correspondent à des usages très variés: dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain. La norme ENV 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau I.5. Dans ce tableau  $f_{ck}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2);  $f_{cube}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cubes. Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées [10].

**Tableaux I.5** : Classe de résistance de béton [10]

Classe	C12/1 5	C16/2 0	C20/25	C25/3 0	C30/3 7	C35/4 5	C40/5 0	C45/5 5	C50/6 0
$f_{ck,cyl}(Mpa)$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}(Mpa)$	15	20	25	30	37	45	50	55	60

## I.13 La déformation des bétons

### I.13.1 Le retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement [3].

**Tableau I.6** : Causes et constatation avec les remèdes de retrait [3]

Causes et constatation	Remèdes
Le retrait avant-prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise, il se produit : Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment, les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

Estimation du retrait :  $\Delta l = 3\text{‰} \times L$

- $\Delta l$  : Est le raccourcissement ;
- $L$  : Est la longueur de l'élément.

Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 m, le retrait est de l'ordre de:  $3\text{‰} \times 1500 \text{ cm} = 4,5 \text{ cm}$ .

### I.13.2 La dilatation

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à  $1 \times 10^{-5}$ , pour une variation de  $\pm 20 \text{ °C}$  on obtient:  $\Delta l = \pm 2 \text{‰} \times \text{longueur}$ . Pour chaînage en B.A de 20 m de longueur et un écart de température de  $20 \text{ °C}$ , on a une dilatation de :  $2\text{‰} \times 2000 \text{ cm} = 4 \text{ cm}$  [3].

### I.13.3 Le fluage

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau visco-élastique, la déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années, c'est ce que l'on appelle le fluage.

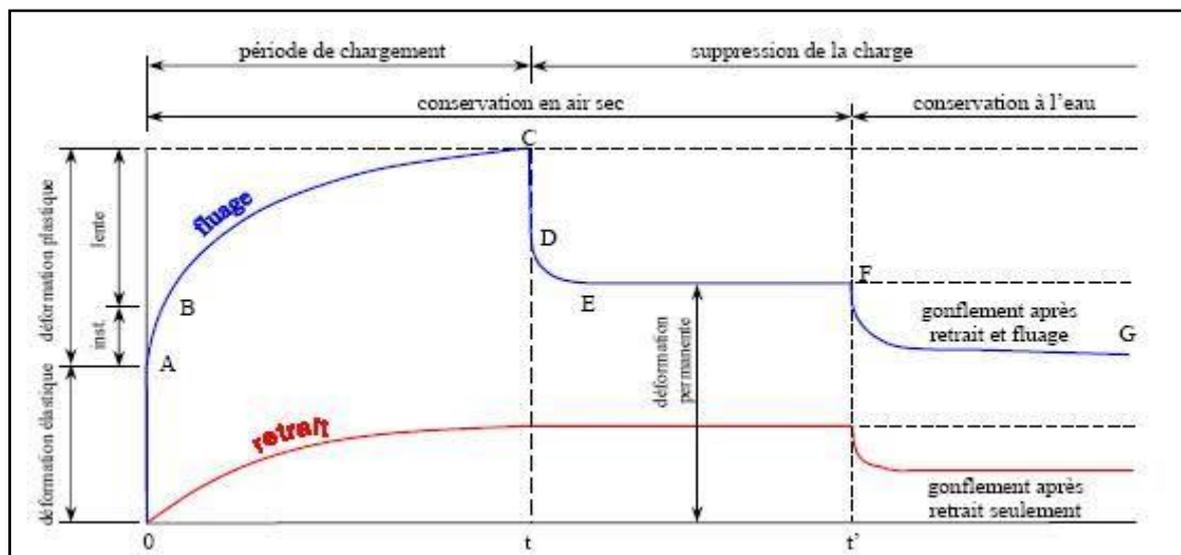


Figure I.3 : Déformation du béton dû aux fluages [3]

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80% estimation de la déformation de fluage:  $\Delta l = 4$  à 5 % longueur cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau [3].

## **I.14 Les domaines d'emploi du béton**

### **I.14.1 Le bâtiment**

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, plus de 90 % en collectif pour les structures ; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau idéal, le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels [5].

### **I.14.2 Les travaux publics**

#### **I.14.2.1 Les ponts**

Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

#### **I.14.2.2 Les tunnels**

Pour les grands tunnels, dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer – le tunnelier.

#### **I.14.2.3 Les barrages**

Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

#### **I.14.2.4 Les routes**

La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface. Les voiries à faible trafic et

aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien [5].

### **I.14.3 Autres ouvrages**

Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées [5].

## **I.15 Conclusion**

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Il est un matériau demandé et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du béton.

Dans ce chapitre nous avons effectué une revue générale sur le matériau béton, de ses constituants, de ses propriétés à l'état frais jusqu'à ses propriétés à l'état durci. Dans le domaine pratique, il y'a deux propriétés, l'ouvrabilité et la résistance mécanique, qui doivent être mises au point en premier lors de la formulation. En effet, l'ouvrabilité contrôle la mise en œuvre sur chantier tandis que la résistance mécanique conditionne la capacité portante de l'ouvrage. L'ouvrabilité est sensible au dosage en eau, en adjuvant et en fines.

# Chapitre II

## Résistances du béton

## II.1 Introduction

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

Nous allons examiner ci-après les différents facteurs ayant une influence sur la résistance et sur lesquels on pourra jouer ou compter pour l'amélioration de cette qualité mais il convient tout d'abord de bien définir les mesures usuelles ainsi que les valeurs et critères retenir [11].

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures (exception faite par exemple du domaine routier) c'est donc en général la résistance en compression qui sert de caractérisation de base du béton durci cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne NF EN 12390-3 la résistance à 28 jours après un mûrissement à l'eau sert en général de référence la norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur cylindre 16x32 cm, tandis que Y est la résistance (du même béton) mesurée sur cube 15x15 cm la résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, mélange de clinker et de gypse finement Co-broyés le clinker se compose principalement des quatre minéraux suivants dans des proportions variables : silicate tricalcique C3S, silicate bicalcique C2S, aluminat tricalcique C3A et aluminoferritetétracalcique C4AF la réaction du C2S et du C3S avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton.

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton on observe, autour des granulats dans le béton durci, une zone de pâte hydratée particulière : l'auréole de transition. Cette auréole a des propriétés différentes de la pâte dans sa masse, en fonction de la porosité des granulats dans le cas de granulats non poreux, l'auréole comporte une couche de cristaux de grandes dimensions, très poreuse et de cohésion faible, générant des zones de faiblesse pour les bétons soumis à des actions mécaniques une bonne résistance à la compression est la performance bien

souvent recherchée pour le béton durci cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment, etc [7].

## II.2 Résistance à la compression

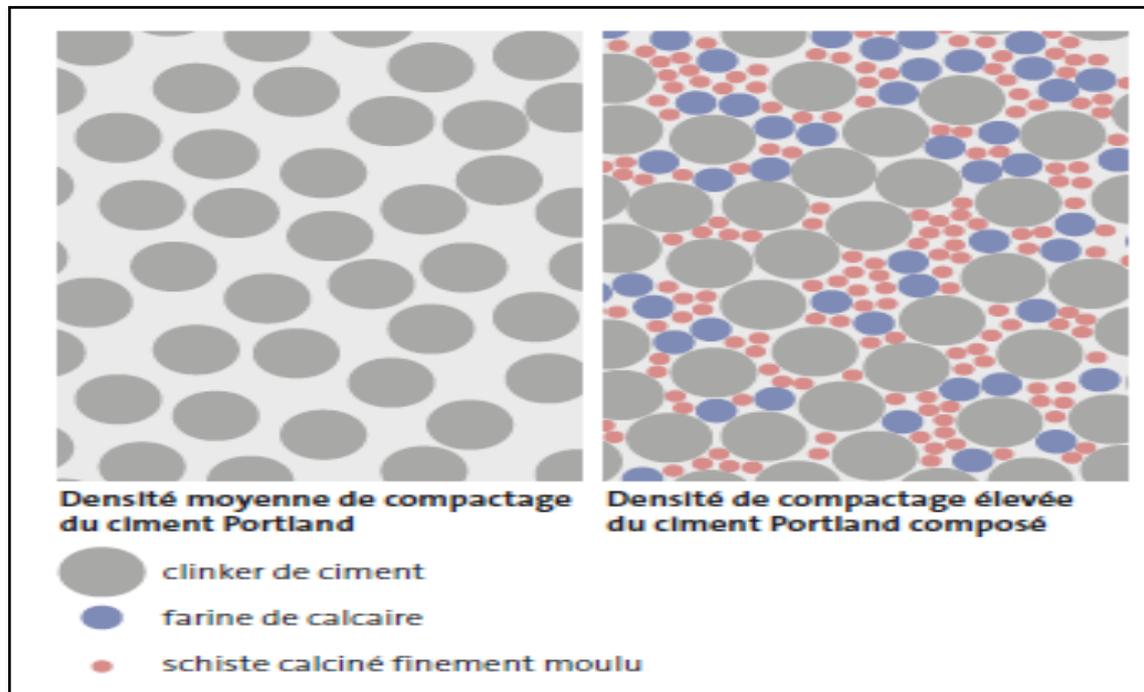
La résistance décrit la charge nécessaire à la rupture du matériau rapportée à la surface d'application de cette charge. La résistance à la compression correspond donc à la contrainte de compression que le béton peut supporter. La résistance à la compression constitue la principale, voire souvent la seule caractéristique exigée d'un béton durci. Selon sa composition le béton peut présenter une résistance à la compression modérée, proche de celle d'une brique en terre cuite ou d'un bois tendre. Elle peut également atteindre une valeur élevée, équivalente à celle obtenue sur un acier de construction courant (Tableau II.1)

**Tableau II.1** : Résistance à la compression de quelques matériaux courants [12]

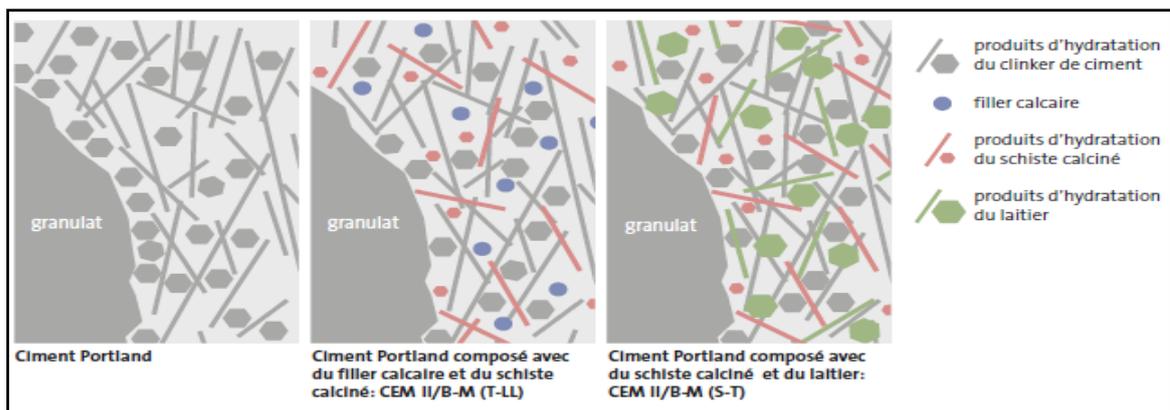
Matériau	Résistance à la compression [N/mm <sup>2</sup> ]
Brique de terre cuite	20-30
Bois tendre	30-50
Roche dure	150-200
mortier	5-25
béton	30-50
Béton a haute résistance	50-110
Béton fibré a ultra-haute performances	150-250

La résistance à la compression du béton 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 (figure II.1 – II.2). 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 [12].



**Figure II.1** : Représentation schématique de la densité de compactage de ciments avec différents constituants principaux[12]



**Figure II.2** : La zone de transition des granulats dans différents types de ciment [12]

Le plus courant des essais sur béton durci est la résistance à la compression, en partie parce que cet essai est facile à exécuter et aussi parce que de nombreuses caractéristiques du béton, mais pas toutes, peuvent être qualitativement reliées à sa résistance toutefois, la raison principale de cet essai est l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurale même s'il est universellement

utilisé dans le domaine de la construction, l'essai de résistance à la compression présente quelques inconvénients, mais il constitue, à parler franc, un élément du bagage culturel de l'ingénieur. Les résultats de l'essai de résistance à la compression peuvent être affectés par différents paramètres: le type d'éprouvette et ses dimensions, le type de moule, de mûrissement, la préparation des faces d'essai sur lesquelles s'exerce la compression, la rigidité de la presse, la vitesse d'application de la charge. Pour toutes ces raisons, les essais doivent être effectués selon une procédure bien précise sans dévier des spécifications imposées.

Les essais de résistance à la compression effectués sur des éprouvettes préparées de façon normalisée, incluant un serrage ou un compactage à 100% et un mûrissement dans l'eau pendant une période donnée, donnent des résultats représentant la qualité du béton bien sûr, le béton dans la structure peut présenter une qualité inférieure, par exemple, par suite d'une mauvaise mise en œuvre, d'un compactage ou vibration inadéquats, d'un phénomène de ségrégation ou d'un mauvais mûrissement ces effets sont importants si l'on désire savoir à quel moment on peut décoffrer, pour suivre la construction ou mettre la structure en service. Pour cette raison, les éprouvettes d'essai sont mûries dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles existant dans la structure réelle.

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques. Les plateaux ou contreplateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai. Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises [7].

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'influence du rapport E/C du béton sur son comportement en compression simple. Les travaux de J. Bolomey [13] permettent de déterminer la résistance à rupture à 28 jours du béton grâce à la formule suivante :

$$\sigma_{28} = G \times \sigma_c \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (\text{Eq II.1})$$

Où :

- $\sigma_c$  : est la classe vraie du ciment à 28 jours ;
- $G$  est le coefficient granulaire fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats ;
- $C, E$  sont respectivement les dosages en ciment et en eau dans un m<sup>3</sup> de béton.

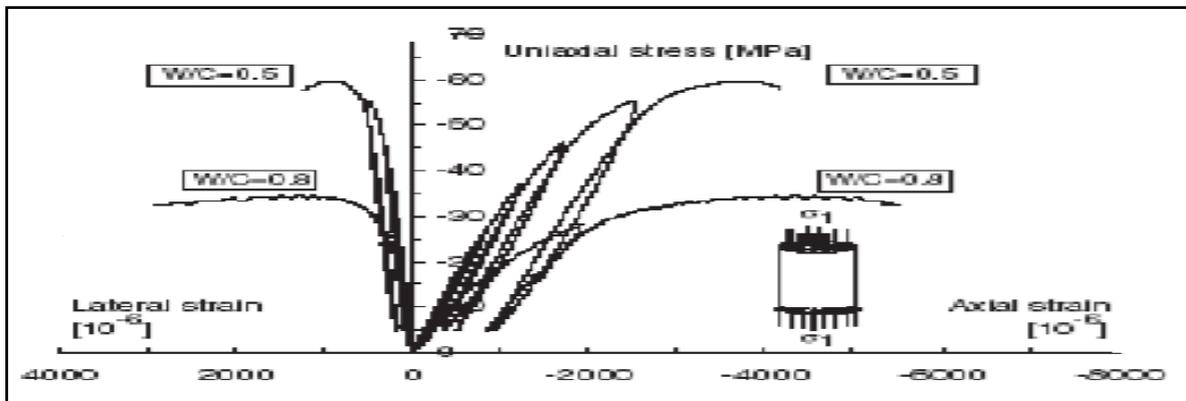
I. Yurtdas et ses collaborateurs [13] ont réalisé les essais de compression simple sur des mortiers ayant le même squelette granulaire mais différents rapports E/C. La composition, les caractéristiques et la conservation de ces mortiers sont présentées dans le Tableau II.2.

**Tableau II.2** : Composition, caractéristiques et condition de conservation des mortiers différents rapports E/C (0,5 ; 0,8) [13]

<b>Composition des mortiers</b>		
Eléments	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )	
Rapport E/C 0,5 ; 0,8	0,5	0,8
Sable normalisé 0/2 mm	1350	1350
Ciment CEM IIb- 32,5R	450	450
Eau	225	360
<b>Caractéristiques mécaniques</b>		
Résistance moyenne à la rupture en compression simple	50 MPa	25 MPa
Porosité moyenne à la rupture en compression simple	18,2 %	26,2 %
<b>Condition de conservation des échantillons</b>		
5 jours dans le moule + 6 mois dans l'eau + à l'air libre avant l'essai		

La Figure II.3 présente le résultat des essais de compression simple effectués sur un échantillon de mortier E/C = 0,5 et un échantillon de mortier E/C = 0,8, ces deux échantillons sont conservés de même manière (Tableau II.2) mais la durée de conservation à l'air contrôlé du premier échantillon (9 jours) est plus faible que celle du deuxième échantillon (15 jours). Il apparaît que les comportements de ces deux mortiers sont moins influencés par les conditions de conservation que le rapport E/C. La Figure II.3 met en évidence que le module de Young et la contrainte au pic (ou la résistance à la rupture) du

mortier  $E/C = 0,5$  sont nettement supérieurs à ceux du mortier  $E/C = 0,8$ . Ces résultats confirment que la résistance en compression simple et le module de Young du mortier diminuent lorsque le rapport  $E/C$  augmente. [13]



**Figure II.3 :** Essais de compression simple sur deux échantillons de mortier

$\frac{E}{C} = 0,5$  et  $\frac{E}{C} = 0,8$  respectivement après 9 et 15 jours de séchage à l'air ambiant contrôlé : contrainte axiale en fonction des composantes de la déformation [13].

## II.3 Paramètres influençant la résistance

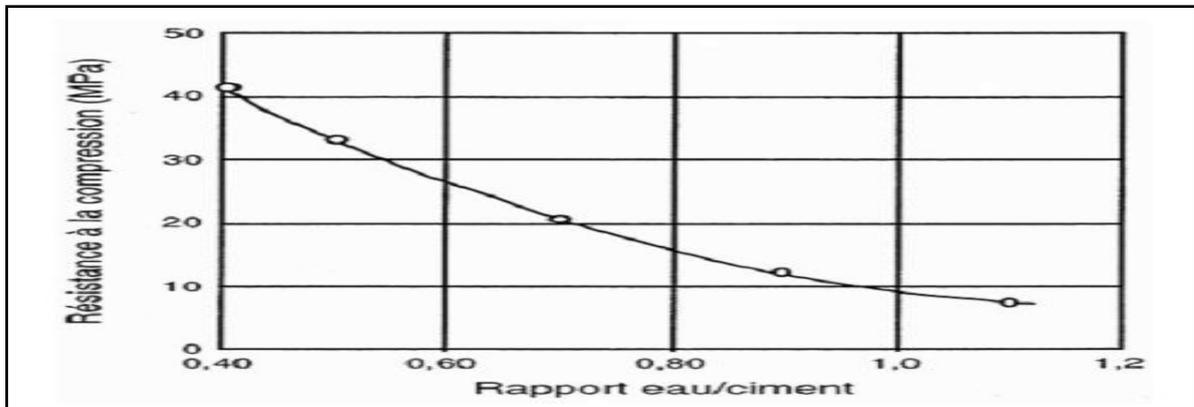
### II.3.1 Influence du rapport eau/ciment

Le rapport eau/ciment ( $E/C$ ) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports  $E/C$ .

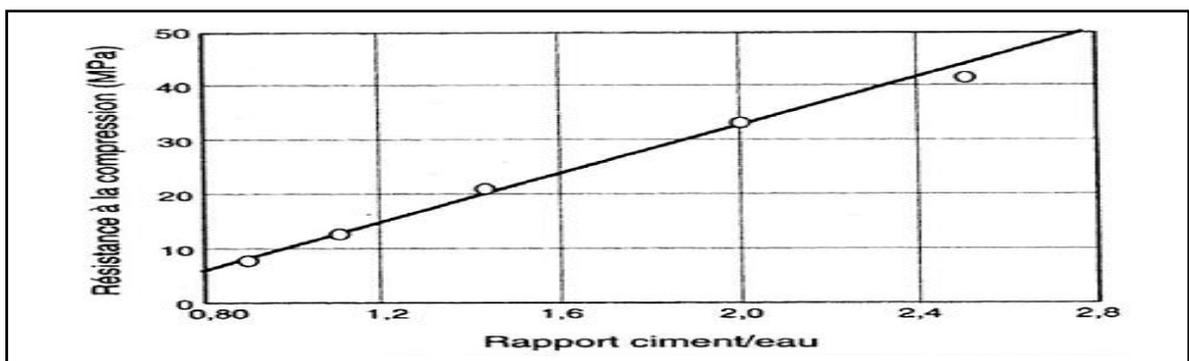
La figure II.4 montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport  $E/C$  a approximativement la forme d'une hyperbole cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulats et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport  $E/C$  diminue une des propriétés géométriques d'une hyperbole ( $y = k/x$ ) est que la relation existant entre  $y$  et  $1/x$  est linéaire.

La relation entre la résistance et le rapport  $C/E$  est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport  $C/E$  compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par Neville [7], a été confirmée par Alexander et Ivanusec [7] et par Kakizaki et col. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport

eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire la figure II.5 présente les valeurs de la figure II.4 en fonction du rapport ciment/eau porté en abscisses les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique.

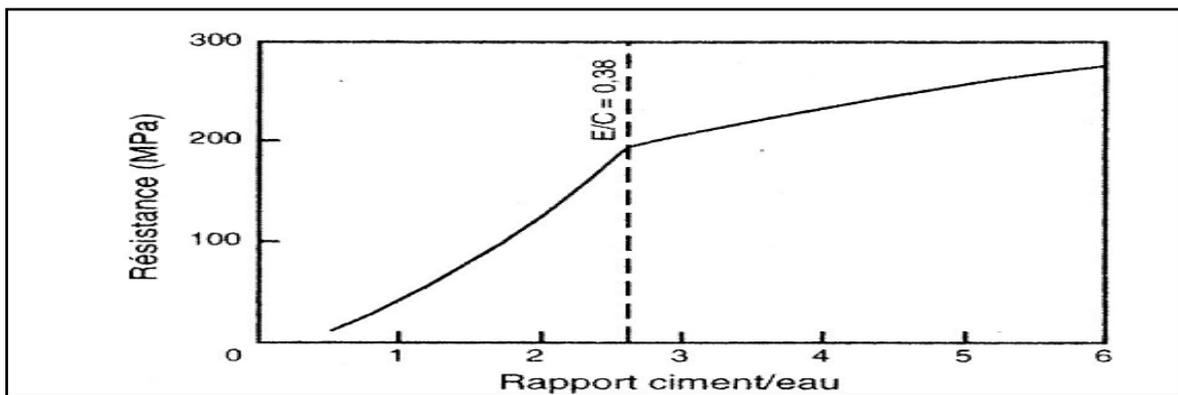


**Figure II.4 :** Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide [7]



**Figure II.5 :** Valeurs des résistances en fonction du rapport C/E [7]

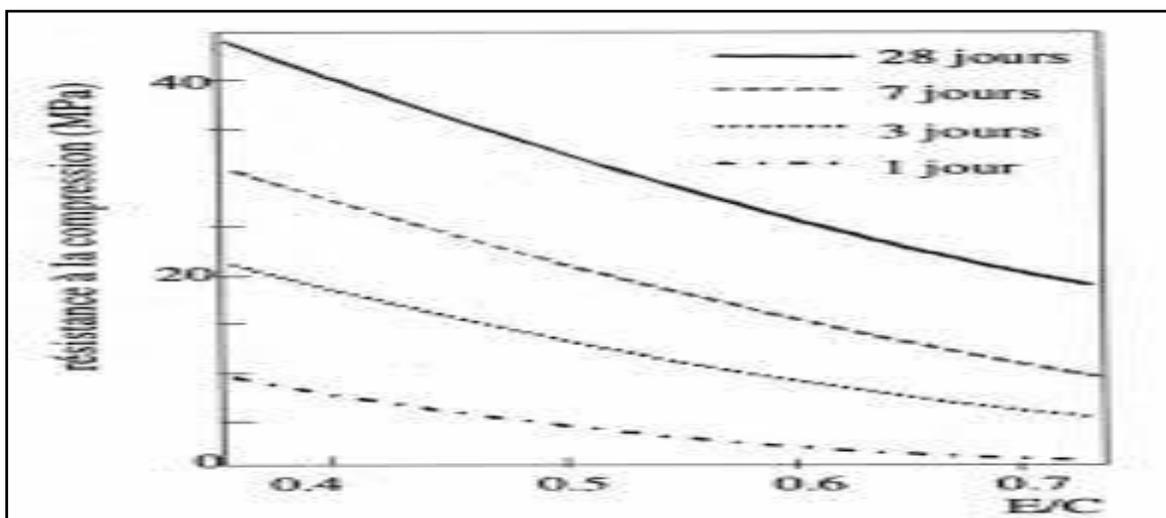
Nielsen [7] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport C/E n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38 comme on le voit sur la figure II.6, pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linière.



**Figure II.6 :** Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport C/E [7]

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton. [7]

La figure II.7 montre que la résistance à la compression du béton est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand.[7]



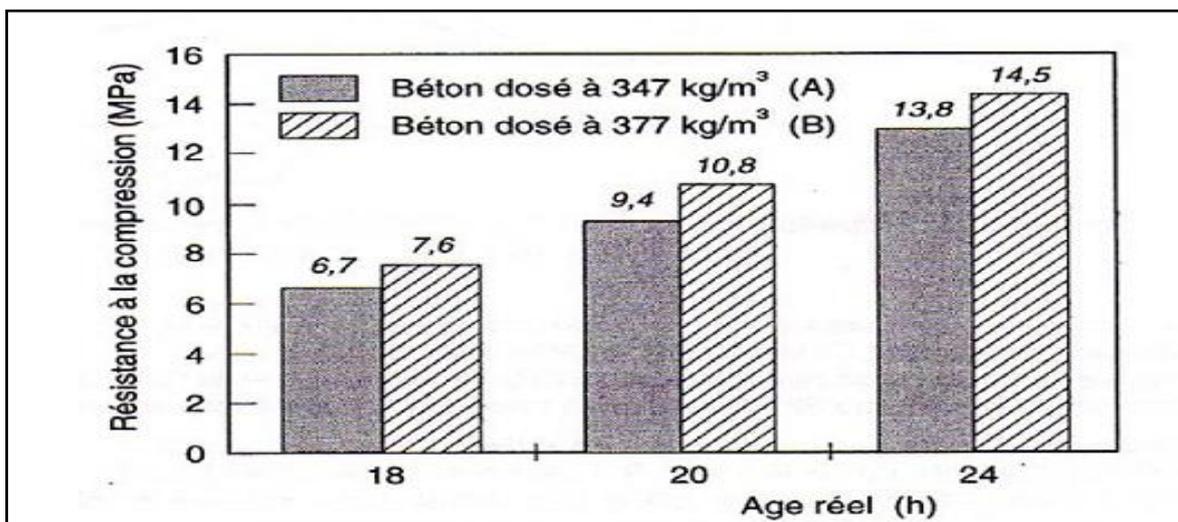
**Figure II.7:** Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [7]

La résistance a été mesurée sur des cylindres de 15x30 cm et les bétons ont été préparés avec un ciment de type I (ASTM), sans air entraîné.

### II.3.2 Influence du dosage en ciment

Pour une même ouvrabilité, une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

La figure II.8 illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton en effet, pour obtenir le même affaissement (7cm), le béton dosé à  $377 \text{ kg/m}^3$  de ciment a demandé  $192 \text{ l/m}^3$  d'eau, soit un rapport E/C de 0,51, alors qu'il a fallu  $186 \text{ l/m}^3$  d'eau pour le béton dosé à  $347 \text{ kg/m}^3$  de ciment, soit un rapport E/C de 0,54. En se référant à la figure II.7, il est alors possible d'expliquer les résultats présentés par la figure II.8 qui montrent clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.



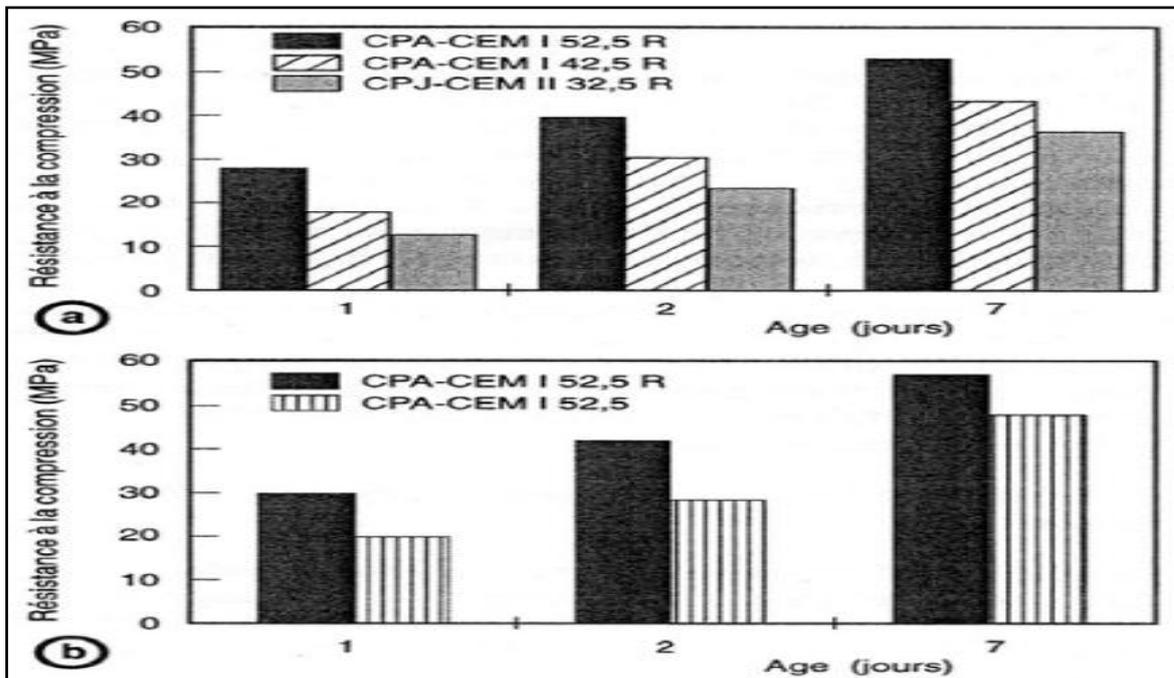
**Figure II.8:** Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [7]

Les bétons ont été gâchés avec  $347 \text{ kg/m}^3$  (A) et  $377 \text{ kg/m}^3$  (B) de CPJ-CEM II 42,5 R et les résistances ont été mesurées sur des éprouvettes  $11 \times 22 \text{ cm}$  confectionnées dans des moules en carton

### II.3.3 Influence du type de ciment

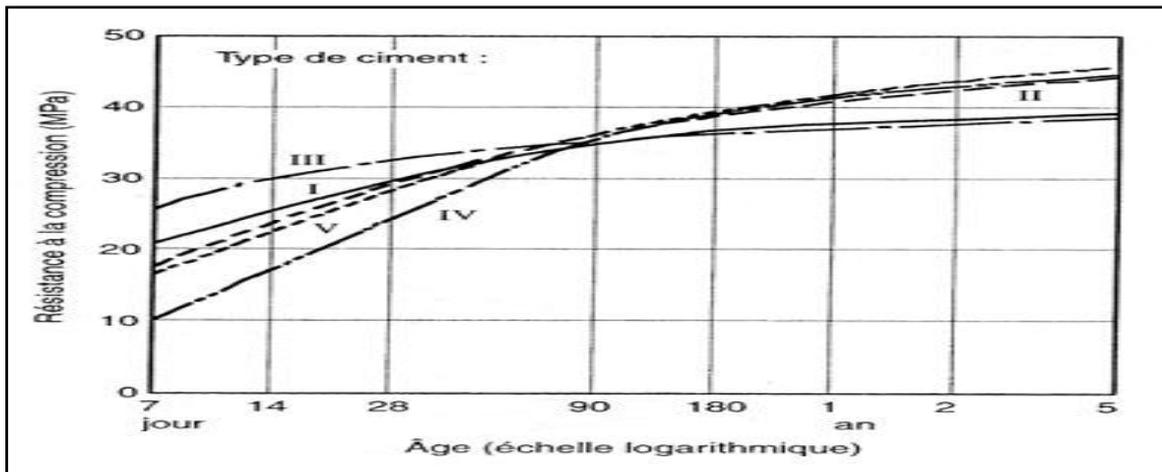
La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la figure II.9 cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage

identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevés, à toutes les échéances de même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPJ-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [7].

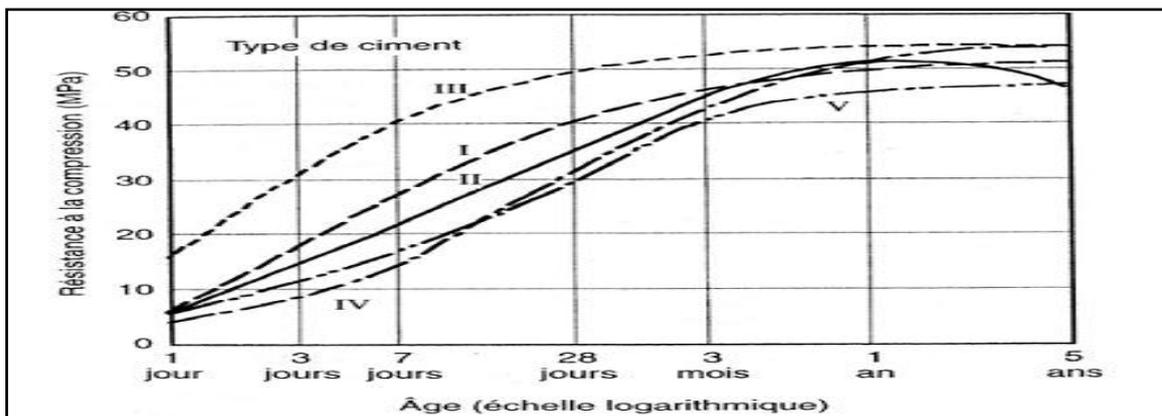


**Figure II.9:** Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [7]

D'après U.S. Bureau of réclamation, la figure II.10 illustre la vitesse de développement de la résistance de bétons confectionnés avec un dosage unique de différents ciments alors que les vitesses de montée en résistance varient considérablement, on constate peu de différence de résistance entre tous ces ciments à 90 jours. A la figure II.11, pour un même rapport E/C, Gonnerman et Lerch [7] ont constaté dans certains cas des différences plus importantes. Or, la tendance générale montre que les ciments à vitesse de durcissement peu élevée ont une résistance finale plus élevée. Par exemple, la figure II.10 montre un ciment de type IV qui présente la plus faible résistance à 28 jours, mais développe la deuxième plus forte résistance à 5 ans. La comparaison des figures II.10 et II.11 démontre que les différences entre les ciments ne sont pas facilement quantifiables.



**Figure II.10:** Développement de la résistance de bétons confectionnés avec différents ciments pour un dosage de 335 kg/m<sup>3</sup> [7]



**Figure II.11 :** Développement de la résistance de bétons de rapport E/C de 0,49 confectionnés avec différents ciments [7]

### II.3.4 Influence de la porosité

De nombreuses études ont montrés que la porosité de la matrice cimentaire est un facteur déterminant pour la résistance en compression des matériaux cimentaires, cette dernière étant d'autant plus élevée que la porosité de ces matériaux est faible, plusieurs chercheurs ont même tenté d'exprimer la relation existant entre ces deux grandeurs par des relations mathématiques simples selon Odler I. & RÖßlerM[14] les équations les plus caractéristiques proposées dans la littérature sont:

- L'équation de Baslshin :  $\sigma = \sigma_0 (1 - P)A$  (Eq II.2)

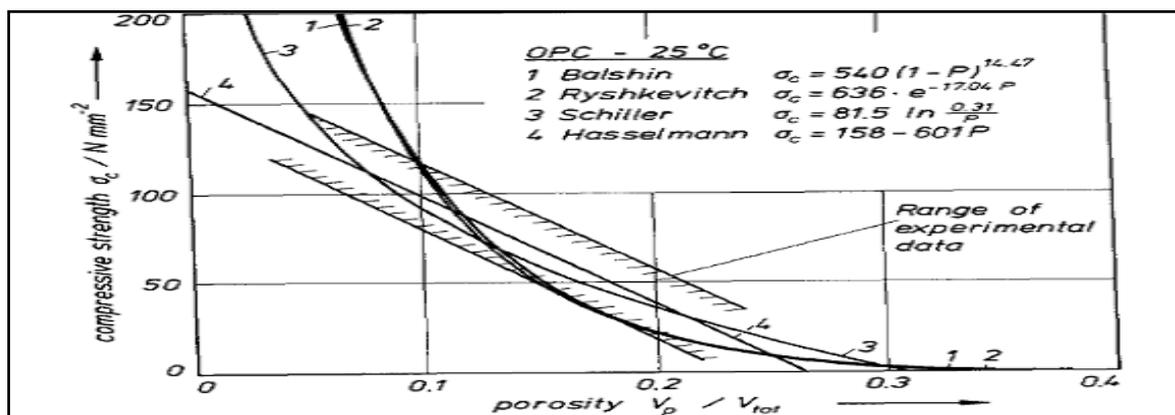
- L'équation de Ryshkovitch :  $\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E \cdot P)$  (Eq II.3)

- L'équation de Schiller :  $R_c = D \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)$  (Eq II.4)
- L'équation de Hasselman :  $R_c = R_{c0} (1 - A \cdot \varepsilon)$  (Eq II.5)

Où :

- $\varepsilon$  : est la porosité ;
- $\varepsilon_0$  : est la porosité lorsque la résistance en compression est nulle;
- $R_{c0}$  : est la résistance en compression lorsque la porosité est nulle;
- $R_c$  : est la résistance en compression lorsque la porosité est égale à  $\varepsilon$  ;
- A, B, D : sont des constantes expérimentales.

Toutes ces équations répondent en premier lieu à un besoin de modélisation phénoménologique du comportement des pâtes cimentaires cependant elles restent très sensibles aux conditions expérimentales et leur généralisation sur les mortiers et les bétons n'a pas été toujours couronnée de succès. En effet, Kumara[14] a démontré que ces modélisations sont inadéquates pour interpréter les résultats expérimentaux sur des bétons (figure II.12).



**Figure II.12:** Confrontation résultats expérimentaux et modèles de la relation porosité-résistance en compression des bétons selon Kumar [14]

A certains égards, cette loi se rapproche plus des modèles prédictifs de Bolomey[14] et de Abrams[14] qui introduisent le rapport E/C dans leur équation.

Bolomey[14] a proposé une forme linéaire de la formule de Féret la relation donne aussi un bon lissage des données (erreur moyenne de 1.4 MPa):

$$R_c = 24,6 \frac{C}{E} - 0,5 \quad (\text{Eq II.6})$$

Abrams proposa une relation exponentielle suivante :

$$R_c = 147 \left( 0,0779 \times \frac{E}{C} \right) \quad (\text{Eq II.7})$$

Où :

**C** et **E** sont les masses de ciment et d'eau par unité de volume de béton.

L'équation d'Abrams donne une bonne corrélation (erreur moyenne de 2,1MPa) il a donc proposé une autre qui prend en compte l'influence de la porosité, de la taille des pores, du dosage en ciment, du type de granulats, des conditions d'exposition et de l'âge des éprouvettes.

### II.3.5 Influence de rapport granulat/ciment (G/C)

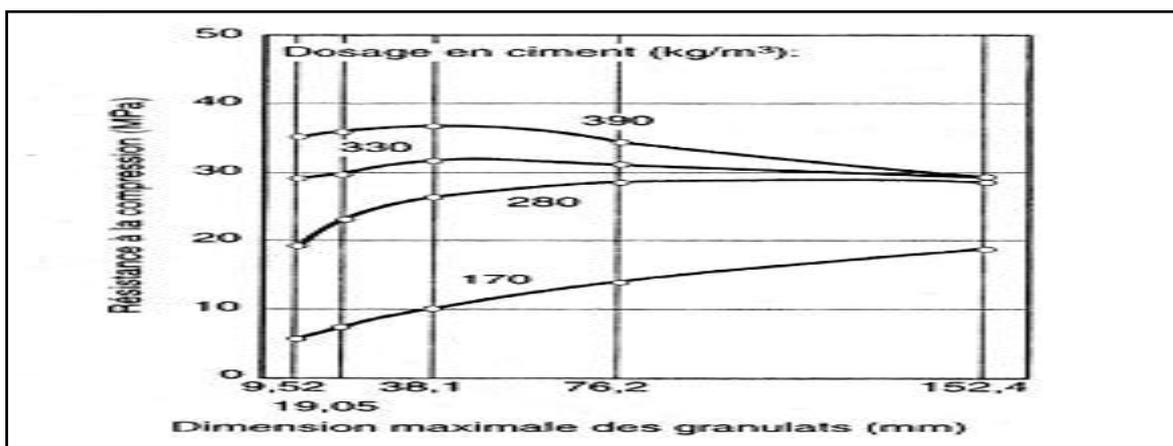
Il n'y a aucun doute que le rapport G/C est un facteur de deuxième importance quant à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant dans certain cas, une partie de l'eau peut être absorbée par le granulat : plus il y a de granulats, plus la quantité d'eau absorbée par ces derniers est importante, ce qui contribue à réduire le rapport E/C réel du béton dans d'autres cas, une plus forte teneur en granulats contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulats et pâte de ciment l'explication la plus probable provient toutefois du fait que la teneur totale en eau par mètre cube de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé.

Les études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20 %, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, on constate une augmentation l'influence du volume des granulats sur la résistance à la traction est pratiquement identique à celle observée sur la résistance à la compression. La liaison entre les granulats et la pâte de ciment est un facteur important pour la résistance des bétons, spécialement celle à la traction la liaison est engendrée en partie par l'imbrication des granulats et de la pâte de ciment hydraté due à la rugosité de la surface des granulats. Une surface plus rugueuse, comme les granulats concassés, génère une meilleure liaison en raison de l'imbrication mécanique [15].

### II.3.6 Influence de la taille maximale du granulat

Dans les années 1960, Walker et Bloem [16] ont publié un article qui suscita à l'époque beaucoup de discussions, la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale du granulat ( $D$ ) sur la résistance à la compression, à rapport E/C constant. Cette constatation étonna la communauté scientifique, celle-ci présumant généralement qu'avec un  $D$  important, le béton, plus compact, présenterait une résistance mécanique supérieure et une meilleure durabilité.

Cependant, deux causes exercent des effets contradictoires : pour une quantité donnée de ciment, en augmentant le  $D$ , on tend vers une réduction de la demande en eau, tandis que la résistance obtenue à rapport E/C donné diminue. Par conséquent, quand le volume du ciment et la maniabilité restent constants, on a un effet du  $D$  sur la résistance à la compression qui n'est pas monotone. Une valeur optimale de la dimension du granulat existe, qui décroît quand la quantité de ciment augmente.

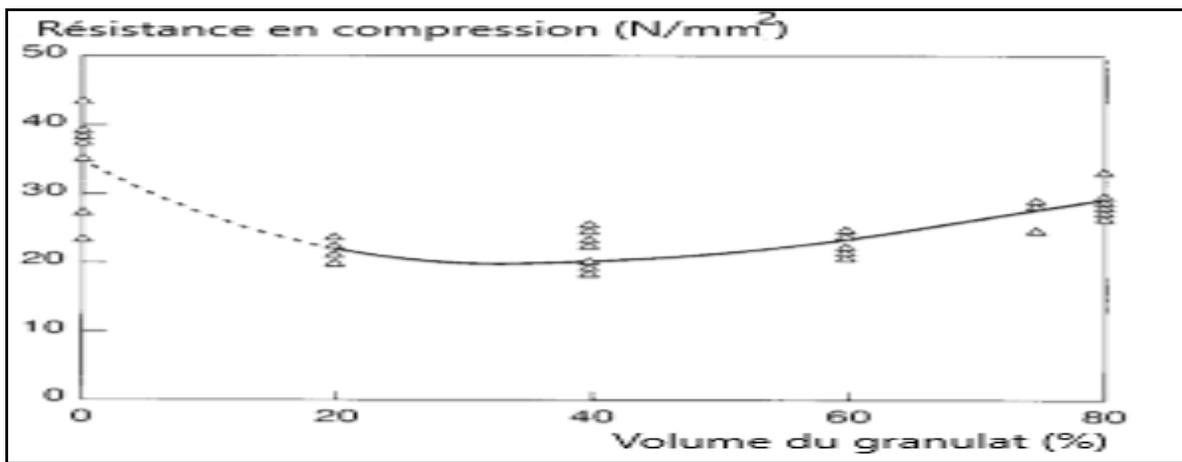


**Figure II.13:** Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment [16].

### II.3.7 Influence du volume du granulat

Stock A.F, Hannant D.J et Williams R.I.T [16] ont publié une étude concernant l'effet du volume du granulat sur la résistance à la compression. La plus grande partie des références citées dans cet article soutient que l'assertion selon laquelle la résistance diminue quand le volume de pâte augmente (à nature de pâte constante). Ces auteurs ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même

matrice. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Malheureusement, les essais de résistance à la compression sur cubes (éprouvettes cubiques) ont donné des résultats assez dispersés. Cependant la tendance mentionnée plus haut est reproduite, au moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulat, soit 60-75 % (Figure II.14). Notons que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand la maniabilité diminue. Selon le paramètre de Féret le volume d'air joue un rôle similaire à celui de l'eau au regard de la résistance.



**Figure II.14:** Effet de volume de granulat, d'après Stock et Hannant D.J et Williams R.I.T [16]

### II.3.8 Influence de la forme de granulat

Les granulats concassés ont une rugosité supérieure à celle des granulats roulés, ce qui favorise l'adhérence entre la pâte de ciment et le granulat et ainsi donne une meilleure résistance ; le gain en compacité des formes arrondies étant contrecarré par la mauvaise adhérence des granulats roulés (sphérique). Cependant les formes très anguleuses chez les granulats concassés « poinçonnent » la pâte de ciment en présence de chargement externe et les granulats roulés sont préférables de ce point de vue une angularité accentuée demande aussi beaucoup d'eau pour être maniable ainsi pour le BHP le granulat idéal doit être concassé, propre, de forme cubique, à angularité réduite et contenant le moins possible de particule plates ou allongées du fait de la faible résistance au plan de fissuration de ces dernières [15].

## II.4 Résistance à la traction

Généralités Sous sollicitation en traction, le béton présente une très faible résistance et un comportement fragile. Généralement, la résistance à la traction est négligée par les concepteurs dans leurs calculs statiques. Ceci nécessite le recours à une armature reprenant intégralement les contraintes de traction dans les zones tendues. Dans certains cas, la résistance à la traction du béton joue cependant un rôle indispensable sur l'état limite de rupture d'un élément structural, par. ex. en ce qui concerne la résistance à l'effort tranchant ou au poinçonnement de dalles dépourvues d'étriers, la transmission des efforts d'une barre droite à une autre dans une zone de recouvrement, la diffusion de forces concentrées ainsi que la résistance du cône d'arrachement d'un ancrage scellé dans le béton. De plus, la vérification de l'état limite de service nécessite impérativement de quantifier la résistance à la traction du béton, afin de déterminer l'amplitude des zones fissurées de la structure.

La résistance à la traction dépend en partie des mêmes facteurs d'influence que la résistance à la compression, c'est-à-dire. des propriétés de la pâte de ciment durcie et son adhérence au granulat. En conséquence la résistance à la traction augmente lorsque le rapport E/C diminue, mais nettement moins que la résistance à la compression. Les bétons avec des granulats concassés possèdent en général une résistance à la traction de 10 % à 20 % plus élevée que les bétons similaires avec un granulat roulé. Le mode et le niveau de rupture d'une éprouvette de béton sollicitée en traction sont essentiellement dictés par les facteurs microstructuraux, tels que:

- Des défauts de compactage ;
- Une mauvaise adhérence de la pâte de ciment au granulat ;
- Des microfissures dans la pâte de ciment et/ou dans le granulat ;
- Des pores d'air.

Habituellement, on obtient une rupture en traction avec une surface de rupture qui suit la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulat. Les granulats sont déchaussés (figure II.15). Si l'on améliore la qualité de la zone de contact, on obtient une résistance à la traction nettement plus élevée. Si elle s'approche de celle des granulats, la rupture se produit plutôt au sein du granulat que le long de la zone de contact.

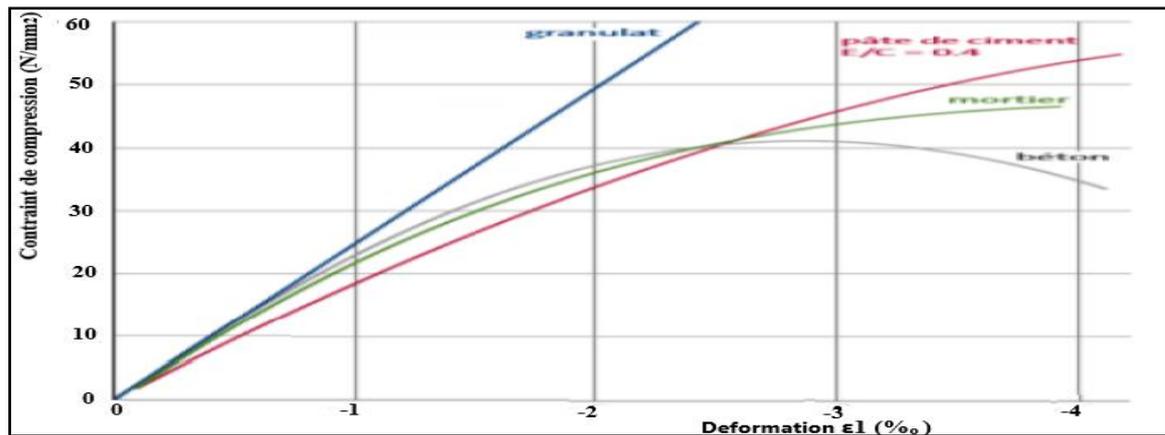


**Figure II.15:** Mode de rupture en traction directe d'une éprouvette dont les granulats sont principalement déchaussés [12]

$$\sigma = E' \times \varepsilon = E' \times \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Eq II.8})$$

- $\sigma$  : Contrainte ( $N/mm^2$ ) ;
- $E'$  : Modulus d'élasticité ( $N/mm^2$ ) ;
- $\varepsilon$  : Déformation (‰) ;
- $l$  : Longueur de l'éprouvette sans charge (mm) ;
- $\Delta l$  : Changement de longueur de l'éprouvette sous charge (mm).

Le comportement élastique du béton n'est que partiellement linéaire. Les courbes contrainte-déformation de la pâte de ciment et du granulat sont en majeure partie linéaires. Mais la déformation du béton n'est pas directement proportionnelle à la contrainte et croît plus rapidement que la contrainte. Les courbes contrainte-déformation ne sont pas linéaires, mais s'incurvent de plus en plus lorsque le niveau de contrainte s'approche de la rupture. Le comportement non-linéaire du béton est expliqué par la formation de microfissures dans la zone de transition entre le granulat et la pâte de ciment. En général, le niveau de chargement du béton en service est nettement inférieur à la charge de rupture, respectivement bien en-dessous du domaine de déformation plastique. Au niveau des contraintes de service le comportement du béton est pratiquement linéaire (Figure II.16).



**Figure II.16 :** Courbes contrainte-déformation du granulat, spécifiques à la pâte de ciment, au mortier et au béton [12]

Le module d'élasticité du béton dépend directement des proportions volumiques et modules respectifs du granulat et de la pâte de ciment. De par sa proportion volumique de l'ordre de 70 % le granulat représente clairement le paramètre prépondérant. Le module d'élasticité des granulats courants varie entre 50 000 et 700000 N/mm<sup>2</sup>. Le module de la pâte de ciment est nettement plus bas et se situe, en principe, entre 15 000 et 22 000 N/mm<sup>2</sup>.

Le module d'élasticité correspond à la notion pratique suivante: un module élevé est avantageux pour limiter les déformations par exemple, en cas de structures fléchies ou comprimées (dalles, poutres, piliers). Par contre, un module bas s'avère plus utile, p. ex. en cas de déformations imposées (tassement d'appuis, retrait, variations de température), parce qu'il en résulte de plus faibles contraintes de traction et donc un risque de fissuration réduit [12].

#### II.4.1 Essai de résistance à la traction par flexion

Cet essai donne une indication sur la résistance à la traction par flexion du béton et donc sur sa résistance à la fissuration [18].

La résistance à la traction par flexion se calcule comme suit :

$$f_{cbt} = \frac{3P'L}{2bh^2} \quad (\text{Eq II.9})$$

Avec :

- **P'** : La charge maximale ;
- **L** : La portée libre ;

- **b** : La largeur h la hauteur du prisme.

#### II.4.2 Essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien

Permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

La résistance à la traction transversale se calcule comme suit [18] :

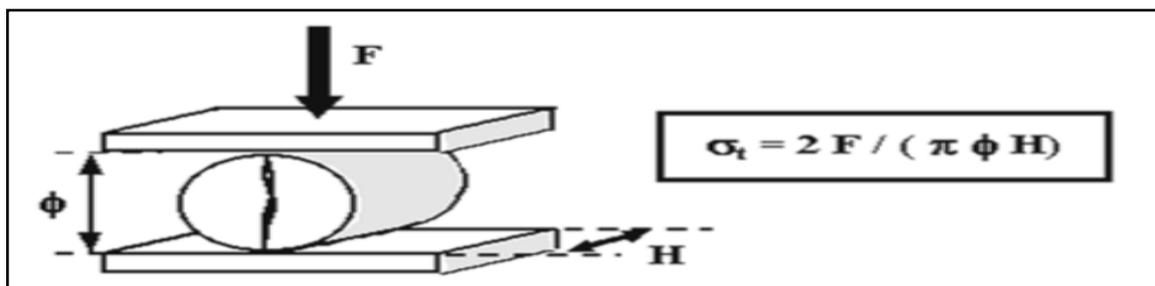
$$f = \frac{2P'}{\pi dl} \quad (\text{Eq II.10})$$

Avec :

- **P**: la charge maximale, d le diamètre du cylindre (ou largeur) ;
- **L**: la longueur de l'éprouvette selon la ligne de l'application de la charge.

#### II.4.3 Résistance à la traction par fendage

Dans l'essai de traction indirecte (par fendage), la partie centrale est soumise simultanément à des efforts de compression et de traction. Tenant compte du fait que la résistance du béton en compression est nettement supérieure à celle en traction, la rupture s'opère dès que le béton atteint sa limite en traction. Le schéma de principe de l'essai est représenté par la figure II.15 [17].



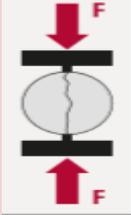
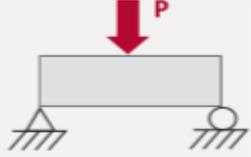
**Figure II.17:**Schéma de principe de l'essai de traction par fendage [17]

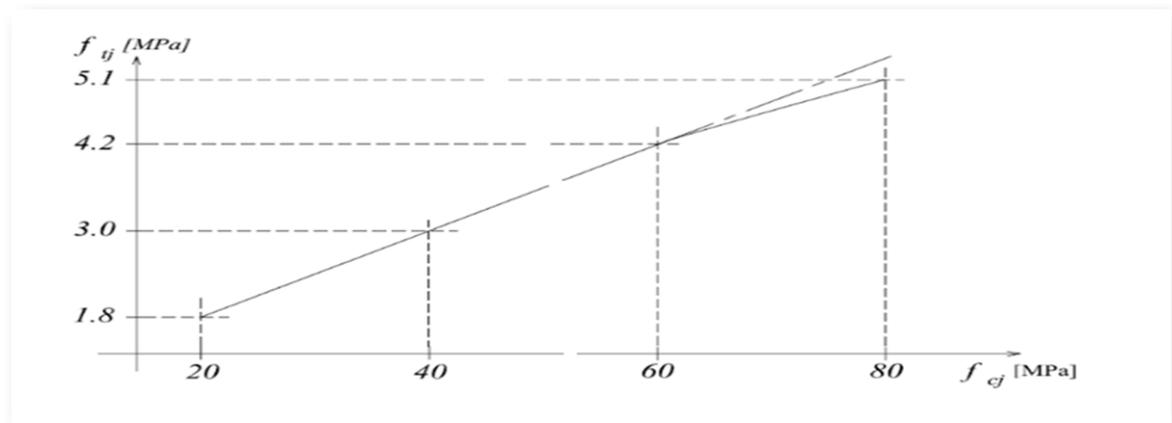
La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée  $f_{tj}$ , est conventionnellement définie par les relations :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06f_{cj} \quad \text{si } f_{c28} \leq 60\text{MPa} \quad (\text{Eq II.11})$$

$$f_{tj} = 0.275f_{cj}^{\frac{2}{3}} \quad \text{si } f_{c28} > 60\text{MPa} \quad (\text{Eq II.12})$$

**Tableau II.3** : Méthodes d'essai de la résistance à la traction [12]

	<b>Traction directe</b>	<b>Traction directe Traction par fendage (essai Brésilien)</b>	<b>Flexion 3 points</b>
<b>Principe</b>			
<b>Recommandation, respectivement norme</b>	Rilem Recommendation CP27	SN EN 12390-6	SN EN 12390-5
<b>Eprouvettes</b>	cylindre (aussi taillé)	cylindre	prisme
<b>Charge</b>	traction centrée le long de l'axe du cylindre	compression le long de deux lignes opposées dans le plan axial	charge centrée en un point
<b>Paramètres</b>	T = force de rupture (traction)  d = diamètre de l'éprouvette	F = force de rupture (compression)  d = diamètre de l'éprouvette  L = longueur de l'éprouvette	P = force de rupture  h = hauteur de l'éprouvette  b = largeur de l'éprouvette  L = portée entre appuis
<b>Résultat de l'essai</b>	$f_{ct} = \frac{t}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$	$f_{c, \text{fendage}} = \frac{2}{\pi} \times \frac{f}{d \times l}$	$f_{c, \text{flexion}} = \frac{m}{w} = \frac{p \times l}{4} \times \frac{6}{b \times h^2}$
<b>Corrélation approximative</b>	-	$f_{c, \text{fendage}} \approx 1.25 f_{ct}$	$f_{c, \text{flexion}} \approx 2.0 f_{ct}$
<b>Ordre de grandeur (N/mm<sup>2</sup>)</b>	1.5 – 4.0	2.0 – 6.0	3.0 – 8.0



**Figure II.18:** Evolution de résistance à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$  [17]

## II.5 Conclusion

La résistance du béton est influencée par divers paramètres cités ci-dessus mais essentiellement contrôlée par la qualité du ciment et le rapport E/C. La fluctuation de ces paramètres de composition engendre des variations des propriétés prescrites.

Plusieurs recherches se sont intéressées à l'influence de ces constituants sur le comportement du béton, tels que : l'influence des dosages en ciments ou la résistance à la compression du béton augmente avec l'augmentation du dosage la classe de résistance de ciment l'une des qualités essentielles à rechercher pour un béton est sa résistance mécanique à la compression, plusieurs études qui montrent l'évolution de la résistance à la compression de bétons en fonction de classe du ciment. Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la résistance à la compression, plus E/C est faible plus la résistance augmente.

Les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles des bétons. Tels que Le rapport gravier/sable (G/S) c'est un indicateur qui rentre directement dans la formulation du béton.

L'influence de la taille maximale ( $D_{max}$ ) du granulat exerce une influence sur la résistance à la compression de béton. L'augmentation maximale du diamètre global a un impact négatif sur la résistance à la compression aussi le risque de blocage croit, la réduction de la taille des gros granulats contribué significativement à l'amélioration de la maniabilité.

# Chapitre III

## Les adjuvants

### III.1 Un peu d'histoire

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland vers 1850, commencent les recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés. On cherche à agir sur les temps de prise, les caractéristiques mécaniques et de mise en œuvre et la porosité.

Dès 1881, « Candlot »[19] étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le sucre, déjà connu comme retardateur de prise, est souvent employé à partir de 1909. Entre 1910 et 1920, débute la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium. À partir de 1930, les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés.

Depuis 1960, avec le développement du béton préfabriqué et du béton prêt à l'emploi, les adjuvants prennent une place grandissante, fruit d'une expérimentation progressive.

Le développement important des adjuvants nécessite la création en 1964, de la COPLA (Commission Permanente des Liants hydrauliques et des Adjuvants de béton). Elle a pour mission l'agrément et le contrôle des adjuvants et la mise à jour d'une liste officielle.

En 1968, est créé le SYNAD (Syndicat National des Adjuvants) avec pour vocation de développer et faire connaître les adjuvants, le développement des normes d'adjuvants à partir de 1972. A abouti en 1984 à la mise en place d'une certification avec la marque NF Adjuvants, véritable label de qualité.

### III.2 Introduction

L'utilisation d'adjuvants remonterait aux Romains qui utilisaient du sang de bœuf et du jaune d'œuf dans leur mélange de chaux et de pouzzolane.

Le pouvoir coagulant du sang était utilisé pour accélérer la prise des mortiers. Au début, les adjuvants étaient à base de matière organique et utilisés de manière empirique.

Au cours du XXe siècle, des progrès scientifiques ont permis de développer des adjuvants avec des propriétés spécifiques. Leur utilisation s'est généralisée ces dernières décennies.

Ils sont aujourd'hui incorporés dans tous les types de bétons, qu'ils soient livrés prêts à l'emploi, utilisés en usine de préfabrication ou fabriqués sur chantier [19].

### III.3 Définitions des adjuvants

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

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

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

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

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

L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés [20].

A noter que:

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides, mais certains adjuvants existent en poudre afin de réduire leur coût de transport (cas des chantiers à l'export), dans dernier cas il faut généralement les diluer avant l'emploi (la dispersion homogène d'une petite quantité de poudre dans un malaxeur de centrale à béton est en effet moins certaine que celle d'un liquide).

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a pas une mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de substituer les règles de la bonne technique [11].

### III.4 L'intérêt des adjuvants

La raison de l'utilisation croissante des adjuvants est qu'ils confèrent physiquement et économiquement au béton des avantages considérables. Ces avantages comprennent, entre autres, l'utilisation de béton dans des conditions qui présentaient auparavant des difficultés considérables, voire insurmontables. Ils permettent aussi l'utilisation d'une plus grande gamme de matériaux dans le béton.

Même s'ils ne sont pas toujours bon marché, les adjuvants ne représentent pas nécessairement des dépenses supplémentaires, car leur utilisation peut engendrer des économies, par exemples sur les couts du serrage et du dosage en ciment ou encore en augmentant la durabilité des bétons sans disposition supplémentaires ultérieure.

Il ya toutefois lieu d'insister sur le fait que, même utilisés de manière adéquate et bénéfique pour le béton ,ils ne peuvent en aucun cas servir à corriger la mauvaise qualité des autres constituants , ni leur dosage incorrect ,ni des erreurs de manutention lors du transport , de la mise en place ou du serrage du béton [21].

### **III.5 Rôle des adjuvants**

Les adjuvants jouent un rôle de plus en plus important dans la technologie du béton. Leurs mécanismes d'action sont très complexes, en particulier pour les adjuvants de nouvelles générations. En effet, l'action d'un adjuvant est en fonction de son dosage, du type de ciment, de sa séquence d'introduction dans le malaxeur et des conditions climatiques lors de la mise en œuvre du béton [19].

### **III.6 Les fonctions**

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une ou plusieurs fonctions secondaires.

#### **III.6.1La fonction principale**

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la ou les modifications majeures qu'il apporte aux propriétés des bétons, des mortiers ou des coulis, à l'état frais ou durci. L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier en fonction de son dosage et des composants du béton (Ciment, sable et fines en particulier). Les performances des adjuvants et les plages de dosages permettant de satisfaire aux exigences normales sont précisées dans les fiches techniques des fournisseurs.

La performance d'un adjuvant est jugée vis-à-vis de son aptitude à être efficace dans son utilisation prévue (fonction principale) sans produire d'effets secondaires dommageables [19].

### III.6.2 Les fonctions secondaires

Un adjuvant présente en effet généralement une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont le plus souvent indépendantes de la fonction principale.

Certains plastifiants ont par exemple une fonction secondaire d'accélérateur de durcissement. Des effets recherchés cumulés peuvent être obtenus en associant plusieurs adjuvants.

Les effets de chaque adjuvant varient en fonction de son dosage. Il est donc indispensable, lors de l'utilisation d'un adjuvant, de s'assurer, par des essais préalables représentatifs des conditions de réalisation du chantier, de son efficacité.

L'utilisation d'adjuvants pour la production de béton de structures doit respecter les exigences de la norme NF EN 206-1. L'emploi d'un adjuvant ne doit pas altérer les caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques du béton, du mortier ou du coulis. Il ne doit pas nuire aux caractéristiques des armatures et en particulière leur adhérence au béton [19].

## III.7 Les fonctions principales de classification d'adjuvants

### III.7.1 Classification

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ». Les normes retiennent la classification suivante [11]:

- Plastifiants réducteurs d'eau;
- Superplastifiants hautement réducteurs d'eau;
- Rétenteurs d'eau;
- Entraîneurs d'air;
- Accélérateurs de prise;
- Accélérateurs de durcissement;
- Retardateurs de prise;
- Hydrofuges.

### III.7.1.1 Plastifiants réducteurs d'eau

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C. donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité.

Ils doivent par rapport au béton ou mortier témoin, assurer une résistance à la compression de 110% minimum et permettre une réduction du dosage en eau d'au moins 5%.

On peut également jouer partiellement sur les deux paramètres pour augmenter les résistances mécaniques tout en améliorant la maniabilité (figure III.1).

Les premiers plastifiants étaient à base de lignosulfonates, sous-produits de l'industrie papetière après extraction de la cellulose du bois. Actuellement, certains lignosulfonates modifiés restent utilisés, essentiellement en raison de leur faible coût, mais des produits de synthèse sont également employés.

Les plastifiants se dosent généralement entre 0.3 et 0,5 % du poids de ciment et ils se caractérisent souvent par un effet secondaire « retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage plus élevé [11].

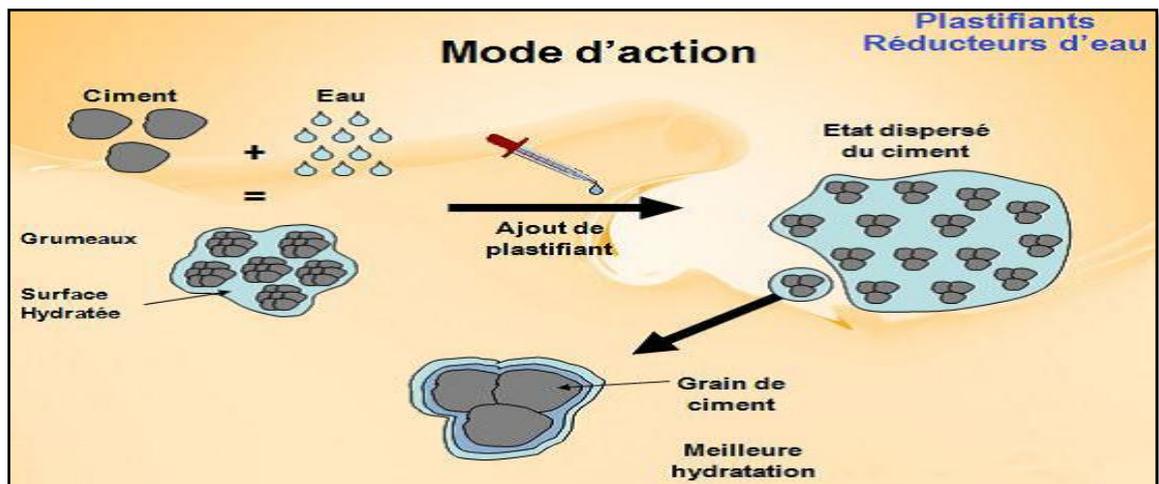


Figure III.1: Schéma explique le rôle d'ajout de plastifiant [22]

### III.7.1.2 Superplastifiants hautement réducteurs d'eau

Cette désignation complexe, traduction de l'anglais Superplasticizers - High Range Water Reducers, se rapporte à des produits qu'en France on appelait auparavant «fluidifiants».

Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton ou mortier témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12 %, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25 % suivant le dosage. Concernant les résistances à la compression elles doivent être de 140 % à 1 jour et de 115 % à 28 jours.

Sur le plan pratique, il est préférable d'introduire le superplastifiant le plus tard possible lors du malaxage du béton ou mortier, ne serait-ce qu'en raison de la durée assez faible de leur efficacité sur la maniabilité et le raidissement qui s'ensuit, ce qui explique le choix de ne l'introduire que sur le lieu d'utilisation dans la toupie du camion malaxeur. Toutefois si l'on recherche essentiellement la réduction de la quantité d'eau, il s'avère parfois difficile d'utiliser cette technique du fait que le béton sortant du malaxeur risque d'être trop sec et de ne plus permettre au superplastifiant d'avoir tout l'effet souhaité en raison d'une mauvaise dispersion après son introduction dans la toupie du camion malaxeur. La solution consiste alors à procéder à une double introduction, c'est à dire à incorporer pendant le malaxage une partie de l'adjuvant afin d'obtenir un slump suffisant pour assurer un mélange et un transport corrects, puis à l'arrivée sur le lieu d'utilisation à ajouter le complément en un deuxième temps, cette façon d'opérer devant être contrôlée rigoureusement.

Il y a cependant lieu d'indiquer qu'un groupe cimentier a mis au point très récemment dans son département « adjuvants » une molécule donnant naissance à une nouvelle génération de superplastifiants autorisant la fabrication de bétons très homogènes conservant leur maniabilité pendant des durées identiques à celles présentées par les bétons classiques, c'est à dire de l'ordre de 3 heures à une température ambiante de 20 °C. Ce nouveau superplastifiant compatible avec la quasi-totalité des ciments, est mis en œuvre directement dans la bétonnière avec l'eau de gâchage, au moment du malaxage à un dosage d'environ 1 % du poids du ciment; il ne doit pas être ajouté dans la toupie sur le lieu d'utilisation, comme nous l'avons indiqué précédemment pour les autres superplastifiants. Il autorise par là même la réalisation de

travaux pour lesquels il est nécessaire avec les superplastifiants classiques d'adjoindre des retardateurs, ainsi que des mises en œuvre par pompage sur de longues distances.

Les très fortes réductions d'eau qu'ils permettent, rendent les superplastifiants indispensables dans la formulation des bétons à hautes performances, avec ou sans fumées de silice [11].

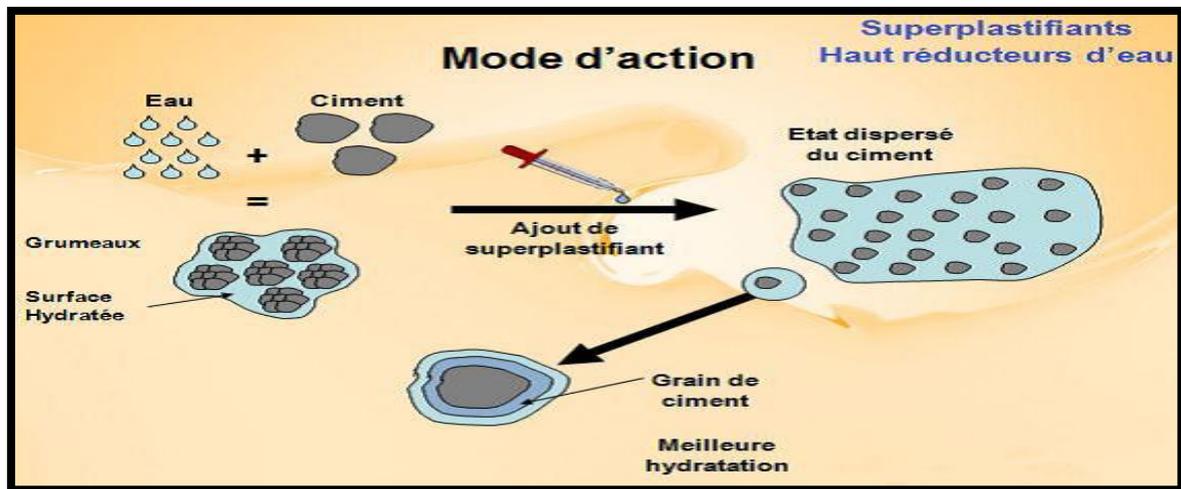


Figure III.2 : Schéma explique le rôle d'ajout de superplastifiant [22]

### III.7.1.3 Rétenteurs d'eau

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons.

On utilise généralement des méthyles cellulose (Methocel) qui ont la propriété d'augmenter de volume en fixant l'eau libre du béton. Les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manqué d'éléments fins ou à faible dosage en ciment [11].

### III.7.1.4 Entraîneurs d'air

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résines de synthèse: résine Vinsol, aryl alkyl sulfonates, acides gras... etc.

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage.

Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage. Sous forme d'un très grand nombre de microbulles, dont 80 % d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100 microns, la plupart étant comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns. Ces microbulles ne doivent pas être confondues avec l'air occlus, constitué de bulles de tous diamètres généralement supérieurs

à 1 mm, réparties aléatoirement dans le béton, qui se trouvent emprisonnées pendant la mise en place.

Ils améliorent essentiellement:

- La plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissant comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement;
- La résistance au gel du béton durci (antigélif), les très nombreuses petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau des canalicules internes pour l'eau interstitielle dont le volume augmente avant la prise en glace; cela évite la désagrégation du béton par gel de cette eau.

La quantité d'air entraîné pour une bonne protection contre le gel est d'autant plus grande que la dimension des granulats est plus faible (fig. III.3).

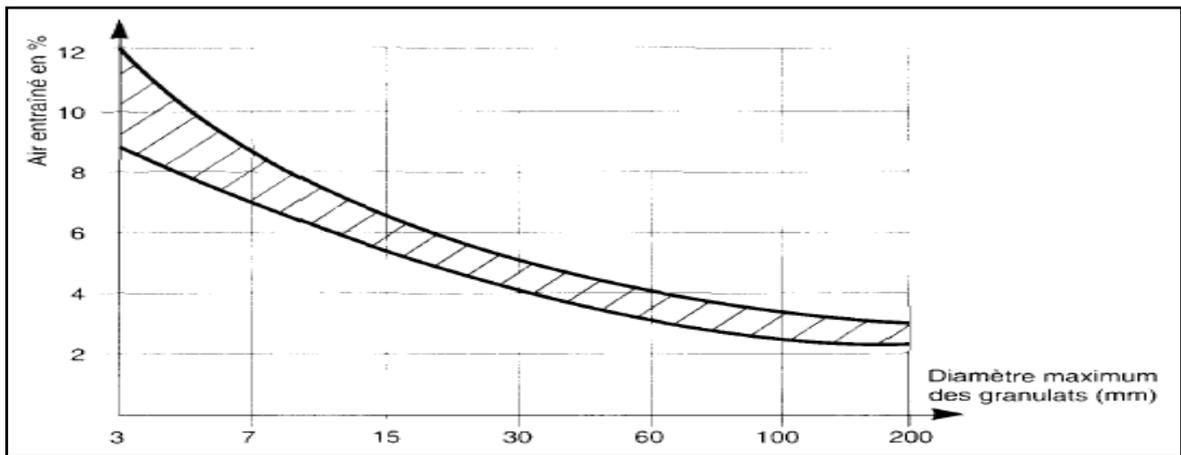


Figure III.3: Pourcentage d'air entraîné recommandé suivant la grosseur des granulats

[11]

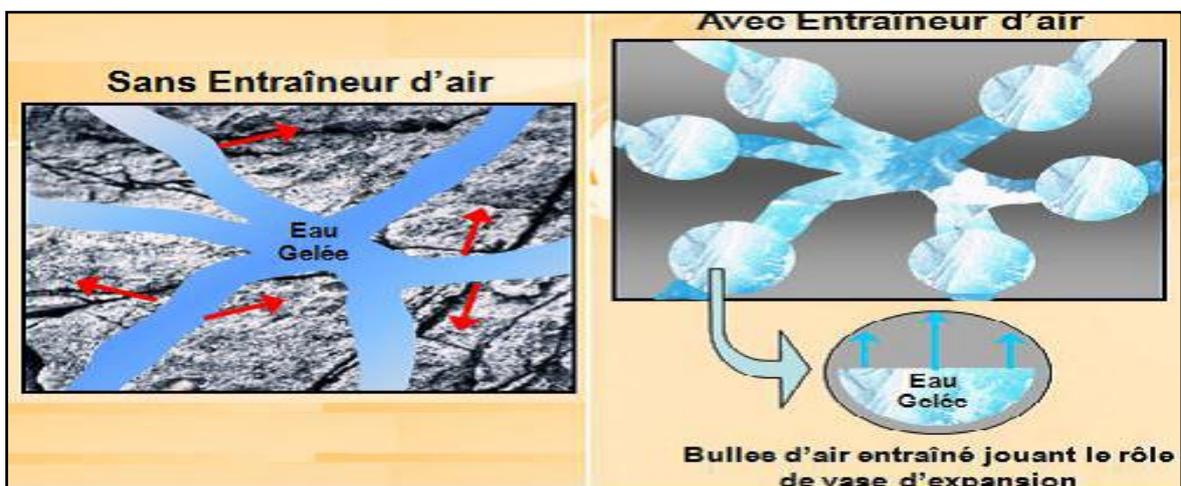


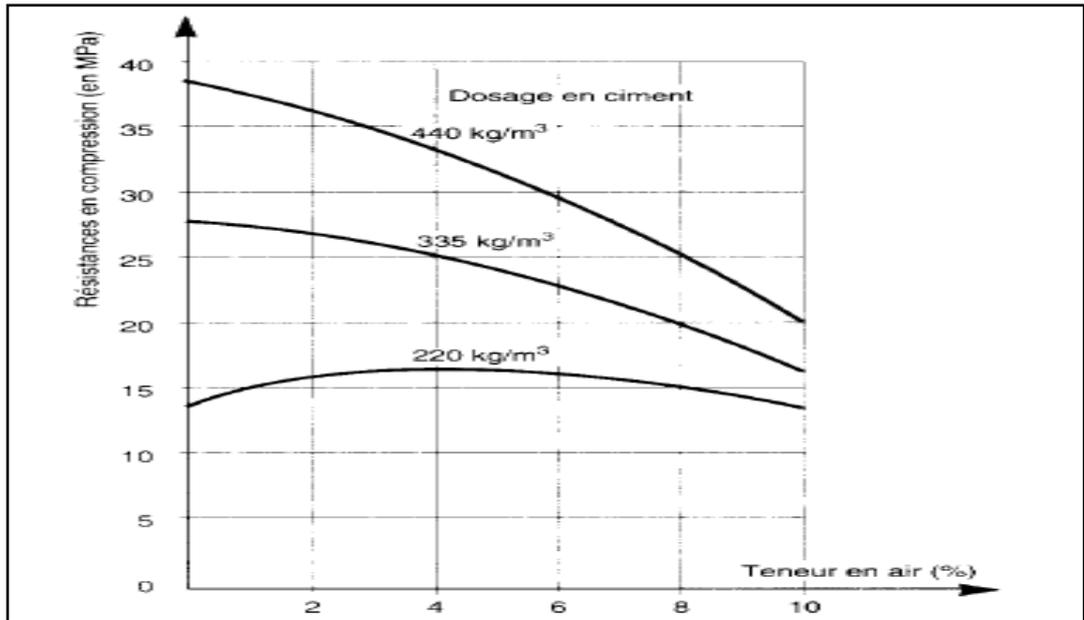
Figure III.4: Schéma explique le rôle d'ajout entraîneur d'air [22]

Les recherches les plus récentes ont montré que le facteur primordial pour la protection contre les effets du gel est le facteur d'espacement entre les microbulles d'air qui est désigné par  $L$  ( $L$  barre). L'expérience montre que lorsque ce facteur d'espacement (qui représente la demi-distance moyenne entre 2 microbulles) est inférieur à une certaine valeur, le béton peut résister sans difficulté à des cycles de gel/dégel. Cette valeur doit être inférieure à 200  $\mu\text{m}$  notamment lorsque le béton risque d'être en contact avec des sels de déverglaçage.

Cette nécessité ne peut être assurée que par le respect de diverses dispositions. La première d'entre elles étant de choisir un entraîneur d'air conforme à la norme. À cela s'ajoute le fait que les quantités d'adjuvants à employer sont fonction d'un grand nombre de facteurs (nature chimique du produit; type de ciment, dosage, module de finesse du sable, dimension maximale « $D$ » des granulats, additions minérales éventuelles, E/C, énergie de malaxage).

Il en résulte qu'une fois choisi l'adjuvant à utiliser et son dosage défini en fonction du pourcentage d'air désiré, des essais préalables puis de contrôle sur chantier doivent être réalisés pour vérifier le pourcentage d'air entraîné et s'assurer que le résultat obtenu correspond à celui recherché. Le dosage effectif pouvant alors être ajusté aisément. Dans la pratique il convient de composer des bétons dont le E/C est limité à une valeur de l'ordre de 0.50 de prévoir un dosage d'adjuvant tel que le pourcentage d'air entraîné soit de 4 à 5 % avec un maximum de 8 % en se rappelant que plus la dimension « $D$ » est grande moins il est nécessaire d'avoir un pourcentage élevé d'air entraîné, le béton contenant alors un pourcentage de pâte moindre. Enfin il est recommandé d'éviter, lors de la mise en place, les durées trop longues de vibration qui diminuent le pourcentage d'air entraîné (deux minutes de vibration en un même point peuvent faire chuter de 6 à 4 % ce pourcentage) et de prévoir une cure efficace immédiatement après mise en œuvre.

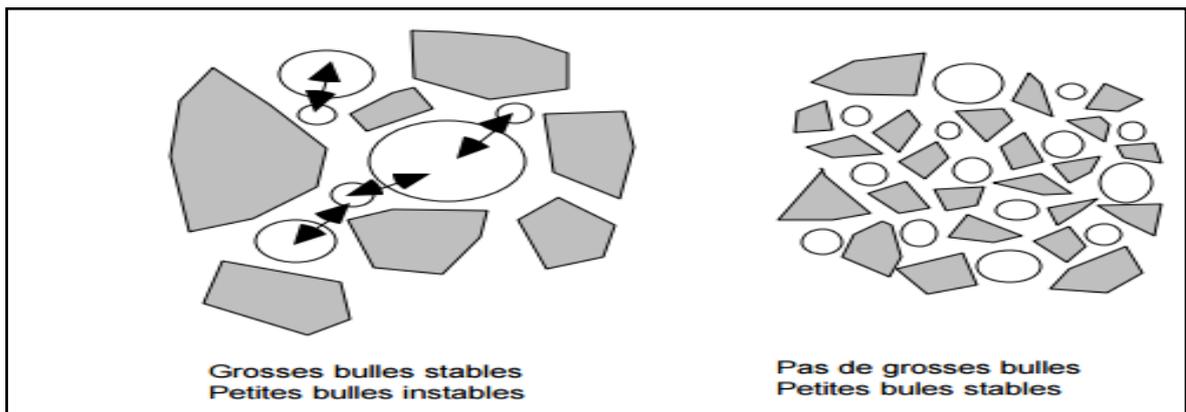
Les entraîneurs d'air autorisent une diminution du dosage en eau à maniabilité équivalente, ce qui permet de réduire légèrement l'E/C et de compenser ainsi une partie de la chute de résistance provoquée par leur emploi. On peut effectivement chiffrer cette chute de résistance entre 4 et 6 % pour chaque 1 % d'augmentation d'air entraîné si aucune correction telle une diminution du E/C n'est apportée, cette baisse de résistance étant d'autant plus importante que la valeur initiale des résistances est plus élevée (figure III.5).



**Figure III.5:** Influence du pourcentage d'air entraîné sur les résistances en compression d'un béton [11]

Les paramètres de formulation du béton qui influencent la production durable de bulles sont très nombreux [11]:

- Ciment: En général, plus le ciment est fin, plus le dosage en AEA doit être augmenté ;
- Eau de gâchage (Dureté, eau recyclée) ;
- Granulats du mélange (Figure III.6) Forme des particules, distribution granulométrique.



**Figure III.6:** Influence de la granulométrie des particules sur le mécanisme d'entraînement d'air [20]

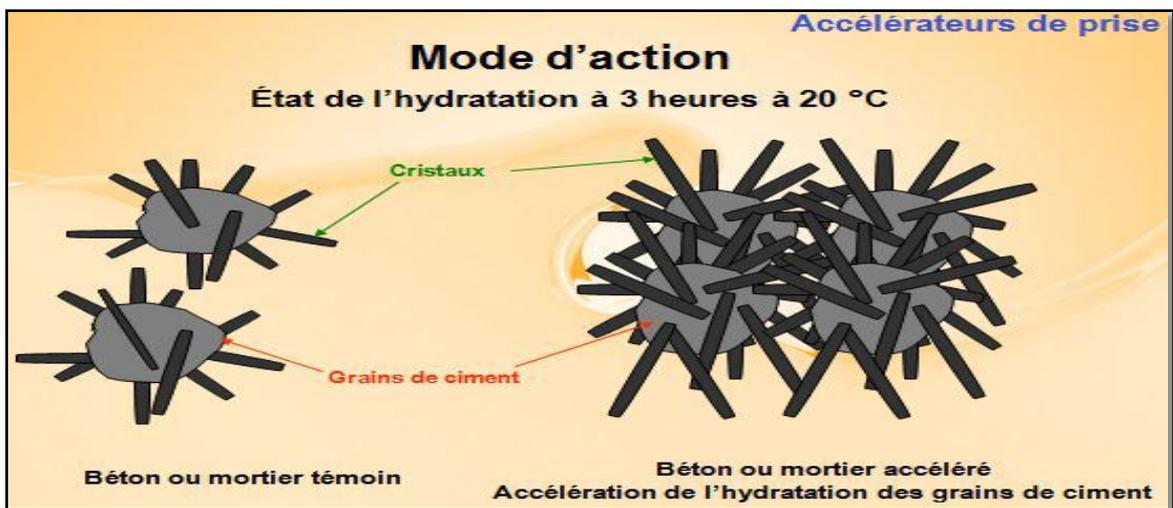
### III.7.1.5 Accélérateur de prise et durcissement

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment: cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents.

On distingue :

- Les accélérateurs de prise : alcalis, carbonates et sulfates de soude ou de potasse, utilisés surtout par temps froid; (figure III.7)



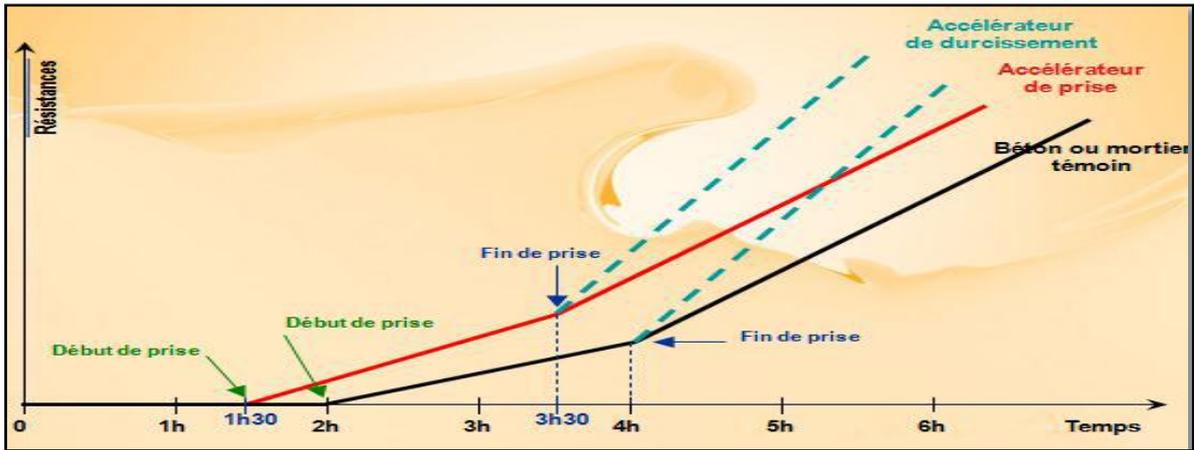
**Figure III.7:** Schéma explique le rôle d'ajout d'accélérateur de prise [22]

- Les accélérateurs de durcissement: chlorures et carbonates, plus généralement employés afin de réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.

En raison des risques de corrosion les produits à base de chlorure sont interdits pour certains travaux:

- Béton précontraint;
- Réservoirs;
- Plancherschauffants, etc.

Il y a lieu de noter que si les résistances initiales sont augmentées, les résistances à 28 jours peuvent être légèrement diminuées.(figure III.7 et III.8) [11].



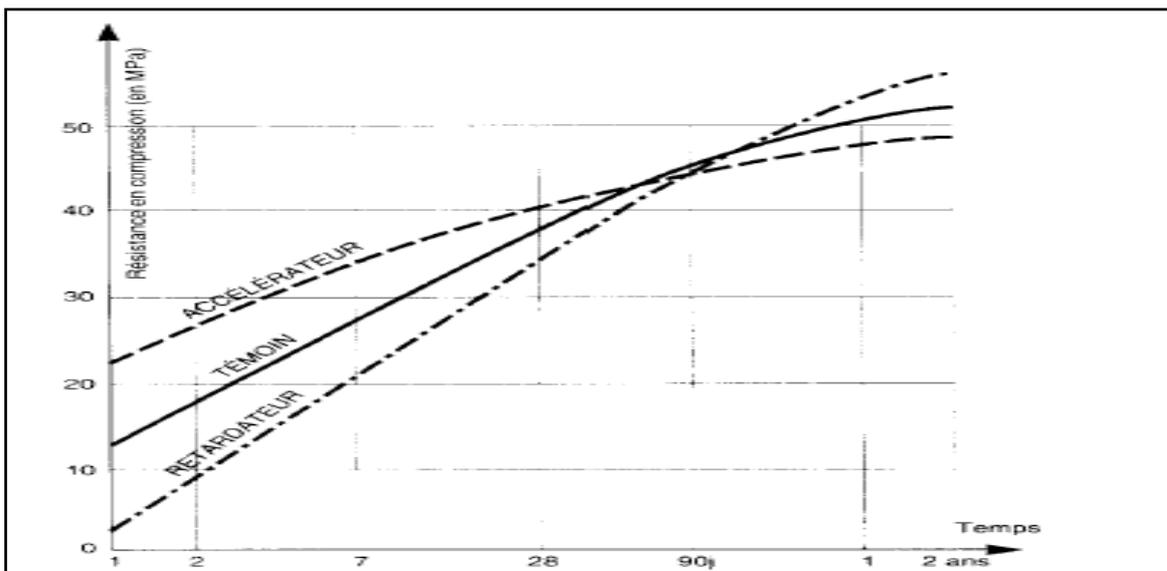
**Figure III.8 :** Schéma de l'influence comparée d'un mortier ou béton avec et sans accélérateur sur l'évolution des résistances [22]

**III.7.1.6 Retardateurs**

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer:

- Les sucres et gluconates, les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins.

Les doses à utiliser sont en général très faibles (de l'ordre de 0,1 % en extrait sec) et les produits commerciaux sont dilués: il convient de veiller à une bonne répartition du produit dans la masse. Les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales (figure III.9 et III.10) [11].



**Figure III.9 :** Schéma de l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [11]

Ces produits sont employés en particulier :

- Pour les bétonnages par temps très chaud;
- Pour les transports de béton sur grande distance;
- Pour des reprises de bétonnage.

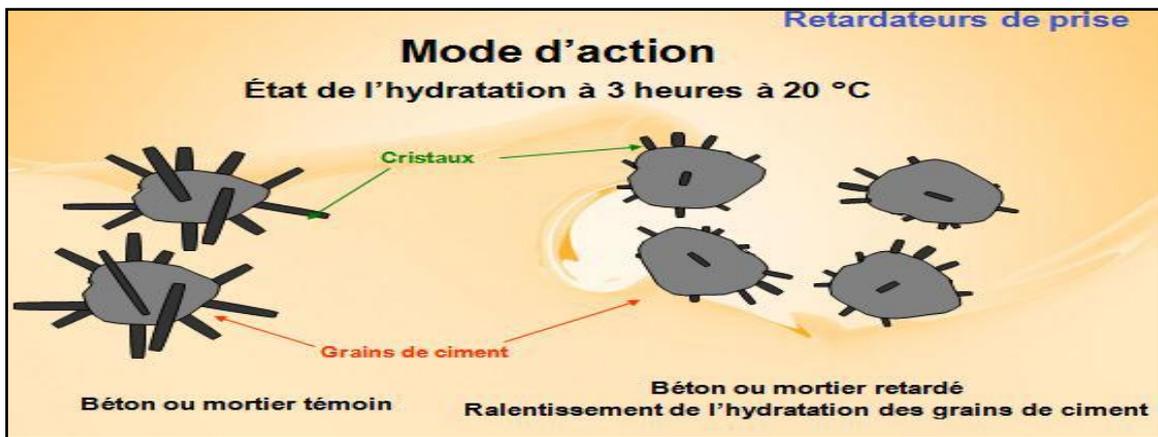


Figure III.10 : Schéma explique le rôle d'ajout d'un retardateur de prise [22]



Figure III.11 : Schéma de l'influence comparée d'un mortier ou béton avec et sans retardateur sur l'évolution des résistances [22]

### III.7.1.7 Hydrofuges

Ce sont des adjuvants qui, introduits dans la masse du béton, ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire.

Il ne faut pas les confondre avec les hydrofuges de surface qui s'appliquent au rouleau sur le béton ou mortier durci et qui sont bien souvent à base de silicone.

Les hydrofuges de masse sont en général à base de stéarates solubles qui, en contact avec la chaux du ciment, forment des cristaux de stéarate de calcium insolubles qui viennent obstruer le réseau capillaire du béton ou mortier.

Ces produits ne sont vraiment efficaces que si le béton ou mortier est bien compact et homogène, et que toutes les précautions sont prises afin d'éviter la formation de fissures.

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que lorsqu'on cherche à obtenir un béton étanche dans la masse, il est bien souvent préférable d'utiliser un gâchage, donc la perméabilité [11].

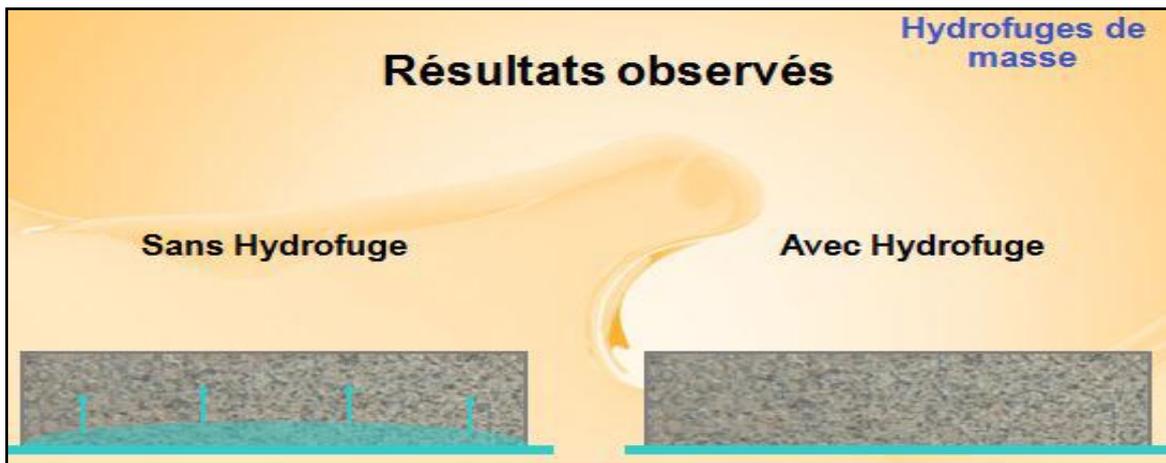


Figure III.12 : Schéma comparée d'un mortier ou béton avec et sans Hydrofuges [22]

### III.7.1.8 Antigels et antigélifs

Il ne faut pas confondre antigels et antigélifs :

**Les premiers:** évitent le gel du béton frais qui stoppe la prise du ciment et qui, du fait du gonflement, réduit la compacité du béton. Quand on veut bétonner par temps froid, on a intérêt à accélérer la prise pour profiter du dégagement de chaleur provoqué par cette réaction et en même temps il convient de réduire le dosage en eau. Dans la pratique on utilise donc un accélérateur avec un plastifiant ou un superplastifiant, ou un produit unique combinant les deux fonctions. L'utilisation d'un antigel ne dispense toutefois pas de l'observation des règles élémentaires de bétonnage par temps froid et notamment de proscrire l'emploi de matériaux gelés.

**Les seconds:** les antigélifs évitent que le béton, une fois durci, ne se désagrège progressivement dans le temps par suite de gels successifs: les entraîneurs d'air sont les meilleurs adjuvants antigélifs mais une bonne compacité et l'homogénéité du béton restent les conditions essentielles de la non-gélivité.

Il existe sur le marché certains produits qui combinent à la fois l'effet antigel (accélération + réduction d'eau) et l'effet antigelif (entraînement d'air) [11].

### III.7.1.9 Produits divers

#### a. Les produits de cure (ou curing-compounds)

Ce ne sont pas à proprement parler des adjuvants; ce sont des produits de couverture que l'on pulvérise sur le béton frais pour empêcher l'évaporation de l'eau de gâchage. Les produits de cure sont soit des émulsions résineuses directes (c'est-à-dire où l'eau est le dispersant) qui se rompent instantanément lorsqu'on les applique sur le béton frais (en raison de la présence de la chaux), soit des solutions de résine dans un solvant pétrolier (white spirit, xylène) qui s'évapore après la pulvérisation.

Il se dépose une pellicule mince de résine qui ne doit pas être absolument incolore pour que la partie déjà couverte soit visible, mais qui ne doit pas être teintée d'une couleur trop sombre pour ne pas absorber les rayons solaires. Il existe un certain nombre de produits dont l'efficacité est variable. Il est essentiel que le produit soit appliqué sans tarder sur le béton frais, un retard d'une heure ou deux pouvant sensiblement en diminuer l'efficacité (surtout par temps chaud et ensoleillé) car celle-ci se manifeste et est nécessaire surtout au début. Ce sont d'ailleurs les débuts de la protection (les sept premiers jours) qui sont les plus importants pour le béton [11].

#### b. Les anti-poussières et durcisseurs de surface

Grâce à des traitements en surface par fluosilicates, silicatisation, silicones, le béton devient plus dur et résistant à l'usure superficielle ainsi qu'aux agents agressifs; mais là encore une bonne compacité et un dosage en ciment suffisant sont des qualités essentielles [11].

### III.7.1.10 Autres types d'adjuvants

#### a. Anti-retrait

Le retrait est dit « plastique » car il se produit dès que le béton commence sa prise. Les mécanismes mis en œuvre sont complexes.

La première responsable est liée à la tension superficielle de l'eau du béton:

- Lorsque l'eau contenue dans les pores du béton de très faible diamètre (2, 5 à 50 nm) commence à s'évacuer, il se forme des ménisques incurvés qui tirent sur les parois de ces pores ;

- En revanche, ces forces deviennent négligeables si le diamètre des pores est supérieur à 50 nm ;
- Des pores encore sont plus petits que 2.5 nm, ils ne laissent pas le ménisque d'eau se former.

Les adjuvants agissent chimiquement en réduisant la tension superficielle de l'eau pour contrer ce mécanisme de départ qui provoque le retrait du béton, ses domaines d'utilisation sont[20]:

- Tabliers de ponts ;
- Cuvelages divers ;
- Sols de parking ;
- Tout type de sol à haute performance où les fissures sont particulièrement indésirables.

#### **b. Inhibiteurs de corrosion**

Dans un béton récent, les armatures d'acier sont protégées de l'oxydation car elles se trouvent dans un milieu basique (pH d'environ 11,5 à 12,5). L'acier ainsi recouvert d'une sorte de couche protectrice est dit « passivé ».

Par la suite, à cause de la porosité interne et de la présence d'humidité, ce pouvoir passivant s'amenuise et la corrosion des aciers commence. La rouille étant expansive, il peut se créer des éclatements localisés aux endroits où les épaisseurs d'enrobage sont trop faibles. Par le passé, ce phénomène de corrosion était aggravé car le manque de connaissance engendrait de grossières erreurs de conception (mauvais dosage de ciment, mauvaise vibration, mauvais enrobage des armatures, etc.).

Dans le béton précontraint, la corrosion peut être plus grande et surtout plus grave que dans le béton armé ordinaire. Les raisons sont les suivantes :

- Le diamètre des armatures utilisées étant plus faible, celles-ci sont soumises à de fortes tensions ;
- La structure et l'état de surface des armatures sont différents (aciers spéciaux).

Le respect de certaines règles essentielles permet d'éviter ou de retarder au maximum la corrosion:

- Recouvrir et enrober suffisamment les armatures d'acier avec le béton (au moins 2 cm) ;
- Utiliser un liant assez fin (meilleure imperméabilité), à faible ressuage, stable, contenant assez peu de sulfates et très peu de chlorures (électrolytes) ;
- Réaliser un béton compact, imperméable, homogène, à faible rapport E/C (mais plastique) ;
- Conserver l'humidité après gâchage et pendant plusieurs jours (meilleure résistance, vitesse de carbonatation moins rapide).

Les adjuvants dits « anti-corrosion » parviennent à maintenir la couche protectrice passivante à la surface des aciers de renfort. Ces produits prolongent la vie des structures et sont très conseillés en zones humides [20].

#### **c. Agents de cohésion**

Ces adjuvants présentent de multiples avantages [20]:

- Facilitation du pompage des bétons (réduction de la pression nécessaire) ;
- Augmentation des possibilités d'espacement des pompes;
- Réduction de la ségrégation des bétons désactivés;
- Réduction des risques de délavage du béton coulé sous l'eau.

#### **d. Produits de cure**

Bien que souvent cités parmi les adjuvants, ces produits ne sont pas incorporés à la masse du béton mais pulvérisés à leur surface. Le film protecteur continu ainsi formé va limiter les risques de fissuration par retrait d'eau rapide (effets du vent et de la chaleur). Ils sont fabriqués par les sociétés qui fournissent les adjuvants traditionnels et sont normalisés.

Leur rôle est particulièrement important dans les conditions extrêmes de vent et de chaleur ambiante [20].

### III.7.2 Les fonctions principales des adjuvants

#### III.7.2.1 «Ouvrabilité»

##### a. Plastifiant

Cet adjuvant est introduit dans l'eau de gâchage. Sa fonction principale, pour une même teneur en eau, est de provoquer une augmentation de l'ouvrabilité du béton, mortier ou coulis, sans en diminuer les résistances mécaniques.

##### b. Fluidifiant

Pour la même ouvrabilité, ce produit permet:

- Une forte réduction de la teneur en eau du béton, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du béton ;
- Une augmentation notable de cette ouvrabilité, pour une même teneur en eau. L'affaissement ou l'étalement est accru de façon significative ;
- Les effets simultanés dus à la réduction d'eau et à l'augmentation de l'ouvrabilité.

Ce produit n'augmente pas de façon appréciable la teneur en air [20].

#### III.7.2.2 «Prise»

##### a. Accélérateur de prise

Ce produit diminue, dans un délai compatible avec la mise en œuvre, le temps de passage de l'état plastique à l'état solide des bétons.

##### b. Accélérateur de durcissement

Ce produit accélère le développement des résistances initiales des bétons. La durée de prise est fréquemment raccourcie à un délai compatible avec la mise en œuvre.

À noter que : le dégagement de chaleur résultant de son emploi facilite le bétonnage par temps froid.

##### c. Antigél

Ce produit abaisse notablement le point de congélation de l'eau des bétons sans agir sur la vitesse de prise et de durcissement. Cet effet est consécutif à sa présence en solution ou en mélange dans l'eau de gâchage.

**d. Retardateur de prise**

Ce produit accroît le temps de passage entre l'état plastique et l'état solide, sans influencer notablement le développement ultérieur des résistances, souvent supérieures aux résistances du témoin au-delà de 28 jours, et même dans un délai plus court.

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une brusque augmentation de la viscosité de la pâte puis son échauffement.

La fin de prise correspond au moment où la pâte devient totalement rigide [20].

**III.7.2.3 «Autres propriétés »****a. Entraîneur d'air**

Ce produit entraîne et stabilise un nombre élevé de bulles d'air petites et séparées, réparties uniformément dans la masse. Il peut améliorer l'ouvrabilité et la cohésion des mélanges frais. Sa fonction est d'augmenter la résistance au gel des bétons durcis. En revanche, la présence de bulles peut entraîner une chute des résistances mécaniques.

**b. Hydrofuge**

Ce produit peut réduire, seules ou ensembles [20]:

- La perméabilité des bétons durcis aux fluides sous pression;
- La capacité d'absorption par capillarité des bétons durcis.

**III.8 Actions des adjuvants****III.8.1 Amélioration des conditions de mise en œuvre-Ouvrabilité**

Les premiers adjuvants ont probablement été utilisés afin d'améliorer le malaxage, la mise en place et la finition du mélange plastique. Cette dernière considération est importante pour l'architecte car elle permet de réduire ou d'éliminer :

- Le ressuage ;
- La segregation ;
- La formation de nids de cailloux ;
- Les défauts superficiels disgracieux pouvant résulter du manque de plasticité du mélange.

La plupart des adjuvants utilisés, qu'ils soient agents entraîneurs d'air, retardateurs de prise ou réducteurs d'eau améliorent l'ouvrabilité. Bien que cette amélioration soit

considérée comme un effet secondaire, c'est souvent la principale raison pour laquelle on recourt aux adjuvants [20].

### III.8.2 Amélioration des performances mécaniques

La résistance des bétons a longtemps été limitée car on ne peut augmenter indéfiniment les dosages de ciment sans prendre d'autres risques. Avec l'aide des adjuvants, la teneur en eau des bétons peut baisser considérablement tout en hydratant mieux le ciment disponible. Le résultat est une augmentation des résistances finales [20].

### III.8.3 Amélioration de la durabilité

Bien qu'étant un matériau dont la robustesse est unanimement reconnue, la surface de contact du béton avec le milieu extérieur nécessite une grande attention si on veut lui conserver un rôle esthétique. Cette surface est susceptible de se dégrader sous l'influence de certains facteurs:

- Le manque de compacité;
- La perméabilité;
- Les facteurs climatiques;
- Les agressions chimiques;
- La survenue possible de fissures.

Les adjuvants servent à limiter grandement ces risques, notamment avec les effets suivants [20]:

- Augmentation de la compacité des bétons;
- Protection des armatures par un meilleur enrobage (à l'exemple de la faible perméabilité des BHP et leur liaison par-faite aux armatures);
- « Cure » des bétons amenant une limitation des pertes d'eau trop rapides par la surface.

Les propriétés et les actions pour chaque adjuvant précédemment classée.

**a. Superplastifiants – Hauts réducteurs d'eau****• Améliorer la plasticité**

Le procédé consiste à fluidifier le mélange de béton par dispersion rapide des particules de ciment, qui ont normalement tendance à rester agglomérées au seul contact de l'eau. Cet effet dispersant est obtenu grâce à la répulsion électrostatique créée par la présence de molécules « plastifiantes » de signes identiques venant se coller à la surface des grains de ciment.

Les forces ainsi créées étant supérieures aux forces d'attraction des grains de ciment entre eux, la fluidification se produit sous l'influence du malaxage du béton. L'hydratation du ciment est en conséquence beaucoup plus poussée (rendement cimentaire de 80 % au lieu de 60 % pour un béton classique), ce qui explique le gain de résistance.

**• Réduire les excès d'eau**

La maniabilité du béton conditionne la réussite de sa mise en œuvre et donc sa compacité. Cette compacité est étroitement liée à la composition du béton mais surtout à sa teneur en eau.

Un béton fluide s'obtient généralement en ajoutant une quantité d'eau nettement supérieure à celle nécessaire à l'hydratation du ciment. Cet excès d'eau est indésirable car les vides remplis d'eau du mélange initial se transforment en espaces libres dès que l'eau superflue s'évapore et que le béton durcit. Le matériau béton devient vulnérable aux différentes agressions chimiques, et ces inconvénients s'ajoutent aux caractéristiques mécaniques nettement amoindries.

La recherche sur la qualité et la durabilité du béton passe donc toujours par l'amélioration de la maniabilité et par la diminution de la teneur en eau. Même dans les conditions les plus favorables, le système de vides reste considérable et les dégradations consécutives à cet excès sont nombreuses [20]:

- Retrait, gonflement, création de réseaux capillaires lors de la prise ;
- Diminution des performances mécaniques ;
- Plus grande sensibilité au gel à cause de la porosité ;
- Accroissement des risques de certaines dégradations chimiques (carbonatations, corrosions) ;

- Encrassement rapide des surfaces par les diverses moisissures à la recherche de porosités.

#### **b. Retardateurs de prise**

- **Ralentir la cristallisation**

Le procédé consiste à ralentir la croissance des cristaux qui se forment lorsque le ciment commence à prendre. Un faible dosage de molécules est incorporé afin de ralentir la diffusion des ions calcium à l'intérieur du mélange. En formant une enveloppe imperméable autour des grains de ciment, la formation des cristaux, et donc la prise, est beaucoup plus lente à se produire. Une trop forte dose peut bloquer définitivement la prise. L'efficacité dépend du [20]:

- Type de ciment ;
- La teneur en eau ;
- La température extérieure.

#### **c. Accélérateurs de prise :**

- **Favoriser la cristallisation**

Ce procédé, inverse du précédent, consiste à favoriser la diffusion des ions calcium en augmentant sensiblement la concentration sous forme de sels (généralement des chlorures ou nitrates).

La cristallisation ainsi provoquée favorise [20]:

- L'accélération du durcissement du mélange ;
- La dissolution des éléments actifs (chaux, alumine...) ;
- L'hydratation de silicates.

#### **d. Les entraîneurs d'air**

- **Augmenter la plasticité du béton**

Pour limiter les dégâts dus aux cycles hivernaux de gel/dégel, on réalise un réseau régulier de fines bulles d'air qui augmentent la plasticité du béton. Ainsi, lorsque le béton est durci, le réseau forme un grand nombre de petits « vases d'expansion ». L'eau les pénètre juste avant de geler au moment de sa dilatation. Certains additifs tensioactifs, dont la particularité est de posséder une extrémité ayant une affinité avec l'air et l'autre avec

l'eau, vont stabiliser le réseau dense de très fines bulles en leur évitant de se regrouper (on dit « en évitant la coalescence de ces bulles »).

En revanche, le seul emploi d'air entraîné dans le béton ne garantit pas la résistance aux dommages dus au gel. Une résistance élevée aux conditions hivernales peut s'acquérir avec un béton dense, bien compacté, et dont le rapport eau/ ciment est faible.

La quantité d'air entraîné dépend des caractéristiques suivantes [20]:

- Dosage de l'adjuvant;
- Quantité des éléments fins;
- Plasticité du béton;
- Vitesse et durée du malaxage;
- Vibration lors de la mise en place.

**e. Hydrofuges:**

- **Réduire la capillarité du béton**

Le procédé consiste à réduire la capillarité des bétons avec des produits qui agissent [20]:

- Soit physiquement, en bouchant les capillaires grâce à leurs particules hydrophobes à surfaces spécifiques élevées.
- Soit en créant des précipités insolubles par réaction avec la chaux. Ces cristaux légèrement expansifs bouchent les capillaires.

## **III.9 Domaines d'utilisation**

### **III.9.1 Plastifiants**

Les plastifiants sont utilisés dans les cas suivants [20] :

- Béton pour dallages (béton pompé, etc.);
- Béton maigre (blocs manufacturés);
- Béton routier;
- Béton coulé sous l'eau pour diminuer le délavage ;
- Béton trèsferraillé;
- Sables manquant de fines ;
- Injection (coulis et mortiers).

### III.9.2 Superplastifiants

Ils sont préconisés dans le cas de [20]:

- Bétons à compacité, et donc durabilité, élevée (pour les ouvrages d'art par exemple);
- Bétons à haute performance (BHP);
- Bétons autoplaçants et autonivelants (tels ceux pour chape fluide) ;
- Bétons destinés à la préfabrication lorsque l'on veut augmenter leur résistance à court terme en réduisant le dosage de l'eau. Cette méthode permet aussi de réduire les cycles d'étuvage sans avoir recours aux accélérateurs de prise;
- Béton avec recherche d'un parfait enrobage des armatures.

### III.9.3 Retardateurs de prise

Les retardateurs de prise sont utilisés pour [20]:

- Les bétons mis en place sur de fortes épaisseurs (ouvrages d'art, barrages...);
- La diminution de la chaleur d'hydratation ainsi dégagée réduit les risques de fissures qui en découleraient;
- Tout bétonnage par temps chaud ;
- Transports de béton sur de longues distances ;
- Tétonsinjectésencontinu;
- Parois moulées dans le sol ;
- Reprises de bétonnage (pour coulages effectués par tranches décalées de plusieurs heures) ;
- Mortiers stabilisés utilisables plusieurs jours sur chantier ;
- Graves ciment que l'on veut garder maniabiles plusieurs heures.

L'effet secondaire est l'amélioration des résistances mécaniques à long terme car l'hydratation des grains de ciment est meilleure.

### III.9.4 Accélérateurs de prise

Les accélérateurs de prise trouvent leur utilisation dans [20]:

- Décoffrage rapide (réduction du temps de prise) ;
- Bétonnage par temps froid ;

- Mise du béton hors gel ;
- En préfabrication : augmentation de la rotation des coffrages ;
- Travaux d'étanchement, travaux à la mer (entre deux marées) ;
- Réparations rapides, remise en circulation rapide des routes ou des pistes d'aéroports ;
- Scellements.

### III.9.5 Entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air sont utilisés pour [20]:

- Les routes ;
- Les barrages ;
- Les ponts ;
- Les travaux maritimes ;
- Les travaux en montagne ;
- Les ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.

### III.9.6 Hydrofuges

Les hydrofuges sont utilisés pour [20] :

- Les mortiers pour enduits ;
- Les chapes étanches pour cuvelage ;
- Les citernes ;
- Les réservoirs ;
- Les piscines ;
- Les fosses ;
- Les tuyaux ;
- Les galeries ;
- Les tunnels ;
- Les travaux souterrains ;
- Tout béton destiné à l'assainissement et restant en contact prolongé avec l'eau (surtout s'il est sous pression) ;
- Les bétons apparents décoratifs lorsque l'on veut éviter les risques d'efflorescences.

### III.10 Dosage des adjuvants

#### III.10.1 Doses d'emploi

Les doses d'utilisation sont très diverses selon la fiche technique de chaque produit. Les indications générales sont [25]:

- Plastifiants: 0,2 à 0,5 % du poids de ciment au m<sup>3</sup> de béton ;
- Superplastifiants : 0,5 à 3 % ;
- Accélérateurs : 0,5 à 3 % ;
- Retardateurs : 0,15 à 2 % ;
- Hydrofuges : 0,2 à 2 % ;
- Entraîneurs d'air: 0,02 à 0,2 %.

#### III.10.2 Méthodes d'introduction

Les nombreux systèmes de doseurs mis à la disposition des utilisateurs d'adjuvants permettent une utilisation rationnelle et fiable des produits. Les doseurs récents font largement appel à l'électronique.

On distingue deux types principaux: les doseurs électroniques à débitmètres et les bascules à adjuvants.

##### a. Doseurs électroniques à débitmètres

Ce sont des doseurs volumétriques où une pompe centrifuge est associée à un compteur volumétrique. Un débitmètre, situé en aval de la pompe, décompte à chaque tour une certaine quantité de produit.

Cette gamme de doseurs peut être mono ou multiproduits. Sa précision est d'environ 1 à 2 % et fonction du choix du débitmètre. La dose minimale de produit est généralement de 50 ml dans les doseurs standard. Toutefois, pour des applications spécifiques, il existe des doseurs atteignant une précision de 5 ml.

##### b. Bascules à adjuvants

C'est un système pondéral qui fait partie intégrante de la centrale à béton. Il peut être intégré au calculateur gérant les composants du béton. Un réservoir est suspendu à une jauge de contrainte fonctionnant par traction ou par compression. La vidange du produit est

commandée par une vanne électropneumatique. La précision de cette bascule est d'environ 20 g.

Ces systèmes de dosage comportent de nombreuses sécurités permettant d'alerter l'utilisateur en temps voulu en cas de fonctionnement défectueux.

### c. Précautions d'emploi

Il est indispensable, lors de l'utilisation d'un adjuvant, de s'assurer que [25]:

- L'efficacité, ou la fonction annoncée, est bien confirmée par des essais ;
- Les caractéristiques de l'adjuvant ne sont pas trop pointues, afin d'essayer d'anticiper les risques encourus sur le chantier par tout écart de dosage ou de qualité des matériaux ;
- Les effets secondaires sont acceptables ;
- Les dosages requis sont compatibles avec la précision du matériel de dosage fourni.

La compatibilité ciment-adjuvant est bonne, ce qui dépend de plusieurs paramètres, tels:

- La teneur en C3A ;
- La finesse de mouture ;
- Le degré de sulfatation pour le ciment ;
- Pour les adjuvants : la longueur de chaîne du polymère, la teneur en sulfate résiduel, etc.

Les fabricants d'adjuvants disposent désormais de techniques de laboratoire, telles la méthode MBE (mortier de béton équivalent). Elles peuvent faire économiser beaucoup de temps lors de la mise au point des formules de béton avec adjuvant.

Des formules variées sont rapidement testées sur de très petites quantités de matière afin de suivre l'évolution rhéologique et thermique, qui est ensuite transposée fidèlement à la formulation de béton définitive.

### III.10.3 Effets secondaires défavorables

Les adjuvants peuvent avoir certains effets secondaires indésirables.

#### a. Sur le retrait

Durant le durcissement du béton (particulièrement lors de l'emploi des fluidifiants, des entraîneurs d'air, des accélérateurs et des hydrofuges). Tels les effets exercés par le

rapport eau/ciment sur le retrait, les adjuvants qui augmentent les besoins en eau du ciment augmentent le retrait, et ceux qui en diminuent les besoins diminuent le retrait :

- Dans le dosage le plus utilisé en tant qu'accélérateur (2 % en poids de la quantité de ciment) ;
- Le chlorure de calcium peut augmenter le retrait dû au séchage jusqu'à 50 % ;
- L'effet d'ensemble produit par l'emploi de béton à air occlus n'est pas une augmentation du retrait ;
- Utiliser dans des proportions plus fortes qu'initialement prévu, certains adjuvants peuvent augmenter considérablement le retrait.

Une grande attention doit donc être apportée aux proportions utilisées.

#### **b. Sur les résistances**

En perturbant le développement normal de la résistance finale du béton. Ceci concerne particulièrement les entraîneurs d'air, les hydrofuges et les accélérateurs.

#### **c. Sur l'effet de prise**

Il peut être inverse à l'effet voulu sur la prise selon la quantité ajoutée (particulièrement lors de l'emploi d'entraîneurs d'air et d'hydrofuges).

#### **d. Sur la résistance chimique**

- Résistance amoindrie aux eaux et aux sols ayant une agressivité chimique ;
- Risque de corrosion des armatures augmenté (cas où l'adjuvant contient des chlorures...)
- Les problèmes survenant lors de l'utilisation d'un adjuvant peuvent provenir de l'incompatibilité du ciment et de l'adjuvant, ou d'une erreur de dosage [25].

### III.11 Précautions à prendre

#### a. Essais de convenance

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et des divers composants de celui-ci, en particulier du ciment. Les mécanismes d'interaction adjuvants/ciments ne sont en effet pas tous entièrement élucidés.

Il est indispensable lors de l'utilisation d'un adjuvant de s'assurer par des essais préalables, que l'efficacité annoncée est bien confirmée et de vérifier l'étendue des effets secondaires, c'est pourquoi il convient de réaliser avant le début des travaux des essais de convenance de l'adjuvant avec :

- Les matériaux du chantier (ciment et granulats) ;
- Les conditions réelles de mise en œuvre (température. pompage. transport. etc.).

#### b. Interaction adjuvant-adjuvant

L'utilisateur peut être amené à employer dans une même gâchée plusieurs adjuvants ayant des fonctions différentes. La finalité essentielle de cette pratique est d'obtenir les effets conjoints des produits soit en corrigeant certains effets secondaires non recherchés. Soit en amplifiant l'une des fonctions principales (synergie).

Certains adjuvants sont incompatibles entre eux ou avec des adjuvants de marques différentes, aussi l'utilisation simultanée de deux adjuvants ne doit-elle être envisagée qu'après avoir préalablement consulté le fabricant pour :

- Le choix des produits ;
- Les dosages ;
- Le mode d'introduction.

#### c. Dosage

Il existe plusieurs systèmes de dosage automatique qui permettent une utilisation rationnelle et fiable des produits. Certains peuvent être intégrés à l'automatisme des centrales à béton et être pilotés par l'ordinateur qui gère les composants du béton.

Les deux types principaux sont :

- Les doseurs volumétriques, composés d'une pompe centrifuge associée à un débitmètre (compteur volumétrique) ayant en général une précision de 50 ou 100 ml. Toutefois pour les applications très spéciales (entraîneurs d'air) il existe des doseurs volumétriques ayant une précision de 5 ml ;
- Les doseurs pondéraux, constitués d'une bascule dont la vidange est commandée par une vanne électropneumatique. La précision de ces balances est en général de 20 à 50 g.

Les normes précisent, concernant les dosages d'adjuvants dans les bétons, que la quantité totale, en cas d'ajout, doit être supérieure à 2 g/kg et inférieure à 50 g/kg dans le mélange par rapport au poids du ciment. En plus faible quantité il est nécessaire de disperser l'adjuvant au préalable dans une certaine proportion d'eau de gâchage.

Lorsqu'ils sont introduits sous forme liquide avec des quantités dépassant 3 litres par m<sup>3</sup> de béton, ils doivent être pris en considération dans le calcul du WC [25].

### III.12 Modalités de l'utilisation des adjuvants

L'emploi des adjuvants dépendent du type d'adjuvants.

#### a. Plastifiants Réducteurs d'eau

Les produits sont introduits dans l'eau de gâchage. Le dosage indicatif est de 0,15 à 0,4% selon le but recherché. 0,6 à 1,2% pour les «multi-dosages» selon les effets secondaires. Comme effets secondaires nous pouvons noter que pour un dosage dose supérieur à 0,4% du ciment entrainera un retard et/ou air entraîné.

#### b. Superplastifiant Haut réducteurs d'eau

Produits introduits soit dans l'eau de gâchage, soit en cours de malaxage. Le dosage indicatif varie de 0,6 à 5 % selon le but recherché.

#### c. Accélérateurs de prise

Produit introduit dans l'eau de gâchage. Le dosage indicatif est de 1 à 3 % du poids du ciment. Il y a possibilité de l'employer sur site après transport moyennant une homogénéisation soignée du béton.

**d. Accélérateurs de durcissement**

Produit introduit dans l'eau de gâchage. Le dosage indicatif est de 0,8 à 2 % du poids du ciment.

**e. Retardateurs de prise**

Produit introduit dans l'eau de gâchage. Le dosage indicatif : de 0,2 à 0,5% du poids du ciment.

**f. Hydrofuges de masse**

Produit introduit dans l'eau de gâchage. Le dosage indicatif : de 0,5 à 2 % du poids du ciment.

**g. Entraîneursd'air**

Produit introduit dans l'eau de gâchage mais il y a possibilité de le verser sur le sable humide à l'entrée du malaxeur. Le dosage indicatif : de 0,05 à 0,2 % du poids du ciment. Pour les bétons devant résister aux cycles de gel et de dégel, la teneur en air entraîné doit se situer entre 4 et 6 %. Du poids du ciment. Leur utilisation doit être contrôlée régulièrement à l'aide d'un aéromètre et l'espacement entre les bulles doit être régulier et faible.

Ces informations sont fournissent à titre indicatif par la Synad, il faudra cependant respecter les dosages indiqués sur les fiches techniques des produits utilisés ainsi que les paramètres de formulation [26].

**III.13 La normalisation des adjuvants**

Prescriptions générales de la Nouvelle Norme NF EN 934-2recense 11 caractéristiques générales pour chaque adjuvant:

**a. L'homogénéité**

Elle est évaluée par un examen visuel. Une ségrégation de l'adjuvant peut être tolérée. Les limites fixées par le fabricant doivent être respectées.

**b. La couleur**

Elle est évaluée par un examen visuel, elle doit être uniforme et similaire à la description fournie par le fabricant.

**c. Le composant actif**

Il est analysé par infrarouge selon la norme NF EN 480-6 ; le spectre du composant actif doit être reconnaissable.

**d. La densité relative**

Elle est mesurée selon la norme ISO 758 et doit être encadrée dans une moyenne définie.

**e. L'extrait sec conventionnel**

C'est le taux de matières sèches compris dans l'adjuvant. Mesuré selon EN 480-8.

**f. La valeur du pH**

Il détermine le caractère acide ou basique à  $\pm 1$  près de l'adjuvant. Il est mesuré selon la norme ISO 4316.

**g. L'effet sur le temps de prise au dosage maximal recommandé.****h. Les résultats doivent être indiqués dans le rapport selon EN 934-2.****i. La teneur en chlore total :**

Mesurée selon ISO 1158, elle doit être  $\leq 0,1\%$  en masse, ou à la valeur indiquée par le fabricant.

**j. La teneur en chlorures solubles :**

Mesurée selon EN 480-10, elle doit être  $\leq 0,1\%$  en masse, ou à la valeur indiquée par le fabricant.

**k. La teneur en alcalins :**

Exprimée en  $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent, elle est mesurée selon la norme NF EN 480-12.

**l. Le comportement à la corrosion :**

Un adjuvant ne doit pas favoriser la corrosion de l'acier enrobé dans le béton [27].

### **III.14 Nouveaux types de béton rendus possibles grâce aux adjuvants**

#### **III.14.1 Bétons autoplaçants**

Ce sont des bétons très fluides, homogènes et stables qui peuvent être mis en place dans les moules et coffrages sans l'utilisation de vibration, ces nouveaux bétons n'ont pu voir le jour que grâce à l'existence de superplastifiants de nouvelle génération; produits qui augmentent beaucoup la maniabilité des bétons sans risque de ségrégation des éléments

Ceci engendre un grand nombre d'avantages aussi bien pour la rapidité de mise en place que pour la suppression de nombreux défauts de surface. Tous les intervenants y trouvent leur compte.

Très rapidement, ils ont été adoptés en usine de préfabrication, car ils permettent la suppression des nuisances sonores.

Sur chantier, ils permettent de confectionner des bétons auto-nivelant pour les dallages; et dans l'avenir ils seront de plus en plus utilisés par injection dans les coffrages verticaux [27].

#### **III.14.2 Bétons à haute performance**

Ce sont des bétons qui ont vu le jour dans les années 1980 pour les ouvrages d'art et certaines structures exceptionnelles ; le principe est d'exploiter les dernières innovations techniques : fumées de silice, et nouveaux superplastifiants ; ceci de façon à réduire la teneur en eau tout en hydratant mieux les particules de ciment.

La fluidité de départ permet une bonne mise en place même en présence d'une forte densité de ferrailage. De plus, le béton peut être facilement pompé, sans nuire, par la suite à une montée en résistance rapide : en finale on arrive de 60 à 100 MPa.

La compacité du béton est améliorée de façon spectaculaire avec ce principe. Ce type de béton est mis en œuvre sur les ouvrages les plus connus : Pont de l'Île de Ré, Grande Arche de la Défense, Pont de Joigny, Pont de Normandie, viaducs TGV, etc.... Dans le futur, les experts pensent que ce type de matériau permettra d'alléger les structures, ce qui engendrera une réduction des coûts de construction pouvant aller jusqu'à 20% de moins [27].

### III.15 Un béton amélioré par des adjuvants est-il recyclable?

Après démolition, un béton amélioré par des adjuvants procure des granulats qui peuvent se recycler sans préjudice notable pour l'environnement.

En utilisant des granulats provenant d'un béton de démolition se posent deux questions écologique et technique:

**La première:** En recyclant des granulats provenant d'un béton de démolition ayant été préalablement amélioré par des adjuvants, faut-il compter avec un préjudice pour l'environnement ?

**La deuxième :** en cas de recyclage répétés, faut-il compter avec une accumulation des résidus d'adjuvants ?

Les granulats provenant d'un béton de démolition sont à l'évidence des composants écologiques qui contribuent à ménager nos ressources naturelles et nos paysages.

Même dans des conditions extrêmement défavorables telles qu'un stockage sur des aires non étanchées ou une utilisation dans la construction routière sous une forme non liée, il n'y a pas de préjudice notable pour l'environnement.

Comme mesure de précaution, il est toutefois judicieux d'éviter des conditions extrêmement défavorables. Outre des adjuvants, la démolition d'ouvrages en béton peut libérer une multitude d'autres produits inconnus. Cette constatation a amené différents cantons à édicter des directives en matière de recyclage du béton de démolition.

En recyclant les granulats provenant d'un béton de démolition pour confectionner un nouveau béton, on additionne souvent d'autres adjuvants à celui-ci. Dans le recyclage multiple, la teneur cumulée en adjuvant augmente. Même en utilisant une proportion très élevée de granulats provenant d'un béton de démolition (70 %), la quantité d'adjuvants est au maximum deux fois plus élevée que celle d'un béton de référence (sans adjuvant).

Le béton de démolition qui correspond aux critères de l'ordonnance sur le traitement des déchets (OTD) pour des matières inertes peut se recycler sans restriction dans le cadre d'un recyclage des matériaux [28].

### III.16 Conclusion

En plus des trois composants de base, les adjuvants sont devenus le quatrième composant du béton: le ciment Portland, l'eau et les granulats. Pour les producteurs et utilisateurs de béton, la liste complète des avantages est impressionnante. Cependant, ces avantages dépendent d'une utilisation appropriée, de la compréhension des effets secondaires et d'autres risques. Les additifs ne peuvent pas compenser des matériaux de mauvaise qualité ou un travail mal exécuté.

Aujourd'hui, des normes spécifiques réglementent l'utilisation et le rôle de ces agents, qui font désormais partie intégrante de technologies et de pratiques spécifiques.

# Chapitre IV

## Les superplastifiants

## IV.1 Introduction

Les superplastifiants sont des polymères solubles dans l'eau, lesquels possèdent de nombreuses applications dans l'industrie de la construction. Ces matériaux sont également appelés réducteurs d'eau de haut rang. Ils font partie des adjuvants pour béton, lesquels sont définis, selon la norme EN 934-2, comme des matériaux qui sont ajoutés au béton pendant le processus de malaxage, dans des quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, afin de modifier ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

Il existe différents types de superplastifiant communément utilisés dans les matériaux de construction. Ils se différencient principalement par la nature des groupements anioniques portés par le polymère et par la façon dont ils engendrent une force répulsive entre les grains de ciment. Toutefois, quelle que soit leur nature, les superplastifiants apportent sans conteste des améliorations technologiques aux bétons qui les incorporent dans leur formulation.

Dans ce qui suit, les superplastifiants sont tout d'abord présentés selon leurs caractéristiques structurales liées à leurs différents protocoles de synthèse. Ensuite, les modes d'action selon lesquels ces adjuvants fluidifient une pâte de ciment et les effets rhéologiques qui en découlent sont décrits. Pour finir, les applications des superplastifiants dans la fabrication du béton sont abordées [30].

## IV.2 Les superplastifiants « haut réducteurs d'eau »

Un adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau jusqu'à 30% d'un béton donné, en augmente considérablement l'affaissement ou l'étalement. Le résultat de leur ajout est une maniabilité et ouvrabilité du béton par défloculation des grains de ciment, leur avantage principal est la réduction de la quantité d'eau pour le malaxage et la mise en place du béton et de lui conférer un meilleur comportement mécanique. On ne pourrait obtenir les mêmes effets avec les plastifiants réducteurs d'eau même en augmentant considérablement ces dosages en raison des effets secondaires : retard de prise, excès d'air occlus [30].

## IV.3 Classification des superplastifiants

Les superplastifiants sont classés en quatre groupes, par deux catégories selon la nature du groupement anionique. La première est composée des polymères contenant des

fonctions sulfonates ( $-\text{SO}_3^-$ ) et la deuxième des polymères munis de fonctions carboxylate ( $-\text{COO}^-$ ) [30].

### IV.3.1 Superplastifiant à base de sulfonates

#### IV.3.1.1 Lignosulfonate modifiés (LSM)

Les lignosulfonates modifiés forment le groupe des premiers superplastifiants utilisés. Ils sont obtenus à partir de la liqueur du procédé de réduction du bois en pâte à papier. Cette liqueur contient de la lignine, polymère naturel constitutif de la couche de soutien du bois.

La lignine subit une dégradation thermique et une sulfonation, elle se transforme ainsi en polyélectrolytes solubles dans l'eau : les lignosulfonates modifiés.

Les LSM permettent une réduction de la teneur en eau dans les mortiers et bétons de 5 à 15% en moyenne et de 20% au maximum. Cependant, des effets secondaires néfastes sont occasionnés lors de leur utilisation. Ils ont tendance à entraîner de grandes quantités d'air. Ils entraînent également un fort retard de l'hydratation lorsqu'ils sont utilisés à un haut dosage. Cet effet retardateur est causé par les résidus de sucres et d'acides organiques et doit être compensé par l'emploi d'un adjuvant accélérateur [30].

#### IV.3.1.2 Polynaphtalènes sulfonates (PNS)

Les superplastifiants de type polynaphtalènes sulfonates (PNS) ont été développés à la fin des années 1960 par la société Kao Soap au Japon après la découverte des propriétés dispersantes exceptionnelles de ces molécules.

Les PNS sont des polymères organiques, linéaires et anioniques avec des groupements sulfonates ( $-\text{SO}_3^-$ ) à intervalle régulier. Leur structure chimique est représentée dans la figure IV.1. Ils sont formés par condensation entre le formaldéhyde et l'acide naphthalènesulfonique.

Une molécule de PNS comporte des régions hydrophiles, les groupements sulfonates, et des parties hydrophobes, les anneaux benzéniques du naphthalène.

Deux types de PNS sont différenciés selon la position du groupement sulfonates : le PNS  $\alpha$  et le PNS  $\beta$ . La forme  $\beta$ , thermo-dynamiquement plus stable que la forme  $\alpha$ , est essentielle pour la fluidification, car la forme  $\alpha$  n'a quasiment aucun pouvoir dispersant.

Les PNS permettent une réduction de la teneur en eau pouvant atteindre environ 40%. Cette importante réduction, par rapport aux superplastifiants de type lignosulfonates,

est due au fait que les PNS peuvent être introduits dans une plus grande proportion dans les formulations du béton, sans retarder particulièrement l'hydratation du ciment.

Leur procédé de fabrication mieux contrôlé est à l'origine de la diminution des polluants retardateurs dans ces matériaux, tels que les sucres et les acides organiques [30].

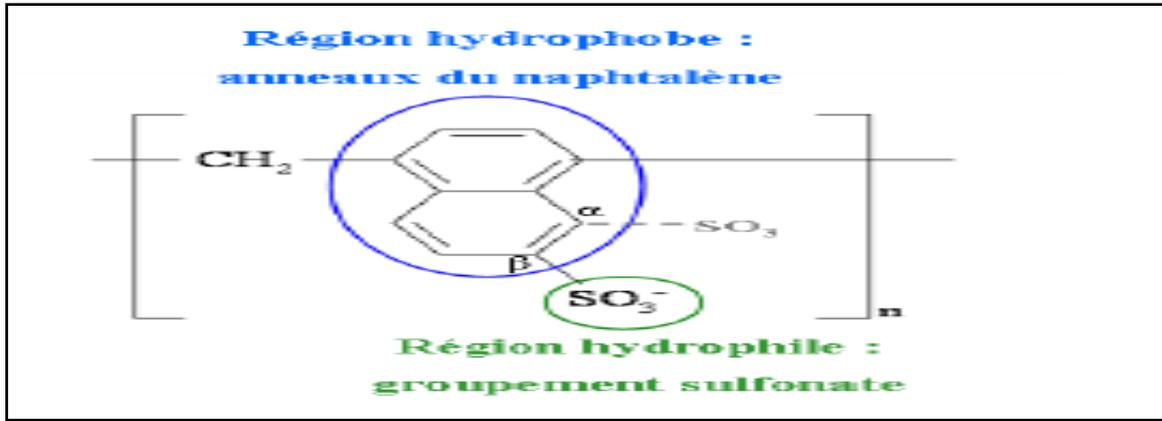


Figure IV.1: Structure chimique des polynaphtalènesulfonates  $\alpha$  et  $\beta$  [30]

#### IV.3.1.3 Polyméline sulfonates

Les superplastifiants de type polymélinesulfonates (PMS) ont été développés au cours des années 1960, simultanément aux PNS, par la société SKW Trotsberg en Allemagne pour leurs applications dans la fluidification des bétons.

Les PMS sont des polymères organiques avec des groupements polaires sulfonates ( $-\text{SO}_3^-$ ), leur structure chimique est représentée à la figure IV.2. Ils sont formés par condensation entre le formaldéhyde et l'acide méline sulfonique [30].

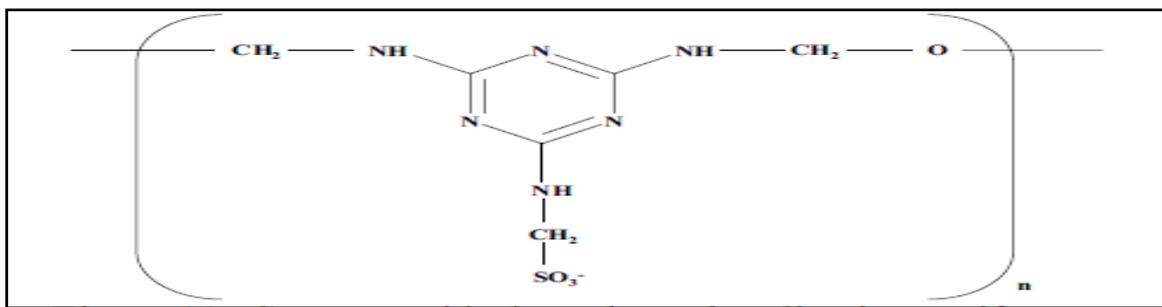


Figure IV.2: Structure chimique des polymélines sulfonates [30]

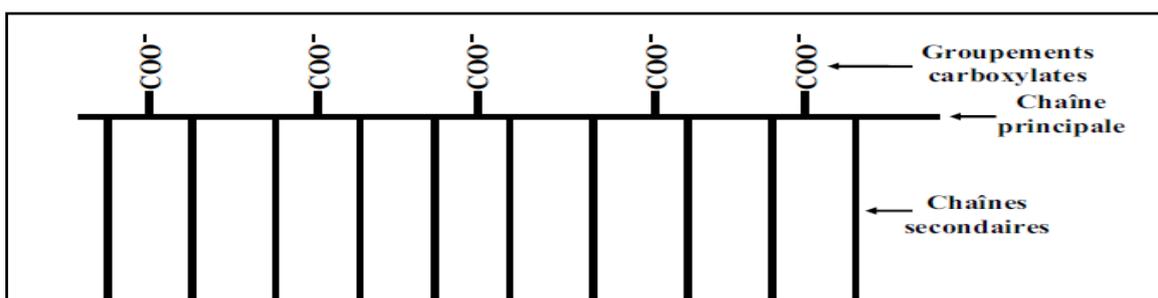
#### IV.3.2 Superplastifiant à base de carboxylate

Les superplastifiants à base de polycarboxylates ont été mis au point après les polysulfonates et sont pour cette raison communément appelés superplastifiants de

nouvelle génération. La molécule d'un superplastifiant de type polycarboxylate est composée d'une chaîne principale, qui porte les fonctions carboxylates ( $-\text{COO}^-$ ), et sur laquelle sont greffées de nombreuses chaînes secondaires. Elle est représentée schématiquement à la figure IV.3.

Cette structure spécifique des polycarboxylates rappelle la forme d'un peigne, c'est pourquoi ces superplastifiants sont souvent qualifiés de polymères de type « peigne ». Les polycarboxylates présentent une structure chimique modulable par rapport aux polycondensats précédemment définis, ce qui conduit à une large variété de nouveaux produits avec des propriétés très variables.

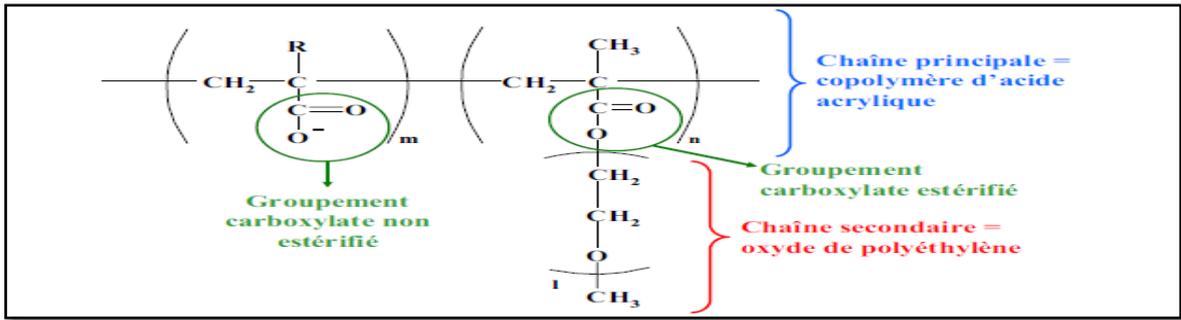
Différentes générations de polycarboxylates sont donc apparues au cours des ans. Ces matériaux peuvent être synthétisés pour des applications précises. Cette propriété a contribué à l'importance acquise par ces produits au cours des dernières années [30].



**Figure IV.3:** Structure schématique d'un superplastifiant de type polycarboxylate, polymère de type « peigne » [30]

#### a. Polycarboxylates de première génération

La première génération de superplastifiants de type polycarboxylate a été mise au point en 1986 par la société japonaise Nippon Shokubai en collaboration avec Nisso Master Builder [30]. Ces matériaux sont des polymères anioniques et ramifiés obtenus par copolymérisation entre un acide carboxylique insaturé et un ester d'acide carboxylique et de méthacrylate polyéthylène glycol (MPEG).



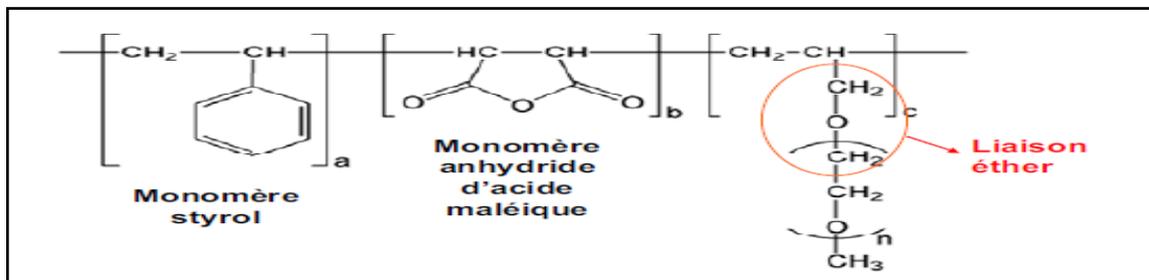
**Figure IV.4:** Structure chimique d'un polycarboxylate de première génération (R = H, CH<sub>3</sub>) [30]

**b. Polycarboxylates de deuxième et troisième génération**

En 1989, deux nouveaux types de polycarboxylates ont été développés en modifiant la nature des liaisons des chaînes secondaires à la chaîne principale.

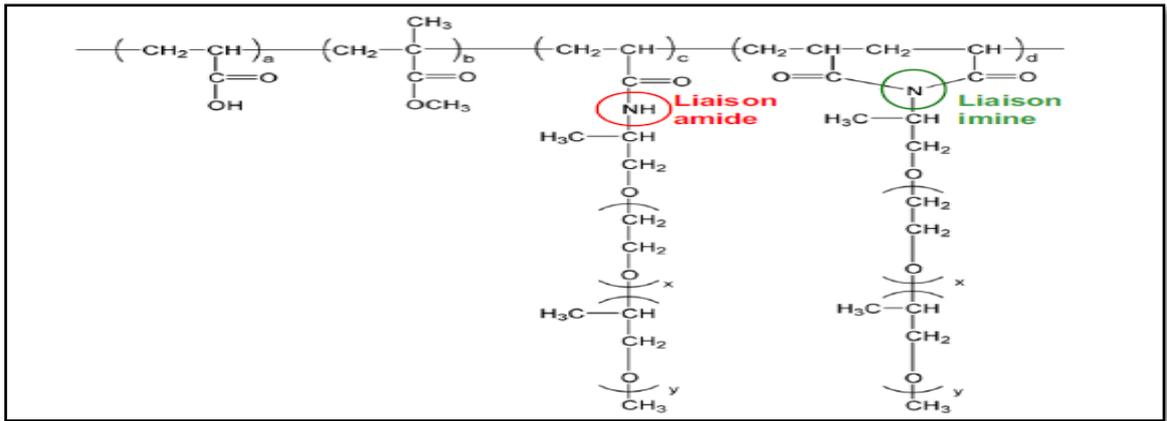
La société TakemotoOil& Fat [30] a mis au point un polycarboxylate au sein duquel les chaînes secondaires sont greffées à la chaîne principale par des liaisons éthers.

La chaîne principale se compose de monomères relativement simples comme l'acide acrylique, l'anhydrite d'acide maléique et la chaîne secondaire est formée par des éthers d'allyle ou de vinyle.



**Figure IV.5:** Structure chimique d'un polycarboxylate de deuxième génération de type éther D'allyle [30]

La même année, la société américaine W.R.Grace [30] a élaboré un polycarboxylate où les chaînes secondaires sont rattachées à la chaîne principale par des liaisons amide ou imine.

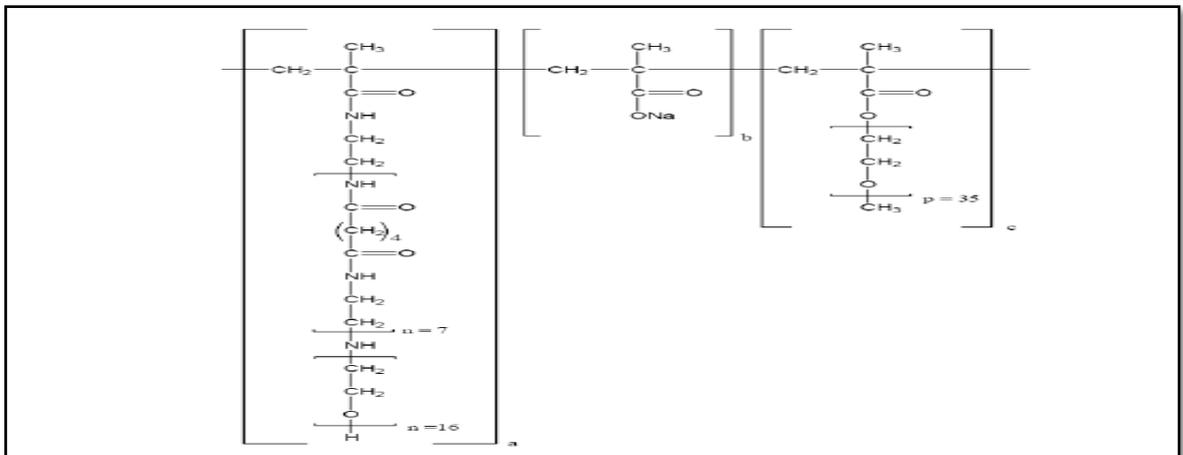


**Figure IV.6:** Structure chimique d’un polycarboxylate de deuxième génération développé par W.R. Grace [30]

**c. Dernière génération de polycarboxylate**

En 2000, une dernière génération de polycarboxylate est née d’une collaboration entre la société suisse SIKA et la société japonaise TOHO. Ces polymères portent des fonctions carboxylates sur leur chaîne principale et des fonctions amines sur leurs chaînes secondaires, ils sont capables d’être soit un polymère anionique soit un polymère cationique. Ces polycarboxylates se distinguent par leur effet fluidifiant exceptionnel pour des rapports E/C extrêmement faibles allant jusqu’à 0,12. Le domaine d’application de ces matériaux est, par conséquent, la conception de bétons à ultra hautes performances en raison des résistances mécaniques exceptionnellement grandes pouvant être atteintes à un rapport E/C de 0,15.

Les polymères organiques entrant dans la composition des superplastifiants sont d’une grande diversité structurale. La façon dont ils vont fluidifier les pâtes de ciment est fortement influencée par le type et la structure des produits utilisés [30].



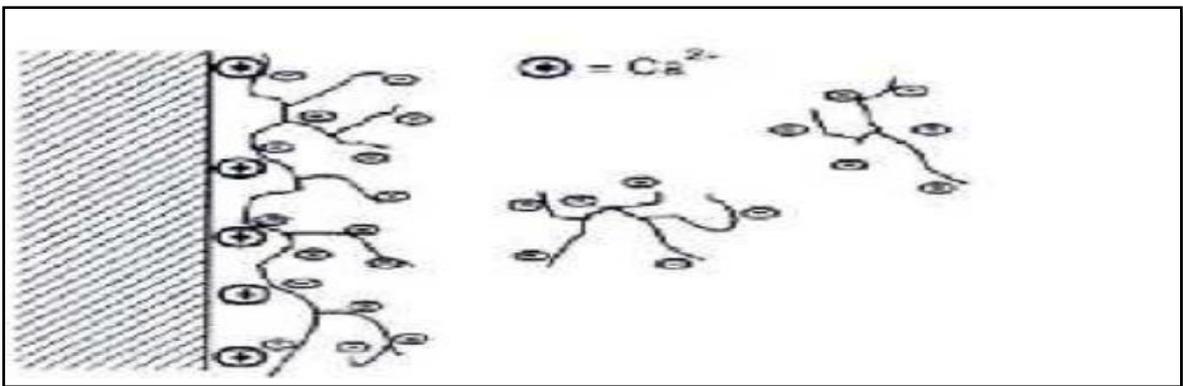
**Figure IV.7:** Structure chimique d’un polycarboxylate de troisième génération [30]

#### IV.4 Modes d'action des superplastifiants

Le pouvoir fluidifiant des superplastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à  $t=0$ ). Ces processus sont l'adsorption des superplastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique. La dispersion des particules de ciment par les superplastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment [30].

##### IV.4.1 Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment

L'adsorption des superplastifiants à la surface des particules de ciment, qui contribuent à la dispersion des particules pour éviter l'agglomération de ces particules et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats, leur adsorption conduit une dispersion entre les particules qui réduisant les forces attractives d'interaction inter-particulaire de Van Der Waals qui existent entre les atomes des différentes particules, et ainsi l'analogie ciment-sulfate de calcium est possible du fait de la forte présence d'ion  $\text{Ca}^{+2}$  à la surface de grains de ciment en suspension, est à l'origine d'un potentiel de surface importante, plus le potentiel de surface est élevé, plus la force de répulsion est grande. Ce phénomène est illustré sur la figure suivante:

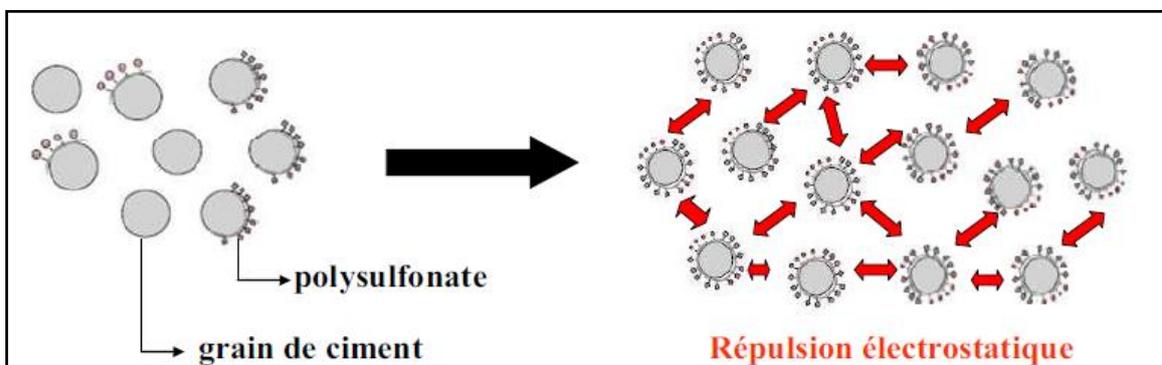


**Figure IV.8 :** Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule [30]

L'adsorption des superplastifiants à la surface des grains de ciment repose sur l'attraction électrostatique entre les groupements anioniques de l'adjuvant ( $-\text{SO}_3^-$ ,  $-\text{COO}^-$ ) et les domaines positivement chargés de la double couche électrochimique. Il s'agit ainsi d'un mécanisme de physisorption. Ce processus montre un plateau d'adsorption, lequel est appelé point de saturation de surface et correspond grossièrement à la quantité de super-plastifiant permettant la fluidité optimale [30].

#### IV.4.2 Répulsion électrostatique

La dispersion engendrée par les superplastifiants de type polysulfonate est majoritairement due à la répulsion électrostatique. Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes. En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment, entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques, cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation, la dispersion des grains de ciment est représentée schématiquement figure IV.9 [30].

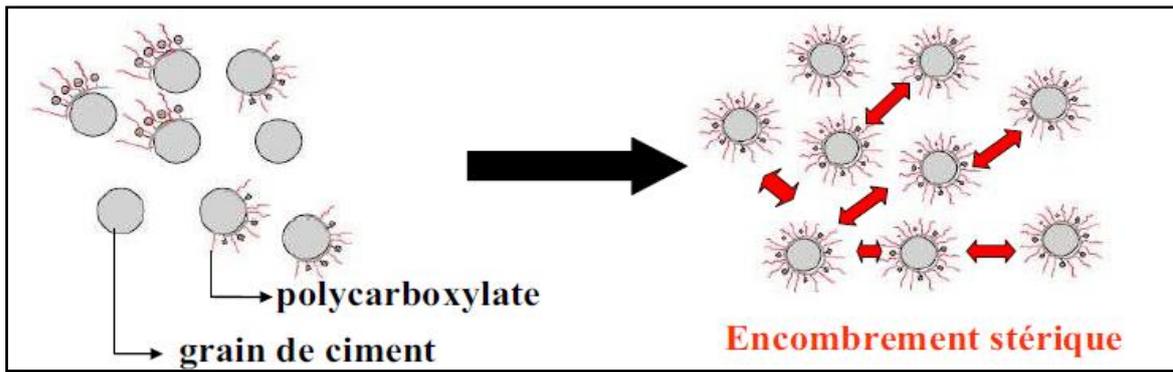


**Figure IV.9:** Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique [30]

#### IV.4.3 Encombrement stérique

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylate. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre.

L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères. L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches. La figure IV.10 donne une représentation schématique de cette interaction dans une suspension de ciment [30].



**Figure IV.10 :** Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique [30]

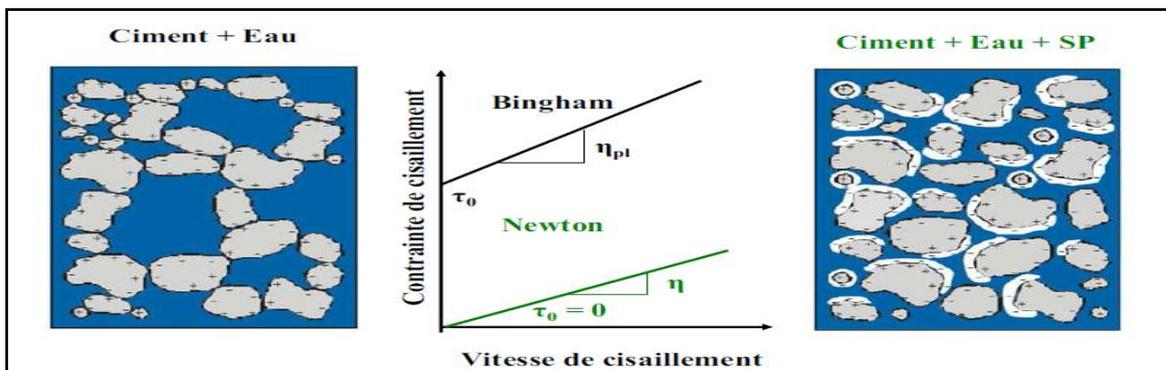
#### IV.4.4 Facteurs affectant l'action des superplastifiants

La capacité des superplastifiants d'augmenter l'affaissement du béton dépend de plusieurs facteurs :

- **Le type de superplastifiant :** pour obtenir un affaissement de 260 mm à partir d'un affaissement initial de 50 mm, il est nécessaire d'ajouter 0,6 de SMF ou MLS, mais seulement 0,4% de SNF.
- **Le dosage en superplastifiant :** l'augmentation de l'affaissement est proportionnelle au dosage en superplastifiant, mais l'efficacité diminue au-delà d'un certain dosage. De plus la concentration en superplastifiant influence le taux et la vitesse d'hydratation des constituants.
- **Le rapport E/C :** les mesures de la viscosité et de l'affaissement montrent que pour des rapports E/C compris entre 0,4 et 0,65, l'addition d'une certaine quantité de superplastifiant augmente l'affaissement et diminue la viscosité en augmentant le rapport E/C.
- **Le moment de l'addition :** si le superplastifiant est ajouté au début avec l'eau de malaxage, l'affaissement augmente considérablement, mais dans le cas où il est ajouté entre 5 et 50 minutes après le début du malaxage, généralement l'affaissement par rapport au premier cas est moindre.
- **Le type et la teneur en ciment.**
- **La température :** pour des températures allant de 5 à 30°C, il n'y a généralement pas de différence d'affaissement due à l'addition de superplastifiant. Au-delà de 30°C, l'efficacité du superplastifiant diminue [29].

#### IV.4.5 Effets rhéologiques

En l'absence de superplastifiant, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiant, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement. De plus, lors de la dispersion des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement. Figure IV.11 reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment.



**Figure IV.11:** Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [30]

La structure des superplastifiants de type polycarboxylate a une influence décisive sur leur pouvoir fluidifiant. Les recherches de Yamada et al. ont montré que de longues chaînes secondaires conduisent, en général, à une fluidité plus grande et à une diminution de la viscosité plastique et du seuil d'écoulement. Par contre, un allongement de la chaîne principale a un effet négatif sur la fluidité. Il semble que ces effets s'expriment surtout pour de faibles rapports E/C.

Enfin, la concentration en superplastifiant est déterminante en ce qui concerne la stabilité des mélanges cimentaires. En effet, au-delà d'une concentration critique, les particules de ciment et les granulats sédimentent en raison de l'absence de seuil d'écoulement.

Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des grains de ciment de la même manière que soit leur nature. Par contre, la répulsion qu'ils engendrent une fois adsorbés diffère selon le type de polymère. Les superplastifiants de type polysulfonate

agissent par une interaction électrostatique et ceux de type polycarboxylate par un encombrement stérique.

Dans les deux situations, la dispersion des particules se traduit par une amélioration des caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment. De nombreuses applications technologiques vont découler de cette propriété [30].

## IV.5 Applications des superplastifiants

Depuis leur apparition, les superplastifiants ont trouvé de nombreuses applications dans l'industrie de la construction :

- Dans un premier temps, les performances technologiques réalisées dans la fabrication du béton sont expliquées ;
- Dans un deuxième temps, les nouveaux bétons développés, entre autres, grâce à l'essor des superplastifiants, sont décrits ;
- Enfin, les avantages économiques et écologiques directement et indirectement issus de l'emploi de superplastifiants sont présentés [30].

### IV.5.1 Performances technologiques des superplastifiants

L'emploi des superplastifiants permet de nombreuses améliorations techniques et technologiques tout au long du processus de fabrication du béton. La maniabilité élevée associée à une bonne cohésion du matériau facilite les différentes étapes de la mise en œuvre :

- Si la quantité d'eau n'est pas trop diminuée, le pompage du béton peut être réalisé avec des vitesses plus rapides, sur des distances plus longues et à des hauteurs plus élevées, tout en diminuant la pression de 20 à 30 % ;
- La mise en place nécessite moins de vibrations, voire aucune dans le cas de bétons autocompactants ou autoplaçants, d'où une économie de temps, de main d'œuvre et de matériel ;
- Le béton peut être placé dans des endroits difficiles d'accès grâce à sa grande fluidité obtenue, ce qui serait impossible avec un béton classique.

Des avantages sont aussi apportés sur le long terme [30] :

- Les armatures sont parfaitement enrobées, même dans les éléments qui en possèdent un taux élevé, ce qui réduit considérablement les risques de corrosion.
- Les résistances mécaniques et la durabilité des bétons sont augmentées du fait de la faible porosité du matériau produit avec un volume réduit d'eau de gâchage.
- Les différents superplastifiants présentent des performances différentes lorsqu'ils sont utilisés en présence d'un même ciment.
- La supériorité des superplastifiants de type polycarboxylate y apparaît clairement.

**Tableau IV.1:** Réduction d'eau pour les différents superplastifiants [30]

Superplastifiant	Réduction d'eau (%)	
	Moyenne	Maximale
Lignosulfonate	5-15	20
PNS	10-25	30
PMS	10-25	30
Polycarboxylate	20-30	40

#### IV.5.2 Nouveaux bétons

Le développement des bétons à hautes performances est indissociable de l'emploi de superplastifiants. Ces bétons sont essentiellement utilisés dans la conception d'ouvrages modernes et complexes. Les superplastifiants ont contribué à l'amélioration des propriétés de ces matériaux selon trois façons :

- **L'augmentation de la fluidité**

Les propriétés rhéologiques du béton sont améliorées tout en conservant un rapport E/C similaire à un béton traditionnel.

- **La diminution du rapport E/C**

Tout en conservant son ouvrabilité à l'état frais, le béton développe une résistance mécanique élevée et une meilleure durabilité une fois durci.

- **La réduction des teneurs en ciment et en eau**

Les bétons répondent à des exigences spécifiques de mise en œuvre et de résistance. Le dégagement de chaleur provoqué par l'hydratation du ciment est moins

intense dans ces mélanges. Les différentes applications des bétons à hautes performances sont classées en quatre catégories [30].

- **Les bétons à hautes résistances**

Ces bétons sont caractérisés par un faible rapport E/C. Par conséquent, la matrice cimentaire de ces matériaux est très dense et peu poreuse une fois durcie. La qualité de la microstructure de ces bétons leur confère des performances exceptionnelles en termes de résistance mécanique et de durabilité. En effet, ces bétons sont capables de résister à de plus lourdes charges que les bétons ordinaires. Leur texture se compose de pores de petites tailles et isolés les uns des autres ; la pénétration de l'humidité, des sels et des gaz est de cette façon considérablement réduite et la durabilité dans les environnements agressifs est meilleure.

- **Les bétons à grand volume de cendres volantes**

Dans ces bétons, 50 à 60 % du ciment est remplacé par des cendres volantes. Une faible quantité d'eau est introduite dans la formulation, par contre un dosage élevé en superplastifiant est nécessaire pour assurer une ouvrabilité correcte. Ces matériaux présentent une très faible chaleur d'hydratation, des résistances mécaniques élevées et une faible perméabilité.

- **Les bétons autocompactants et autolissants:**

Ces bétons présentent une grande fluidité (affaissement supérieur à 170 mm) tout en conservant une bonne résistance à la ségrégation, laquelle peut être encore améliorée par l'ajout d'un agent de stabilité, adjuvant qui augmente la viscosité de la suspension. Ces propriétés permettent aux matériaux de se mettre en place sans l'aide de vibrations et de trouver des applications dans la fabrication des sols et des surfaces planes.

- **Les bétons projetés armés de fibres**

Les bétons projetés sont utilisés pour les travaux de restauration sur des surfaces importantes. La force de projection densifie le matériau et lui confère une grande cohésion. Des fibres en polypropylène ou en acier sont incorporées au béton pour améliorer sa ductilité et sa résistance mécanique. Cependant, l'ouvrabilité du matériau s'en trouve fortement diminuée. Des superplastifiants sont donc utilisés afin que le béton retrouve des propriétés rhéologiques adéquates [30].

### IV.5.3 Avantages économiques et écologiques

L'utilisation des superplastifiants contribue, directement et indirectement, à la réduction des coûts économiques et environnementaux de la production des bétons.

D'après Perche [30], les avantages obtenus sont les suivants :

- **Réduction de la consommation d'eau**

L'emploi de superplastifiant, lors de la fabrication d'un béton, permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage nécessaire. Cette économie, qui peut aller jusqu'à 30 %, représente près de 300 millions de mètre cube d'eau par an [30].

Cette contribution directe peut se révéler décisive, dans les cas de construction d'ouvrage en béton dans les pays en voie de développement, où l'acheminement de l'eau est souvent problématique.

- **Valorisation des coproduits industriels**

Les lignosulfonates modifiés sont fabriqués à partir de produits résiduels de l'industrie du papier. La valorisation de ces coproduits industriels est ici directement liée à la production de superplastifiants.

D'une façon plus indirecte, d'autres matériaux ont pu être utilisés lors de la fabrication du béton grâce à l'essor des superplastifiants. Une partie du ciment est remplacé par des additions minérales, toutes produites dans une autre branche industrielle: la fumée de silice provient de l'industrie du silicium, les cendres volantes sont filtrées des fumées de combustion des centrales thermiques, les laitiers de haut fourneau sont issus de la métallurgie de la fonte. Ces coproduits industriels n'auraient pas été aussi facilement valorisés en matériau de construction sans les superplastifiants.

- **Diminution des émissions de CO<sub>2</sub>**

La consommation de ciment Portland est diminuée lorsqu'il y a substitution du ciment par des coproduits. Ainsi, les superplastifiants participent indirectement à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> associées à la fabrication du ciment Portland. La production annuelle de ciment Portland se monte à 2 milliards de tonnes et répand à peu près la même quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Remplacer 20 % du ciment revient à abaisser de 200 millions de tonnes les émissions annuelles de CO<sub>2</sub>. Cependant, la fabrication des superplastifiants engendre également une émission de CO<sub>2</sub>, laquelle ne doit pas être omise dans le bilan global.

- **Économies d'énergie**

Les superplastifiants donnent lieu, indirectement, à une limitation de l'énergie consommée pour la fabrication du ciment (broyage, clinkérisation, etc.). En revanche, ils contribuent directement à diminuer les énergies dépensées pour la mise en œuvre du béton (malaxage, pompage, vibration) en lui conférant une fluidité élevée.

Les superplastifiants apportent des avantages et des améliorations dans la majorité des secteurs de la production du béton. Ces matériaux seront donc vraisemblablement de plus en plus utilisés dans le futur. Une bonne compréhension des mécanismes d'interaction entre le ciment et ces polymères organiques est donc indispensable pour se prémunir des cas d'incompatibilité. En effet, les désagréments engendrés par ce type de situation peuvent se répercuter sur l'ensemble des utilisateurs du béton et ils sont donc à éviter.

Les superplastifiants pouvant être introduits dans un béton afin d'augmenter sa fluidité ou de diminuer son rapport E/C sont nombreux et variés. Pour pouvoir exercer leur pouvoir dispersant, ces polymères doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains et ensuite, selon leur nature et leur structure, produire une force répulsive de type électrostatique ou stérique. Le raidissement des mélanges cimentaires peut donc mettre en jeu soit un défaut de l'adsorption des superplastifiants soit une neutralisation de la force répulsive. Dans les deux cas, le pouvoir fluidifiant disparaît et les systèmes voient se détériorer leurs propriétés rhéologiques [30].

## IV.6 Conclusion

Les superplastifiants sont des matériaux organiques multicomposants. Les molécules de superplastifiant sont des polymères avec des groupements anioniques de type sulfonate ( $-\text{SO}_3^-$ ) pour les superplastifiants polysulfonates et de type carboxylate ( $-\text{COO}^-$ ) pour les superplastifiants polycarboxylates. Cette dernière catégorie d'adjuvant consiste en un polymère de type « peigne » composé d'une chaîne carbonée principale (copolymère d'acide acrylique) portant les groupements anioniques et sur laquelle sont greffées des chaînes secondaires (oxyde de polyéthylène).

Les superplastifiants sont utilisés pour améliorer les propriétés rhéologiques des systèmes cimentaires. Ces polymères anioniques s'adsorbent à la surface des grains de ciment et engendrent une dispersion des particules soit par une répulsion électrostatique pour les polysulfonates soit par un encombrement stérique pour les polycarboxylates. Une

amélioration de la fluidité est ainsi obtenue par la défloculation des grains de ciment et la libération de l'eau retenue dans les floculats. Une diminution consécutive du seuil d'écoulement est alors observée.

# Chapitre V

## Les méthodes de formulation du béton

## V.1 Introduction

La diversité des méthodes existant dans le monde montre bien que la formulation des mélanges a été longtemps plus «un art qu'une science ». Il existe non seulement des différences profondes dans la stratégie adoptée par les différents auteurs pour résoudre le problème, mais une comparaison quantitative entre méthodes révèle, pour les mêmes spécifications, des écarts impressionnants en termes de formule, de coût et de quantité de ciment, comme a pu le montrer le groupe international de travail RILEM [7]. Cela est dû à la nature empirique des modèles utilisés qui, de plus, sont calibrés sur des données locales.

La formulation des bétons permet de lier la composition du béton à ses propriétés. L'objectif est alors de rechercher une composition utilisant au mieux les ressources locales, qui soit la plus économique possible et qui possède les propriétés désirées.

Un béton est constitué d'un squelette granulaire mis en suspension dans de l'eau (contenant éventuellement des adjuvants). Le squelette est lui-même composé d'un ensemble de grains solides de tailles différentes, du micron (pour les fines du ciment ou des additions minérales) à la dizaine de millimètres (pour les gravillons). Sa compacité joue un rôle « Clé » sur les propriétés du béton, notamment sur l'ouvrabilité, on peut illustrer ce fait de façon très schématique: l'eau mise dans un béton va, dans un premier temps, combler les vides constituant la porosité du squelette, puis une fois cette porosité comblée, écarte les grains. On peut donc faire l'hypothèse que c'est la seconde partie de l'eau qui donne au béton son ouvrabilité. Ainsi pour une ouvrabilité donnée, maximiser la compacité du squelette permet de diminuer la quantité d'eau dans le béton donc de faire des bétons plus économiques. De façon corollaire, maximiser la compacité permet d'augmenter l'ouvrabilité pour une teneur en eau fixée [7].

Plusieurs auteurs Bolomey, Caquot, Valette, Faury, Joisel, cités dans la référence ont développé des méthodes de formulation de bétons. Selon le pays et l'école de pensée, les plus utilisés sont la méthode Américaine, la méthode Britannique, la méthode française, la méthode Barron Lesage, la méthode basée sur le modèle d'empilement compressible, la méthode des plans d'expériences citée dans Baron et Ollivier [7].

## V.2 Méthode de formulation du béton

L'étude de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (agrégats fins: sable et gros agrégats : graviers ou pierres concassée) et en eau

pour un dosage de  $1\text{m}^3$  de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une compacité élevée. Ainsi qu'une résistance mécanique voulue (exigée) [31].

### V.2.1 Méthode de Bolomey

La méthode de Bolomey [31] a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7  $\text{kg}/\text{m}^3$  ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

Le principe de la méthode consiste à :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs ;
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale ;
- Dédire la composition d'un mètre cube de béton.

#### Courbe optimale :

L'équation qui régit cette courbe est exprimée par la relation :

$$p = A + (100 - A) \sqrt{d/D} \quad (\text{Eq V.1})$$

Avec :

- **p** : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre  $d$  ;
- **D** : est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisante pour laisser passer la totalité des granulats ;
- **A** : représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats [31].

**Tableau V.1** : Valeurs de coefficient A [31]

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 à 8	8 à 10
Béton armé	10	12 à 14
Béton coulé	12	14 à 16

### V.2.2 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 ; les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams [32], sont indiqués dans le tableau V.2 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 [32] ; elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse  $Mf_1$  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 désirées ... etc

**Tableau V.2:** Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams) [32]

Dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	Dimension maximale $D$ des granulats (mm)						
	10	15	20	25	30	40	60
<b>275</b>	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
<b>300</b>	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
<b>350</b>	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
<b>400</b>	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

### V.2.3 Méthode de Vallette

R. Vallette [33] 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 quelquefois utilisée avec certaines variantes. Voici sommairement un résumé qui détermine 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 le 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 mouillé.

#### **V.2.4 Méthode de Baron et Lesage**

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).

On ne peut rechercher simultanément ces trois qualités. Il est nécessaire d'en choisir une, a priori, pour commencer l'étude [34].

### V.2.5 Méthode de Joisel :

S'inspirant comme Faury [7] de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel [7] propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de  ${}^m\sqrt{d}$ ,  $m$  dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage ;  $m$  peut alors varier de 3 à 10. Joisel prend comme échelle en abscisse, la  ${}^m\sqrt{d}$  au lieu de  $\sqrt[5]{d}$  (Faury) ou  $m$  variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse  $D/2$ , Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle  $(\frac{D}{2} / D)$  de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode. En revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une échelle à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats [7].

### V.2.6 Etude théorique de Caquot

Caquot [7] a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains.

### V.2.7 Méthode de FULLER-THOMPSON

Fuller et Thompson [35] ont proposés, pour les agrégats seuls, sans ciment, une courbe d'équation :

$$P(\%) = 100(d \div D)^m \quad (\text{Eq V.2})$$

Où l'exposant  $m$  est voisin de 0,5 d'où la parabole de Fuller :

$$P(\%) = 100(d \div D)^{1/2} \quad (\text{Eq V.3})$$

**P** : pourcentage en poids passant à travers la passoire de diamètre  $d$  (en mm) ;

**D** : grosseur maximum de l'agrégat.

### V.2.8 Méthode pratique de « DREUX-GORISSE »

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à :

- Rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton.
- Permet de déterminer les quantités optimales de matériaux nécessaires (l'eau, ciment, sable et gravier) à la confection d'un mètre cube de béton [36].

#### V.2.8.1 Dosage en ciment et en eau

##### Résistance visée :

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée. Ainsi la résistance visée :

$$f'c = fc_{28} + 15\%fc \quad (\text{Eq V.4})$$

$$f'c = 1.15 \times fc_{28} \quad (\text{Eq V.5})$$

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, et de la qualité du ciment et des granulats. Ainsi expérimentalement, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres :

$$fc = \sigma'c \cdot G \cdot \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{Eq V.6})$$

Avec :

**fc**: Résistance visée à 28 jours ;

**C:** Dosage du ciment en kg/m<sup>3</sup> de béton ;

**E:** Dosage de l'eau en l/m<sup>3</sup> de béton ;

**σ'c:** Classe vraie du ciment en MPa ;

**G:** Coefficient granulaire. Ce coefficient représente la qualité des granulats.

Expérimentalement, il est établi que cette qualité dépend du granulat, mais également de son diamètre selon les valeurs suivantes :

**Tableau V.3 :** Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D de granulats		
	D ≤ 12,5	20 ≤ D ≤ 31,5	D ≥ 50
	Fins	moyens	gros
<b>Excellente</b>	0,55	0,60	0,65
<b>Bonne</b>	0,45	0,50	0,55
<b>Passable</b>	0,35	0,40	0,45

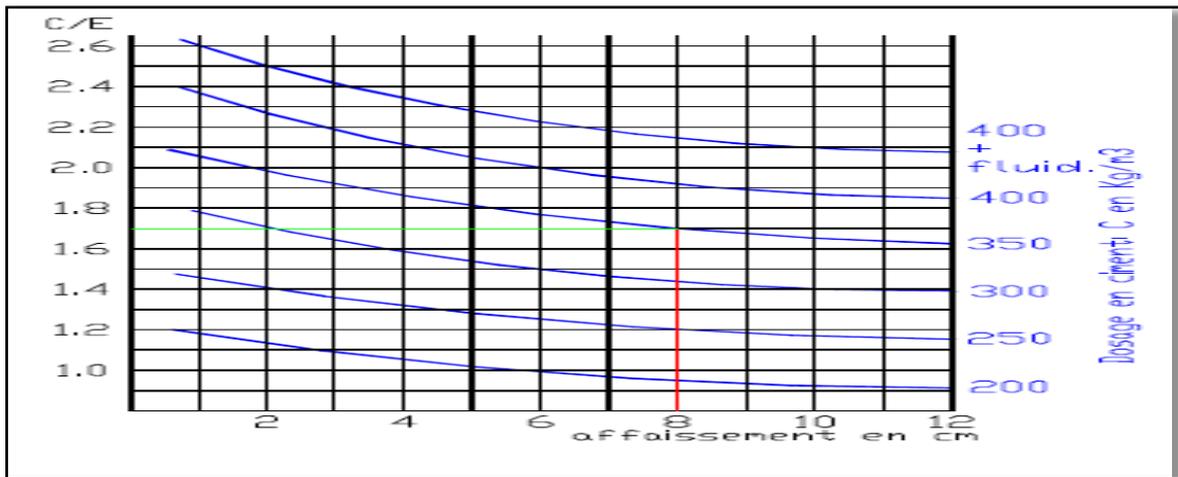
Cette relation permet de déterminer le rapport C/E :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_c}{\sigma'c \cdot G} + 0.5 \quad (\text{Eq V. 7})$$

Il est à observer à travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton soit forte ; inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, il y a également moins besoin de ciment lorsque la qualité ou la dimension des granulats augmentent.

Le problème consiste à délier le dosage en ciment du dosage en eau, le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée, ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque suivant figure V.2

La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée ; en abscisse, la valeur de l'affaissement désirée est entrée et en ordonnée le rapport, C/E ; l'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg.



**Figure V.1:** Dosage approximatif en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée [36]

Il est à observer que plus l'ouvrabilité désirée est importante plus il faut d'eau et plus il faut de ciment. De même le dosage en ciment est limité à  $400 \text{ kg/m}^3$  de béton en place. Au-delà le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration dans le béton. Cela aurait pour effet de produire des fissures de retrait.

Ainsi, pour des rapports C/E et une ouvrabilité à atteindre qui nécessiteraient plus de  $400 \text{ kg}$  de ciment, le dosage en ciment est limité à  $400 \text{ kg}$  et l'ouvrabilité désirée est atteinte en ajoutant un fluidifiant au béton [36].

#### V.2.8.2 Ajustement du dosage en eau

Le dosage en eau est à ajuster. En effet l'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange, or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit. La quantité d'eau dépend donc également du diamètre des grains à humidifier. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal.  $D = 25 \text{ mm}$ . Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre  $D$ .

**Tableau V.4 :** Correction du dosage en eau selon le diamètre,  $D$  du mélange granulaire [36]

Diamètre en (mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50
Correction en(%)	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

Ainsi pour un mélange granulaire de diamètre,  $D = 20\text{mm}$ , il faut majorer le dosage en eau de 2%, pour un dosage initial de 206 litre d'eau le dosage doit être augmenté à  $E = 206 \times 1,02 = 210$  litres [36].

### V.2.8.3 Dosage en pourcentage des granulats

On trace la courbe granulaire de référence sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), la courbe peut être entièrement déterminée à partir de seulement trois points appelés respectivement, O, origine, A, point de brisure, et B, extrémité.

Pour les granulats à béton, il apparaît que les points O et B, sont invariables quel que soit les proportions du mélange.

Le point d'origine, O est fixe à 0% de tamisât sur le plus petit tamis, 0,080mm. Ce point est repéré par ses coordonnées : O (0,080 ; 0).

De même, le d'extrémité, B se situe sur le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât ; Ce point est repéré par ses coordonnées: B (D ; 100). Pour le point de brisure A, il apparaît que le tamis sur lequel il se situe est invariable quel que soit les proportions du mélange.

En observant de plus près, il apparaît que ce tamis se situe à  $D/2$ , si  $D \leq 20\text{mm}$ , et au milieu de l'intervalle (5 ; D) si  $D > 20$ .

Il reste à déterminer le pourcentage de tamisât du point de brisure. Cette position dépend des proportions du mélange, or, les proportions du mélange influent sur la compacité du béton et par conséquent sur sa résistance.

Le problème consiste donc à déterminer l'ordonnée du point de brisure qui permettra de donner la meilleure compacité au béton, cette position est optimisée par la méthode DREUXGORISSE.

L'ordonnée optimisée du point de brisure, YA est déterminée par la relation suivante :

$$YA = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad (\text{Eq V.8})$$

Cette relation prend en compte l'influence de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre [36].

**K** : optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment.

**Tableau V.5:** Valeur correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	+4	0	+2	-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

**K<sub>s</sub>** : ajustement de la granularité du sable, pour  $2,2 \leq M_f \leq 2,8$ .

(M<sub>f</sub> : module de finesse du sable)

$$K_s = 6 \times M_f - 15 \quad (\text{Eq V.9})$$

- **K<sub>p</sub>** : ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton ;
- **K<sub>p</sub> = 0** : Si béton non pompable ;
- $5 \leq K_p \leq 10$  : Si béton pompable.

Les proportions de sable et de gravier nécessaire obtenu à partir d'une méthode graphique appelée la ligne de partage.

#### V.2.8.4 La ligne de partage

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier, ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection, ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier [36].

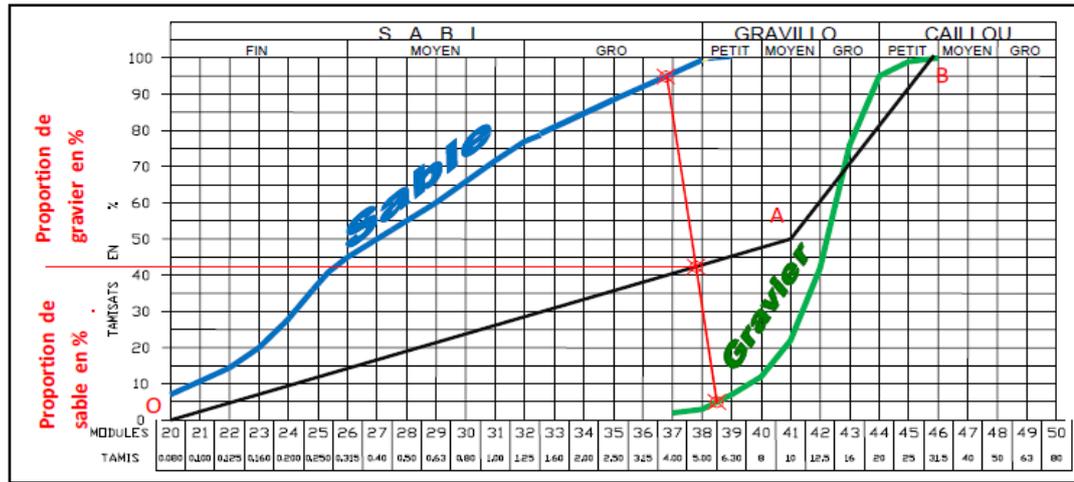


Figure V.2: Exemple d'étude de la composition granulatoire d'un béton [36]

### V.2.8.5 Dosage en masse des granulats

Quelles masses de gravier et de sable correspondent aux proportions du mélange granulatoire ?

La réponse s'obtient par la connaissance de la compacité du béton et des masses volumiques absolues des matériaux.

La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulatoire, mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre,  $D$  des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité, l'expérience permet de prévoir approximativement la compacité du béton selon les valeurs suivantes :

Tableau V.6 : Coefficient de compacité ( $\gamma$ )[36]

Consistance	Serrage	Coefficient $\gamma$ en fonction du diamètre D des granulats						
		D= 5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=80
<b>Molle</b>	piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
<b>Plastique</b>	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
<b>Ferme</b>	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V_{abs} = 1000\gamma - V_c \quad (\text{Eq V.10})$$

Avec :

$V_c$  : volume du ciment.

$$V_c = C / \rho_c \quad (\text{Eq V.11})$$

$\rho_c$  : Masse spécifique du ciment.

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

**Sable :**

$$V_s(\text{en litre}) = P_s \% * (\gamma) \quad (\text{Eq V.12})$$

**Ps:** Le % du sable obtenu à partir de la courbe granulométrique.

**Gravier :**

$$V_g(\text{en litre}) = P_g \% * (\gamma) \quad (\text{Eq V.13})$$

**Pg:** Le % du gravier obtenu à partir de la courbe granulométrique.

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont MS et Mg, les masses de chacun d'eux seront :

**Sable:**

$$M_s(\text{kg}) = V_s \times \rho_s \quad (\text{Eq V.14})$$

**Gravier:**

$$M_g(\text{kg}) = V_g \times \rho_g \quad (\text{Eq V.15})$$

**La masse totale des granulats :**

$$M_t = M_s + M_g \quad (\text{Eq V.16})$$

### V.2.9 Méthode Américaine (ACI 211)

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

#### Etape 1 : choix de l'affaissement

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

**Etape 2 : choix de la dimension maximale du granulat**

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

**Etape 3: estimation du dosage en eau et de la teneur en air**

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

Les agents réducteurs d'eau, et encore plus les superplastifiants, diminuent dans de fortes proportions les quantités d'eau. On doit se rappeler que la partie liquide des adjuvants fait partie de l'eau de gâchage.

**Etape 4: choix du rapport E/C**

Les deux critères du choix du rapport E/C sont: la résistance et la durabilité. En ce qui concerne la résistance à la compression, la valeur moyenne visée doit dépasser la résistance minimale spécifiée avec une marge appropriée. L'expression ciment représente la masse totale des composants hydrauliques utilisés; leur choix étant fonction de nombreux facteurs :

Développement de chaleur, vitesse d'évolution des résistances, résistance à différentes formes d'attaques, en sorte que le type de ciment composé doit être choisi avant l'étape du calcul de la composition proprement dite. A partir du type réel de ciment choisi, la relation entre la résistance et le rapport E/C doit être établie pour une certaine plage de résistance.

Lorsque l'on considère la durabilité, le rapport E/C doit être spécifié par le concepteur de la structure ou par un règlement approprié. Il est primordial que la valeur du rapport E/C choisie soit la plus faible des deux valeurs obtenues selon les critères de résistance et de durabilité.

Lorsque différents matériaux cimentaires sont utilisés, on doit se rappeler qu'ils ont des densités différentes: la valeur habituelle pour du ciment Portland est de 3,15 ; elle est de 2,90 pour le laitier de haut fourneau et de 2,30 pour les cendres volantes.

**Etape 5: calcul du dosage en ciment**

Les résultats des étapes 3 et 4 donnent directement le dosage en ciment : c'est la quantité d'eau divisée par le rapport E/C. Cependant, si, pour des considérations de durabilité, on exige une quantité minimale de ciment, on devra prendre en compte la plus élevée des deux valeurs.

Occasionnellement, pour des raisons de dégagement de chaleur, les spécifications imposent une quantité maximale de ciment. Cette règle doit être scrupuleusement respectée. Le dégagement de chaleur est particulièrement important dans le cas des bétons de masse ; le calcul pour ce type de béton est spécifié dans la norme ACI 211.1-91.

**Etape 6 : estimation du dosage en gros granulat**

La méthode suppose que le rapport optimal du volume en vrac des gros granulats au volume total de béton dépend seulement de la dimension maximale du granulat et de la granulométrie du granulat fin. La forme des éléments constituant le gros granulat n'entre pas directement en considération parce que, par exemple, un granulat concassé a un volume en vrac plus élevé pour une même masse (ce qui représente une masse volumique plus faible) qu'un granulat bien roulé. Ainsi la forme du granulat est un facteur directement pris en compte lorsque l'on détermine la masse volumique en vrac. Ce volume est transformé en masse de gros granulats par mètre cube de béton (en  $\text{kg/m}^3$ ).

**Etape 7 : estimation du dosage en granulats fins**

A cette étape, la masse de granulat fin est la seule quantité qui demeure inconnue. Le volume absolu de cette masse peut être obtenu en soustrayant la somme des volumes absolus de l'eau, du ciment, de l'air entraîné et des gros granulats du volume de béton, qui est de  $1\text{m}^3$ . Pour chacun des constituants, le volume absolu est égal à sa masse dans le mélange divisée par sa masse volumique (en  $\text{kg/m}^3$ ); la masse volumique absolue est la densité du constituant multipliée par la masse volumique de l'eau ( $1000\text{ kg/m}^3$ ).

Le volume absolu du granulat fin est converti en masse en multipliant son volume par la densité du granulat fin et par la masse volumique de l'eau.

La masse du granulat fin peut aussi être obtenue directement en soustrayant la masse totale de tous les constituants de la masse de l'unité de volume de béton, si cela peut être estimé expérimentalement. Cette approche est légèrement moins précise que la méthode des volumes absolus.

**Etape 8 : ajustement des proportions**

Comme dans chacune des méthodes de formulation des bétons, des gâchées d'essai doivent être réalisées. La norme ACI211.1-91 donne quelques règles empiriques pour procéder aux ajustements nécessaires. En général, il est important de se rappeler que, si la maniabilité doit être modifiée, mais sans changer la résistance, le rapport E/C ne doit pas être modifié. On peut effectuer des modifications du rapport granulat /ciment (G/C) ou, si des granulats convenables sont disponibles, de la granulométrie.

Inversement, des changements de la résistance, mais non de la maniabilité, sont réalisés en modifiant le rapport E/C du béton, sans modifier la quantité d'eau. Ceci signifie qu'un changement du rapport E/C doit s'accompagner d'un changement du rapport G/C de sorte que le rapport des masses  $\frac{\text{eau}}{\text{eau} + \text{ciment} + \text{granulats}}$  soit à peu près constant [7].

**V.2.10 Méthode Britannique (BRE 1988):**

La méthode du département de l'environnement révisée en 1988[7] elle comporte les étapes suivantes :

**Etape 1 : Détermination 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).

**Etape 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.

**Etape 3 : Calcul de la quantité de ciment :**

Elle s'obtient, en divisant la quantité d'eau par le rapport eau/ciment. A ce stade, une limite inférieure concernant la durabilité est prise en compte.

**Etape 4 : Détermination de la masse totale de granulat**

«La densité du béton à l'état frais » en fonction de la quantité d'eau et de la densité, les masses (pour un volume unité) de ciment et d'eau sont soustraites.

**Etape 5 : détermination du rapport sable/sable + gravillon**

Ce rapport est en fonction de la maniabilité requise (exprimée par l'affaissement ou par le temps d'écoulement vebe), de  $D_{max}$ , du rapport E/C et de la quantité de passants du sable au tamis de 0,6 mm, quand le gravillon est livré en plusieurs fractions.

**V.2.11 Méthode de Seramtaïev**

Cette méthode est appelée la méthode des volumes absolus ou méthode de Seramtaïev [37].

Le principe de cette méthode est le suivant : la somme des volumes absolus de tous les matériaux composants pour un dosage de  $1 \text{ m}^3$  de béton frais est égale 1000 litres.

$$\left[ \frac{C}{\gamma'_C} + \left( \frac{E}{\gamma'_e} \right) + \left( \frac{S}{\gamma'_s} \right) + \left( \frac{G}{\gamma'_g} \right) \right] = 1000 \quad (\text{Eq V.17})$$

Avec :

**C ; E ; S et G** : dépenses en ciment, eau, sable, et gravier en (Kg/ m<sup>3</sup>).

$\gamma'$ : masses spécifiques ou masses volumique absolues du ciment, eau, sable et gravier en (Kg/l).

La composition du béton c'est-à-dire la dépense (quantité) de ciment, d'eau, de sable et de gravier ou pierres concassées est établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode d'essai des dosages expérimentaux de mélange du béton.

**V.2.12 Méthode de Faury**

Cette méthode, qui date de 1941, s'inspire des travaux de Caquot. Faury prend comme échelle des abscisses pour ses graphiques, la racine cinquième de l'ordonnée est graduée en échelle décimale suivant le pourcentage en volume absolu de matière passant à travers les passoires correspondantes (ciment compris). Il peut tenir compte de l'effet de paroi et du mode de serrage, c'est-à-dire de la consistance du béton.

**a. Principe de la méthode**

Le principe de Fauryest basé sur la granularité continue des granulats, elle s'inspire de la théorie de Caquotrelative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

Le mélange optimum est celui dont la courbe granulométrique se rapproche le plus possible de la courbe de référence donnée par la méthode.

Cette courbe est tracée dans un axe rectangulaire dont les abscisses croissent proportionnellement à la racine cinquième des dimensions en mm des trous des tamis.

### b. Le traçage de la courbe

La courbe de référence conduisant à la compacité maximale est normalement une droite mais Faury [11] à distinguer la zone des grains fins et moyens ( $<D/2$ ) de la zone des gros grains ( $>D/2$ ).

La courbe granulométrique de référence devient donc un composé de deux segments de droites avec des pentes différentes. L'abscisse du point de rencontre des deux segments correspond à  $D/2$  et l'ordonnée  $Y$  est donnée par une formule qui tient compte de la nature des granulats et du niveau de consistance recherché :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{K'}{\frac{R}{D} 0.75} \quad (\text{Eq V.18})$$

- **A** : coefficient choisit dans le tableau des valeurs de A ;
- **D** : dimension maximale du béton ;
- **K'** : coefficient dépendant de la puissance de serrage, on le prend égale à 1.5 en cas de serrage moyen (béton mou), et 1.0 en cas de serrage énergétique (béton ferme) ;
- **R** : rayon moyen du moule.

En masse indéfinie la formule de  $Y$  devient :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} \quad (\text{Eq V.19})$$

Le segment de droite correspond à la zone des éléments inférieurs à  $D/2$  s'obtient en joignant le point qui correspond conventionnellement à la dimension des grains de ciment pris égale à 0.0065mm au point  $D/2$ .

Le segment de droite correspondant à la zone des éléments supérieurs à  $D/2$  s'obtient en joignant le point correspondant à la dimension maximale du béton au point  $D/2$ .

Le point correspondant à la dimension maximale du béton ne correspond pas souvent à la dimension du plus gros grain du plus gros granulat du béton.

Il est toujours inférieur et il se calcule par la formule suivante:

$$D = d1 + (d1 - d2) \frac{x}{y} \quad (\text{Eq V.20})$$

- **d1** : Diamètre du plus grand tamis sur lequel on obtient un refus ;
- **d2** : Diamètre du tamis immédiatement inférieur ;
- **x** : proportion des grains retenus sur le tamis d1 ;
- **y** : proportion des grains entre d1 et d2.

### c. Calcul de l'indice des vides

Le volume des vides est ici représenté par la somme des volumes(e) de l'eau de prise et du volume(v) inclus dans le béton, ce volume que nous désignant par (I) et le complément à 1 de la compacité (P), ainsi :  $I = e + v$  où  $I = 1 - P$

La quantité d'eau de gâchage se détermine par la formule suivante :

Avec effet de paroi :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D}} \quad (\text{Eq V.21})$$

En masse indéfini :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} \quad (\text{Eq V.22})$$

- **K** : coefficient choisit dans le tableau des valeurs de K ;
- **D** : dimension maximale du béton ;
- **K'**: Coefficient qui dépend de la puissance du serrage ;
- **R** : rayon moyen du moule.

**Tableau V.7:** Valeur de « A »

	Sable roulé / Gravier roulé	S roulé / G concassé	S concassé / G concassé
<b>Très fluide</b>	32	34	38
<b>Fluide</b>	30 - 32	32 - 34	36 - 38
<b>Mou</b>	28 - 30	30 - 32	34 - 36
<b>Ferme</b>	26 - 28	28 - 30	32 - 34
<b>Très ferme</b>	24 - 26	26 - 28	30 - 32
<b>Puissant</b>	22 - 24	24 - 26	28 - 30

Tableau V.8: Valeur de « K »

	S roulé / G roulé	S roulé / G concassé	S concassé / G concassé
<b>Très fluide</b>	0.370	0.405	0.450
<b>Molle</b>	0.350 – 0.370	0.375 – 0.405	0.430 – 0.460
<b>Ferme</b>	0.330 – 0.350	0.355 – 0.385	0.400 – 0.430
<b>Très ferme</b>	0.250 – 0.330	0.330 – 0.350	0.350 – 0.370
<b>Extra sèche</b>	0.250	0.330	0.350

#### d. Détermination des proportions des matières sèches

Deux méthodes existent :

- La méthode des indices pondéraux ;
- La méthode graphique.

La méthode graphique donnant pratiquement les mêmes résultats que la méthode des indices pondéraux et ayant en plus la particularité d'être très simple, c'est cette méthode que nous proposons de développer.

Cette méthode consiste à définir les pourcentages en volumes absolus des matières sèches que sont granulats et le ciment.

- **Pourcentage en volume absolu du ciment**

C'est généralement le cahier des clauses technique particulières (CCTP) qui définit le dosage en ciment et ce compte tenu des résistances nominales du béton à 28j.

Il est en général compris entre 250 et 450 Kg /m<sup>3</sup>.

Le pourcentage en volume absolu du ciment se définit par :

$$C(\%) = X / P_c \quad (\text{Eq V.23})$$

Où :

- **C** : ciment ;
- **X** : dosage en ciment tel que prévu par CCTP ;
- **P<sub>c</sub>** : poids spécifique du ciment.

- **Pourcentage en volume absolu des granulats**

Trois cas se présentent :

**1er cas :** le diamètre maximum du sable (S) est équivalent au diamètre minimum du gravillon (G) une verticale à l'axe des abscisses et passant par le  $D_{max}$  du sable et le  $D_{min}$  du gravillon coupe la courbe de référence au point M.

(100-M) représente le pourcentage en volume absolu du gravillon. Le point (M) représente le pourcentage en volume absolu du sable et du ciment

**2eme cas :** les courbes granulométriques du sable et du gravillon se chevauchent.

Une verticale à l'axe des abscisses est tracée de façon à ce qu'elle coupe la courbe du sable à un point qui représente un (%) de refus équivalent au tamisât du point de coupure de la courbe du gravillon.

Cette verticale coupe la courbe de référence au point M. (100-M) représente le pourcentage en volume absolu du gravillon. Le point M représente le pourcentage en volume absolu du sable et du ciment.

**3eme cas :** les courbes granulométriques du sable et du gravillon sont discontinues.  $d_0$  étant le diamètre max du sable et  $d_2$  le diamètre min du gravillon, on tracera une verticale  $d_1$  à l'axe des abscisses de telle sorte que  $d_1 = d_0 + \frac{d_2}{2}$ .

Cette verticale  $d_2$  coupe la courbe de référence au point M.

(100-M) représente le pourcentage en volume absolu du gravillon

Le point M représente le pourcentage en sable et en ciment.

Lorsque le béton à étudier est composé de plusieurs granulats, la procédure sera répétitive.

- **Calcul des volumes absolus des matières sèches**

Le volume absolu des matières sèches correspond au :

(Volume total du béton) – (volume d'eau de gâchage qui correspond au volume des vides).

Le volume total du béton pris en compte dans les calculs est égal à 1000 litres

- **volume absolu du ciment:** (Pourcentage en volume absolu du ciment) × (Volume absolu des matières sèches).

- **volume absolu du sable :** (Pourcentage en volume absolu du sable) × (Volume absolu des matières sèches).

- **volume absolu du gravillon :** (Pourcentage en volume absolu du gravillon) × (Volume absolu des matières sèches).

- **Calcul des masses de matières sèches**

Masse de ciment= (volume absolu) x (poids spécifique) ;

Masse de sable= (volume absolu) x (poids spécifique) ;

Masse de gravillon= (volume absolu) x (poids spécifique).

- **Le Traçage de la courbe du mélange**

La courbe du mélange est déterminée de la façon suivante :

**Gravillon** : on multiplie le pourcentage en volume absolu du gravillon par les pourcentages des tamis successifs obtenus lors de l'analyse granulométrique.

**Sable** : idem.

**Ciment** : le pourcentage en volume absolu du ciment est identique pour toutes les ouvertures de tamis.

La courbe du mélange correspond à la somme des pourcentages de chaque constituant obtenue au niveau de chaque ouverture de tamis.

### V.3 Conclusion

Nous avons introduit diverses méthodes de formulation spécifiques qui existent et sont couramment utilisées dans de nombreux pays du monde. Sur la base de la formule du modèle qui associe la structure interne aux attributs d'utilisation spécifiques, la composition optimale peut être déterminée tout en satisfaisant les conditions spécifiées dans la spécification. En fait, lors de la formulation du béton, l'ouvrabilité et la résistance mécanique doivent d'abord être développées. Les différentes méthodes de formulation que nous avons citées ont un point commun: elles utilisent une simple séquence d'étapes basée sur l'expérience personnelle. Enfin, le choix de la formule concrète doit être basé sur les calculs préliminaires mentionnés ci-dessus, puis plusieurs lots d'essais doivent être effectués. Cependant, l'application réussie de la formulation demande de l'expérience, combinée à une connaissance de l'influence des nombreux paramètres sur les propriétés du béton, cette connaissance doit être fondée sur la compréhension du comportement du béton. Lorsque ces trois éléments, expérience, connaissances et compréhension sont tous présents.

Pour notre formulation, nous avons utilisé la méthode de Faury adopté par le laboratoire de travaux publics (LTPO) dans lequel nous avons mené notre étude expérimentale.

# Chapitre VI

## Les essais sur béton

## VI.1 Introduction

Sur le mélange du béton ordinaire (constitué de ciment, des granulats et l'eau), nous avons procédé à l'ajout d'adjuvant **Superplastifiant Haut Reducteur d'eau MasterEase 3666**, dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment.

Les modes opératoires et les méthodes d'essais de caractérisation des constituants décrits dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

Les différentes manipulations utilisées pour la caractérisation du ciment, et des granulats sont effectuées au niveau de Laboratoire L.T.P.O Tiaret.

## VI.2 Matériaux utilisés

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

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

### VI.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland au calcaire de la marque **AWTED** de type **NA 442-CEM II/A-L 42.5 N Conforme à la 442** en provenance de la cimenterie de **AMOUDA CIMENT** qui est installée à 20 km de Gueltet Sidi Saad- El Beidha, Wilaya de Laghouat, cet usine fonctionne par voie sèche, avec une capacité nominale de 2 millions de tonnes de clinker par an.



**Figure VI.1** : Ciment utilisé de type C.P.J CEM II/A-L 42.5Nde marque AWTED (Laghouat)

### VI.2.2 Les Granulats (NF P 18-541)

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

Les granulats  $d/D$  peuvent avoir des dimensions comprises entre les extrêmes  $0.63d$  et  $2 D$ . Ils interviennent par leur masse, leur état de surface, leur propreté, leur forme, leur courbe granulométrique, leur résistance....etc.



Figure VI.2 : Granulats utilisés

Les graviers utilisés dans la confection des bétons de classes (3/8) et (8/15) sont d'origine Dolomitique et proviennent de la carrière de « **Ben Brahim** » sise à **Rechaiga** située dans la région Sud de Tiaret. Tandis que les sables de classe (0/5) sont d'origine calcaire de rivière « **Guelta** ».

### VI.2.3 L'eau de gâchage

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

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

**Tableau VI.1** : Composition chimique d'eau de gâchage (mg/l)

	(SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	CO <sub>2</sub>	Cl	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	pH	Mg <sup>+2</sup>
<b>Eau de gâchage utilisée</b>	980	70	798.75	40	05	2000

### VI.3 Les différents essais effectués au sein de laboratoire

- **Analyses physiques** : l'équivalent de sable (les impuretés), la granulométrie, la masse volumique apparente, et la masse volumique absolue ;
- **Analyses chimiques** : Valeur de bleu "bleu de méthylène", Caco3 "carbonate" ;
- **Analyses mécaniques** : Micro Deval, Essai de compression simple.

#### VI.3.1 Les analyses physiques

##### VI.3.1.1 Essai d'équivalent de sable (NF P18-598)

###### a. Définition

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

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

###### b. Principe de l'essai

L'essai de ES consisté à déterminer la propreté d'un sable de la fraction 0/5. La propreté désigne d'une part la teneur en fine argileuse ou autre particule adhérentes à la surface des grains d'autre part les impuretés susceptibles nuire à la qualité de béton parmi les quelles on peut situer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments des racines on mesure les éléments suivants :

**Hauteur h<sub>1</sub>** : sable propre + éléments fins ;

**Hauteur h<sub>2</sub>** : sable propre seulement.

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

$$ES = \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \times 100 \quad (\text{Eq IV.1})$$

Selon que la hauteur  $h_2$  est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine **ES<sub>v</sub>** (Equivalent de sable visuel) ou **ES<sub>p</sub>** (Equivalent de sable au piston).

### c. Appareillage

- Tamis de 5mm d'ouverture de mailles avec fond ;
- Bac pour tamisage;
- Balance électrique;
- Chronomètre;
- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique ;
- Une machine d'agitation électrique capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal rectiligne ;
- Une règle graduée;
- Éprouvettes cylindriques et transparentes en matière plastique ;
- Un piston taré, constitué par :
  - Une tige de 440 mm de longueur ;
  - Une embase de 25 mm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige.



**Figure VI.3** : Machine d'agitation électrique



**Figure VI.4** : Piston taré

**d. Mode opératoire**

Nous avons suivi les instructions suivantes :

- Tamiser une quantité de sable sur un tamis de 5mm (une masse de 500g), prendre une pesée de 120g ;
- Remplir l'éprouvette de solution lavante jusqu'au 1<sup>er</sup> repère;
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminer toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon;
- Laisser reposer pendant 10 minutes;
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc, et la fixer sur la machine.
- Faire subir à l'éprouvette 90 cycles en 30 s;
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table;
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavante au-dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de celle-ci;
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter le niveau du liquide au trait repère supérieur;
- Arrêter l'écoulement;
- Laisser reposer pendant 20 min avant la lecture;
- Mesure de la hauteur de sable  $h_2$  et de la hauteur  $h_1$  de l'ensemble (sable +floculat);
- Mesure de la hauteur de sable  $h'_2$  au piston.

$$ESp = \left( \frac{h'_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (\text{Eq VI.2})$$



Figure VI.5 : Procédure de l'essai d'équivalent de sable

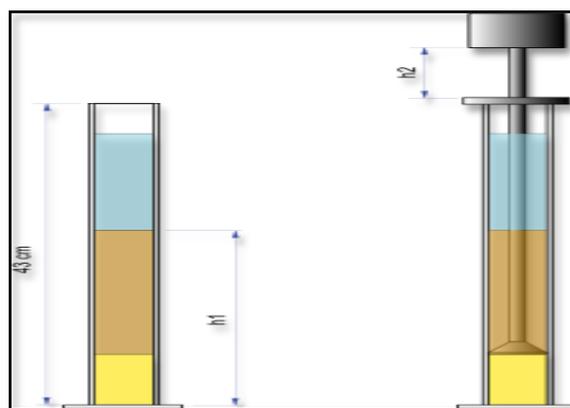


Figure VI.6 : Mesure de ES

**Nota:** voici en ce qui suit quelques valeurs de l'équivalent de sable :

**Tableau VI.2:** Valeurs de l'ES

ES <sub>v</sub>	ES <sub>p</sub>	Nature et qualité
ES <sub>v</sub> < 65	ES <sub>p</sub> < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES <sub>v</sub> < 75	60 ≤ ES <sub>p</sub> < 70	Sable légèrement argileux e propreté admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES <sub>v</sub> < 80	70 ≤ ES <sub>p</sub> < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
ES <sub>v</sub> ≥ 85	ES <sub>p</sub> ≥ 80	Sable très propre : l'absence de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton.

**La solution lavante:** permet de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation .sa composition est la suivante :

- 110g de chlorure de calcium anhydre ;
- 10 ml de la solution de formaldéhyde ;
- 384 ml de glycerol;
- Compléter avec l'eau distillée à 1 L (cette solution lavante est concentré. Elle est valide un an).



**Figure VI.7 :** Composants de la solution lavante

- Pour l'essai on utilise la solution lavante diluée.

Pour chaque litre de solution de lavante diluée, ajoutez 75 ml d'eau distillée à chaque 25 ml de solution de lavante concentrée (Elle est valide 28 jours).



**Figure VI.8 :** Bonbonne de la solution lavante

### VI.3.1.2 La propreté superficielle des graviers (NF P18-591)

#### a. Définition et But de l'essai.

A l'instar de ce qui se pratique pour les sables, les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons.

#### b. Principe

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

#### c. Matériel utilisé

- Tamis de maille 0.5 mm;
- Un sceau d'eau.

#### d. Mode opératoire

- Peser un kg de gravier soit M et le placer dans le tamis ;
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire ;
- Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et le mettre à l'étuve à 105°C puis peser la nouvelle masse, soit Ms.

Calculer la propreté :

$$P(\%) = \frac{M - M_s}{M} \times 100 \quad (\text{Eq VI.3})$$

Le gravier est propre si  $P$  (quantité d'éléments fins)  $\leq 5\%$ .

### VI.3.1.3 Essai d'analyse granulométrique par tamisage (NA 2607) 1992-08-01

#### a. Définition

C'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon.

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

#### b. 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.

#### c. Principe de l'essai

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

#### d. Matériel nécessaire

- Une série des tamis;
- Une balance électrique.



**Figure VI.9:** Séries des tamis



**Figure VI.10 :** Balance électrique

#### e. Mode opératoire

- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis ;
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne ;
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur ;
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur, ajouter le refus obtenu à  $R_1$  et peser l'ensemble, soit  $R_2$  ;
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés  $R_1, R_2, R_3 \dots R_n$  ;
- Peser s'il y'en a, le tamisât au dernier tamis soit  $T_n$  sa masse.

Les masses des différents refus cumulés  $R_i$  sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec  $M_S$  et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus :

$$(\%) \text{Refus cumulé} = \left( \frac{R_i}{M_S} \right) \times 100 \quad (\text{Eq VI. 4})$$

Les pourcentages des tamisâtes correspondants sont :

$$(\%) \text{tamisât cumulés} = \left( 100 \times \left( \frac{R_i}{M_S} \right) - 100 \right) \quad (\text{Eq VI. 5})$$



**Figure VI.11:**Essai d'analyse granulométrique

#### VI.3.1.4 Module de finesse (NF P18-540)

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (Mf). Celui-ci est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons. Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin, et un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulé en \% des tamis } \{5 - 0.1\} \quad (\text{Eq IV.6})$$

**Tableau VI.3 :** Les valeurs de module de finesse

Module de finesse	Qualité du sable
Mf > 3.2	Le sable est à rejeter. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons
Mf entre 2.8 et 3.2	Le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
<b>Mf entre 2.2 et 2.8</b>	Le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités
Mf entre 1.8 et 2.2	Le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance

**VI.3.1.5 Mesure du coefficient d'aplatissement (NA. 255/1990)****a. Définition**

La forme du gravier est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus CA est élevé, plus le gravier contient d'éléments plats. Une mauvaise forme (aiguilles, plats) à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation et la dégradation. La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur L ;
- L'épaisseur E ;
- La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat. Le coefficient d'aplatissement CA d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation :  $\frac{G}{E} > 1.58$

**b. Matériel utilisé**

- Les grilles en fente ;
- Une balance électrique.



**Figure VI.12 : Grilles en fente**

**c. Mode opératoire**

- Tamiser sur les tamis à mailles carrées conformément au principe de l'analyse granulométrique par tamisage ;
- Récupérer les différentes fractions d/D pour chaque classe au gramme près ;
- Tamiser chaque classe granulaire sur les grilles à fentes selon le tableau suivant :

Classe granulaire d/D	écartement
31.5 -40	20
25 -31.5	16
20 - 25	12.5
16 - 20	10
12.5 - 16	8
10 -12.5	6.3
8-10	5
6.3-8	4
5-6.3	3.15
4-5	2.5

**Me:** Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante.

**Mg:** Masse de chaque classe granulaire d/D en grammes.  $M = \sum Mg < M0$ .

Coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire:

$$CA = \frac{Me}{Mg} \times 100 \quad (\text{Eq VI. 7})$$

Coefficient d'aplatissement globale est donnée par :

$$CA = \sum \frac{Me}{Mg} \times 100 \quad (\text{Eq VI. 8})$$

### VI.3.1.6 La masse volumique apparente (NF 18-555)

#### a. Définition

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

**b. Matériel utilisé**

- Une balance;
- Un récipient avec un volume de 1 Litre ;
- Une règle à araser.

**c. Mode opératoire**

- Prendre une masse de l'échantillon ;
- Peser le récipient vide  $M_1$ ;
- Remplir le récipient avec du matériau ;
- Araser le récipient avec la règle ;
- Peser le récipient avec le matériau  $M_2$ .

**a. Ciment****b. Sable****c. Gravier 3/8 et 8/15**

**Figure VI.13:** Détermination des masses volumiques

La masse volumique apparente est déterminée par la formule :

$$M_{vapp} = \frac{(M2 - M1)}{V} \quad (\text{Eq VI.9})$$

Avec :

- **M1** : Le poids du récipient vide ;
- **M2** : Le poids du récipient avec le matériau ;
- **V** : le volume du récipient. ( $V=1\text{litre}=1000\text{cm}^3$ ).

Le mode opératoire est le même que celui utilisé pour le sable et aussi pour le gravier sauf que le **V** de récipient  $V=2L= 2000 \text{ cm}^3$ .

### VI.3.1.7 La masse volumique absolue (NA 255/1990)

#### a. Définition

La masse volumique réelle imbibée est définie comme le quotient de la masse de l'échantillon imbibé par le volume qu'il occupe (volume réel).

#### b. Matériel utilisé

- Pycnomètre;
- L'eau distillée;
- Balance électrique.

#### c. Mode Opératoire

- Peser le pycnomètre+bouchon soit M1 ;
- On prend 50g de la prise d'essai (Le passant du tamis 2mm) et on l'ajoute dans le pycnomètre. La masse du pycnomètre, la masse du bouchon et la masse de la prise d'essai soit M2 ;
- Après on ajoute l'eau distillée dans le pycnomètre jusqu'à repère ;
- Placer le bouchon, le pycnomètre est séché, laisser se stabiliser pendant 30 min et pesé soit M3 ;
- Pycnomètre vide, nettoyé est rempli d'eau distillée jusqu'au repère, l'ensemble est pesé soit M4.

a. Ciment



b. Sable



Figure VI.14 : Détermination des masses volumiques absolues

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

$$M_{vabs} = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \quad (\text{Eq VI.10})$$

- **M1** : Poids de pycnomètre + bouchon ;
- **M2** : Poids de pycnomètre + matériau + bouchon ;
- **M3** : Poids pycnomètre + eau distillée+ matériau ;
- **M4** : Poids pycnomètre + eau distillée.

**VI.3.1.8 Mesure de masses volumique des gravillons (NA.255/1990)****a. Mode opératoire****Détermination de la masse de l'échantillon et sa teneur en eau**

- Peser l'échantillon au gramme près : soit  $M_s$  sa masse ;
- Soit  $M_g$  la masse de l'échantillon sèche sans lavage préalable.

**Détermination dans l'air de la masse sèche de l'échantillon**

- Laver l'échantillon sur le tamis 4 mm ;
- Sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à la masse constante ;
- Peser l'échantillon soit  $M_s$  sa masse.

**Détermination de la masse de l'échantillon dans l'eau:**

- Soit  $M_a$  sa masse ;
- Mettre l'échantillon imbibé dans le panier en toile, le suspendre au fléau de la balance ;
- L'immerger dans l'eau à 20°C à l'aide du récipient prévu à cet effet, agiter le panier afin d'éliminer toute présence de bulles d'air avant la pesée ;
- Peser l'échantillon dans l'eau soit  $M_{sa}$  sa masse.

La masse volumique réelle est déterminée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M_s}{(M_s - M_a)} \quad (\text{Eq VI.11})$$

**VI. 3.2 Analyses chimiques****VI.3.2.1 Essai de bleu de méthylène « valeur de bleu » (NF P 18-592)****a. Définition**

L'essai au bleu de méthylène dit « à la tâche » permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon.

**b. Principe de l'essai**

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure une goutte de suspension est prélevée et déposée sur un papier filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

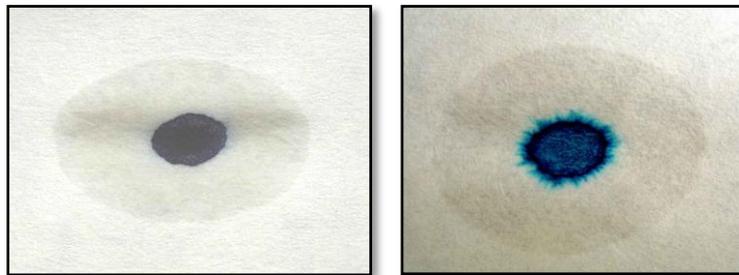
**c. Matériel utilisé**

- Un agitateur mécanique;
- Papier filter ;
- Une balance ;
- Chronomètre ;
- Une burette ;
- La solution bleue de méthylène ;
- Tige en verre.

**Figure VI.15 : Agitateur mécanique****Figure VI.16:**Papier  
filtre**Figure VI.17 : Solution**  
bleu de méthylène**d. Mode Opérateur**

- Préparation de la solution de bleu ;
- Préparation de l'échantillon de sable 0/2 ;
- Masse de l'échantillon à laver Mh ;
- Préparation de la prise d'essai 300 g ;
- Mettre la prise d'essai dans le bac de plastique ;
- Ajouter 100ml d'eaudistillée;

- Agiter;
- Laver la prise d'essai du sable (300 g) sur le tamis 80 $\mu$ m avec l'eau distillé au-dessus d'un bécher de 3 L ;
- Rince;
- Sécher le refus et peser ;
- Agiter la solution du bécher à V 700tr/mn pendant 5 min ;
- Régler la vitesse à V 450tr/mn ;
- Procéder à l'essai de la tâche ;
- Verser dans la suspension un vol.de bleu 5cm<sup>3</sup> < V < 10cm<sup>3</sup> ;
- Mesurer le diamètre de la tâche ;
- Contrôle de la tache Positif / Négatif ;



**Figure VI.18** : Test négatif      **Figure VI.19**: Test positif

- **Négatif**: Injecter jusqu'au l'apparition de l'auréole, noter le volume de bleu.
- **Positif**: Effectuer des essais de minute en minute.





**Figure VI. 20:** Procédure d'essai de VB

Calculer la valeur de bleu :

$$VB = \frac{V}{m} \quad (\text{Eq VI.12})$$

- **V**: Volume de bleu méthylène versé ;
- **m**: La masse des tamis inférieurs de tamis 80  $\mu\text{m}$  (300-  $m_s$ ) .

**Spécification** :  $VB < 0.1$ .

### VI.3.2.2 Essai de la teneur en carbonate «Calcimètre» (NF P 94-048)

#### a. Définition

Cet essai détermine le pourcentage de la fraction carbonatée contenue dans un matériau.

#### b. Principe

Détermination volumétrique d'oxyde de Carbone ( $\text{CO}_2$ ) dégagé sous l'action d'un acide fort à la température ambiante (du laboratoire) par l'échantillon préparé pour l'essai.

#### c. Matériel nécessaire

- Une balance électrique;
- Tamis d'ouverture de maille 0.2 mm ;
- Fiole cornique munie d'un dispositif à trois voies ;
- Tube à Ford plat, de capacité minimale 10ml ;
- Calcimètre à tube gradué de 100 ml.

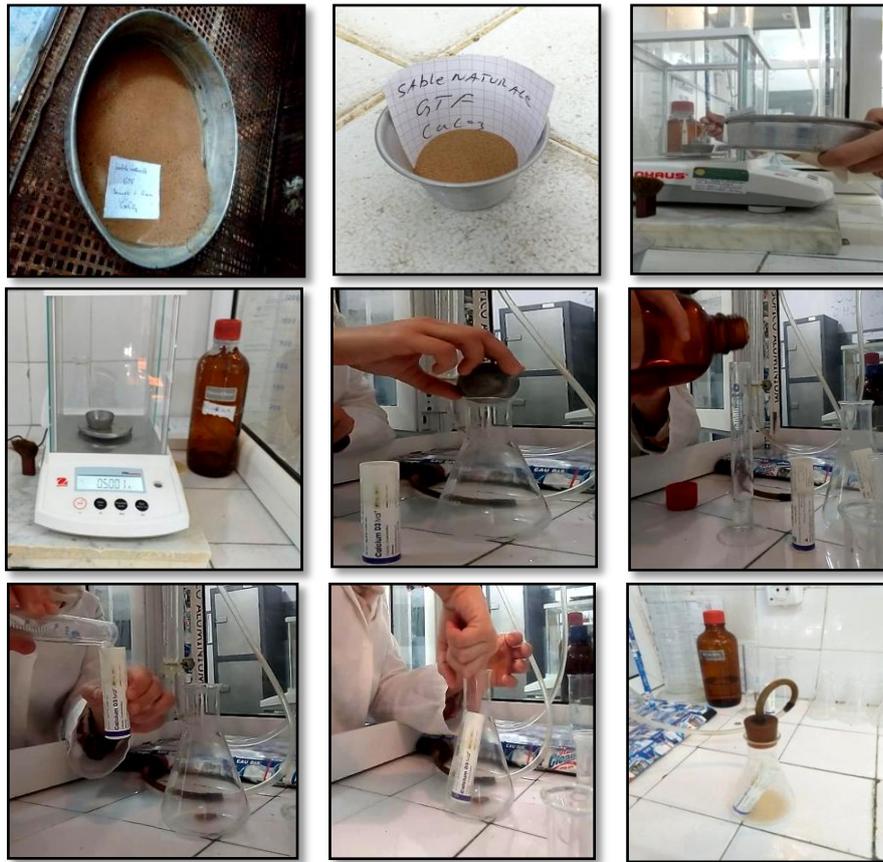


Figure VI. 21: Calcimètre

#### d. Mode Opérateur

- Prélever une masse  $m$  de l'échantillon ;
- Broyer l'échantillon;
- Passer tout l'échantillon par des ouvertures du tamis 0.2mm ;
- Verser la masse  $m_1=0.5g$  dans la fiole ;
- Introduire le tube contenant un Volume de 10ml d'acide chlorhydrique ;
- Relier la fiole au calcimètre ;
- Equilibrer les pressions au zéro de la colonne ;
- Verser l'acide Hcl contenu dans le tube sur la masse  $m_1$  ;
- Agiter énergiquement la fiole;
- Suivre et équilibrer en permanence le niveau d'eau distillé de la colonne et celui de l'ampoule jusqu'à la stabilisation de dégagement gazeux ;
- Prélever le volume  $V$  de gaz dégagé ( $CO_2$ ).

## a. Pour le sable



## b. Pour le gravier 3/8 et 8/15 :



Figure VI.22 : procédure d'essai de carbonates

- Déterminer la proportion de  $\text{CaCO}_3$  correspondant au volume de gaz  $\text{CO}_2$  libéré du tableau mentionné dans le chapitre suivant.

### VI.3.3 Les analyses mécaniques

#### VI.3.3.1 Essai de l'usure Micro-Deval (NFP 18-572)

##### a. Définition

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

**Spécification** : MDE < 25%

##### b. But de l'essai

L'essai Micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des roches. Cette résistance à l'usure pour certaines roches n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

##### c. Matériel utilisé

- La machine Micro-Deval;
- Charge abrasive;
- Un jeu de tamis de 1,6- 4-6,3-10-14.



**Figure VI.23** : Machine de l'essai Micro-Deval



**Figure VI.24** : Charge abrasive

##### d. Mode Opérateur

- Verser le matériau (3/8) ou (8/15) dans les tamis :  
Gravier (8/15) : (10-14) Ou (6.3-10) ;  
Gravier (3/8) : (4-6.3) ;
- On prend 500g de matériau quel que soit la fraction du matériau (3/8) et (8/15) ;
- Introduire la prise d'essai dans les deux cylindres ;
- Introduire la charge abrasive dans le cylindre selon la classe granulaire choisiesuivant le tableau :

Classe granulaire	Charge abrasive (g)
4 – 6,3	2000 ± 5
6,3 – 10	4000 ± 5
10 – 14	5000 ± 5

- Pour l'essai en présence d'eau, on ajoute 2.5 L d'eau ;
- Remettre le couvercle du cylindre ;
- Mettre le cylindre en rotation à une vitesse de  $100 \pm 5$  tr/ min pendant 2 heures soit 12000 tours ;
- Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en évitant les pertes ;
- Tamiser le matériau sur un tamis 1.6 mm, la charge abrasive est retenue par un tamis de 8 mm ;
- Laver l'ensemble sous un jet ;
- Retirer la charge abrasive;
- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante ;
- Peser le refus au gramme près. « m ».



**Figure VI.25** : Procédure de l'essai Micro-Deval

Le coefficient Micro–Deval est donné par le rapport :

$$\text{MDE} = \frac{m}{500} \times 100 \quad (\text{Eq VI. 13})$$

Ou :

$m = 500 - m'$  : est la masse sèche de la fraction du matériau passant après tamisât à 1,6 mm

Le coefficient Micro–Deval :

$$\text{MDE} = \frac{100 \times (500 - m')}{500} \quad (\text{Eq VI. 14})$$

## VI.4. L'adjuvant

### VI.4.1 Description

MasterEase 3666 est un mélange unique et polyvalent conçu pour conférer des propriétés rhéologiques exceptionnelles en réduisant la viscosité et la limite d'élasticité du béton frais.

#### Concept de béton à faible viscosité :

MasterEase 3666 facilite le mélange et la décharge rapide du béton. Il améliore considérablement la pompabilité du béton. En réduisant les pressions de pompage. Cet adjuvant facilite également le placement et la finition du béton.

MasterEase 3666 est conforme à la norme EN206-1 et AS 1478.1-2000 pour béton.

### VI.4.2 Innovation

MasterEase 3666 est basé sur une technologie de polymères innovante et brevetée développée par BASF. Son action diffère des polymères traditionnels dans la mesure où l'adsorption de MasterEase 3666 sur les particules de liant est assurée par une liaison chimique qui ne gêne pas l'écoulement du béton. Cette innovation améliore considérablement le comportement rhéologique du béton traité avec MaterEase 3666, Ce qui se traduit par une viscosité et une limite d'élasticité inférieure, associées à une meilleure rétention de la maniabilité.

### VI.4.3 Recommandation d'usage

MasterEase 3666 est recommandé pour :

- Béton pré-à- l'emploi;
- Béton autoplaçants;
- Béton préfabriqué et précontraint;
- Béton auto-compactant et pour un long maintien de rhéologie ;
- Béton à hautesrésistance;
- Béton à Haute Performance;
- Béton projeté;
- Mélanges contenant des sables manufacturés, des scories, des fumées de silice, des fibres synthétiques de type MasterFiber.

### VI.4.4 Caractéristiques et Avantages

- Mélange plus rapide du béton dans les procédés de dosage sec et humide ;
- Décharge plus rapide des camions agitateurs, mélangeurs centraux, croquettes et goulottes ;
- Réduit la pression de pompage pour les applications horizontales et verticales ;
- Bonne réponse aux vibrations et au compactage ;
- Facilite de mise en place et de finition du béton ;
- Finition de surface améliorée;
- Durabilité accrue;
- Atteint une réduction d'eau d'environ 28% au débit de dose nominal ;
- Compatible avec tous les types de liants, ciments et additifs minéraux.

### VI.4.5 Propriétés

<b>Couleur</b>	Jaune Brun
<b>Gravité spécifique</b>	1,060 +/- 0,03
<b>PH</b>	4,5 - 6,5

### VI.4.6 Application

MasterEase 3666 est un adjuvant liquide prêt à l'emploi pouvant être ajouté au mélange de béton en tant que composant séparé avec l'eau du lot initial cependant, une performance optimale est obtenue si MasterEase 3666 est distribué dans le béton après l'ajout de 50 à 70% de l'eau de mélange. Evitez d'ajouter l'adjuvant aux agrégats/ciment secs. Un distributeur et une ligne d'alimentation séparés doivent être utilisés.

### VI.4.7 Dosage

Le dosage recommandé est de 0.4 à 1.6% du poids de ciment en fonction de la formulation du béton et des propriétés souhaitées.

### VI.4.8 Compatibilité :

MasterEase 3666 est compatible avec les naphthalènes-formaldéhyde sulfonés. Il peut être utilisé avec d'autres adjuvants BASF tels que MasterGlenium, MasterSure, MasterPolyheed, MasterPozzolith, MasterAir, MasterSet, MasterMatrix et MasterLife.

Il est impératif que toute combinaison d'adjuvants soit testée dans des essais contrôlés en laboratoire ou sur le terrain afin de vérifier les performances souhaitées du mélange de béton.



Figure VI.26: L'adjuvant MasterEase 3666

## VI.5 Formulation des bétons

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées s'appelle la formulation.

On a fixé le dosage du ciment à  $350 \text{ kg/m}^3$  pour les 2 types du béton.

### VI.5.1 Formulation du béton ordinaire

Une méthode simple a été utilisée pour l'élaboration du béton ordinaire, celle de « Faury », le mode opératoire est le suivant :

#### a. Tracer la courbe de mélange (la courbe de référence)

Ce n'est plus un segment de droite, mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut définir : l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

- **Origine** : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065mm. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis et sur l'axe des ordonnées le (%)des tamisâtes cumulés en volume absolu ;
- **Extrémité** : point d'abscisse  $D_{max}$  et d'ordonnée 100 ;
- **Point de brisure** : abscisse  $D_{max}/2$ , ordonnée  $Y$ .

#### b. Calcul de la dimension maximale ( $D_{max}$ )

Le point correspondant à la dimension maximale du béton ne correspond pas souvent à la dimension du plus gros grain du plus gros granulat du béton. Il est toujours inférieur et il se calcule par la formule suivante :

$$D_{max} = d_1 + (d_1 - d_2) \cdot x/y \quad (\text{Eq VI.15})$$

Avec :

- **d1** : diamètre de l'ouverture du plus grand tamis sur lequel on obtient un refus ;
- **d2** : diamètre de l'ouverture du tamis immédiatement inférieur ;
- **x** : proportion des grains retenus sur le tamis correspondant à  $d_1$  ;
- **y** : proportion des grains retenus entre  $d_1$  et  $d_2$ .

#### c. Calcul de l'ordonnée ( $Y$ )

Formule de l'ordonnée :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}} \quad (\text{Eq VI.16})$$

Avec :

**A** : constante traduisant la maniabilité du béton (voir tableau IV.4).

Tableau VI. 4: Valeurs de la consistance A

Qualité du béton	Sable roulé et gravier roulé	Sable roulé et gravier concassé	Sable concassé et gravier concassé
Très fluide	32	34	38
Fluide	30 – 32	32 – 34	36 – 38
Mou	28 – 30	30 – 32	34 – 36
Ferme	26 – 28	28 – 30	32 – 34
Très ferme	24 – 26	26 - 28	30 – 32
Puissant	22 - 24	24 - 26	28-30

#### d. Calcul de l'indice des vides I

Approximativement, on considère que la quantité d'eau de gâchage est égale au volume des intervalles compris entre les grains du béton. Cette quantité d'eau de gâchage exprimée par la valeur de l'indice des vides I se détermine par la formule suivante :

Avec effet de paroi :

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} + \frac{K'}{(R + D) - 0.75} \quad (\text{Eq VI. 17})$$

En masse indéfinie : voir (EqV.22)

Avec :

- **K** : les valeurs usuelles sont données par le tableau V.8;
- **K'** : coefficient qui dépend de la puissance de serrage ;
- **D<sub>max</sub>** : dimension maximale du béton ;
- **R** : rayon moyen de moule.

#### e. Calcul du volume des matériaux secs

Dans un m<sup>3</sup> de béton, on a un volume absolu total de constituants solides égales à :

$$V_{MS} = 1000 - I \quad (\text{Eq VI.18})$$

- **Volume absolue de ciment**

$$V_{AC} = \frac{\text{dosage en ciment}}{\text{masse volumique absolue de ciment}} \quad (\text{Eq VI. 19})$$

- **Le % du volume absolu du ciment**

Le pourcentage en volume absolue du ciment se définit par :

$$V_{AC} \% = \frac{\text{volume absolu du ciment}}{\text{volume des matériaux secs}} \quad (\text{Eq VI.20})$$

- **Le % en volume absolu des granulats**

Les volumes de sable, et gravier sont déterminés à partir de la courbe granulométrique et la méthode verticale de Joisel. En utilisant ces formules, nous avons obtenus les résultats mentionnés dans l'**annexe III** (formulation du béton ordinaire).

### VI.5.2 Formulation du Béton avec adjuvant BA

La méthode utilisée pour la formulation du BA est la même utilisée pour le BO, donc nous avons obtenus des résultats (voir l'annexe III, formulation du BA). Les six composants du BA sont : graviers + sable + ciment + eau + adjuvant.

Dans le cadre de notre étude le dosage en superplastifiant est de 1.2% du poids du ciment.

### VI.5.3 Confection des bétons ordinaires (BO) et bétons avec adjuvant (BA)

La méthode de Faury a pour but de définir les quantités des différents composants à introduire dans le malaxeur.



**Figure VI.27:** Préparation des ingrédients secs pour la confection des mélanges de béton (BO, BA) (Annexe IV)

### VI.5.4 Malaxage du béton

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

- Préparer les moules nécessaires pour les différents essais, vérifier leur nombre et qu'ils sont bien graissés afin de faciliter par suite le décoffrage ;
- Vérifier que tout le matériel est à disposition et que les matériaux sont bien séchés ;
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour le gâchée. Pour la confection du BA

le superplastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage ;

- Verser les constituants dans la cuve : d'abord les gravillons, puis le sable et le ciment.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 3 à 5 minutes ;
- Ajouter l'eau pendant le malaxeur en marche ;
- Pour le BA, laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première moitié d'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) et mélange, introduire ensuite la partie restante d'eau ;
- Malaxer pendant 2 min.



**Figure VI.28:**Préparation des éprouvettes de béton (lubrification des moules)

Effectuer immédiatement l'essai (essai d'affaissement) pour déterminer l'ouvrabilité estimé du béton frais.



**Figure VI.29 :** Essai de l'affaissement (Annexe IV)

Le cycle de fabrication que nous avons suivi est défini comme suit :

**a. Introduction dans le malaxeur**

- Gravier 8-15 mm;
- Gravier 3-8 mm;
- Le sable;
- Le ciment;
- L'adjuvant.



**Figure VI.30:** Préparations des ingrédients liquides



**Figure VI.31:** Malaxage du béton réalisé

**b. Remplissage des moules et mode de mise en place**

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

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

Les bétons réalisés dans cette étude, ont été mis dans des moules cylindriques (16x32) cm par piquage, ces dernières sont remplies selon le nombre de 03 couches

nécessaires, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide d'une tige en acier de 16mm de diamètre, sont ensuite vibrée verticalement pendant 30 secondes.



**Figure VI.32:** Remplissage des moules (16x32) cm

**c. Conservation avant démoulage**



**Figure VI.33 :** Eprouvettes avant démoulage



**Figure VI.34:** Eprouvette après démoulage

**d. Conservation après démoulage**

Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. Elles sont conservées dans l'eau à une température de 20 °C.



**Figure VI.35:** Conservation des éprouvettes dans l'eau

## VI.6 Caractérisation du béton à l'état durci

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité peuvent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Chaque éprouvette réalisée a été soumise, à l'âge de 7, 14, 21 et 28 jours, à l'essai de compression simple.

### VI.6.1 Résistance en compression

La résistance en compression des bétons est mesurée sur des éprouvettes cylindrique 16x32cm. L'effort est appliqué par une presse hydraulique. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai (Figure VI.36).

#### a. Principe

Les éprouvettes cylindriques (au nombre de trois par essai), préalablement immergées sont sorties de l'eau, puis asséchées. Ensuite, on a rendu les deux extrémités des éprouvettes planes en les surfaçant au moyen du disque néoprène (produit disponible au laboratoire), les éprouvettes une fois rectifiées, sont alors centrées chacune sur la presse de chargement. Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante effectuée à la vitesse de 0,5 MPa/s.

En désignant par P, la charge maximale qui provoque la rupture et S la section, la résistance par compression est déterminée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq VI.21})$$

Avec :

- **f<sub>c</sub>** : Résistance par compression en Méga Pascal (MPa).
- **P** : Charge en Newton (N).
- **S** : Section en mm<sup>2</sup>.



**Figure VI.36 :** Machine d'essai d'écrasement



**Figure VI.37:** Chargement des éprouvettes cylindriques pour essai de compression



**Figure VI.38 :** Eprouvettes après écrasement

## VI.7 Conclusion :

Ce chapitre porte sur la présentation détaillée des différentes méthodes et techniques expérimentales de caractérisation pour une continuité de la partie théorique.

Nous avons présenté les matériaux utilisés et leurs différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques, des composantes ont été établies par des essais réalisés selon les normes connus dans le domaine de génie civil.

Après les essais sur les différents constituants, on va faire des calculs des paramètres de formulation à partir de la méthode de Faury et on va déterminer des coefficients pour obtenir la courbe des mélanges granulaires, pour choisir les quantités des granulats et d'eau pour confectionner le béton, ainsi l'essai sur le béton à la compression est décrit, dont les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

# Chapitre VII

## Résultats et interprétations

## VII.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la recherche et analysé les caractéristiques du béton ordinaire et du béton avec adjuvants.

Nous présenterons les divers résultats expérimentaux liés au test du béton témoin ordinaire (BO) et du béton avec adjuvant MasterEase3666 (BA) selon le mode opératoire mentionné dans le chapitre précédent, et analyserons et discuterons les résultats obtenus

## VII.2 Analyses physiques

### VII.2.1 Essai d'Equivalent de Sable

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons

Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

On a calculé pour chaque éprouvette,  $ES_v$  et  $ES_p$  avec une précision décimale et on retient les moyennes arrondies chacune à l'entier le plus proche.

**Tableaux VII.1** : Résultats d'équivalent de sable visuels et par piston

N d'essai	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$ES_v$ %	$ES_{vmoy.}$ %	$h'_2$ (cm)	$ES_p$ %	$ES_{pmoy.}$ %
1	13,50	8,30	77 %	76%	10,40	61%	64%
2	14,00	9,40	75%		10,50	67%	

- **Interprétation**

La lecture  $ES_v = 76\%$  indique une valeur qui est entre 70 et 80 % présente un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité, et il est bon pour la construction.

### VII.2.2 Propreté superficielle

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment.

**Tableau VII.2:** Résultats de propreté superficielle de gravier

Granulats	M (gr)	MS (gr)	M – MS	P (%)
3/8	1600	1560,70	39,30	2,46
8/15	3000	2984	16	0,53

- **Interprétation**

Le gravier utilisé est propre car la valeur de P (quantité d'éléments fins)  $\leq 5\%$ .

### VII.2.3 Analyse Granulométrique par tamisage

#### VII.2.3.1 Sable

L'essai de l'analyse granulométrique du sable analysé a fait ressortir une classe réelle (0/5) avec une courbe étalée et continue.

**Tableaux VII.3 :** Résultats d'analyse granulométrique de sable

Module	Tamis	Refus cumulés		%tamisât cumulés $100 - (100 \times \frac{R_i}{M_s})$
		Masse des refus cumulés $R_i$ (gr)	%refus cumulés $(\frac{R_i}{M_s}) \times 100$	
38	05	02	00	100
36	04	05	01	99
34	02	16	03	97
31	01	25	05	95
29	0,5	56	11	89
27	0,4	87	17	83
26	0,315	161	32	68
24	0,200	340	68	32
21	0,100	472	94	06
20	0,080	485	97	03

#### VII.2.3.2 Gravier (3/8)

Avant d'entamer l'essai de l'analyse granulométrique des graviers on a séparé les deux classes de graviers (3/8 et 8/15), l'analyse a fait, ressortir des graviers de classe réelle pour (3/8) une classe (3/8) et pour (8/15) une classe (9/14) avec des courbes étalées et continues.

Tableau VII.4 : Résultats d'analyse granulométrique de gravier (3/8)

Ouvert. Tamis (mm)	Refus cumulés		% tamisât cumulés $100 - (100 \times \frac{Ri}{M_{(3/8)}})$
	Masse des refus cumulés Ri (gr)	% refus cumulés $(\frac{Ri}{M_{(3/8)}}) \times 100$	
10	00	00	100
08	135	08	92
6,30	535	33	67
5	862	54	46
4	1219	76	24
2	1577	99	01
1	1581	99	01
0,5	1592	100	00
0,4	1598	100	00

## VII.2.3.3 Gravier (8/15)

Tableau VII.5 : Résultats d'analyse granulométrique du gravier (8/15)

Ouvert Tamis (mm)	Refus cumulés		% tamisât cumulés $100 - (100 \times \frac{Ri}{M_{(8/15)}})$
	Masse des refus cumulés Ri (gr)	% refus cumulés $(\frac{Ri}{M_{(8/15)}}) \times 100$	
20	00	00	100
16	27	01	99
12,5	830	28	72
10	2335	78	22
08	2951	98	02
6,30	2991	100	00
05	2994	100	00

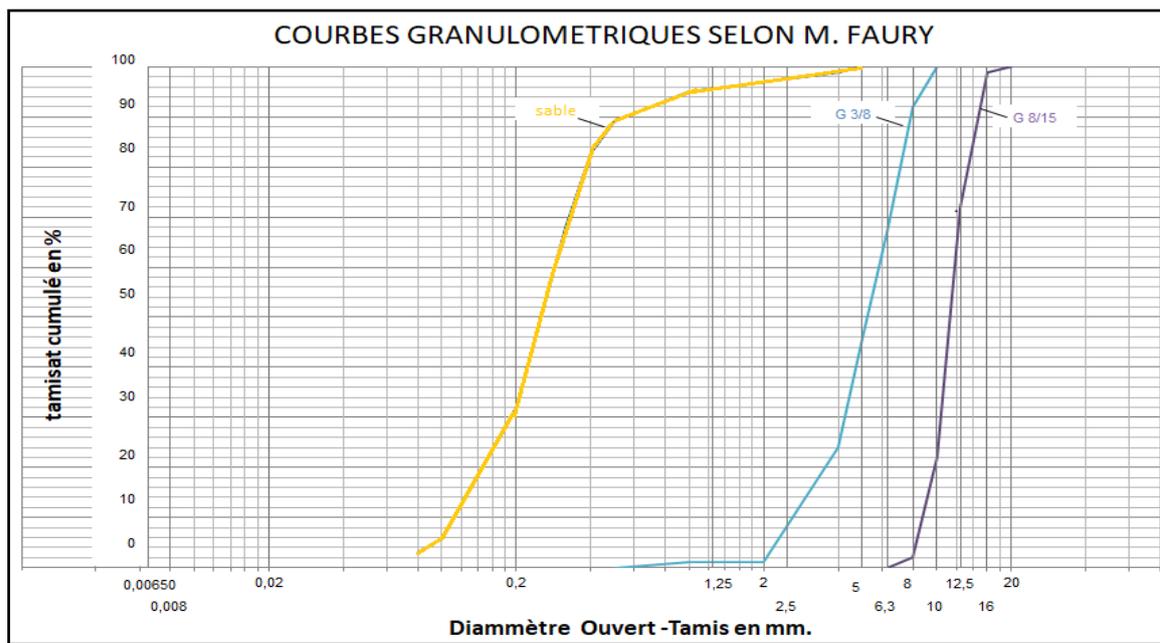


Figure VII.1: Courbe granulométrique [sable et gravier (3/8 ; 8/15)]

#### VII.2.4 Module de finesse

$\Sigma$  refus cumulé en % des tamis {5 – 0,1} = 231

$$Mf = \frac{1}{100} \times 231 = 2,31$$

- **Interprétation**

Le module de finesse est de (Mf=2,31) montre que l'échantillon de sable s'inscrit dans le fuseau de sable moyen ( $2,2 < Mf < 2,8$ ), le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités, il est propre donc admissible pour les bétons de qualité courante qu'on ne craint pas de retrait.

#### VII.2.5 Coefficient d'aplatissement CA

La mesure du coefficient d'aplatissement (CA) caractérise la forme des granulats, plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement de chaque granulométrie.

**Tableau VII.6** : Coefficient d'aplatissement de gravier (8/15)

Classe granulaire (d/D) mm	16 -20	12,5 - 16	10-12,5	8 - 10	6,3 - 8	5-6,3
Écartement	10	8	6.3	5	4	3,15
(Mg) en gr	27	803	1505	618	38	03
(Me) en gr	00	37	44	16	00	00
Coefficient d'aplatissement = $\sum \left( \frac{Me}{Mg} \right) \times 100$					CA= 3,24	

- **Interprétation**

La valeur de CA est de 3,24% < 25% ce qui confirme que notre gravier est multi-surface, il va contribuer à réduire la ségrégation et la dégradation de béton.

### VII.2.6 Essai de la masse volumique absolue et la masse volumique apparente

L'essai de la détermination de la masse volumique d'un échantillon de matériau de construction, nous permet de connaître le volume de solide contenu dans ce dernier, et lui donner une classification qui limite ses utilisations dans le domaine de la construction. Par exemple cette méthode peut nous aides à savoir les volumes exacts de sable, gravier et ciment utilises pour 01 m<sup>3</sup> de béton.

#### VII.2.6.1 La masse volumique apparente Mvapp

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau peut avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

**Tableau VII.7:** Les masses volumiques apparentes de ciment, sable (0/5) et graviers (3/8;8/15)

Les matériaux	M1 ( gr)	M2 (gr)	V (gr)	Mvapp (gr/cm <sup>3</sup> )
<b>Ciment CPJ</b>	1500,50	2550,50	1000	1,04
<b>Sable 0/5</b>	1439,90	1751,40	1000	1,44
<b>Gravier 3/8</b>	1835,60	4897,20	2000	1,531
<b>Gravier 8/15</b>	1835,60	4836,50	2000	1,500

**Interprétations**

- Pour la masse volumique apparente du ciment analysé a donné une valeur de
- $1,04 \text{ g/cm}^3$ . Cette valeur s'approche du seuil préconisé pour ce genre de ciment ( $M_{VApp}$  de  $0,80$  à  $1,30 \text{ g/cm}^3$ ) ;
- Pour la masse volumique apparente de sable utilisé est  $1,440 \text{ gr/cm}^3$  est conforme à celle de sable (théorique) qui comprise entre ( $1,40 \text{ g/cm}^3$  et  $1,80 \text{ g/cm}^3$ ) ;
- Pour la masse volumique apparente des graviers utilisés (3/8 et 8/15) est ( $1,531 \text{g/cm}^3$  et  $1,500 \text{g/cm}^3$ ), d'autre part la masse volumique apparente correspond aux granulats concassés est comprise entre ( $1,40 \text{gr/cm}^3$  et  $1,60 \text{ gr/cm}^3$ ) ;
- On constate d'autre part la bonne cohérence des valeurs de masses volumiques, ce qui conforte la validité de nos mesures.

**VII.2.6.2 La masse volumique absolue Mvabs**

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

**Tableaux VII.8:** Les masses volumiques absolues de ciment et sable

Matériaux	M1 (gr)	M2 (gr)	M3 (gr)	M4 (gr)	Mvabs (gr/cm <sup>3</sup> )
ciment	97,30	147,20	379,30	346,00	3,02
sable	97,30	147,20	377,80	347,80	2,513

**Interprétations**

- La masse volumique absolue du ciment utilisé est  $3,02 \text{ g/cm}^3$  est conforme à celle du ciment CPJ qui oscille entre  $2,90$  et  $3,15 \text{ g/cm}^3$  ;
- La masse volumique absolue de sable utilisée correspond à la masse volumique absolue des granulats qui comprise entre  $2,60$  et  $2,90 \text{ g/cm}^3$ .

**VII.2.6.3 La masse volumique des graviers 3/8 et 8/15**

La masse volumique des granulats est  $> 2 \text{ gr/cm}^3$ , indiquant des matériaux denses qui peuvent être utilisée pour le béton.

**Tableau VII.9:** Résultats de la masse volumique de gravier 3/8 et 8/15

Granulats	M1 (gr)	M2 (gr)	M2 – M1	Mg (gr/cm <sup>3</sup> )
3/8	500,10	320,10	180,00	2,77
8/15	500,60	321,80	178,80	2,79

### VII.3 Analyses chimiques

#### VII.3.1 Valeur de bleu de méthylène pour le sable

La valeur de bleu méthylène est  $0,55 \leq 1$  qui montre une très faible valeur de volume de méthylène, ce qui permet de dire que la sensibilité de la fraction argileuse du fillers est négligeable.

#### VII.3.2 Détermination de la teneur en carbonate «Calcimètre» «CaCO<sub>3</sub>»

##### VII.3.2.1 Pour le sable

Le pourcentage de calcaire dans le sable utilisé est  $5\% \leq 09\% < 12,5\%$  montre que le sable analysé est non calcaire et faiblement carbonaté.

##### VII.3.2.2 Pour les graviers (3/8) et (8/15)

Le pourcentage de calcaire dans les graviers utilisés est de  $89\% > 50\%$ , ce qui confirme la forte teneur en carbonate des graviers analysés (graviers très fortement calcaire), qui montre que ce matériau est dure et sa dégradation est faible, et donc une augmentation de la durabilité du béton.

**Tableau VII.10** : Valeurs des Ca Co<sub>3</sub>des sable, graviers (3/8 ; 8/15)

Volume de Co <sub>2</sub> (ml)	Masse de Co <sub>3</sub> (gr)	%deCaCo <sub>3</sub> dans l'échantillon
2	0,01	2
5	0,02	4
10	0,04	9
11	0,05	10
12	0,05	11
13	0,06	12
15	0,07	13
17	0,08	15
20	0,09	18
25	0,11	22
30	0,13	27
35	0,16	31
40	0,18	36
45	0,20	40
50	0,22	45
55	0,25	49
60	0,27	54
65	0,29	58
70	0,31	63
75	0,33	67
80	0,36	71
85	0,38	76
90	0,40	80
95	0,42	85
100	0,45	89
105	0,47	94
110	0,49	98

## VII.4 Analyse mécaniques

### VII.4.1 Essai de l'usure Micro-Deval (MDE)

Le coefficient mesuré d'usure est petit, alors les agrégats analysés ont une grande résistance à l'usure et par conséquent la résistance mécanique du béton augmente.

**Tableau VII.11** : Résultats de l'essai de Micro-Deval

Gravier	La valeur de Micro-Deval
3/8	4%
8/15	13%

## VII.5 Formulation de béton

Les détails de la détermination de cette formulation sont déjà montrés dans le chapitre précédent, et on a fait les calculs pour un m<sup>3</sup> de béton.

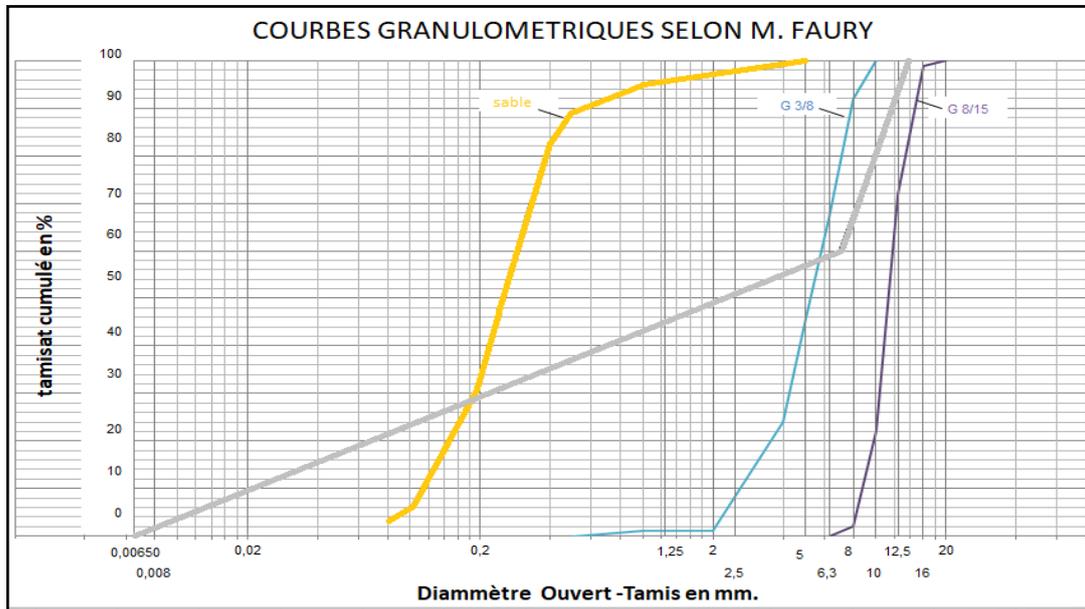


Figure VII.2 : Courbe de mélange (la courbe de référence) Méthode de Faury

### VII.5.1 Calcul de la dimension maximale (Dmax)

Nous avons extrait les valeurs à partir du tableau d'analyse granulométrique de gravier (8/15) :

$$D_{\max} = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{y} = 12,5 + (12,5 - 10) \frac{28}{50} = 13,90 \text{ mm}$$

$$\frac{D_{\max}}{2} = 6,95 \text{ mm}$$

**VII.5.2 Calcul de l'ordonné Y**

La valeur de A est donnée dans le chapitre précédent tableau VI.4 :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{\max}} = 31 + 17 \sqrt[5]{13,90} = 59,78$$

**VII.5.3 Calcul de l'indice des vides I**

La valeur de K (voir le tableau V.8)

$$I = \frac{K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} = \frac{0.300}{\sqrt[5]{13,90}} = 177L$$

**VII.5.4 Calcul du volume des matériaux secs  $V_{MS}$** 

On a calculé le volume des matériaux secs pour un  $m^3$  de béton :

$$V_{MS} = 1000 - I = 1000 - 177 = 823L$$

**VII.5.5 Volume absolue de ciment**

Le poids de ciment utilisé est 350 kg et sa masse volumique absolue est 3,1 :

$$V_{AC} = \frac{P_c}{DC} = \frac{350}{3,1} = 113 L$$

**VII.5.6 Le% du volume absolu du ciment**

$$V_{AC} \% = \frac{V_{AC}}{V_{MS}} = \frac{113}{823} = 14\%$$

**VII.5.7 Le % en volume absolu des granulats**

Les volumes des granulats sont déterminés à partir de la courbe granulométrique et la méthode verticale de Joisel.

- Le % en volume absolu de sable est  $V_s = 28 \%$
- Le % en volume absolu de gravier (3/8) est  $V_{g(3/8)} = 30\%$
- Le % en volume absolu de gravier (8/15) est  $V_{g(8/15)} = 28\%$

**VII.6 Compositions de béton**

On a calculé les valeurs des composants en masse on multipliant le volume absolu de chaque matériau par sa masse volumique absolue, et les valeurs des composants en volume, on multipliant les valeurs de composants en masse par sa masse volumique apparente.

On a fait la même méthode de calcul des composants pour le béton avec adjuvants, le dosage de superplastifiant est 1,2% de poids de ciment.

### VII.6.1 Béton ordinaire

Lorsqu'on a établi la composition des bétons frais qu'on va étudier, on a essayé de conserver trois paramètres constants. Ces paramètres sont : la quantité de gravier 3/8 et 8/15 et la quantité de sable. L'autre paramètre était déduit à l'aide du rapport E/C (pour le ciment).

**Tableau VII.12** : Composition du béton ordinaire en poids et en litres

	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable (0/5)	ciment	eau	$\frac{E}{C}$
<b>Composants</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	686	645	579	350	177	0,51
<b>Composants</b> (L/m <sup>3</sup> )	448	430	402	350	177	0,51

### VII.6.2 Béton avec adjuvant :

La composition des bétons frais avec adjuvant est la même, sauf ici, on a ajouté l'adjuvant Superplastifiant haut réducteur d'eau MasterEase3666 (1,2% de poids de ciment)

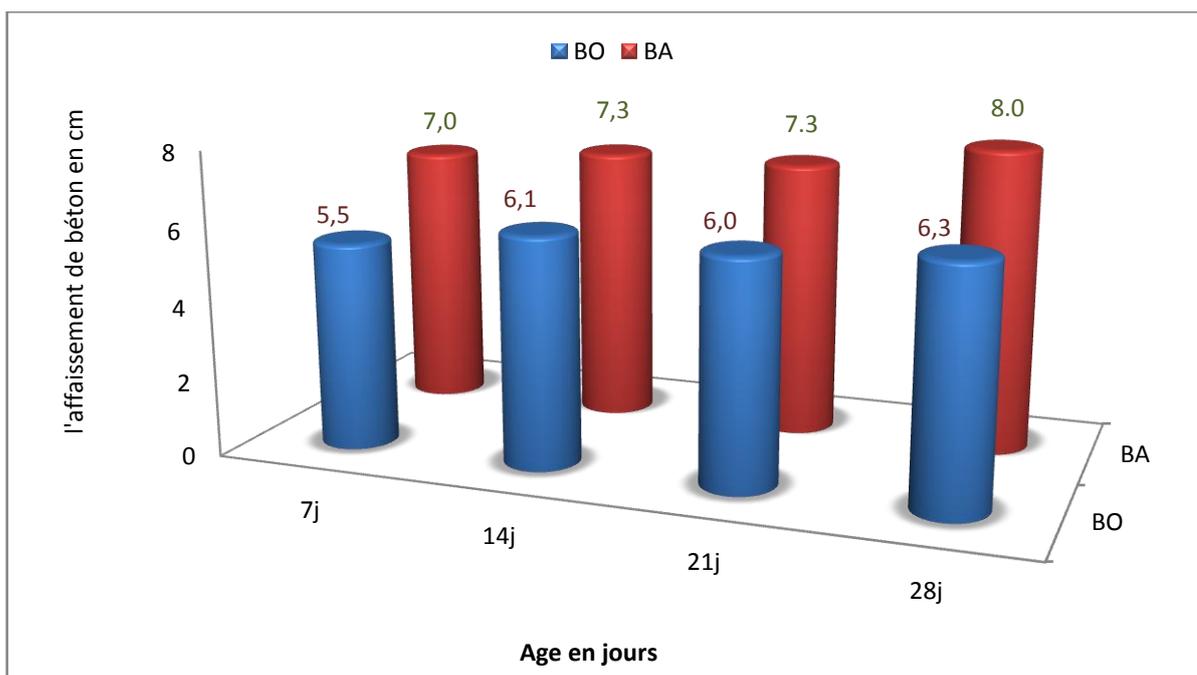
**Tableau VII.13**: Composition du béton avec adjuvant MasterEase3666 en poids et en litres

	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Sable (0/5)	ciment	Superplastifiant MasterEase 3666	Eau	$\frac{E}{C}$
<b>Composants</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	686	645	579	346	4,2	175	0,51
<b>Composants</b> (L/m <sup>3</sup> )	448	430	402	346	4,2	175	0,51

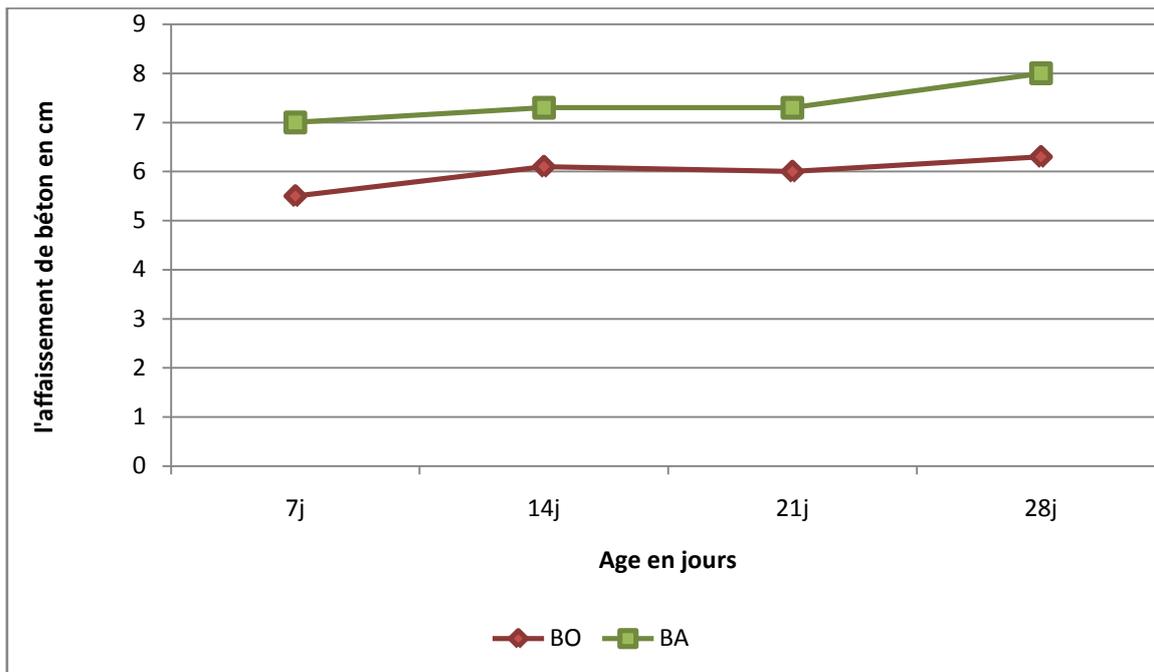
## VII.6.3 La consistance

Tableau VII.14 : Détermination de la consistance en fonction de l'affaissement

Type de béton	Age (jours)	Affaissement (cm)
BO	7	5,50
	14	6,10
	21	6,00
	28	6,30
BA	7	7,00
	14	7,30
	21	7,30
	28	8,00



**Figure VII.3:** Evolution d'affaissement en fonction du l'âge d'un béton témoin ordinaire (BO) et un béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA)



**Figure VII.4 :** L'affaissement de béton témoin ordinaire (BO) et béton avec adjuvants MASTEREASE 3666 (BA) en fonction de l'âge

#### Interprétations

- A partir du tableau VII.14 l'affaissement de notre béton est compris entre 50 et 90 mm, la consistance est comprise entre 30 et 32 (voir tableau VI.4 dans le chapitre précédent), nous observons une augmentation d'affaissement de béton avec adjuvant en fonction de temps, donc l'adjuvant modifie la consistance du béton à l'état frais, et donne un béton mou qui augmente l'affaissement de ce dernier ;
- Figure VII.4 montre le changement de l'affaissement du béton avec adjuvant MasterEase 3666 (BA) en fonction de son âge par rapport au béton. Ce qui indique que l'ajout de MasterEase 3666 affecte grandement le changement d'affaissement ;
- L'historique ci-dessus confirme les résultats obtenus précédemment [amélioration de l'affaissement du béton avec adjuvant (BA)] d'une façon proportionnelle.

### VII.7 Résistance en compression

Les éprouvettes réalisées pour les essais de compression doivent être conservées dans un bassin de conservation rempli d'eau avec une température ambiante de l'eau de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  dans la salle de conservation. Ces éprouvettes doivent être séchées avant leurs écrasements aux différents âges, afin de déterminer la résistance caractéristique exacte.

Le testeur dispose d'une unité d'acquisition de données numériques par ordinateur de 2000 KN, conçue pour effectuer des tests de compression. Lorsque la poignée est tournée dans le sens des aiguilles d'une montre, la pression est transmise au piston et la machine peut charger l'échantillon. La tige de poussée vous permet d'augmenter ou de diminuer la vitesse de chargement.

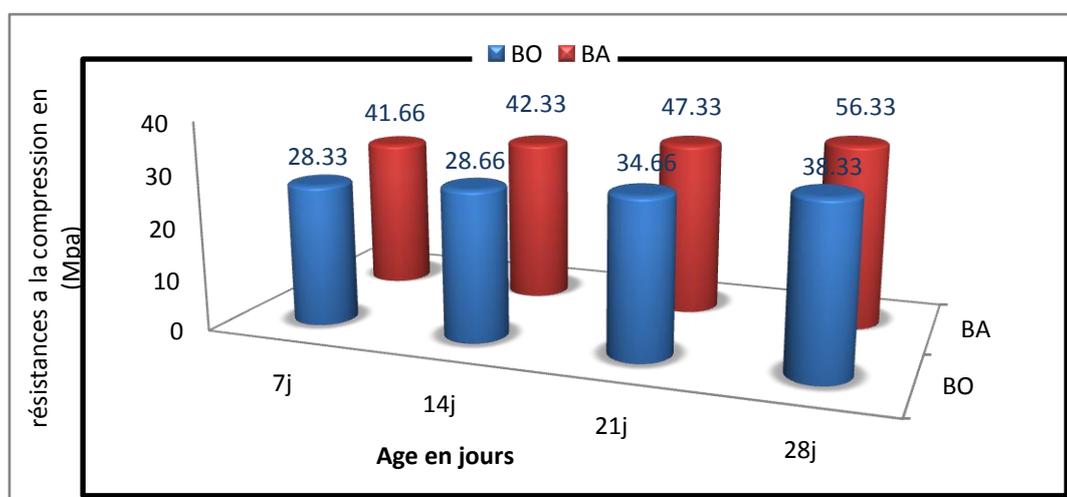
DIGILAB 2000 enregistre et imprime les conditions de l'essai: date, heure, identification de l'essai, numéro de l'essai, type de l'essai, section de l'éprouvette, force maximale atteinte et résistance en MPa. Il dispose d'une mémoire qui peut stocker et imprimer les résultats à tout moment.

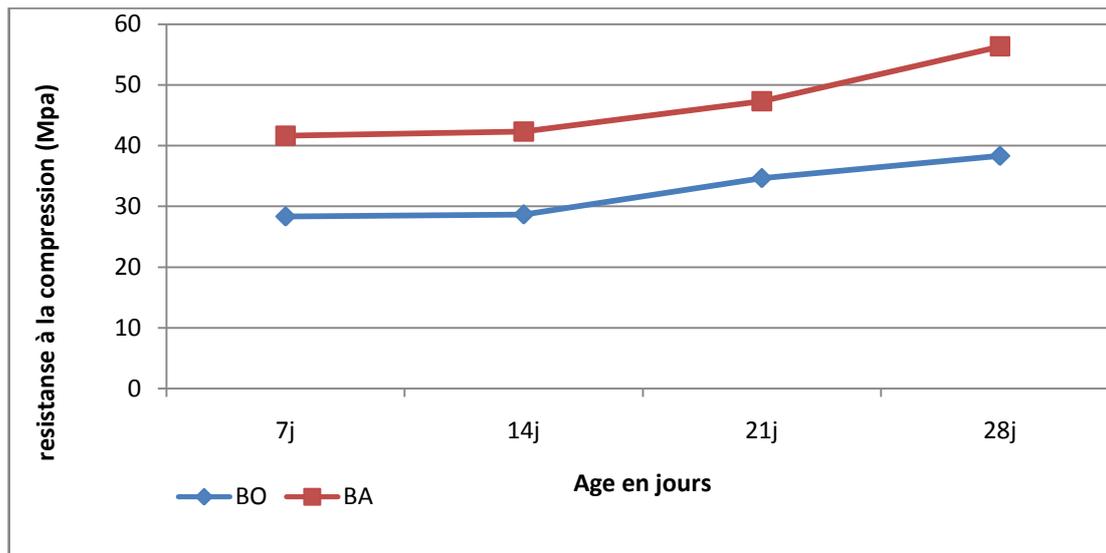
Il est à noter que d'une manière générale toute variation dans les résultats expérimentaux de mesure de la résistance en compression entre les cylindres provenant de l'échantillon est causée par des écarts sur la fabrication de plusieurs gâchées.

Les résultats de la résistance à la compression des éprouvettes retenues sont récapitulés dans le tableau suivant. Toutes les valeurs données sont des moyennes arithmétiques de trois essais :

**Tableau VII.15** : Résultat de la résistance en compression aux différentes échéances des bétons témoin ordinaire (BO) et bétons avec adjuvant (BA) MasterEase3666.

Type de béton	Age de béton	Poids des éprouvettes (kg)	Charge (KN)	Section d'éprouvettes (mm <sup>2</sup> )	Résistance à la compression $f_{cj}$ (MPa)	Résistance caractéristique moyenne $f_{cj}$ (MPa)
BO	à 7j	15280	596	20096	30	28,33
		15250	538	20096	27	
		15320	562	20096	28	
	à 14j	15670	770	20096	32	28,66
		15690	800	20096	23	
		15650	744	20096	31	
	à 21j	15350	745	20096	37	34,66
		15060	606	20096	30	
		15190	738	20096	37	
	à 28j	15130	635	20096	38	38,33
		14960	465,3	20096	40	
		15150	612	20096	37	
BA	à 7j	15560	820	20096	41	41,66
		15380	860	20096	43	
		15510	827	20096	41	
	à 14j	15500	836	20096	42	42,33
		15370	821	20096	41	
		15440	880	20096	44	
	à 21j	15230	943	20096	47	47,33
		15090	955	20096	48	
		15100	942	20096	47	
	à 28j	15040	1131	20096	56	56,33
		15040	1127	20096	56	
		15120	1147	20096	57	

**Figure VII.5:** Evolution des résistances à la compression en fonction du temps d'un béton témoin ordinaire (BO) et un béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA)



**Figure VII.6:** Résistance en compression du béton témoin ordinaire (BO) et béton avec adjuvant MASTEREASE 3666 (BA) en fonction du temps

Le tableau VII.15 et la figure VII.6 précédentes indiquent les résultats de résistances à la compression obtenus par des écrasements effectués sur des éprouvettes cylindriques de (16x32) cm de béton ordinaire (BO) et béton avec adjuvant MasterEase3666(BA) en fonction de l'âge de 7j à 28j ou elle atteint sa valeur maximale (56.33 MPa).

La figure VII.6 indique la variation de la résistance à la compression du béton ordinaire et béton avec adjuvant MasterEase3666(BA) qui croit en fonction de l'âge. Cependant l'ajout de d'adjuvant influe sur la variation de la résistance à la compression d'une façon considérable.

L'allure des courbes (résistances-âges) des éprouvettes testées aux différents âges (7j, 14j, 21j et 28j) montrent en générale une courbe qui augmente au fur et à mesure que l'âge augmente mais avec des valeurs des résistances à la compression qui augmente d'une façon considérable pour le béton avec adjuvant MasterEase3666 (BA) (1,2% du poids de ciment). La résistance de béton avec adjuvant dépasse celle de béton témoin d'une valeur majorée de l'ordre moyen de 1,50% à 7 jours avec une mosaïque et texture homogène indique une bonne corporation des agrégats avec le sable et le ciment ce qui confirme la valeur trouvée de G/S, on remarque que le processus d'écrasement des éprouvettes montre la bonne répartition des charges de compression exercées sur les éprouvettes.

## VII.8 Conclusion

Les adjuvants sont des produits incorporé au moment du malaxage du béton a un dosage inférieur ou égal à 5% en masse de poids de ciment du béton, leurs but est de modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou à l'état durci.

Le superplastifiant MasterEase3666 permet d'améliorer la fluidité de béton, modifiés la consistance lors du gâchage du béton réalisée, avec une réduction d'eau d'environ 21% de la quantité d'eau de gâchage et permet d'obtenir des mélanges de béton avec adjuvant à maniabilité normale et une grande résistance à la compression qui dépasse de 1.5% à 7jrs celle des mélanges sans adjuvants.

La cause de cette réduction de la quantité d'eau de gâchage et cette amélioration de résistance à la compression est l'action des molécules de superplastifiant MasterEase3666 qui s'enroulent autour des grains de ciment pour leur donner une charge négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres et conduisant à une défloculation et à une meilleure dispersion des grains de ciment et meilleure hydratation et l'augmentation de la maniabilité.

On conclura que le MasterEase3666 rend le béton plus dense, plus durable et accroît d'une manière remarquable et significative la résistance du béton.

**Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

Les travaux menés dans cette étude s'inscrivent dans la problématique d'influence d'un adjuvant superplastifiant sur la résistance en compression du béton, pour cela nous avons dressé une synthèse du comportement mécanique du béton à base d'adjuvant superplastifiant.

Nous avons formulé un béton ordinaire témoin (BO) et un autre à base d'adjuvant MasterEase 3666 (BA), les granulats utilisés se distinguent par leur masse volumique et leur distribution granulaire, une comparaison a été réalisée entre la résistance en compression simple du béton ordinaire(BO) et béton avec adjuvant (BA), ces essais ont permis de déterminer l'influence de l'ajout d'adjuvant MasterEase3666 sur le comportement du béton.

Les particules de ciment utilisées formant une suspension instable dans l'eau, il a été observé que le superplastifiant améliore la fluidité du béton. En effet, l'hydratation peut provoquer l'aggrégation des particules, il assure donc une fluidité initiale accrue et un bon maintien de cette dernière durant la période d'ouvrabilité.

Les superplastifiants jouent un double rôle, ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide et augmente l'affaissement du béton d'une manière remarquable, donc un béton très maniable, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton. La résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. La durée d'action de ces adjuvants est de 1 à 3 heures.

Nous avons remarqué quelques minutes après l'incorporation du superplastifiant que le béton commence à se couler facilement et se met automatiquement de niveau. Il conserve sa cohésion et ne présente pas de ressuage, contrairement au béton ordinaire sans superplastifiant, son écoulement était lent.

La configuration unique des molécules des MasterEase 3666 utilise dans la formulation de notre béton permet la parfaite maîtrise de leur délai d'adsorption sur les grains de ciments, il est ainsi possible de moduler le maintien de maniabilité des bétons et de pallier à la perte de consistance. Les superplastifiants MasterEase 3666 laissent une surface libre du grain de ciment importante permettant ainsi un développement rapide des hydrates. Le MasterEase 3666 atteint une réduction d'eau d'environ 21% au débit de dose nominal et réduit la viscosité du béton frais. Donc il rend le béton plus dur, Ceci a été

démontré en augmentant la résistance (améliorée de 15MPa de 7 jours à 28 jours) dans le béton mélangé. En revanche, le développement de la résistance dans le béton ordinaire est moins (résistance augmentée de 10 MPa de 7 jours à 28 jours).

Parce que la résistance mécanique du béton est la plus importante des propriétés d'usage du matériau, elle présente également l'avantage d'être relativement facile à mesurer par des expériences..

Enfin, parmi les thèmes liés à l'amélioration de la qualité du béton, il est recommandé de développer et d'approfondir les éléments suivants:

- Estimer avec précision le volume d'eau ;
- Estimer la dose d'adjuvant ;
- Identifier des méthodes simples dans les essais de qualification ;
- Modifications du rapport E/C et son impact sur les résultats cibles.

# Annexes

## Annexe I

# Notice technique MasterEase 3666



We create chemistry

## MasterEase® 3666

Nouvelle Technologie d'adjuvant pour un béton à faible viscosité et avec des propriétés rhéologiques supérieures et une stabilité améliorée du mélange et moins de collage, une pompabilité améliorée et une mise en place facile.

### DESCRIPTION

MasterEase 3666 est un mélange unique et polyvalent conçu pour conférer des propriétés rhéologiques exceptionnelles en réduisant la viscosité et la limite d'élasticité du béton frais.

#### Concept de béton à faible viscosité

MasterEase 3666 facilite le mélange et la décharge rapide du béton. Il améliore considérablement la pompabilité du béton en réduisant les pressions de pompage. MasterEase 3666 facilite également le placement et la finition du béton. MasterEase 3666 est conforme à la norme EN 205 -1 et AS 1478.1-2000 pour béton.

### INNOVATION

MasterEase 3666 est basé sur une technologie de polymères innovante et brevetée développée par BASF. Son action diffère des polymères traditionnels dans la mesure où l'adsorption de MasterEase 3666 sur les particules de liant est assurée par une liaison chimique qui ne gêne pas l'écoulement du béton. Cette innovation améliore considérablement le comportement rhéologique du béton traité avec MasterEase 3666, ce qui se traduit par une viscosité et une limite d'élasticité inférieure, associées à une meilleure rétention de la maniabilité.

### RECOMMANDATION D'USAGE

MasterEase 3666 est recommandé pour :

- Béton pré- à l'emploi,
- Béton autoplaçants,
- Béton préfabriqué et précontraint,
- Béton auto-compactant et pour un long maintien de rhéologie,
- Béton à Haute résistance,

- Béton à Haute Performance,
- Béton projeté,
- Mélanges contenant des sables manufacturés, des scories, des fumées de silice, des fibres synthétiques de type MasterFiber.

### CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

- Mélange plus rapide du béton dans les procédés de dosage secs et humides,
- Décharge plus rapide des camions agitateurs, mélangeurs centraux, croquettes et goulottes,
- Réduit la pression de pompage pour les applications horizontales et verticales,
- Bonne réponse aux vibrations et au compactage,
- Facilité de mise en place et de finition du béton,
- Finition de surface améliorée,
- Durabilité accrue,
- Atteint une réduction d'eau d'environ 28 % au débit de dose nominal,
- Compatible avec tous les types de liants, ciments et additifs minéraux.

### PROPRIÉTÉS

Couleur	Jaune Brun
Gravité Spécifique	1.060 ± 0.03
pH	4.5 – 6.5

### APPLICATION

MasterEase 3666 est un adjuvant liquide prêt à l'emploi pouvant être ajouté au mélange de béton en tant que composant séparé avec l'eau

## Annexe I: Notice technique MasterEase 3666

du lot initial. Cependant, une performance optimale est obtenue si **MasterEase 3666** est distribué dans le béton après l'ajout de 50 à 70% de l'eau de mélange. Évitez d'ajouter l'adjuvant aux agrégats / ciment secs. Un distributeur et une ligne d'alimentation séparés doivent être utilisés.

### **DOSE**

Le dosage recommandé est de 0,4 à 1,6 % du poids de ciment en fonction de la formulation du béton et des propriétés souhaitées.

### **COMPATIBILITE :**

**MasterEase 3666** est compatible avec les naphthalène-formaldéhyde sulfonés. Il peut être utilisé avec d'autres adjuvants BASF tels que **MasterGlenium**, **MasterSuro**, **MasterPolyheed**, **MasterPozzolith**, **MasterAir**, **MasterSet**, **MasterMatrix** et **MasterLife**.

Il est impératif que toute combinaison d'adjuvants soit testée dans des essais contrôlés en laboratoire ou sur le terrain afin de vérifier les performances souhaitées du mélange de béton.

### **CONDITIONNEMENT :**

**MasterEase 3666** est commercialisé en cubi de 1000L.

### **STOCKAGE :**

**MasterEase 3666** doit être stocké dans un endroit propre, sec et bien ventilé, à l'écart des sources d'inflammation, de la chaleur et des flammes. Protéger des rayons directs du soleil et du gel. **MasterEase 3666** a une durée de conservation de 12 mois lorsqu'il est stocké dans les conditions recommandées.

### **QUALITE**

Tous les produits provenant des installations de BASF en Algérie sont fabriqués dans le cadre d'un système de gestion certifié de manière indépendante afin de répondre aux exigences des normes de qualité, d'environnement et de santé et de sécurité au travail ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 1800.

## Annexe II Courbe granulométrique selon M.Faury

Formulation du Béton Aicha -- Khadija

Calcul de la dimension maximale ( $D_{max}$ )

$d_1$	12,5
$d_2$	10
X	28
y	50

ouverture du tamis	% des refus cumulés
12,5	28
10	78

$D_{max}$  13,90

Calcul de l'ordonnée Y

A	31		
$D_{max}$	13,90	D/2	6,95
Y	59,78		

Calcul de l'indice des vides I

k	0,300	
I	177	1,692789514

Calcul du volume de matériaux secs

$V_{MS}$  823

Volume absolu de ciment

$P_c$	350
$D_c$	3,1
$V_{AC}$	113

Calcul en pourcentage du volume absolu de ciment

$V_c$  14

composant	%	(1000-eau)/100	volume absolu	Masse volumique absolue	composants en masse	Masse volumique apparente	composants en volume
1	2	3	4	5	6	7	8
Ciment	14	8,23	113	3,10	350	1	350
Sable	28	8,23	230	2,513	579	1,44	402
3/8	30	8,23	247	2,778	686	1,53	448
8/15	28	8,23	230	2,799	645	1,5	430
Eau	177			1	201	1	205
Totaux	100				2461		1835

E/C 0,51  
G/S 1331 2,30  
579

$V_1 = 3,14 * [0,16/2]^2 * 0,32$  0,006433  
 $V_2 = 0,1 * 0,1 * 0,4$  0,004

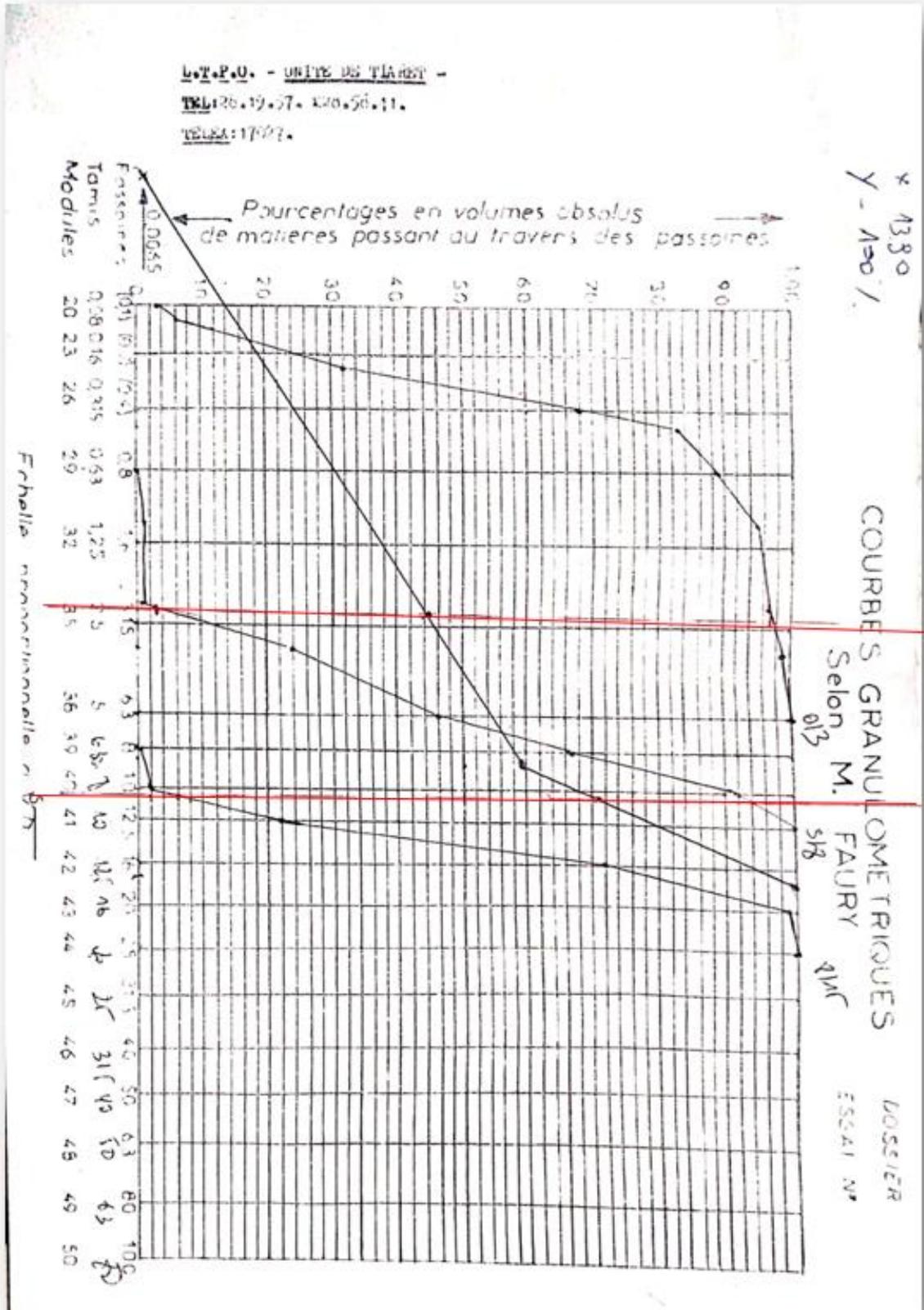
Calcul des composants du Béton ordinaire (Moules cylindrique) (ues)

$V_1 = 3,14 * (0,16/2)^2 * 0,32$  0,006433  
 $V_2 = 0,1 * 0,1 * 0,4$  0,004

1 moule C 03 moules C

Ciment	2,3	7,0
Sable naturel	3,7	11,5
G1	4,4	13,7
G2	4,1	12,9
L'eau	1,1	3,5
adjuvant	27,0 ml	84 ml

## Annexe II : Courbe granulométrique selon M.Faury



## Annexe III

## Formulation de béton



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

Entreprise Publique Economique Au capital social de 22600000 DA  
RC. 99B0103524 / Mat Fisc. 099031010015039 / Art Impo. 3101 6145011

**Unité de iaret**

Adresse: Cité 248 logts B.P 496 14000 - Tiaret  
Art Imposition: 1401 6801515  
Téléphone: 046 42.61.11  
Télécopie: 046 42.61.11

Département technique:

Note Technique

Etapes	Feuille de paille						
AICH A KHADIDJA							
Intitulé: Composition de béton - dosage : 350kg/m3							
Client :							
Date : 15/03/2020							
<b>1 Calcul de la dimension maximale (<math>D_{max}</math>):</b>							
$D_{MAX} = d_1 + (d_1 - d_2) \times y$				13,90 mm			
<b>2</b> $D_{max} / 2$				6,95 mm			
<b>3 Calcul de l'ordonnée Y:</b>							
$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}}$				59,78			
<b>4 Calcul de I (indice des vides):</b>							
$I = K \sqrt[5]{D_{max}}$				177 L			
<b>5 Calcul du volume matériaux secs:</b>							
$V_{MS} = 1000 - I$				823 L			
<b>6 volume absolu de ciment :</b>							
$V_{AC} = P_c / D_c$				113 L			
<b>7 Calcul en %age du volume absolu de ciment:</b>							
$V_c = V_{AC} / V_{MS}$				14 %			
composant	%	(1000- eau)/100	volume absolu	Masse volumique absolue	composant s en masse	Masse volumique apparente	composants en volume
1	2	3	4	5	6	7	8
Ciment	13,7	8,23	113	3,10	350	1	350
Sable	28	7,99	224	2,513	562	1,38	407
3/8	30	7,99	240	2,778	666	1,32	504
8/15	28	7,99	224	2,799	626	1,42	441
15/25	0		0		0		
Eau	177			1	177	1	201
<b>Totaux</b>	<b>99,7</b>				<b>2382</b>		<b>1904</b>

date: 15/03/2020

E/C 0,51

1292

G/S 2,30

FI.2

## Annexe IV

## Essai d'affaissement

NORME FRANÇAISE HOMOLOGUÉE	BÉTONS ESSAI D'AFFAISSEMENT	NF P 18-451 Décembre 1981
<p><b>1 OBJET</b></p> <p>La présente norme a pour objet de définir un essai des bétons frais dit « essai d'affaissement » (1).</p> <p><b>2 DOMAINE D'APPLICATION</b></p> <p>La présente norme s'applique aux bétons dont les granulats ont une dimension D inférieure ou égale à 40 mm.</p> <p><b>3 APPAREILLAGE</b></p> <p><b>3.1 MOULE</b></p> <p>Le moule, sans fond, de forme tronconique, a les dimensions intérieures suivantes (en millimètres) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— diamètre du cercle de la base supérieure : <math>100 \pm 0,5</math></li> <li>— diamètre du cercle de la base inférieure : <math>200 \pm 0,5</math></li> <li>— hauteur ..... : <math>300 \pm 1</math></li> </ul> <p>Il est construit de manière à être indéformable (2). La paroi intérieure est non absorbante, non réactive au liant, lisse et sans aspérités.</p> <p>Il doit être muni :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— aux 2/3 de la hauteur à partir de la base, de deux poignées,</li> <li>— à la partie inférieure, de dispositifs de fixation ou d'appuis pour les pieds de l'opérateur, permettant de l'assujettir sur la surface d'appui.</li> </ul> <div data-bbox="1034 1010 1262 1406" style="text-align: center;"> </div> <p><b>3.2 TIGE DE PIQUAGE</b></p> <p>Tige en acier, diamètre 16 mm, longueur 600 mm, à extrémités hémisphériques.</p> <p><b>3.3 PORTIQUE DE MESURE (3)</b></p> <p>Portique constitué par deux montants verticaux distants d'environ 300 mm et reliés rigidement à la partie supérieure, sur laquelle coulisse une règle de lecture susceptible d'être immobilisée par une vis de pression.</p> <p><b>3.4 SURFACE D'APPUI DE L'ENSEMBLE</b></p> <p>La surface d'appui doit être plane et horizontale, rigide et non absorbante (4) ; elle ne doit pas recevoir de chocs ou de vibrations pendant l'essai.</p> <p>(1) Cet essai est appelé également « essai au cône d'ABRAMS ».</p> <p>(2) Par exemple : moule à parois métalliques d'épaisseur minimale 1,5 mm.</p> <p>(3) L'emploi de ce portique facilite la détermination de l'affaissement, mais il n'est pas obligatoire.</p> <p>(4) Elle est généralement métallique.</p>		
Homologuée par arrêté du 1981-11-27 (J.O. 1981-12-04) effet le 1981-12-27	La présente norme remplace la norme de même indice, homologuée par arrêté du 1 <sup>er</sup> avril 1966.	© afnor 1981 Droits de reproduction et de traduction réservés pour tous pays

éditée par l'association française de normalisation afnor - tour europe cedex 7 92080 paris la défense - tél. (1) 778-13-26

J. BRARD - 60110 Méru

NF P 18-451 1<sup>er</sup> Tirage 81-12

Concrete - Slump test.

Beton - Setzprüfung.

## Annexe IV Essai d'affaissement

NF P 18-451

— 2 —

### 4 MODE OPÉRATOIRE

Humidifier la surface d'appui et y assujettir le moule dont la paroi intérieure, bien propre, aura été légèrement huilée (1).

Au moyen d'une pelle creuse, introduire le béton dans le moule en trois couches, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du cône. Cette introduction doit commencer une à deux minutes, au maximum, après prélèvement et homogénéisation du béton destiné à l'essai.

Piquer chaque couche 25 fois, avec la tige de piquage, en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du béton et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

A la dernière couche, au cours du compactage, ajouter le béton nécessaire pour que le moule soit juste rempli à ras bords.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton.

Démouler immédiatement en soulevant le moule avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses.

Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement, en mesurant le point le plus haut du béton affaissé.

Si l'on constate un éboulement ou un cisaillement partiel du béton, recommencer l'essai.

### 5 EXPRESSION DES RÉSULTATS

L'affaissement est exprimé par un nombre entier A, obtenu par l'une des deux méthodes suivantes :

#### 5.1 UNE SEULE MESURE

Faire la lecture de l'affaissement au centimètre près, ce qui donne la valeur A.

#### 5.2 TROIS MESURES

Pour obtenir une meilleure appréciation de l'affaissement, procéder à trois prises successives et réaliser sur chaque prise une détermination au demi-centimètre. Retenir pour résultat la moyenne arithmétique A des lectures, arrondie au centimètre le plus voisin.

### 6 COMPTE-RENDU

Le compte-rendu doit comporter sous une forme appropriée (tableau, imprimé...) les informations suivantes :

#### 6.1 RÉSULTATS DE L'ESSAI

— Valeur de l'affaissement A du béton

- soit à partir d'une seule mesure
- soit à partir de trois mesures : dans ce cas, indiquer toutes les lectures effectuées ; exemple :
 

valeurs mesurées .....	4 - 6 - 4,5
moyenne arithmétique arrondie au centimètre .....	5
inscription au compte-rendu .....	A = 5 (4-6-4,5)

— Observations éventuelles.

#### 6.2 RENSEIGNEMENTS FONDAMENTAUX

##### 6.2.1 à donner par le fournisseur du béton :

- a) identification du béton,
- b) désignation du projet de construction,
- c) partie ou composant de la construction.

##### 6.2.2 à donner par le laboratoire d'essais :

- a) date de l'essai.

(1) L'huile employée ne doit pas être réactive au liant.

# Références bibliographiques

- [1]. **Jean-François Denoël, Bernard Espion, Armande Hellebois, Michel Provost.**, “Histoire de Béton armé Patrimoine, Durabilité et Innovations”.
- [2]. **Lucien Pliskin.**, “Lebéton”, Centre de recherche sur la culture technique, Neuilly sur Seine (FRA), 1992.
- [3]. **Dr.A.MERDAS.**, “Cours de matériaux de constructions II chapitre I les bétons”, U.F.A. de Sétif 1, 1.
- [4]. La composition de béton, Guid Beton.com, Guide béton.
- [5] **Fiche technique tom 2.**, “Les béton: formulation fabrication et mise en œuvre”, Cimbéton centre d’information sur le ciment et ses applications, Réédition janvier 2013.
- [6]. [https://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/fr/pdf/4\\_legendes.pdf](https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/fr/pdf/4_legendes.pdf)
- [7]. Thèse de doctorat, “ Contribution à l’étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen”. Présenté par Sidi Mohammed El Amin Boukli Hacene. 2009.
- [8]. Thèse de doctorat. “Paramètres influents sur le maintien de l’ouvrabilité des bétons : modélisation du comportement rhéologique du béton frais”. Présenté par **Nasser Grine, Abdelhamid R’милиMongi Ben Ouezdou.** Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tunis. 29-31 mai 2015.
- [9]. **Holcim Belgique.**, “Du béton frais au béton durci : Ouvrabilité et consistance”, 26 Avril 2019.
- [10]. Les cours des matériaux de construction .4geniecivil.com.
- [11]. **Georgedreux et Jean festa**, “Nouveau guide béton et de ses constituants”, Eyrolles, Huitième édition 1998, troisième tirage 2007.
- [12]. **Holcim (Suisse) SA.**, “Guide pratique du béton Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables”, Sixième édition 2015.
- [13]. Thèse de doctorat., “Caractérisation expérimentale du béton sous fort confinement : influences du degré de saturation et du rapport eau/ciment ”, Présenté par **Xuan Hong VU**, Université Joseph Fourier. 29 août 2007.

- [14]. Thèse de doctorat., “ Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d’enrobage par l’utilisation des tests d’absorption capillaire ”, Présenté par **Mohamed Rabehi** 15/12/2014.
- [15]. Mémoire de magistère, “ Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance”, Présenté par **Touhami TAHENNI**, USTHB Algerie 2006.
- [16]. **François de Larrard.**, “L’influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons”, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 219 - Janvier-Février 1999.
- [17]. Thèse de doctorat., “Béton de sable fibre projeté pour panneau 3D”. Présenté par **Imene Benaissa**. Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 29 Octobre 2015
- [18]. **Walid. LARBI** , “le béton Chapitre 9”. Conservatoire National des Arts et Métiers Matériaux de construction - CCV015.
- [19]. **Article.**, “Les adjuvants: pour des bétons à l’épreuve des chantiers et du temps”, Construction Moderne / Annuel Ouvrages d’art 2014.
- [20]. Article Techniques de l’ingénieur., “Les adjuvants des bétons”. Construction Techniques du bâtiment : l’enveloppe du bâtiment ; Réf. : TBA1036, 01 décembre 2004.
- [21]. **Adam M. Neville.**, “ Propriétés des bétons ” 09-01-754. 15.09.2000.
- [22]. Mr: Youssef Ouhami., F.S.T de Settlat –Licence Professionnelle Licence Professionnelle Licence Professionnelle Licence Professionnelle - Option: Génie Civil - 2011 / 2012
- [23]. <https://ensh.dz/files/Cours/1011/Mat%20de%20construction/Eau%20et%20adjuvants.pdf>
- [24]. <http://www.infociments.fr/betons/composition/constituants/adjuvants>.
- [25]. Encyclopédie technique de bâtiment EB<sub>1</sub>.
- [26]. [https://www.memoireonline.com/11/19/11204/m\\_Les-adjuvants-dans-le-beton.html](https://www.memoireonline.com/11/19/11204/m_Les-adjuvants-dans-le-beton.html)
- [27]. [http://prescripteur.chez.com/presentation\\_adjuv.htm#11](http://prescripteur.chez.com/presentation_adjuv.htm#11)

[28]. Adjuvants pour béton et environnement. FSHBZ

[29].Thèse de Doctorat.,“Contribution à l’étude de l’influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)” ,Science en Génie Civil Présentée par **AmouriChahinez**.

[30].Thèse de doctorat.,“Compatibilité et incompatibilité liants cimentaires/ supaerplastifiants” Présentée en vue de l’obtention du grade académique de docteurdel’université **Henri- Poincaré** en chimie du solide et de docteur de l’université du Luxembourg en science de l’ingénieure par **Edwige Nicolas** Soutenue le 21 juin 2010

[31]. Université Aboubakre Belkaid , Faculté de technologie département de géniecivil, Matériaux de Construction, Responsable : Pr. **GHOMARI Fouad**.

[32].<http://s4.e-monsite.com/2011/04/21/98202702methode-de-composition-beton-pdf.pdf>

[33].**VALLETTE (R.)**. Manuel de composition des bétons. Méthode expérimentale.

Eyrolles(1963).

[34]. Composition des bétons par **Georges DREUX** Ingénieur en Chef au Centre Expérimental de Recherches et d’Études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP)]

[35].**NASR.Eddine – KEDOUR** office des publications universitaires 03-2003 dépôt légal 445/2003. « Le laboratoire du béton ».

[36]:<https://dokumen.tips/documents/methode-dreux-gorissepdf.html>

[37].Etude comparative de méthodes de formulation du béton . Algérie équipement .article n°= 04, Janvier 2004)

[38] . Partier 5, “Le Matériau Béton”.

# Liste des normes

**NF P 18-589** : Essai de l'équivalent de sable.

**NF P18-591** : La propreté superficielle des graviers.

**NA 2607 1992-08-01** : Essai d'analyse granulométrique par tamisage.

**NF P18-540** : Module de finesse.

**NA. 255/1990** : Mesure du coefficient d'aplatissement.

**NF 18-555** : La masse volumique apparente.

**NA.255/1990** : Mesure de masses volumique des gravillons.

**NF P 18-592** : Essai au bleu de méthylène.

**NF P 94-048** : Essai de la teneur en carbonate « Calcimètre ».

**NF P 18-572** : Essai de l'usure Micro-Deval.