

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Civil

Option : Structures



Sujet

AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES BPE À JEUNE ÂGE

Par :

AMRANI Aboubakr

KORTI Neyla Fadia

Soutenu publiquement, le 26 / 06 / 2018 , devant le jury composé de :

Mr El Hassane CHERIF	Maître assistant A	Univ. Tlemcen	Président
Mr Fouad GHOMARI	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr Abdelillah BEZZAR	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur
Mr Farid Brahim HOUTI	Maître assistant A	Univ. Tlemcen	Encadrant
Mr Omar TALEB	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Encadrant

Dédicaces

A l'éternel le tout puissant et miséricordieux,
A mes chers parents,
Merci pour l'amour et le soutien indéfectible montrés à mon égard,
A mon cher frère et ma chère sœur,
A toute la famille " AMRANI "et la famille " KARA - ALI ",
A tous mes aimables amis (es).

AMRANI Aboubakr.

A la mémoire de mon père,
A ma mère,
A mon fiancé,
A mon frère et ma sœur,
A toute ma famille,
A tous ceux qui me sont chers.

KORTI Neyla Fadia.

Remerciements

Par ces quelques lignes, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire.

Tout d'abord, nous adressons nos vifs remerciements à nos deux encadreurs Mr TALEB Omar et Mr HOUTI Farid Ibrahim, enseignants au département de Génie Civil de l'université de Tlemcen de pour leur soutien, le temps et la patience qu'ils nous ont accordé et le partage de leurs connaissances, merci pour leur gentillesse, leur patience, leur écoute et leurs précieux conseils qui ont été prépondérants pour aboutir à la bonne réussite de ce mémoire.

Nous souhaitons remercier respectueusement Mr GHOMARI Fouad et Mr BEZZAR Abdelillah, professeurs à l'université de Tlemcen de nous avoir fait l'honneur d'accepter d'être nos examinateurs.

Nous remercions également Mr CHERIF El Hassane pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Nous tenons à remercier aussi toute l'équipe du laboratoire particulièrement Mr HENAOUI Mustapha pour sa disponibilité et son amabilité.

Nos remerciements s'adressent également à tous ceux et celles qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste travail, en particulier Mr SOUALEM Toufik.

Résumé

Ce travail présente les résultats d'un programme à caractère expérimental dans lequel les méthodes des plans d'expériences et des surfaces de réponse sont utilisées pour répondre à une problématique du secteur socio – économique sur la résistance des bétons à jeune âge et la possibilité de diminuer le dosage de la classe granulaire 16/25 qui est souvent responsable de blocage dans les conduites d'une pompe.

Un plan factoriel complet a été donc utilisé pour modéliser l'influence de trois paramètres clés liés à la cohésion du mélange et à sa résistance. Les paramètres considérés dans cette étude sont : la teneur des fillers calcaires, le rapport G/S ainsi que le dosage en graviers 16/25.

Les propriétés du béton ont été déterminés par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams pour l'ouvrabilité et par des essais destructifs et non destructifs pour estimer les résistances à 3 jours et 28 jours ainsi que le module de Young.

Les résultats ont montré qu'il est possible de réduire légèrement le dosage des graviers 16/25 sans pour autant nuire à la résistance mécanique.

D'un autre côté, un ajout d'une petite quantité de fillers calcaires (environ 10% de la masse du ciment) permet d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BPE.

Par ailleurs, des modèles pour prédire l'affaissement et la résistance ont été développés dans ce travail. Ils offrent des informations concernant l'optimisation d'un BPE.

Mots clés : BPE, plans d'expériences, formulation, jeune âge, ouvrabilité, résistance mécanique, fillers calcaires.

ملخص

يقدم هذا العمل النتائج المحصل عليها من طرف البرنامج التجريبي الذي تستخدم فيه التصاميم التجريبية وأسطح الاجابات لحل الاشكالية المطروحة من طرف القطاع الاجتماعي والاقتصادي التي تتعلق بمقاومة الخرسانة في السن المبكر وامكانية التقليل من تركيز المجاميع اي كمية الحصى 16/25 التي غالب ما تكون سبب في انسداد انابيب المضخة. يستخدم تصميم المضروب الكامل لنمذجة تأثير العوامل الرئيسية الثلاث المتعلقة بتماسك الخليط بالمقاومة، العوامل المذكورة سابقا هي: محتوى من الحشوة الجيرية، نسبة الرمل/ المجاميع، كمية الحصى 16/25.

خصائص الخرسانة تم اختبارها عبر اختبار هبوط الخرسانة بواسطة مخروط "Abrams" لمعرفة خاصية امتداد وتوسع الخليط. وعبر الاختبارات المدمرة والغير مدمرة لتقدير مقاومة الخرسانة التي سنها 3 ايام و28 يوم وايضا تقدير معامل "Young".

أظهرت النتائج المحصل عليها انه من الممكن تقليل كمية الحصى 16/25 دون التأثير على المقاومة الميكانيكية. من ناحية أخرى، اضافة كمية قليلة من حشو الحجر الجيري (حوالي 10 % من كتلة الاسمنت) تساعد على تحسين الخصائص الانسيابية والميكانيكية للخرسانة الجاهزة.

في هذا العمل، تم تطوير النماذج التي تسمح بتنبؤ قيم هبوط الخرسانة وقيم المقاومة، هذه النماذج تزود بالمعلومات المتعلقة بتحسين الخرسانة الجاهزة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الجاهزة، التصاميم التجريبية، التركيب، السن المبكر، قابلية التشغيل، المقاومة الميكانيكية، الحشوات الكلسية.

Summary

This work represents the results of an experimental character program within which the methods of the experimental designs and the response surfaces are used to answer an issue of the socio-economic sector on the resistance of the prime concrete and the possibility of reducing the dosage of the 16/25 granular class which is often responsible for the blockage in the pipes of a pump.

A complete factorial design was therefore used to model the influence of three key parameters related to the cohesion of the mixture and its resistance. The parameters considered in this study are: the calcareous fillers content, the G/S ratio and the 16/25 gravel dosage.

The properties of the concrete were determined by the Abrams cone collapse test for workability and by destructive and non-destructive tests to estimate the 3-day and 28-day strength as well as the Young's modulus.

The results have shown that is it possible to slightly reduce the 16/25 gravel dosage without compromising the mechanical strength.

On the other hand, adding a small amount of limestone fillers (about 10% of the cement mass) improves the rheological and mechanical characteristics of the BPE.

In addition, models to predict subsidence and resistance have been developed in this work; they offer information about optimizing a BPE.

Key Words: BPE, experimental designs, formulation, young age, workability, mechanical resistance, calcareous fillers.

Sommaire

Résumé	IV
Summary.....	VI
Sommaire.....	VII
Liste des Figures.....	X
Liste des Tableaux	XIII
Liste des notations et des abréviations.....	XV
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1 : Comportement du béton au jeune âge & Paramètres Influent.

I. Introduction :	4
II. Définition du Béton Prêt à l'Emploi (BPE) :	5
III. Le béton au jeune âge :	5
IV. Description du mécanisme de l'hydratation du ciment :	5
V. Critères à considérer pour l'amélioration de la qualité du béton :	7
V.1. L'ouvrabilité :	7
V.1.1. Affaissement au cône d'Abrams :	7
V.1.2. Méthode Vébé :	8
V.1.3. Etalement à la table à secousses :	9
V.1.4. Les paramètres permettant d'améliorer l'ouvrabilité :	9
V.2. Résistance en compression :	12
V.2.1. Essai de compression :	12
V.2.2. Essai à l'ultrason :	13
V.2.3. Les paramètres permettant de modifier la résistance à la compression :	14
Conclusion :	20
Références bibliographiques :	21

Chapitre 2 : Plans d'expériences.

I. Introduction :	24
I.1. Introduction aux plans d'expériences :	24
I.2. Conditions d'application des plans d'expériences :	25
II. Étapes d'une étude par les plans d'expériences :	26
III. Processus d'acquisition des connaissances :	27
IV. Facteurs et réponses :	27
IV.1. Choix des facteurs :	28
IV.2. Les différents types de facteurs :	28
IV.3. Choix des réponses :	28
V. Types de plans d'expérience :	28
V.1. Plans factoriels complets :	28

V.2. Plans centrés composites :	29
V.3. Plans fractionnaires :	29
V.4. Plans mélanges :	29
VI. Les logiciels utilisés pour les plans d'expériences :	29
VI.1. Introduction au logiciel MINITAB :	30
VII. Quelques applications des plans d'expériences dans le domaine des matériaux cimentaires :	32
VII.1. Sur les bétons ordinaires : (A.Kaoua, 2008).....	32
VII.2. Sur l'optimisation des procédures de bétonnage par temps chaud : (Bella et al, 2011).....	33
VII.3. Sur l'étude de nouvelle formulation d'adjuvant hydrofuge pour applications diverses : (Belgacem Bezzina ,2012).....	34
VII.4. Sur les bétons autoplaçants :(Taleb et al, 2012)	36
VII.5. Sur des bétons ordinaires : (M.Ayad et Y.Barka, 2013)	37
VII.6. La formulation des bétons par la méthode Taguchi : (S. Dali Youcef, 2017)	39
Conclusion :	41
Références bibliographiques :	42

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux & Formulation du béton de référence.

I. Caractérisation des constituants :	44
I.1. Identification et analyse du sable :	44
I.1.1. Propriétés dimensionnelles (EN 933-1 et 933-2) :	44
I.1.2. Le module de finesse du sable :	45
I.1.3. Equivalent de sable :	45
I.1.4. Foisonnement du sable :	45
I.1.5. Essai au bleu de méthylène dit essai à la tâche :	46
I.2. Analyse granulométrique des Gravieres :	47
I.2.1. Propriétés physiques :	47
I.2.2. Mesure de la compacité des granulats :	51
I.3. Le ciment :	52
I.4. Les fillers calcaires :	54
I.5. Eau :	54
I.6. Les additions organiques (NF EN 934-2) :	55
I.7. Détermination des dosages de saturation :	56
II. Formulation du béton de référence :	59
II. 1.Choix des données de base :	59
II. 1.1. Résistance :	59
II. 1.2. Ouvrabilité :	59
II. 1.3. Dimension maximale D des granulats :	59
II. 1.4. Le dosage en ciment C :	59
II. 1.5. Le rapport C/E :	59

II. 1.6. Détermination de la composition granulaire :.....	59
II. 2.Composition de la formulation de référence :	60
Conclusion :.....	61
Normes :.....	62

Chapitre 4 : Étude Statistique & Analyse des résultats.

I. Introduction :.....	64
II. Formulation des bétons :.....	64
II.1.Bétons de références :.....	64
II.2.Bétons étudiés :	65
II.3.Mode de malaxage :.....	66
III. Les plans d'expériences :.....	66
III.1. Choix des facteurs :.....	66
III.2. Niveaux des facteurs :	66
III.3. Choix du plan d'expérience :	67
III.4. Interactions :	67
III.5. Réponses :.....	67
III.6. Formulation des bétons :.....	68
III.7.Analyse des résultats :	69
III.7.1.Analyse des résultats relatifs à l'affaissement :.....	69
III.7.2. Analyse des résultats relatifs à la résistance à 3 jours :.....	71
III.7.3. Analyse des résultats relatifs à la résistance à 28 jours :.....	73
III.7.4. Analyse des résultats relatifs à la masse volumique à l'état frais :	74
III.7.5. Analyse des résultats relatifs à la masse volumique à l'état durci :	75
III.7.6. Analyse des résultats relatifs au module d'élasticité :.....	77
Conclusion :.....	82
Références bibliographiques :	83
Conclusion Générale.....	84

Annexes

Liste des Figures

Chapitre 1 : Comportement du béton au jeune âge & Paramètres Influent.

Figure 1.1. : Organigramme des principaux facteurs qui influent sur la qualité du béton.....	4
Figure 1.2. : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	8
Figure 1.3. : Consistomètre de Vébé (http://www.concrete.org.uk).....	9
Figure 1.4. : L'influence du rapport E/C sur la maniabilité (Meftah.H et Arabi.N, 2012).....	10
Figure 1.5. : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation) (F.DE Larrard ,2000) :.....	10
Figure 1.6. : Utilisation des superplastifiants (N.Tabet, 2012).....	11
Figure 1.7. : Corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonore (K.Ali Benyahia, 2010)...	13
Figure 1.8. : Corrélation résistance à la compression –vitesse ultrasonique (D.Boukhelkhal et col, 2015) :.....	14
Figure 1.9. : L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression d'un béton ordinaire (http://www.guidebeton.com).....	14
Figure 1.10. : Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats ($E/C=0,50$) (Neville AM ,2000).....	15
Figure 1.11. : L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression et l'affaissement d'un béton ordinaire. (I-Cheng Yeh ,2006).....	15
Figure 1.12. : Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton (K.Ali Benyahia ,2010).....	16
Figure 1.13. : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation) (F.DE Larrard ,2000).....	16
Figure 1.14. : La résistance à la compression en fonction de rapport G/S (B.S.Elbahi ,2004)..	17
Figure 1.15. : Évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%) (Y.Labiad et N.Sbai, 2016).....	19

Chapitre 2 : Plans d'expériences.

Figure 2.1. : Les variables expérimentaux.....	24
Figure 2.2. : Organigramme général de traitement des plans d'expériences (S.M.A. Boukli Hacene, 2010).....	26
Figure 2.3. : Processus d'acquisition des connaissances (B.Bezzina ,2012).....	27
Figure 2.4. : Effet quadratique (A.Kaoua, 2008).....	29
Figure 2.5. : Introduction au MINITAB.....	30
Figure 2.6. : Courbe iso valeur du rapport E/C. Pour ($G/S = 1,6$).....	32
Figure 2.7. : Courbe iso valeur du de la résistance en fonction du rapport E/C.....	33
Figure 2.8. : Résistance à la compression à 3J.....	34
Figure 2.9. : Résistance à la compression à 14J.....	34

Figure 2.10. : Graphes des réponses prédites générés par les modèles.....	35
Figure 2.11. : Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant($E=250\text{l/m}^3$, $F=50\text{kg/m}^3$).....	37
Figure 2.12. : Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=150 \text{ kg/m}^3$).....	37
Figure 2.13. : Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=600 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$).....	38
Figure 2.14. : Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=700 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$).....	39
Figure 2.15. : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport E/C.....	40
Figure 2.16. : Réponse de l'affaissement en fonction du rapport E/C et G/S.....	40
Figure 2.17. : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport E/C :.....	41
Figure 2.18. : Réponse de la résistance en compression en fonction du rapport E/C et G/S.....	41

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux & Formulation du béton de référence.

Figure 3.1. : Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.....	44
Figure 3.2. : Courbe de foisonnement du sable.....	45
Figure 3.3. : L'essai au bleu de méthylène.....	46
Figure 3.4. : Courbe granulométrique des différents graviers.....	47
Figure 3.5. : L'essai d'absorption pour le sable.....	48
Figure 3.6. : Les tamis à mailles carrées de l'essai Forme des granulats.....	49
Figure 3.7. : L'essai Micro Duval.....	50
Figure 3.8. : La machine de l'essai Los Angeles.....	51
Figure 3.9. : Composition du ciment.....	53
Figure 3.10. : Essai de KANTRO.....	56
Figure 3.11. : Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en Superplastifiant pour $E/C = 0,4$	58
Figure 3.12. : Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en Superplastifiant pour $E/C = 0,5$	58
Figure 3.13. : Détermination des débits en volume absolus des matériaux.....	60

Chapitre 4 : Étude Statistique & Analyse des résultats.

Figure 4.1. : Organigramme des formulations des bétons étudiés.....	65
Figure 4.2. : Le mode de malaxage suivi.....	66
Figure 4.3. : L'affaissement au cône d'Abrams (affaissement de 10 mm et 185 mm).....	69
Figure 4.4. : Surface de réponse de volume de l'affaissement en fonction de FC et G/S et G16/25.....	70
Figure 4.5. : Essai de la résistance à la compression.....	71

Figure 4.6 : Surface de réponse de volume de la résistance à 3 jours en fonction de FC et G/S et G16/25.....	72
Figure 4.7. : Surface de réponse de volume de la résistance à 28 jours en fonction de FC et G/S et G16/25.....	73
Figure 4.8 : Histogramme représente les résistances à la compression à 3 jours et à 28 jours...	74
Figure 4.9. : Surface de réponse de volume de la masse volumique à l'état frais en fonction de FC et G/S et G16/25.....	75
Figure 4.10. : Surface de réponse de volume de la masse volumique à l'état durci en fonction de FC et G/S et G16/25.....	76
Figure 4.11. : Comparaison de différentes valeurs des masses volumiques.....	77
Figure 4.12. : L'essai de l'ultrason.....	78
Figure 4.13. : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité.....	78
Figure 4.14. : Comportement du béton lors l'essai d'écrasement.....	82

Liste des Tableaux

Chapitre 1 : Comportement du béton au jeune âge & Paramètres Influent.

Tableau 1.1. : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams - norme (NF EN 206-1).....	7
Tableau 1.2. : Durée de vibration par couche d'éprouvette 16/32 en fonction de l'affaissement du béton. Données valables pour des granulats semi-concassés (NF P 18-422).....	8
Tableau 1.3. : Classes Vébé (NF EN 206).....	8
Tableau 1.4. : Classe l'étalement du béton (NF EN 206).....	9
Tableau 1.5. : Équivalence des résistances obtenues sur cubes de 100 et cylindre \varnothing 113 mm et \varnothing 150 mm.....	12
Tableau 1.6. : Relation entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion (Feidman, 2005).....	13
Tableau 1.7. : Adjuvants modifiant la prise et le durcissement du ciment (Cimbéton, 2005)....	18

Chapitre 2 : Plans d'expériences.

Tableau 2.1. : Niveaux des facteurs.....	32
Tableau 2.2. : Niveaux des facteurs.....	33
Tableau 2.3. : Tableau récapitulatif des facteurs contrôlés choisis et leurs niveaux.....	35
Tableau 2.4. : Niveaux des facteurs.....	36
Tableau 2.5. : Niveaux des facteurs.....	38
Tableau 2.6. : Niveaux des facteurs.....	39

Chapitre 3 : Caractérisation des matériaux & Formulation du béton de référence.

Tableau 3.1. : Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.....	44
Tableau 3.2. : Masses volumiques apparentes et absolues des granulats.....	47
Tableau 3.3. : Les coefficients d'absorption des différents granulats.....	48
Tableau 3.4. : Résultats de l'essai sur les impuretés des graviers.....	49
Tableau 3.5. : Compacité des différents granulats.....	51
Tableau 3.6. : Compacité des mélanges granulaires.....	51
Tableau 3.7. : Tableau récapitulatif de la caractérisation des granulats.....	52
Tableau 3.8. : Composition chimique et minéralogique du ciment.....	53
Tableau 3.9. : Caractéristiques physico - mécaniques du ciment.....	53
Tableau 3.10. : Composition de l'eau de gâchage.....	54
Tableau 3.11. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 17200.....	55
Tableau 3.12. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 15400.....	55
Tableau 3.13. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 13600.....	55

Tableau 3.14. : Caractéristique du SOLUFLOW ® 3085.....	56
Tableau 3.15. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant "ORAFLOW HM THM 17200 (SP1) ".....	56
Tableau 3.16. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant ORAFLOW HM THM 15400.....	57
Tableau 3.17. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant ORAFLOW HM THM 13600 (SP3).....	57
Tableau 3.18. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant SOLUFLOW ® 3085 (SP4).....	57
Tableau 3.19. : La composition pondérale et volumique.....	60

Chapitre 4 : Étude Statistique & Analyse des résultats.

Tableau 4.1. : Les constituants des bétons de références.....	64
Tableau 4.2. : Niveaux des facteurs.....	67
Tableau 4.3. : Matrice des effets.....	67
Tableau 4.4. : Formulation des bétons étudiés :	68
Tableau 4.5. : Caractérisation des bétons étudiés :.....	68
Tableau 4.6. : Tableau récapitulatif.....	80
Tableau 4.7. : Tableau récapitulatif.....	81

Annexes

Tableau A.1 : Planning du programme expérimental.....	86
--	----

Liste des notations et des abréviations

ρ : La masse volumique [Kg/m³].

Ab : Le coefficient d'absorption.

Adj : Adjuvant.

Aff : Affaissement [cm].

C : Ciment.

Dmax : Le diamètre maximal des granulats.

E : Eau.

E/C : Rapport entre la masse de l'eau et la masse du ciment.

E/F : Rapport entre la masse d'eau et la masse du liant.

Ed : Module d'élasticité dynamique.

Ec : Module d'élasticité statique.

FC : Fillers calcaires.

ESP : Equivalent de sable par piston.

ESV : Equivalent de sable visuel.

i : Le coefficient d'impureté.

G : Gravier.

LA : Coefficient Los Angeles

M : Masse.

Mvd : La masse volumique à l'état durci [Kg/m³]

Mvf : La masse volumique à l'état frais [Kg/m³].

R² : Coefficient de détermination.

Rc (3) : Résistance à la compression à 3 jours.

Rc (28) : Résistance à la compression à 28 jours.

S : Sable.

SP : Superplastifiant.

V : Vitesse [m/s].

Vv : Volume.

VB : La valeur au bleu des fines.

W : La teneur en eau.

Introduction Générale

Plusieurs entreprises du secteur du bâtiment veulent voir diminuer le pourcentage de la classe granulaire 16/25 dans la formulation des bétons prêts à l'emploi (BPE) à cause des problèmes de blocage ou de ségrégation qu'elle peut engendrer au moment de la pompabilité du béton. Toutefois, lors des applications, ces industriels n'osent pas le faire par peur de répercussions négatives sur les résistances mécaniques, surtout que, ces mêmes acteurs du bâtiment souhaitent avoir des résistances suffisamment élevées à jeune âge pour permettre un décoffrage rapide afin d'améliorer la productivité.

Dans ce cas, l'optimisation du squelette granulaire et l'utilisation des éléments fins comme les fillers calcaires peuvent représenter des bonnes solutions pour assurer une ouvrabilité adéquate au matériau (par augmentation du volume de la pâte) et améliorer la résistance à court et long terme (par amélioration de la compacité).

En vue de répondre à cette problématique du secteur socio - professionnel, le présent travail, à dominante expérimental se base sur la méthode des plans d'expérience, elle est généralement recommandée pour ce genre d'étude. Cette démarche permet une variation simultanée des différents facteurs pour mettre en évidence leurs influences sur le comportement du mélange ainsi que l'impact des interactions entre ces facteurs afin de garantir une meilleure modélisation.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés presque à l'ensemble des constituants du béton : le squelette granulaire (rapport G/S), le dosage des fillers calcaires que nous pouvons ajouter au mélange pour améliorer la compacité et la teneur des gros granulats que nous pouvons substituée par d'autres granulats de tailles plus petites pour améliorer les critères de pompabilité. Par contre, le dosage en ciment et la teneur en eau ont fixés au préalable dans notre étude, sachant que l'influence de ces deux paramètres est connue et a été largement traitée dans la littérature.

Pour les réponses, nous nous sommes fixés comme objectif d'étudier l'influence des facteurs choisis sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques à 3 et à 28 jours ainsi que sur le module d'élasticité.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres précédés par une introduction générale.

Le premier chapitre présente un état de l'art sur le comportement des bétons à jeune âge, sur les facteurs qui peuvent avoir une influence sur l'ouvrabilité et les résistances des bétons adjuvants.

Dans le deuxième chapitre, nous mettons en évidence les principes de la méthode des plans d'expérience ainsi que des résultats de certaines études qui utilisent cette démarche sur des matériaux granulaires.

Le chapitre trois regroupe une caractérisation détaillée des matériaux utilisés. Nous présentons aussi la méthode de formulation du béton de référence.

Le dernier chapitre est consacré à une étude statistique afin de mettre en évidence l'influence des facteurs choisis sur les caractéristiques des bétons.

Enfin, les principaux résultats ont été synthétisés dans une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Comportement du béton au jeune âge & Paramètres Influent

L'étude du comportement du béton à l'état frais et durci nécessite une connaissance particulière de l'influence des différents éléments qui le constituent.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 1 :

I. Introduction	4
II. Définition du Béton Prêt à l'Emploi (BPE).....	5
III. Le béton au jeune âge.....	5
IV. Description du mécanisme de l'hydratation du ciment.....	5
V. Critères à considérer pour l'amélioration de la qualité du béton.....	7
Conclusion.	20
Références bibliographiques.	21

I. Introduction :

Le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Il est composé de graviers, sable, d'eau et de liants. On peut y ajouter des additions minérales ou organiques afin d'augmenter certaines propriétés à l'état frais ou encore sa résistance mécanique à la compression à différents âges du béton.

Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps le mécanisme d'hydratation du ciment en insistant sur la notion du degré d'hydratation. Nous présenterons par la suite, l'influence de certains paramètres clés (figure 1.1.), spécialement ceux considérés dans notre étude expérimentale, sur l'ouvrabilité et les résistances à jeune âge et à 28 jours.

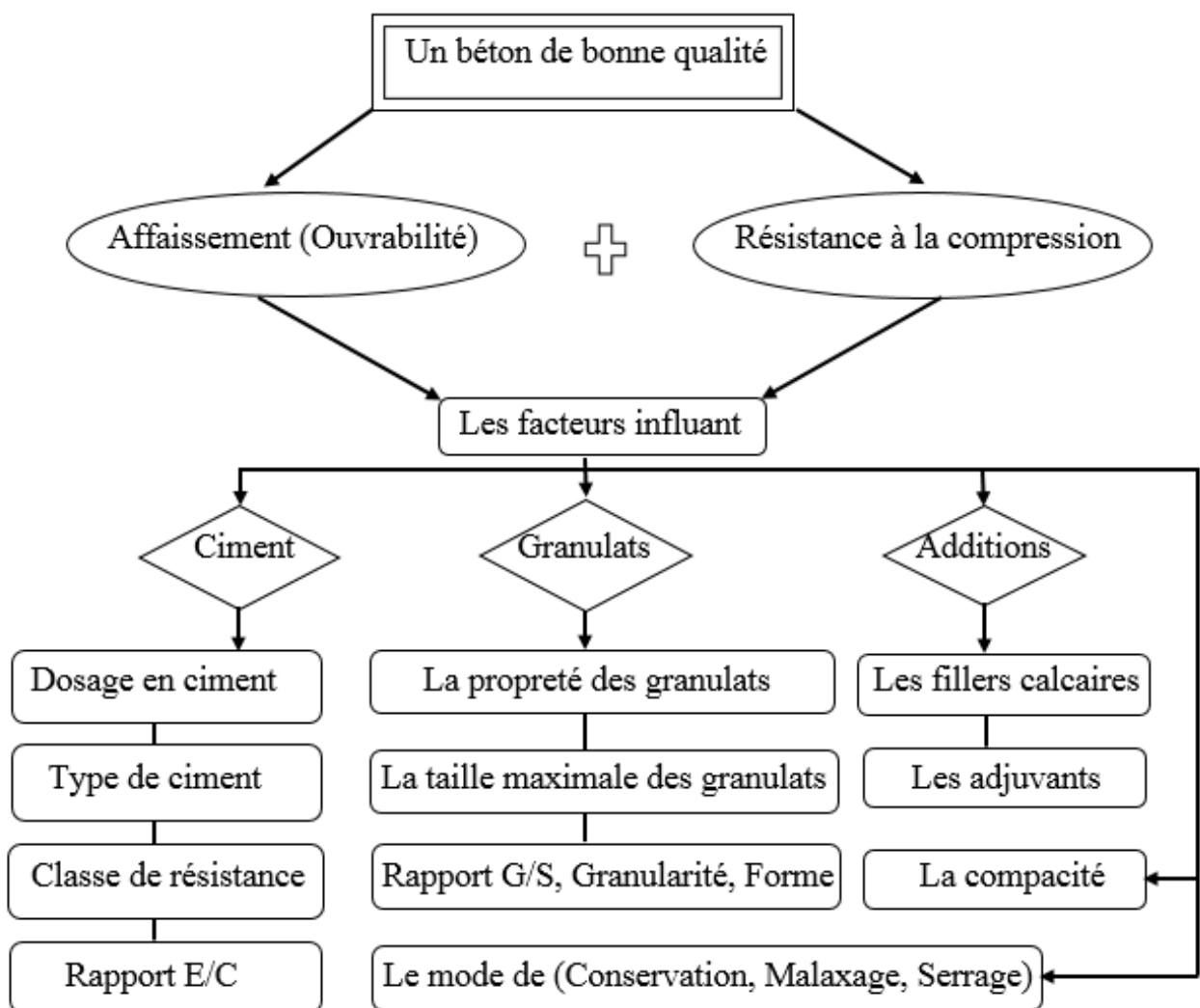


Figure 1.1. : Organigramme des principaux facteurs qui influent sur la qualité du béton.

II. Définition du Béton Prêt à l'Emploi (BPE) :

Le Béton prêt à l'emploi (BPE) est un béton qui peut directement être utilisé sur le chantier. Généralement, il est confectionné dans des centrales à béton fixes et doit posséder des caractéristiques bien spécifiques grâce à l'utilisation de certains adjuvants.

L'ajout des adjuvants va permettre d'influer sur de nombreuses caractéristiques du béton : sa maniabilité, sa résistance mécanique, sa résistance face au choc, ... Il est donc important de bien choisir les adjuvants à utiliser en fonction du climat et de l'ouvrage et du type d'utilisation que l'on veut en faire.¹

III. Le béton au jeune âge :

Le béton est un matériau vivant et évolutif, dont la maturation progressive se caractérise par le passage d'un état presque liquide à un matériau viscoélastique en l'espace de quelques heures, suivi d'une évolution ultérieure vers un matériau durci présentant des résistances mécaniques importantes.

Le «jeune âge» du béton correspond donc aux premières heures de la vie d'un béton qui est souvent défini conventionnellement comme correspondant à la période qui s'étendant au-delà de la prise et durant laquelle la résistance du béton est inférieure à 50 % de sa valeur à 28 jours. (P.Acker et al, 2004 cité par F.Tafouk et O.Mouzaoui ,2012).

La période appelée «court terme» ou « jeune âge » démarre à l'instant où la prise du béton commence. Elle est caractérisée par une grande activité chimique qui se traduit par une croissance rapide correspondant au moment du décoffrage (F.Tafouk et O.Mouzaoui ,2012).

IV. Description du mécanisme de l'hydratation du ciment :

Le béton est un mélange de plusieurs composants, les agrégats, le sable, le ciment et l'eau. Le composant le plus important reste le ciment car il a pour rôle de durcir au contact de l'eau.

Dès que le ciment anhydre est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés du béton évoluent dans le temps.

Le mélange du ciment et de l'eau forme une pâte qui se rigidifie progressivement et devient solide après quelques heures ; ce phénomène est appelé prise de ciment qui est le résultat de l'hydratation du ciment.

Le principal produit de l'hydratation est le silicate de calcium hydraté, la portlandite et l'ettringite (F.Ghomari, 2014).

Le constituant majoritaire du ciment anhydre est le silicate tricalcique C_3S . L'hydratation du C_3S produit un silicate de calcium hydraté C-S-H et de la portlandite.

La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité.

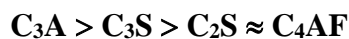
¹<http://www.guidebeton.com/beton-pret-emploi>

L'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes (J.Zreiki, 2009) :

- Réactions initiales.
- Période dormante : Durant cette période il y a peu d'activité chimique, ce qui se traduit par un faible dégagement de chaleur.
- Période d'accélération : La caractéristique de cette période est le fort dégagement de chaleur qui traduit une activité chimique intense. C'est pendant cette période que survient la prise.
- Période de décélération : La formation de la couche d'hydrates ne permet plus qu'une réaction d'hydratation par diffusion à travers la couche d'hydrates déjà formés. En conséquence la cinétique d'hydratation ralentit avec le temps.
- Période de consolidation : Cette dernière période est considérée comme quasi-stable. Le ralentissement de la réaction, dû au caractère diffusif de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années. Cette période est très importante du point de vue du développement de la résistance mécanique, car elle commence très tôt, après un jour d'hydratation, et persiste longtemps après.

Par ailleurs, L'hydratation des aluminates étant très rapide, les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions et régulariser la prise.

D'une manière générale, la réactivité générale avec l'eau des différentes phases minérales respecte l'ordre suivant (J.Zreiki, 2009) :



- **Le degré d'hydratation :**

Les réactions d'hydratation se manifestent par un caractère exothermique qui se traduit par un dégagement de chaleur important. C'est généralement la notion de degré d'hydratation qui s'avère particulièrement adaptée à la description de l'évolution des caractéristiques du béton au jeune âge.

En conséquence, pour suivre l'hydratation, on peut mesurer soit les quantités des réactifs ayant réagi (ciment hydraté, eau non évaporable, ...) ou ceux n'ayant pas encore réagi (ciment anhydre, eau libre,), soit la chaleur dégagée par l'hydratation, variation dimensionnelle d'une éprouvette (retrait), résistance mécanique ...

Le degré d'hydratation est défini par la relation (J.Zreiki, 2009) :

$$\xi = \frac{\text{Quantité de ciment hydraté}}{\text{Quantité de ciment initiale}}$$

Avec ξ : le degré d'hydratation

La notion du degré d'hydratation peut aussi être définie en fonction de la chaleur dégagée :

$$\xi(t) = \frac{Q(t)}{Q_\infty}$$

Avec

$\xi(t)$: le degré d'hydratation à l'instant « t ».

$Q(t)$: la quantité de chaleur dégagée à l'instant « t ».

Q_∞ : la quantité de chaleur dégagée à « t » lorsqu'il tend vers l'infini.

Bien sur cette technique nécessite l'utilisation de matériel sophistiqué tel que le Microscope Electronique à Balayage (MEB), la Diffraction des Rayons X (DRX) ou encore le calorimètre qui mesure la chaleur produite au cours de l'hydratation.

V. Critères à considérer pour l'amélioration de la qualité du béton :

V.1. L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton frais et sa bonne adéquation à la méthode de sa mise en œuvre dans un ouvrage donné compte tenu de ses caractéristiques. Elle est influencée principalement par la granulométrie et la forme des granulats, la nature et le dosage de ciment, le dosage en eau et par l'emploi éventuel d'adjuvants. (Y.Bouedjema, 2017).

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité :

V.1.1. Affaissement au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement est un moyen d'évaluer la consistance du béton frais. Il est utilisé, indirectement, comme moyen de vérifier que la bonne quantité d'eau a été ajoutée au mélange. L'essai est réalisé conformément à la norme (BS EN 12350-2).

Le cône d'Abrams (figure 1.2.) en acier est placé sur une base solide, imperméable et nivelée, et rempli de béton frais en trois couches égales. Pour un béton ordinaire, chaque couche est rodée 25 fois pour assurer le compactage. La troisième couche est terminée au niveau du sommet du cône. Le cône est soigneusement soulevé, laissant un tas de béton qui se dépose ou s'affaisse légèrement.

Lorsque le cône est retiré, l'affaissement peut prendre l'une des deux formes suivantes :

- Dans un vrai effondrement, le béton se résorbe tout simplement, gardant plus ou moins de forme.
- Dans un affaissement de cisaillement, la partie supérieure du béton se détache et glisse latéralement.

Tableau 1.1. : Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams - norme (NF EN 206-1).

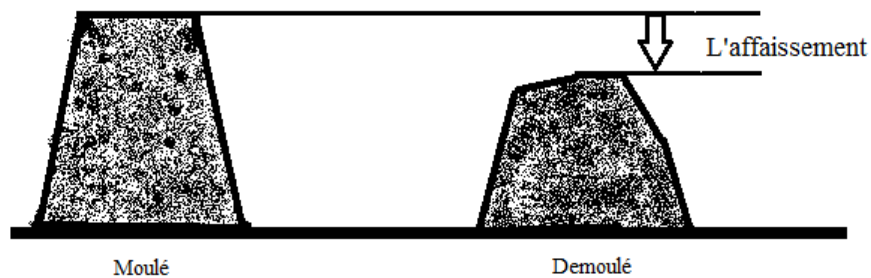
Classe	Affaissement [mm]	Propriété du béton frais
S1	10 – 40	Ferme, très secs et peu maniable.
S2	50 – 90	Plastique, à humidité moyenne et à maniabilité moyenne.
S3	100 – 150	Très plastique, très humide et à maniabilité élevée.
S4	160 – 220	Fluide, très humide et à maniabilité élevée.
S5	≥ 220	Très fluide, très humide et à maniabilité élevée.

Le mode de serrage et le temps de vibration sont en fonction de l'affaissement du béton (Tableau 1.2.).

Tableau 1.2. : Durée de vibration par couche d'éprouvette 16/32 en fonction de l'affaissement du béton. Données valables pour des granulats semi-concassés (NF P 18-422).

Affaissement [cm]	1	5	9	>10
Durée de vibration par couche [s]	27	19	14	12

- ✓ Au-dessous de 10 mm, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams peut être remplacé par l'essai Vébé.
- ✓ Au-dessus de 220 mm, on parle de béton fluide et l'essai d'affaissement au cône d'Abrams peut être remplacé par l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

**Figure 1.2. :** Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

V.1.2. Méthode Vébé :

Le test de Vébé est décrit dans (BS EN 12350-3), 2009.

L'appareil est rythmé sur une table vibrante. Le béton frais est compacté dans un moule d'affaissement conique. Le moule est retiré et un disque en plastique transparent est placé sur le dessus du béton. La table vibrante est démarrée et le temps nécessaire pour que le disque transparent soit complètement en contact avec le béton est mesuré. (figure 1.3.).

Le principal avantage de ce test est qu'il s'agit d'un test dynamique et qu'il peut être utilisé sur des bétons trop rigides pour un test d'affaissement.

Cet essai permet d'évaluer l'ouvrabilité d'un béton. L'affaissement statique dans un vase cylindrique est noté avant la mesure du temps d'étalement complet dans ce même récipient soumis à vibration. Si ce temps d'étalement (Tableau 1.3.), dit temps Vébé, est inférieur à 5 s ou supérieur à 30 s, le béton présente une consistance pour laquelle la méthode d'essai ne convient pas. La méthode est surtout utile pour les bétons peu maniables. (K.Ali Benyahia, 2010).

Tableau 1.3. : Classes Vébé (NF EN 206).

Classe	Temps Vébé [s]
V0	≥ 31
V1	30 à 21
V2	20 à 11
V3	10 à 5
V4	≤ 4

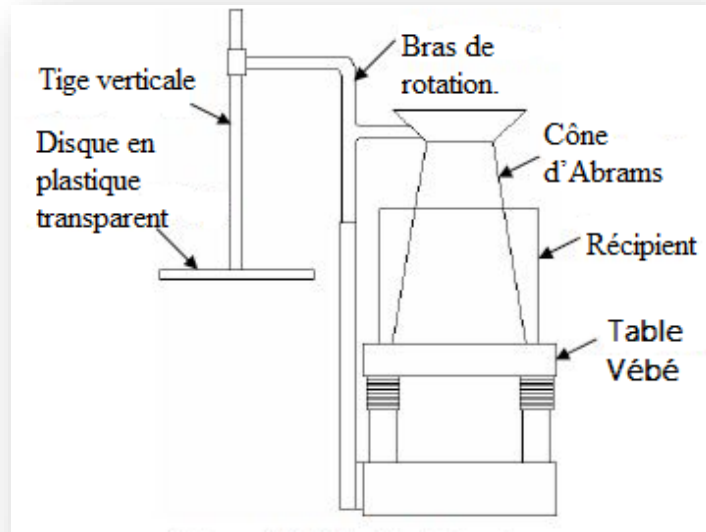


Figure 1.3. : Consistomètre de Vébé (<http://www.concrete.org.uk>).

V.1.3. Etalement à la table à secousses :

Cet essai est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton à s'étaler par écoulement, en effet il donne des valeurs faibles pour les bétons présentant une bonne cohésion et donne en revanche des valeurs plus élevées lorsque le béton a tendance à la ségrégation (K.Ali Benyahia, 2010).

Tableau 1.4. : Classe l'étalement du béton (NF EN 206).

Classe	Étalement en [mm]	Propriété du béton
F1	≤ 340	Ferme
F2	350 – 410	Plastique
F3	420 – 480	Mou
F4	490 – 550	Très mou
F5	560 – 620	Fluide
F6	630 – 700	Très fluide

V.1.4. Les paramètres permettant d'améliorer l'ouvrabilité :

Les facteurs qui influencent d'une manière significative sur l'ouvrabilité sont :

V.1.4.1. L'effet du rapport E/C :

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides. Au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent (S.Utsi, et al, 2003 cité par M.Ayad et Y.Barka ,2013). La figure 1.4 montre l'influence des différents rapports E/C sur la maniabilité du béton.

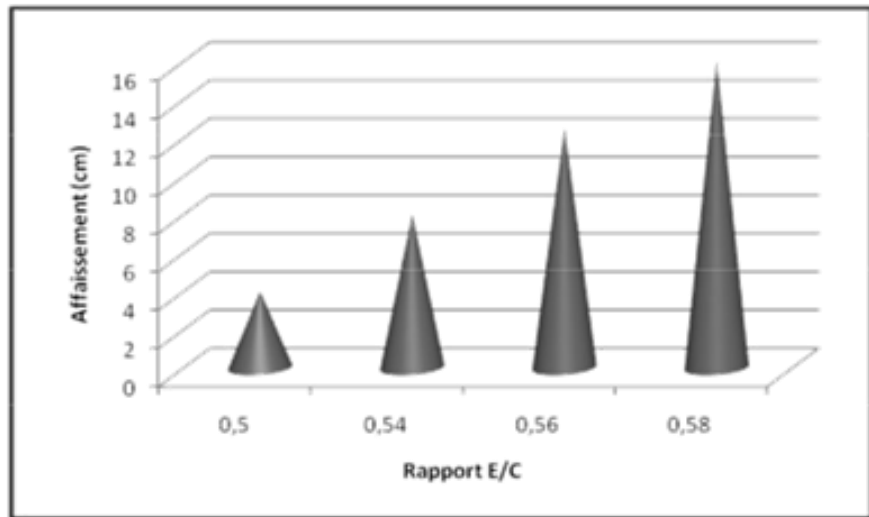


Figure 1.4. : L'influence du rapport E/C sur la maniabilité (Meftah.H et Arabi.N, 2012).

V.1.4.2. L'effet du rapport G/S :

Une étude réalisée sur des bétons fluides a fait ressortir que l'augmentation de la fraction volumique granulaire avait une influence négative sur les propriétés rhéologiques des bétons (O. Taleb et al, 2013).

L'optimisation du squelette granulaire et par conséquent le paramètre G/S est essentielle pour améliorer la fluidité du mélange (S.M.A. Boukli Hacene, 2010). Par une simulation numérique De Larrard (2000) a montré que le rapport G/S est essentiel pour l'améliorer l'ouvrabilité du béton (figure 1.5.).

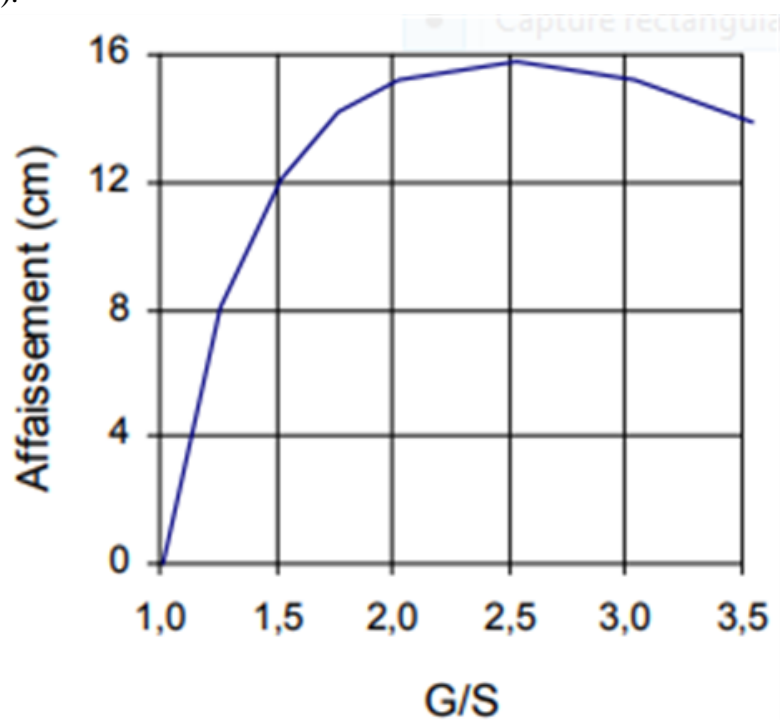


Figure 1.5. : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation) (F.DE Larrard, 2000).

V.1.4.3. L'effet des fillers calcaires :

Un filler calcaire est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires (NF P18-508).

L'appellation de filler calcaire vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci (N.Benyahia et N.Benkhenouche, 2016).

Les travaux de (Michel, 2007, Filltech, 2007 cité par N.Benyahia et N.Benkhenouche, 2016) montrent que la surface spécifique importante du filler calcaire induit une demande en eau plus importante, celle-ci va alors diminuer l'ouvrabilité du béton.

V.1.4.4. L'effet de l'utilisation des adjuvants :

Les adjuvants sont constitués de molécules organiques. Ils sont ajoutés au béton lors du malaxage. Par leur action chimique ou physique, Ces substances modifient certaines propriétés du béton frais ou du béton durci comme par exemple l'ouvrabilité, la prise, le durcissement ou la résistance au gel. (F.Tafouk et O.Mouzaoui, 2012).

Les adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons (figure1.6), mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité. Ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange (Cimbéton, 2005).

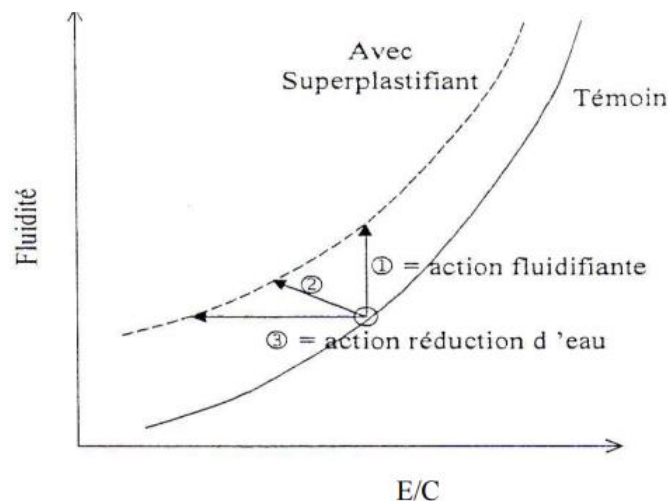


Figure 1.6. : Utilisation des superplastifiants (N.Tabet, 2012).

V.2. Résistance en compression :

V.2.1. Essai de compression :

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé. Cette résistance est caractérisée par la valeur mesurée des éprouvettes écrasées à vingt-huit jours (R_{c28}) selon la norme (NF EN 12390-3).

La résistance à la compression va être calculée par la formule suivante :

$$R = \frac{F}{S} \dots (1.1) \text{ Avec :}$$

R : La résistance en compression en MPa.

F : La force appliquée sur le cylindre en béton en MN.

S : L'air du cylindre en béton en m^2 .

V.2.1.1. Éprouvettes avec correction :

Différentes dimensions des éprouvettes sont décrites dans les normes de référence. Les coefficients ci-dessous permettent d'établir une correspondance entre les résultats obtenus d'un type d'éprouvette vers un autre pour des essais à 28 jours. Ils sont issus de l'amendement Européen à la norme (NF EN 206-1).

Les dimensions des éprouvettes :

- Cylindres de 160mm/320mm.
- Cylindres de 110mm/220mm pour $D_{max} \leq 22,4$ mm.
- Cubes de 100 mm pour $D_{max} \leq 22,4$ mm.

La lettre R désigne le résultat brut sans transposition exprimé en MPa du résultat d'essai réalisé avec les éprouvettes de la taille mentionnée précédemment.

La détermination de la valeur de "fc" :(tableau 1.5.)

Où R : Résultat brut. et fc (cube ou cyl) : résultat d'essai en compression.

Tableau 1.5. : Équivalence des résistances obtenues sur cubes de 100 et cylindre \varnothing 113 mm et \varnothing 150 mm.

Détermination de f_c à partir de R		
Éprouvettes cylindriques		Éprouvettes cubiques de 100 mm
160mm / 320mm	110mm / 220mm	
$f_{c,cyl} = R$	$f_{c, cyl} = 0,98 * R$ Si $R \geq 50$ MPa	$f_{c, cub} = 0,97 * R$ Si $R \geq 50$ MPa
	$f_{c,cyl} = R - 1$ Si $R < 50$ MPa	$f_{c, cyl} = R - 1,5$ Si $R < 50$ MPa

V.2.2. Essai à l'ultrason :

Cet essai permet de déterminer de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Il consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée (relation N°1.2).

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il est mentionné sur le tableau 1.6. (R. GovindKhare et R. F. Feidman, 2005 cité par K.Ali Benyahia ,2017).

$$V = \frac{L}{T} \dots (1.2) \quad \text{Où :}$$

V : la vitesse d'impulsion (m/s).

L : la longueur du parcours (m).

T : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (s).

Tableau 1.6. : Relation entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion (Feidman, 2005).

Vitesse de propagation des impulsions [m/s]	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 - 4500	Bonne
3000 - 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

Une relation permet d'estimer la résistance en fonction de la vitesse de propagation (D.Boukhelkhal et col, 2015) : $R = 0,342 \exp (1,004 V)$.

Certains chercheurs ont trouvé que cette relation est plutôt linéaire (figure 1.7.) alors que d'autres auteurs ont montré que la corrélation est plutôt de type exponentielle (figure 1.8.).

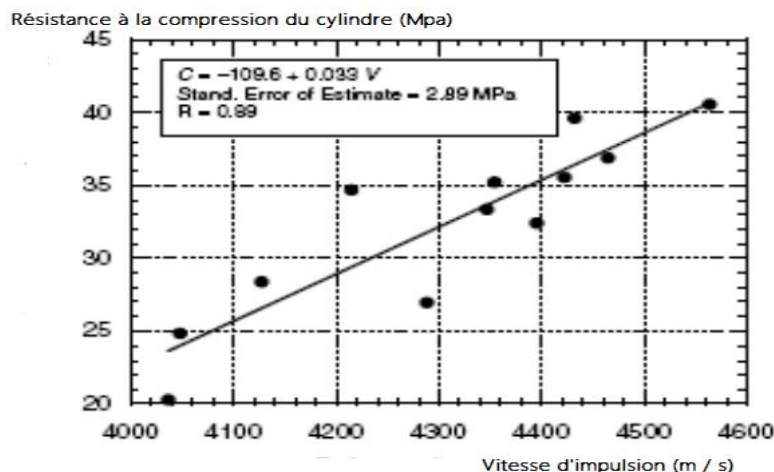


Figure 1.7. : Corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonore (K.Ali Benyahia, 2010).

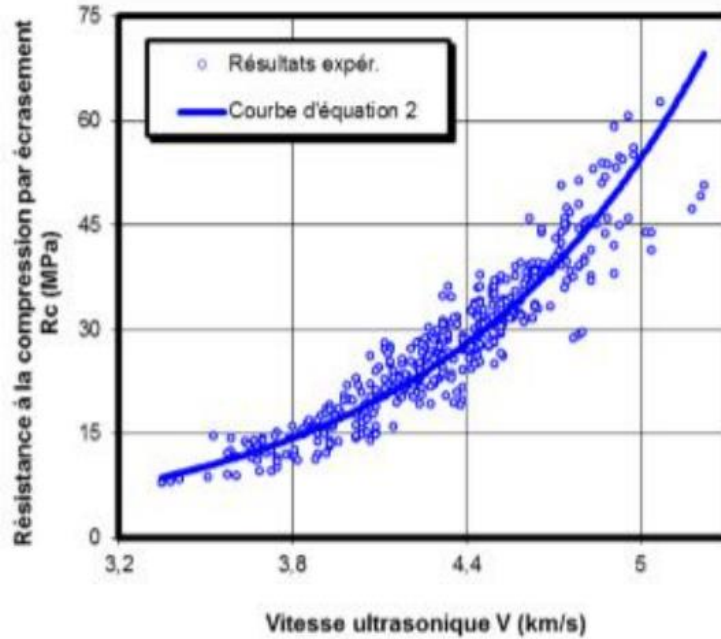


Figure 1.8. : Corrélation résistance à la compression –vitesse ultrasonique (D.Boukhelkhal et col, 2015).

V.2.3. Les paramètres permettant de modifier la résistance à la compression :

V.2.3.1. L'effet du rapport E/C :

Plus le rapport E/C est faible, plus initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins importantes ; il y aura moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates (B.S. Elbahi , 2004).

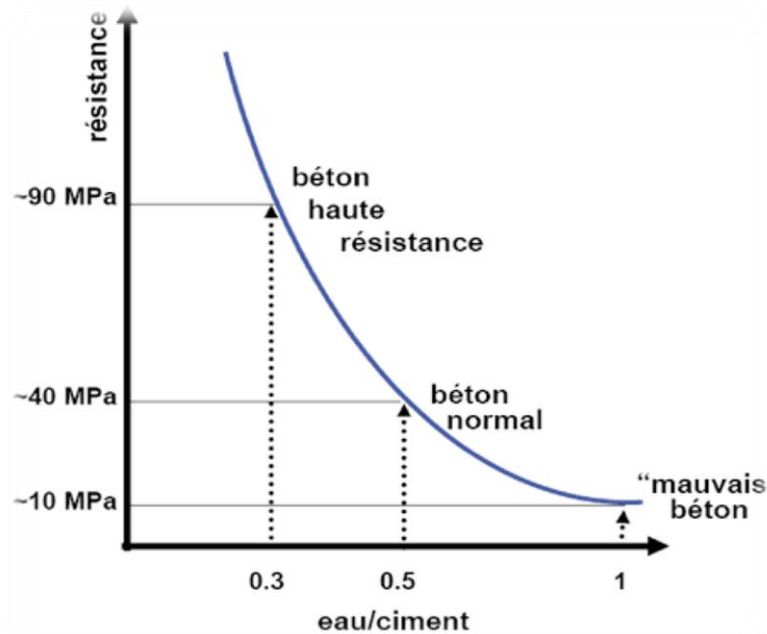


Figure 1.9. : L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression d'un béton ordinaire (<http://www.guidebeton.com>).

Le squelette granulaire augmente la résistance à la compression du béton, les granulats de concassés qui sont de forme rugueuse aboutit à une forte adhérence entre le ciment et les granulats (figure 1.15), par contre la surface lisse affaiblit la résistance jusqu'à 10% de moins (Neville AM, 2000).

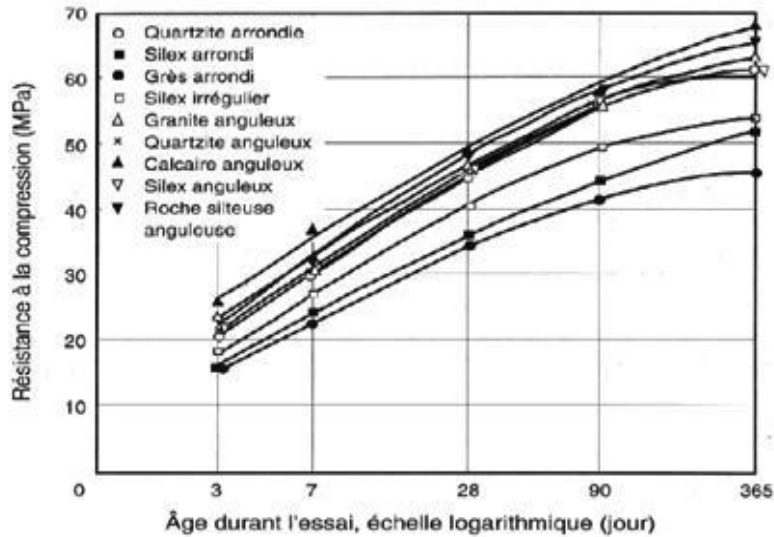


Figure 1.10. : Relation entre la résistance à la compression et l'âge de bétons confectionnés avec différents granulats ($E/C=0,50$) (Neville AM, 2000).

Une augmentation du rapport E/C signifie une augmentation de l'affaissement du béton à l'état frais, en parallèle elle diminue la résistance à la compression du béton à l'état durci. La résistance à la compression est d'autant plus élevée quand le rapport E/C diminue et l'affaissement diminue en diminuant le rapport E/C , donc le rapport E/C est en relation proportionnelle avec l'affaissement et en relation inversement proportionnelle avec la résistance à la compression (I-Cheng Yeh, 2006).

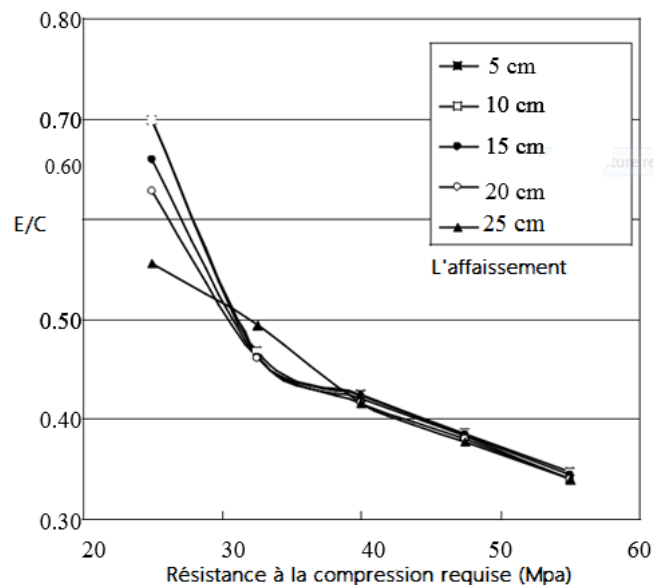


Figure 1.11. : L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression et l'affaissement d'un béton ordinaire. (I-Cheng Yeh, 2006).

La figure 1.12. : donne un aperçu sur le rapport E/C auquel la résistance du béton à la compression varie inversement proportionnelle, par contre cette dernière décroît en fonction du dosage en eau E, et croît au même temps que le dosage en ciment, c'est-à-dire que le dosage en eau baisse la résistance et le dosage en ciment contribue à une augmentation de celle-ci. (K.Ali Benyahia ,2010).

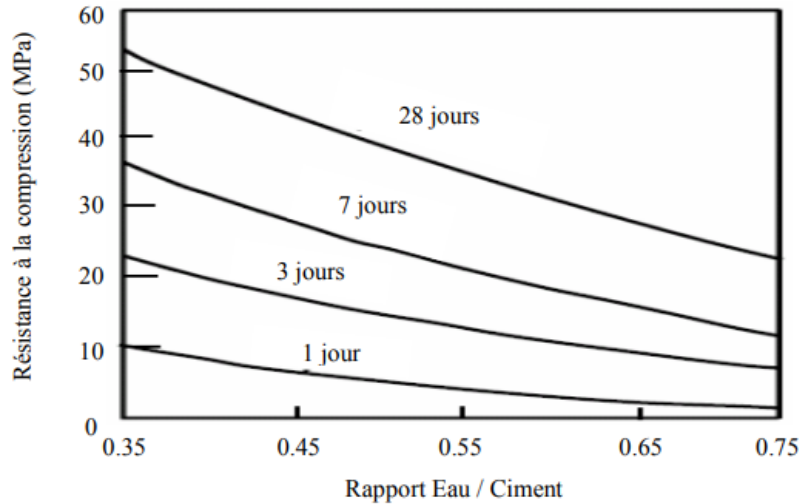


Figure 1.12. : Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression du béton (K.Ali Benyahia ,2010).

V.2.3.2. L'effet du rapport G/S :

Pour obtenir une résistance à la compression maximale, le mélange granulaire doit être optimisé pour laisser le moins de vides possible et la pâte de ciment doit combler les vides, mais sans excès de pâte. Le rapport G/S influe sur la résistance du béton, mais la tendance et l'amplitude de cette variation dépend du type de sable, du type de graviers et du dosage en ciment. Quand le rapport G/S est faible, l'espace inter-granulaire diminue mais la surface spécifique des granulats est élevée. Dans ce cas on aura besoin de plus de pâte de ciment pour couvrir la surface des granulats.

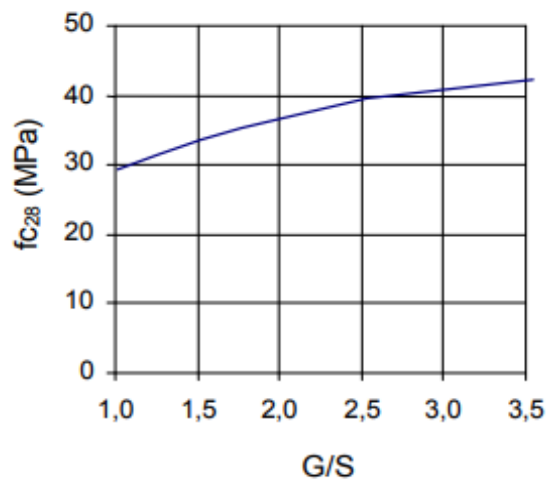


Figure 1.13. : Effet du rapport G/S dans un béton ayant $C=350 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,56$ (simulation) (F.DE Larrard ,2000).

Le gravier utilisé dans le béton offre une résistance remarquable au béton ceci induit à dire que la résistance à la compression augmente en fonction de l'augmentation le rapport G/S, comme montre la figure 1.14. On remarque que l'allure de ces courbes est la même que celle obtenue pour le béton témoin, ceci confirme l'influence du rapport G/S qui n'est pas sur le mécanisme d'hydratation au cours du temps (B.S.Elbahi ,2004).

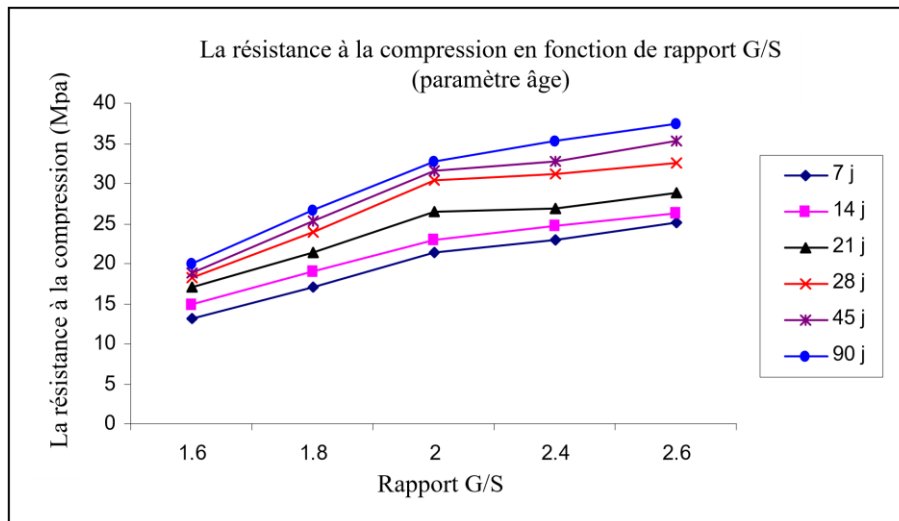


Figure 1.14. : La résistance à la compression en fonction de rapport G/S (B.S.Elbahi ,2004).

V.2.3.3. L'effet de l'utilisation des adjuvants :

La norme européenne (NF EN 934-2) retient la classification suivante :

Le superplastifiant haut réducteur d'eau permet de réduire fortement la teneur en eau du béton qui amène à des résistances plus élevée.

En plus, avec leur effet stérique et électrostatique, les superplastifiants peuvent défloculer correctement les grumeaux de ciments, ce qui amène à une meilleure hydratation et à de meilleures résistances mécaniques.

Le tableau 1.7. : présente les caractéristiques qui peuvent être changées grâce à certains adjuvants.

Tableau 1.7. : Adjuvants modifiant la prise et le durcissement du ciment (Cimbéton, 2005).

Adjuvants		Choix du type d'adjuvant en fonction de sa propriété							
Propriété		Réducteurs d'eau	Plastifiants	Superplastifiants	Accélérateurs de durcissement	Accélérateurs de prise	Retardateurs de prise	Entraîneurs d'air	Hydrofuges de masses
Ouvrabilité			+	+				+	
Temps de prise						-	+		
Résistances	à court terme (3j)	+		+	+	+	-	-	
	A long terme (>28 j)	+		+		=	+	-	
Air occlus								+	
Résistance au gel à l'état durci		+						+	
Compacité		+	+	+					
État de surface			+					+	
Perméabilité sous pression hydraulique				-					-

V.2.3.4. L'effet des fillers calcaires :

Selon les études faites par (Michel, 2007), (Topçu, 2003), (Felekoglu, 2007), l'utilisation de fillers permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires.

Tafouk et Mouzaoui ont remarqué que l'utilisation des fillers calcaires amène à des résistances au jeune âge et à 28 jours, presque comparables à celle des bétons ordinaires. Ce qui veut dire que les fillers calcaires ont un effet favorable grâce à leurs tailles qui permettent de donner des résistances acceptables. Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats.

D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation. (N.Benyahia et N.Benkhenouche, 2016).

D'un autre côté, les fines calcaires ont une double action sur le béton à jeune âge. Elles ont un effet accélérateur de l'hydratation car ces grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates (Anderson R, H.E Gram, 1978 cité par Y.Labiad et N.Sbai, 2016).

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment (figure 1.15.) et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) (G.Escadeillas ,1988 cité par. Y.Labiad et N.Sbai, 2016).

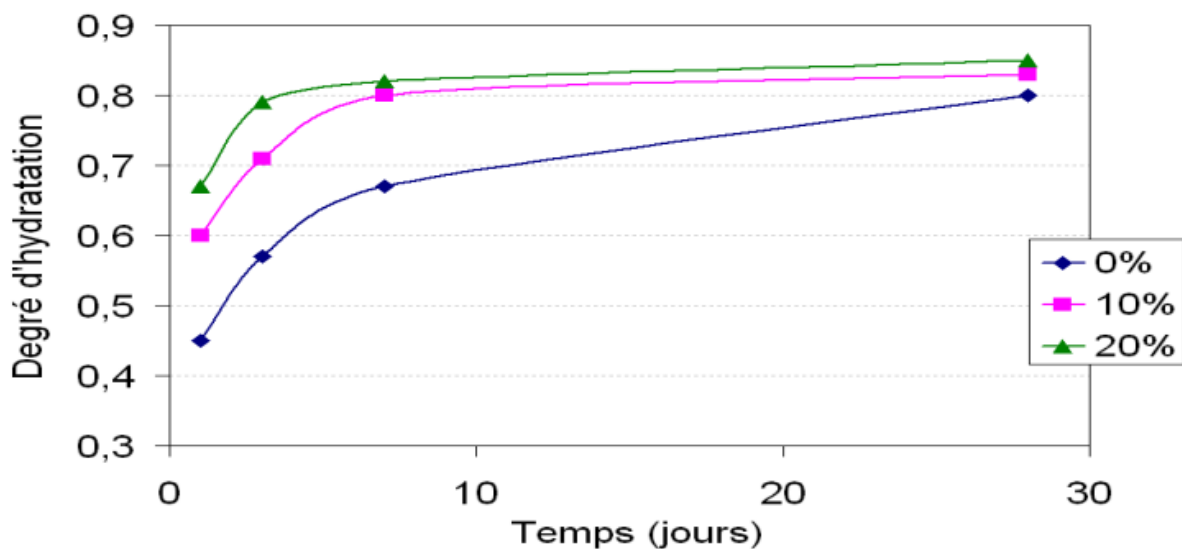


Figure 1.15. : Évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%) (Y.Labiad et N.Sbai, 2016).

V.2.3.5. L'effet de la propreté des granulats :

Les impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui peut avoir une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée (S.M.A Boukli hacene, 2010).

D'après Drissi et al, (2015), la propreté des granulats influe sur la résistance des bétons. Une meilleure résistance à la compression est obtenue avec granulats propres.

V.2.3.6. L'effet de la taille maximale des granulats :

Le diamètre maximal des granulats influe négativement sur la qualité du béton. (Drissi et al, 2015) ont montré que le béton avec un $D_{max}=16\text{mm}$ offre une meilleure résistance à la compression par rapport à un béton ayant un $D_{max}=25\text{mm}$. Par contre, (Dreux et al, 2002) dans leur ouvrage ont mentionné le contraire.

V.2.3.7. L'effet de la granularité :

Les granulats se sont les matériaux inertes (sables, graviers), qui entrent dans la composition des bétons et jouant un rôle prépondérant dans la résistance du béton.

En effet, la fissuration du béton est due généralement, soit à la fissuration des granulats, soit à la rupture de l'adhérence de la pâte de ciment avec les granulats. Il est donc de première importance de bien choisir les granulats, ces derniers influencent la résistance à la compression du béton par la granularité, qui peut-être continue ou discontinue.

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité. Par contre, la granularité discontinue présentant en général des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable, conduit à des résistances en compression un peu supérieure mais parfois au détriment de l'ouvrabilité (K.Ali Benyahia ,2010).

Conclusion :

De nos jours, la formulation de bétons devient spécifiquement adaptée à la problématique de chaque ouvrage, que ce soit en termes de fluidité, de comportement mécanique à jeune âge ou à long terme ou de durabilité. Toutefois, la connaissance de l'influence de chaque constituant devient nécessaire pour avoir des bétons ayant des caractéristiques recherchés.

Le deuxième chapitre décrit la méthode adoptée lors la formulation des bétons étudiés, c'est la méthode des plans d'expériences.

Références bibliographiques :

ALI BENYAHIA KHOUDJA. (2010) ; Corrélations entre Essais non Destructifs et Essais Destructifs du Béton à Faible Résistance, Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie. 135p.

ALI BENYAHIA KHODJA. (2017) ; Contrôle de la Qualité du Béton de Structures par les Essais Non Destructifs, Thèse de Doctorat à l'université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie. 168p.

AYAD MOHAMED ET BARKA YASSINE. (2013) ; Modélisation des bétons ordinaires par les plans d'expériences, mémoire du master, université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.130p.

BENYAHIA NABIL ET BENKHENNOUCHE NASREDDINE. (2016) ; Etude de l'influence des fillers calcaires, rapport (Eau/Ciment) et taux d'adjuvant sur la résistance mécanique d'un mortier à base d'un sable de concassage, mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Algérie. 80p.

BOUKHELKHAL DJAMILA ET KENAI SAÏD. (2015) ; Détermination non destructive de la résistance du Béton sur site (Scléromètre & Ultrason). 9p.

BOUKLI HACENE S. M. A, (2010) ; Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCEM. Thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen. 193p.

BOUNEDJEMA YASSINE. (2017) ; Evaluation des modifications mécaniques Et rhéologiques apportées par le sable de concassage aux mortiers et bétons, thèse de Doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie. 154p.

CHENG YEH I. (2006) ; Conception assistée par ordinateur pour les mélanges de béton optimal. 11p

CIMBETON CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS. (2005) ; Tome 1, Les constituants des bétons et des mortiers, école française du béton. 71p.

DE LARRAD FRANÇOIS. (2000) ; Structures granulaires et formulation des bétons, IST. 144p.

DRISSI.M, MEZGHICHE.B, KHOUADJIA. M. L. K., (2015) ; influence des paramètres de compositions du béton sur sa résistance de compression, Université de Biskra, Algérie. 5p.

ELBAHI BOUBAKEUR SEDDIK. (2004) ; Influence des paramètres de formulation et des conditions de mise en œuvre et de conservation sur la perméabilité à l'eau d'un béton, Magister, Université Mohamed Boudiaf De M'sila, Algérie. 94p.

FEIDMAN.R. F. ; "Essais non destructifs du béton", CBD-187-F, 2005, 6p.

GHOMARI FOUAD. (2014) ; Cours de MDC, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

LABIAD YACINE ET SBAI NASREDDINE. (2016) ; L'effet de durcissement à la vapeur initiale par l'énergie solaire sur la résistance en compression des bétons contenant des fillers calcaires, mémoire de Master, Université Ziane Achour de Djelfa, Algérie. 72p.

MEFTAH HOURIA ET ARABI NOURREDINE. (2012) ; L'effet du rapport E/C sur le comportement des bétons à hautes températures, laboratoire Génie Civil, université BADJI Mokhtar Annaba, Algérie. 9p.

MICHEL.F, PIERARD.J, COURARD.L, ET POLLET.V (2007) ; Influence of physico-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances, Proceedings of the International RILEM Symposium on SCC, p205-210, Ghent, Belgium. 8p.

NEVILLE. A.M. (2000) ; Propriétés of concrete, 5^{ème} édition. 2866p. ISBN 978-0-273-75580-7.

TABET NESRINE, (2012) : Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplaçants fibres (BAPF), Mémoire de Magister, l'université M'hamed bougra-Boumerdes, Algérie.176p.

TAFOUK FATIMA ET MOUZAOUI OUAHIBA. (2012) ; Etude de l'influence des ajouts sur les résistances du béton, mémoire de Master, université a. mira Bejaïa, Algérie. 117p.

TALEB O., GHOMARI F., BOUKLI HACENE S.M.A., (2013) : Modélisation des bétons autobloquants par les plans d'expérience, 1st International Conférence on Civil Engineering, 8 – 9 May 2012, Université de Laghouat, Algérie.

ZREIKI JIHAD (2009) ; Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages, thèse de Doctorat, Université Paris 6. 266p.

BS EN 12350-2 : Essais pour béton frais. Essai d'affaissement - Testing fresh concrete. Slump-test, 2009.

BS EN 12350-3 : Essais pour béton frais. Essai Vébé - Testing fresh concrete. Vebe test, 2009.

NF EN 206 : Béton - Spécification, performances, production et conformité, 2014.

NF EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité, 2004.

NF P 18-422 : Bétons - Mise en place par aiguille vibrante, 1981.

NF P18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, 2012.

<http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=979> (Consulté en 02//05/2018)

<http://www.guidebeton.com/ajout-eau-beton> (Consulté en 02//05/2018)

CHAPITRE 2

Plans d'expériences

Ce chapitre regroupe les notions de base de la méthode des plans d'expériences, qui restent un moyen efficace pour réduire le nombre d'essais expérimentaux à réaliser et prédire des modèles grâce à plusieurs logiciels de statistique tel que Minitab.
Quelques exemples d'application de cette méthode statistique sur les matériaux cimentaires sont aussi présentés dans cette partie.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2 :

I. Introduction.....	24
II. Étapes d'une étude par les plans d'expériences.....	26
III. Processus d'acquisition des connaissances.....	27
IV. Facteurs et réponses.....	27
V. Types de plans d'expérience.....	28
VI. Les logiciels utilisés pour les plans d'expériences.....	29
VII. Quelques applications des plans d'expériences dans le domaine des matériaux cimentaires :.....	32
Conclusion :.....	41
Références bibliographiques :.....	42

I. Introduction :

I.1. Introduction aux plans d'expériences :

Les plans d'expériences représentent la suite ordonnée des essais d'une expérimentation, chacun permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée pour obtenir des résultats validant un modèle avec une bonne économie (<https://fr.wikipedia.org>).

Seule la réalisation d'expériences va permettre d'appréhender et de modéliser les phénomènes complexes. Si ces expériences sont exécutées sans une méthodologie rigoureuse il est fort probable qu'elles vont conduire à des impasses c'est à dire à des modèles impossibles à ajuster ou à des résultats incohérents ou encore à des résultats de mauvaise qualité.

Selon Tinsson (2010), l'objectif principal des plans d'expérience peut être résumé par la devise : "obtenir un maximum d'information en un minimum d'expériences". (W. Tinsson, 2010).

En effet, le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation de résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier (P. Triboulet, 2008).

Les paramètres que l'on fait varier au cours des essais sont appelés facteurs, et les valeurs possibles que l'on attribue à un facteur sont appelées niveaux (L.Gendre, 2009).

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres.
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées (M.Ayad et Y.Barka, 2013).

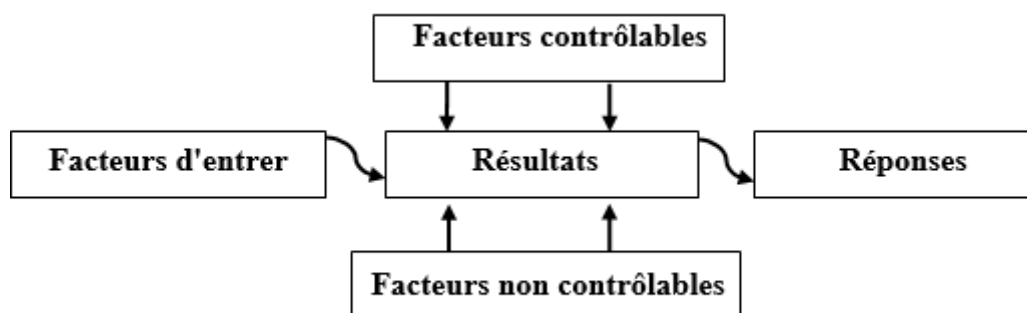


Figure 2.1. : Les variables expérimentaux.

S.Vivier, (2002) a cité deux principales utilisations possibles de la méthode des plans d'expériences qui sont :

- **La technique du screening :**

Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, cet outil permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. On procède ainsi implicitement à une simplification du problème. On recherche pourquoi la réponse varie et en fonction de quels facteurs (S. Vivier, 2002).

La technique du screening permet d'avancer dans la compréhension de tout système. Elle donne ainsi la possibilité de ne retenir que les grandeurs lignes d'intérêt.

Cependant, elle ne peut assurer de façon satisfaisante des études au caractère principalement quantitatif (S. Vivier, 2002).

- **La méthodologie des surfaces de réponse :**

Les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative, le but est de déterminer la façon avec laquelle varie la réponse.

La méthode des surfaces de réponse doit donc être vue comme un ensemble d'outils permettant la compréhension et l'exploitation d'objets simplificateurs de la fonction réponse étudiée, plus largement et plus aisément exploitables (S. Vivier, 2002).

I.2.Conditions d'application des plans d'expériences :

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions (Sier, 1993 cité dans M.Ayad et Y.Barka, 2013) :

- **Condition 1 :**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable est négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- **Condition 2 :**

L'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

II. Étapes d'une étude par les plans d'expériences :

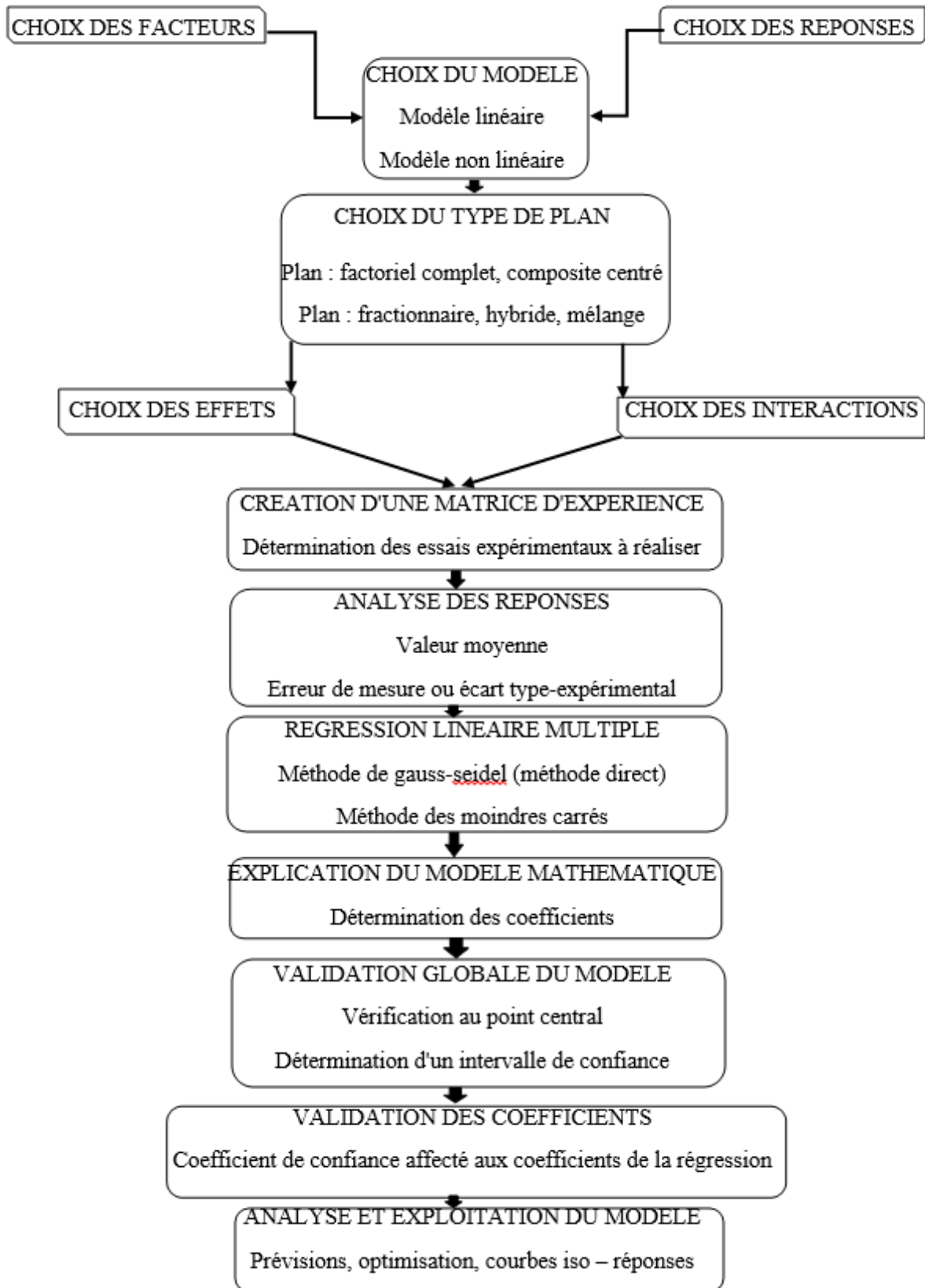


Figure 2.2. : Organigramme général de traitement des plans d'expériences (S.M.A. Boukli Hacene, 2010).

III. Processus d'acquisition des connaissances :

Augmenter ses connaissances consiste à trouver les réponses aux questions posées. Ces questions délimitent le problème à résoudre et fixent les travaux à exécuter. Il est donc important de se poser les questions qui correspondent réellement au problème. Bien sûr, avant d'entreprendre des expériences, il est prudent de vérifier que l'information cherchée n'existe pas déjà ailleurs. Dans ce but, on effectue un inventaire des connaissances, soit une bibliographie, soit une consultation avec des spécialistes, soit une démarche ayant pour but de répondre sans expérience aux questions posées. Après cette phase d'enquête, les questions initiales peuvent être entièrement résolues sans problèmes. Dans le cas contraire, certaines questions restent inchangées ou peuvent être modifiées : il est alors nécessaire d'entreprendre des expériences pour obtenir les réponses complètes. N'ayant plus que les questions sans réponse, il est nécessaire d'entamer les bonnes expériences pour arriver rapidement aux meilleurs résultats possibles et éviter de réaliser des expériences inutiles.

Il est aussi important d'obtenir la meilleure précision possible sur les résultats pour pouvoir établir la modélisation du phénomène étudié, et découvrir la solution optimale (J. Goupy, 2013).

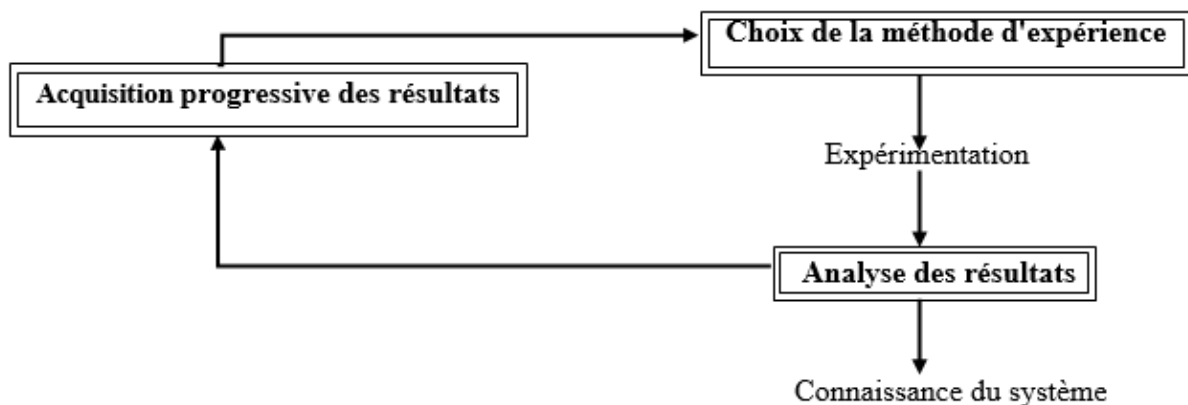


Figure 2.3. : Processus d'acquisition des connaissances (B.Bezzina ,2012).

IV. Facteurs et réponses :

De manière générale, la méthode des plans d'expériences consiste à établir des relations entre deux types de variables :

- La réponse : grandeur physique étudiée.
- Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influé sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux (S. Vivier, 2002).

IV.1. Choix des facteurs :

Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. Un facteur est une grandeur le plus souvent mesurable mais il peut s'agir d'une grandeur qualitative.

Parmi les facteurs on distinguera :

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...).
- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...).
- Les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température, rendement ...) (P.Triboulet, 2008).

IV.2. Les différents types de facteurs :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude.

On distingue plusieurs types de facteurs (J. Goupy, 2013) :

- **Facteurs continus** : Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques et peuvent être représenté par un facteur discret, par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui représente une signification.
- **Facteurs ordonnables** : Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique.
- **Facteurs booléens** : Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs.

IV.3. Choix des réponses :

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation (ségrégation, pas de ségrégation) sur un béton. (P.Triboulet, 2008, M.Ayad et Y.Barka, 2013).

V. Types de plans d'expérience :

Différents types de plans d'expériences peuvent être utilisés :

V.1. Plans factoriels complets :

L'introduction aux plans factoriels complets est représenté par (2^k) expériences où « k » représente le nombre de facteurs. Il permettra d'introduire les principales notations utilisées par la méthode des plans d'expériences. Il servira également de base à une généralisation des écritures mathématiques utilisées (S.Vivier, 2002).

V.2. Plans centrés composites :

- **Effet quadratique d'un facteur :**

C'est le fait qu'un facteur voit son effet sur la réponse modifier en fonction de son propre niveau (figure 2.4.) (Sier, 1993 cité par A.Kaoua, 2008) (Interaction du premier ordre entre un facteur et lui-même). Donc pour pouvoir l'observer le facteur se doit d'avoir plus de deux niveaux.

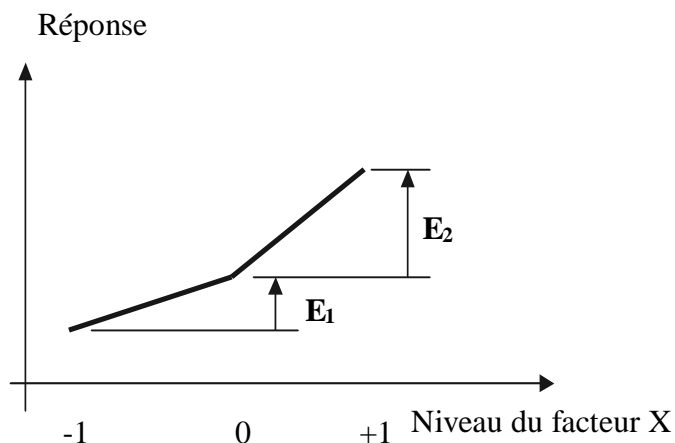


Figure 2.4. : Effet quadratique (A.Kaoua, 2008).

E1 : Effet du facteur « X » quand il passe du niveau « -1 » au niveau « 0 ».

E2 : Effet du facteur « X » quand il passe du niveau « 0 » au niveau « +1 ».

Si E1 est différent d'E2, le facteur « X » est en interaction avec lui-même (Effet quadratique).

V.3. Plans fractionnaires :

Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'inflation rapide du nombre d'essais dans les plans complets avec (2^{k-p}) expériences. L'objectif des plans fractionnaires va consister à réduire le nombre d'expériences à réaliser par rapport au nombre maximum donné par le plan complet.

V.4. Plans mélanges :

Les plans de mélanges sont seulement utilisés lorsque les facteurs d'étude sont les proportions des constituants d'un mélange. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. (B.Bezzina, 2012).

VI. Les logiciels utilisés pour les plans d'expériences :

L'outil informatique est nécessaire à la réalisation rapide et précise d'une étude basée sur les plans d'expérience. Ceci peut être utile tout d'abord pour bénéficier d'une assistance à la création d'un plan d'expérience, ensuite pour réaliser tous les calculs fastidieux et enfin pour obtenir les modèles recherchés présentons ici brièvement diverses solutions logicielles.

- Logiciels non - spécialisés : Excel, Pascal, Matlab.
- Logiciels spécialisés en statistique : SAS, SPSS.
- Logiciels spécialisés en plans d'expérience : Minitab, Statistica, JMP.

VI.1. Introduction au logiciel MINITAB :

Le logiciel Minitab est un logiciel de statistiques dans lequel une partie est consacrée aux plans d'expériences.

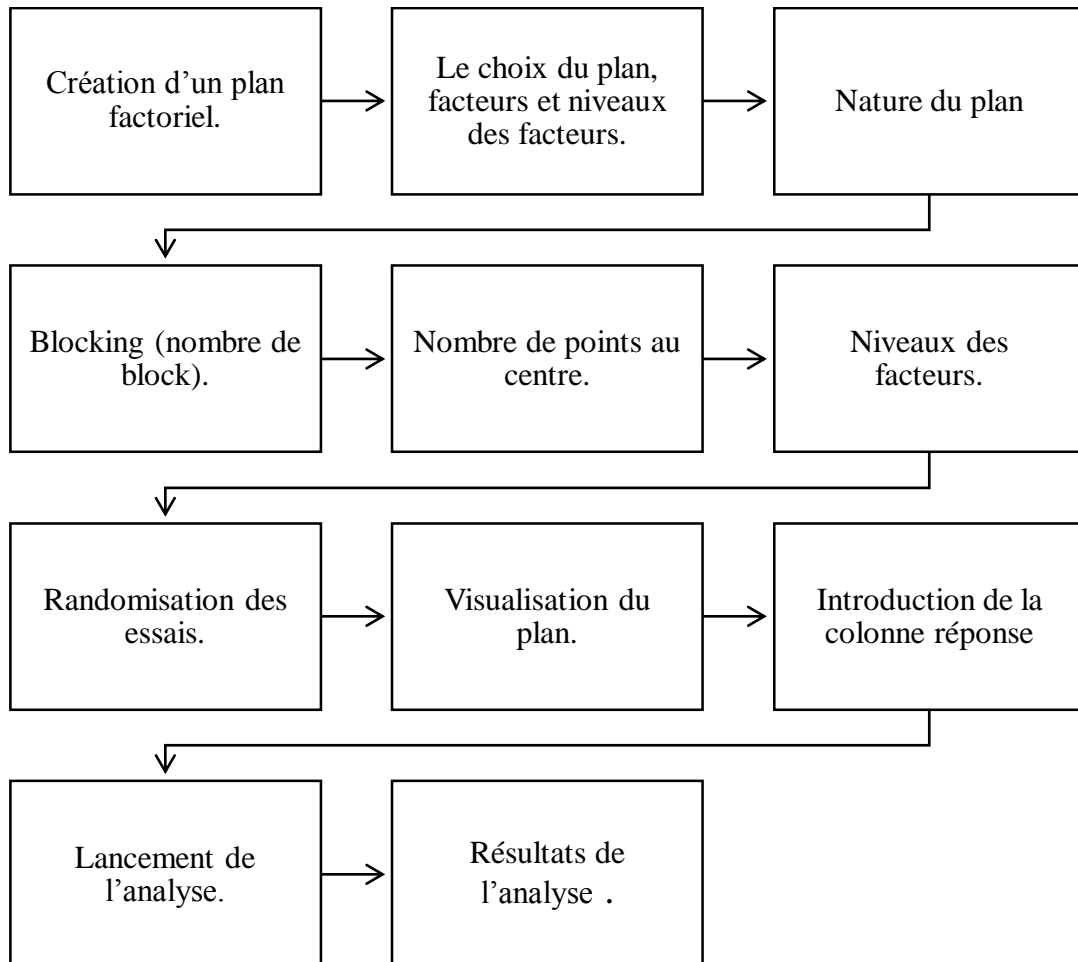
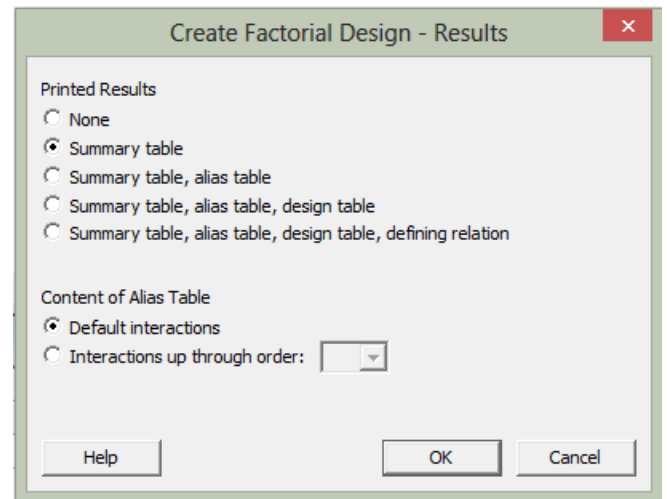
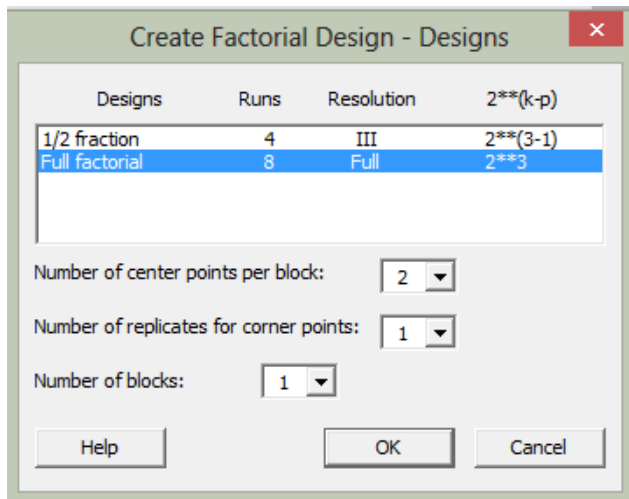
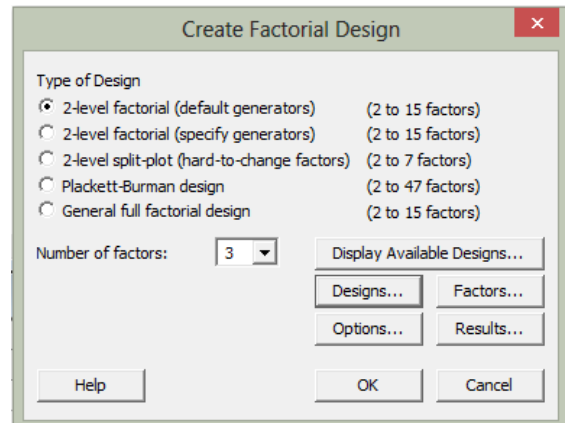
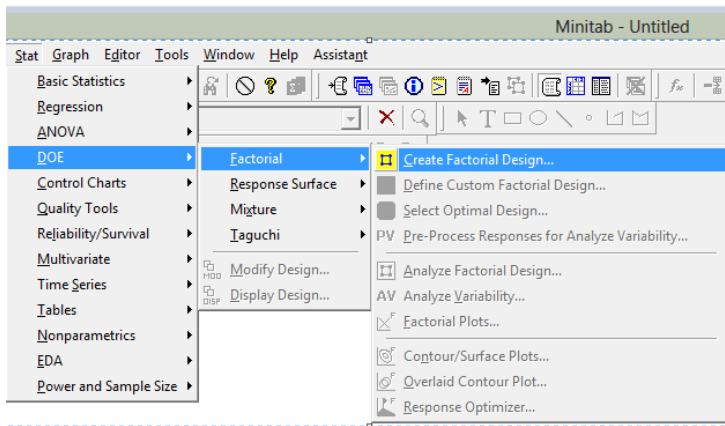


Figure 2.5. : Introduction au MINITAB.

Les étapes d'exécution sous Minitab sont résumées sur les figures suivantes :



C5	C6	C7
FC	G/S	G16/25
0,00	1,2	0
87,50	1,2	0
0,00	1,8	0
87,50	1,8	0
0,00	1,2	450
87,50	1,2	450
0,00	1,8	450
87,50	1,8	450
43,75	1,5	225
43,75	1,5	225

VII. Quelques applications des plans d'expériences dans le domaine des matériaux cimentaires :

VII.1. Sur les bétons ordinaires : (A.Kaoua, 2008)

- Facteurs et leurs niveaux : (MINITAB)

Tableau 2.1. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	niveaux	
Ciment C (kg/m ³)	325	-1
	370	+1
Eau E (l / m ³)	180	-1
	190	+1
rapport (gravier / sable) G/S (%)	1,6	-1
	1,8	+1
rapport (gravier1 / gravier2) Q (%)	0,25	-1
	4	+1

- Réponses :

Volume d'air occlus, affaissement, résistances mécaniques à 7 et 28 jours (compression et traction).

- Modèles et figures adoptées :

A.Kaoua (2008), a montré que l'affaissement et la résistance mécanique sont principalement gouvernés par le rapport E/C.

$$\text{Aff} = 9,31 + 0,640 \text{ E/C} - 0,5 \text{ Q} - 0,526 \text{ E/C} * \text{G/S} + 0,6 \text{ E/C} * \text{Q}.$$

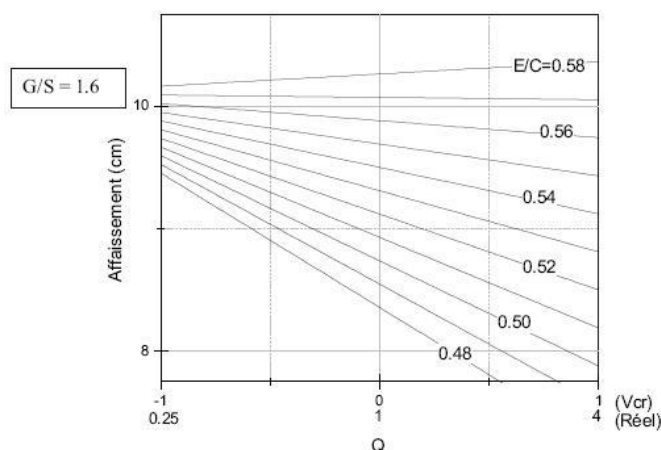


Figure 2.6. : Courbe iso valeur du rapport E/C. Pour (G/S = 1,6).

Pour la résistance à la compression (R_{C28}) :

$$R_{C28} = 29,1 - 4,23 \text{ E/C}.$$

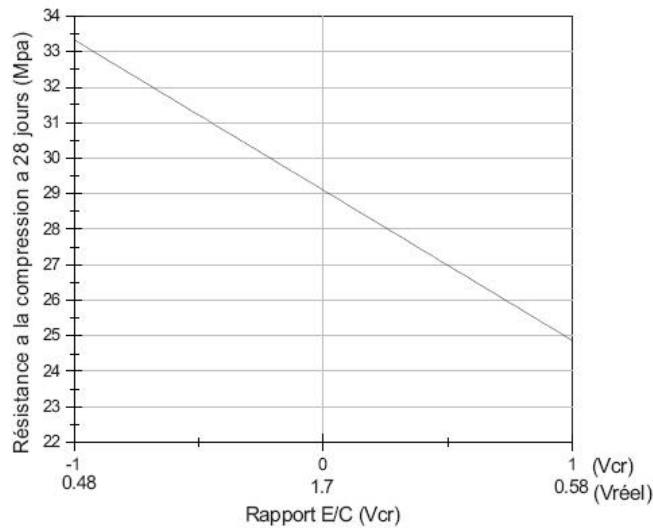


Figure 2.7. : Courbe iso valeur de la résistance en fonction du rapport E/C.

VII.2. Sur l'optimisation des procédures de bétonnage par temps chaud : (Bella et al, 2011)

- **Facteurs et leurs niveaux : (MINITAB)**

Tableau 2.2. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	Niveaux	
	Fibre(FB)	0
	600	+1
Produit De cure (PC)	0	-1
	200	+1
Retardateur (RT)	0	-1
	1	+1
Eau glace (EG)	0	-1
	25	+1
Film plastique (FP)	Sans	-1
	Avec	+1
Changement de ciment	-	-1
	-	+1

- **Réponses :**

Les réponses sont : l'évaporation, le retrait plastique et total, la résistance à la compression à 3 et 14 Jours.

- **Modèles et figures adoptées :**

Pour la résistance à court terme, la figure 2.8. établie par les auteurs montre que l'effet du retardateur est le plus important suivi par l'eau glacée alors que l'effet des autres facteurs reste négligeable.

Par contre, tous les facteurs deviennent influents sur la résistance à moyen terme (14 jours) comme le montre la figure 2.9., avec une influence prépondérante de la fibre, suivie par l'eau glacée et le produit de cure, ensuite la couverture en film plastique.

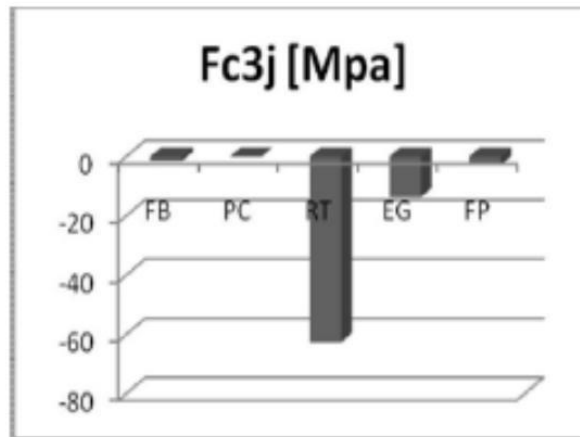


Figure 2.8. : Résistance à la compression à 3J.

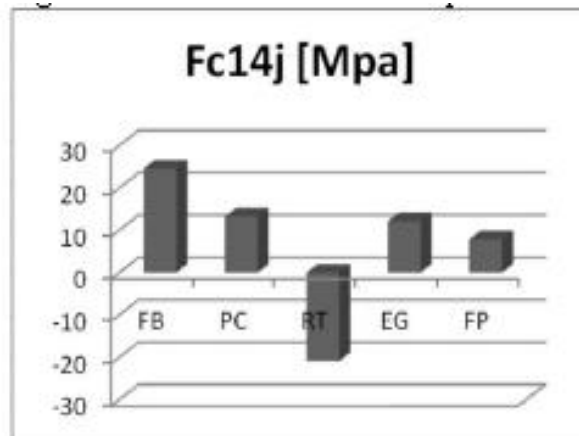


Figure 2.9. : Résistance à la compression à 14J.

VII.3. Sur l'étude de nouvelle formulation d'adjuvant hydrofuge pour applications diverses : (Belgacem Bezzina ,2012)

- Facteurs et leurs niveaux : (logiciel JMP)

Tableau 2.3. : Tableau récapitulant les facteurs contrôlés choisis et leurs niveaux.

Les facteurs	Intervention dans le plan	Valeurs des niveaux
A (Huile)	5 niveaux	10 ; 17,2 ; 20 ; 30 ; 32,5
B (NaOH)	5 niveaux	0 ; 5 ; 10 ; 11 ; 20
[B] [NaOH]	4 niveaux	0 ; 5 ; 10 ; 15
C (Ethanol)	4 niveaux	0 ; 5 ; 10 ; 20
[C] [Ethanol]	5 niveaux	0 ; 50 ; 90 ; 80 ; 95
D (Eau)	8 niveaux	0 ; 20 ; 40 ; 44 ; 60 ; 100 ; 115 ; 120
E (Emulsifiant)	4 niveaux	0 ; 1 ; 1,4 ; 1,7

- **Réponses :** La capillarité, la porosité, la résistance à la compression et à la flexion.

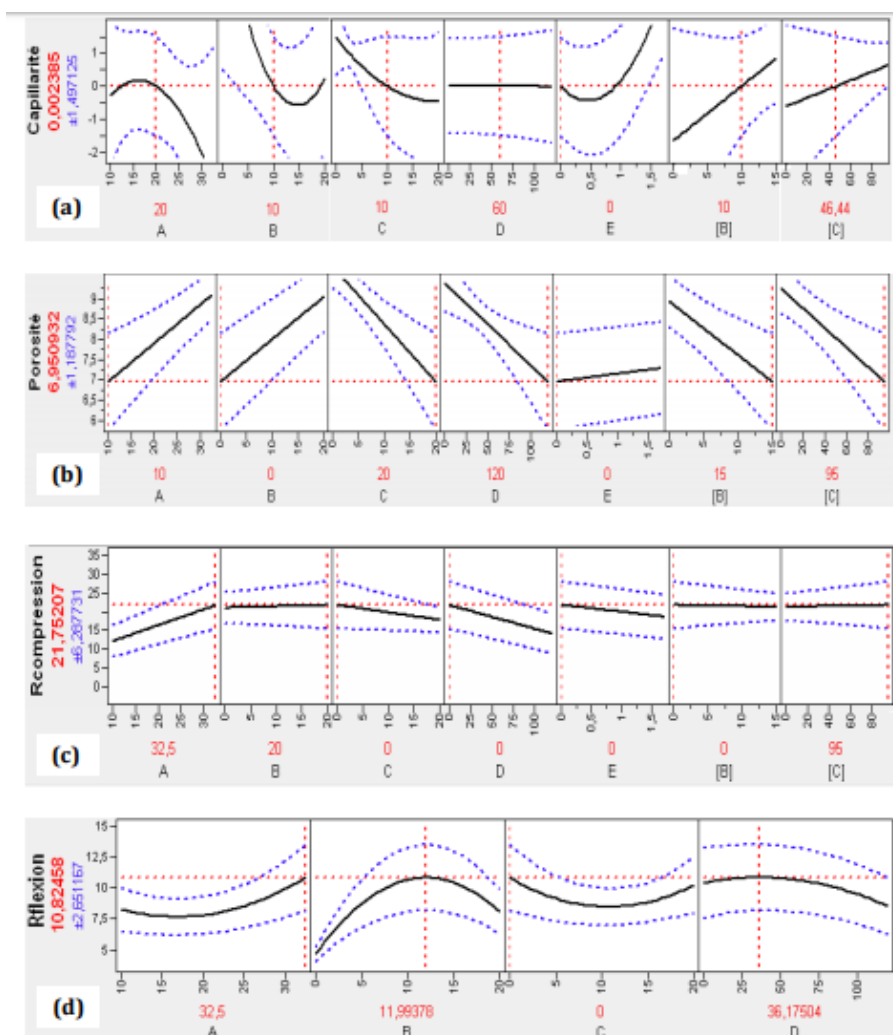


Figure 2.10. : Graphes des réponses prédites générés par les modèles. (Rouge : valeurs prédites des réponses, Bleu : intervalle de 95% de confiance sur la moyenne de la réponse).

La figure 2.10. représente les graphes prédits des différentes réponses obtenues en fonction des effets des facteurs.

Ces graphes nous montrent la coupe de la surface de chaque réponse selon un plan moyen pour les différents facteurs. Quand ces derniers passent du niveau bas au niveau haut, ils sont pris en considération pour l'évolution de la réponse.

VII.4. Sur les bétons autoplaçants :(Taleb et al, 2012)

- **Facteurs et leurs niveaux :(MINITAB)**

Tableau 2.4. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	Niveaux	
Ciments [Kg/m ³]	400	-1
	450	+1
Fillers [Kg/m ³]	50	-1
	150	+1
Sable [Kg/m ³]	623,09	-1
	814,74	+1
Gravier 3/8 [Kg/m ³]	250	-
	250	-
Gravier 8/16 [Kg/m ³]	500	-
	500	-
Eau [l]	230	-1
	250	+1
E / L	0,38	-1
	0,55	+1
Sp [%]	1,5	-1
	2	+1

- **Réponses :**

Les réponses sont l'étalement, la résistance à la compression (R_{c28}).

- **Modèles et figures adoptées :**

Pour la résistance à la compression (R_{c28}) :

$$R_{c28} \text{ (MPa)} = 30,221 + 1,713 C - 0,241 E + 1,088 F - 0,407 Sp + 1,302 C * E + 0,176 C * F - 1,219 C * Sp + 0,152 E * F + 1,007 E * Sp + 0,321 F * Sp$$

$$R^2 = 93,73\%$$

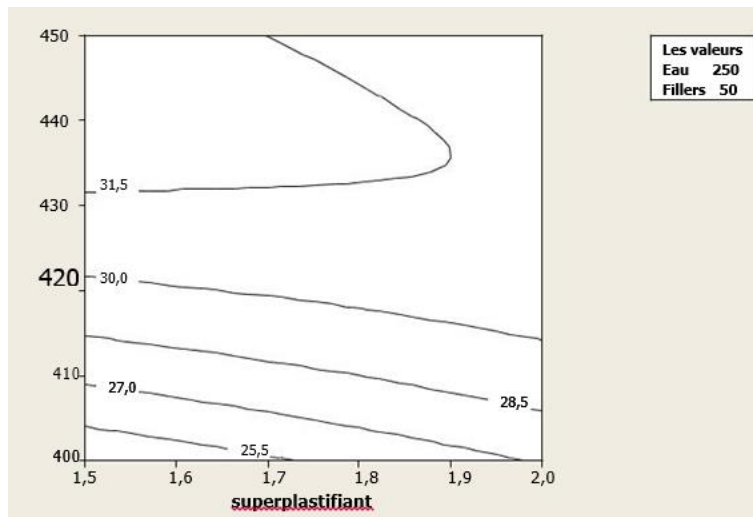


Figure 2.11. : Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=50 \text{ kg/m}^3$).

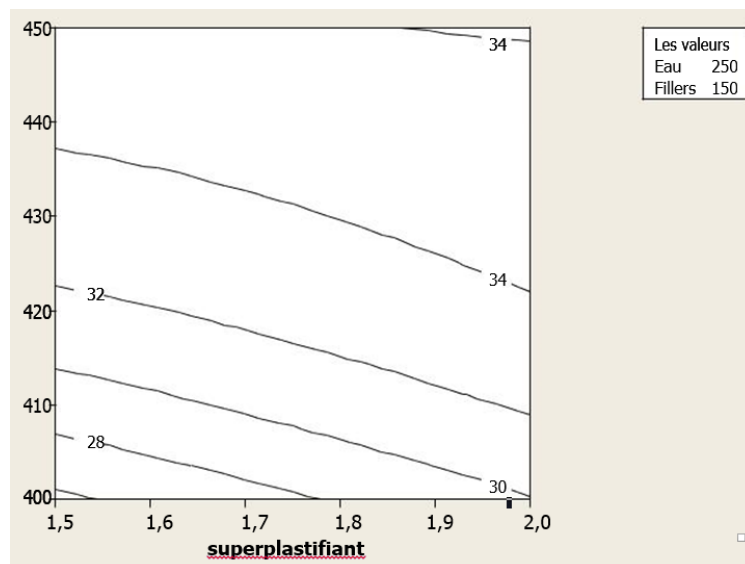


Figure 2.12. : Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=150 \text{ kg/m}^3$).

A travers les figures 2.11. et 2.12. , les auteurs ont montré que pour un dosage constant de ciment et de superplastifiant, les fillers de calcaires amènent de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression.

Cela s'explique par le fait que les fines de calcaires agissent en tant que sites de nucléation pour les hydrates de silicate de calcium. Ces résultats viennent consolider les résultats de plusieurs auteurs qui ont montré que les fillers de calcaires réagissent avec les C_3A pour former un carboaluminate qui a des propriétés cimentaires, et réagir aussi avec les C_3S et les C_2S pour former le carbo-silicate de calcium hydraté (Domone P.L, 2007).

VII.5. Sur des bétons ordinaires : (M.Ayad et Y.Barka, 2013)

- Facteurs et leurs niveaux : (MINITAB)

Tableau 2.5. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	niveaux	
	Ciment	300
C (kg/m³)	400	+1
Eau	165	-1
E (l / m³)	225	+1
Sable	600	-1
S (kg/m³)	700	+1
Graviers	1030	-1
G (kg/m³)	1150	+1
Air occlus	0.5	-1
A (%)	3	+1

- **Réponses :**

Les réponses sont : l'air occlus, l'affaissement et la résistance mécanique en compression.

- **Modèles et figures adoptées :**

Pour la résistance mécanique en compression, les auteurs ont montré à travers les figures que les bétons contenant plus de sable nécessitent un plus grand dosage en eau pour assurer la même résistance en compression. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une quantité d'eau absorbée par le sable n'aura aucune influence sur la résistance mécanique.

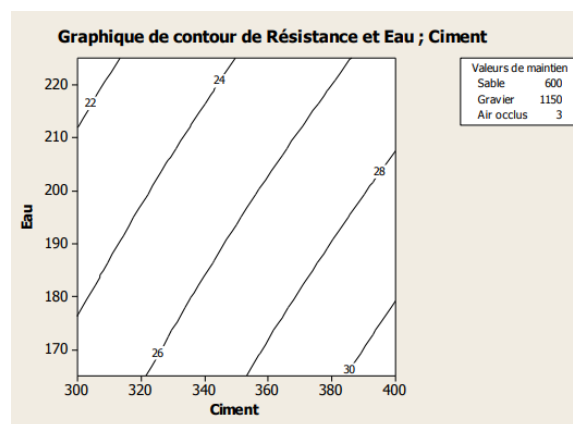


Figure 2.13. : Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment (S=600 kg/m³, G=1150 kg/m³, A=3%).

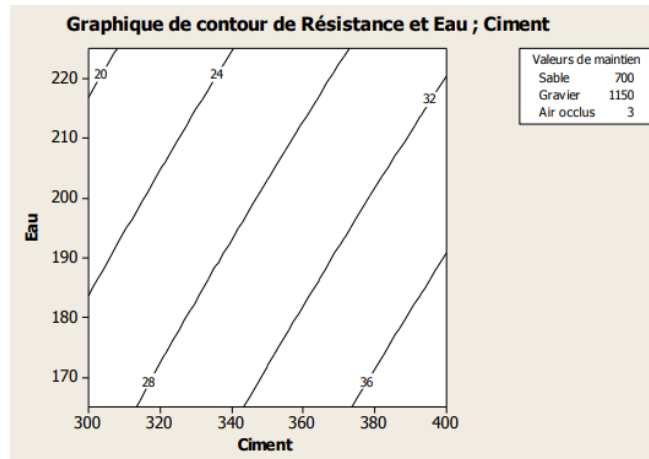


Figure 2.14. : Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=700$ kg/m^3 , $G=1150$ kg/m^3 $A=3\%$).

VII.6. La formulation des bétons par la méthode Taguchi : (S. Dali Youcef, 2017)

La méthode Taguchi, développée par Genichi Taguchi est l'une des méthodes statistiques. Cette méthode repose sur la mise en place d'un plan d'expériences qui permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés.

Les facteurs incontrôlables appelés aussi facteurs de bruit, induisent à des produits mesurables du processus mais déviés de leurs valeurs cibles. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit (William et al, 1995).

- **Facteurs et leurs niveaux : (MINITAB)**

Tableau 2.6. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	Niveaux		
C (kg/m^3)	300	350	400
E/C	0.55	0.6	0.65
G/S	1.2	1.5	1.8

- **Réponses :**

Affaissement, résistance mécanique en compression, Ultrason.

- **Modèles et figures adoptées :**

Pour Affaissement :

$$\text{Affaissement} = - 33,4 + 0,100 C + 20,0 E/C + 1,94 G/S$$

Les résultats obtenus montrent clairement que l'affaissement peut dépasser 20 cm si le dosage en ciment varie entre 350 et 400 kg/m³ avec un rapport E/C entre 0,55 et 0,625 et un rapport G/S variant entre 1,45 et 1,8.

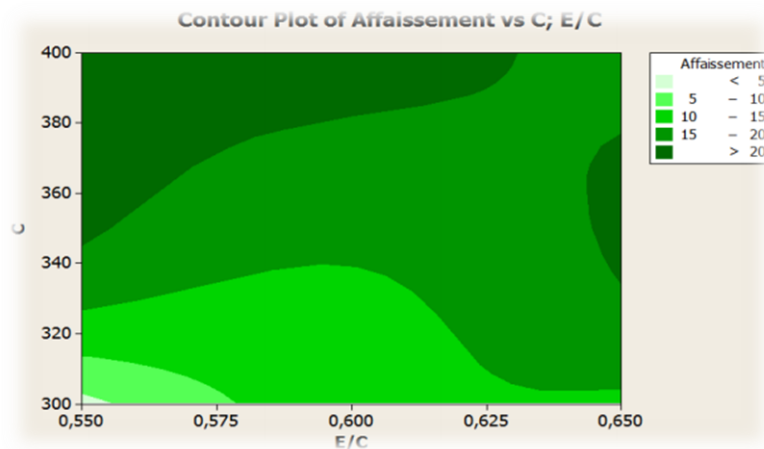


Figure 2.15. : Réponse de l'affaissement en fonction du ciment et du rapport E/C.

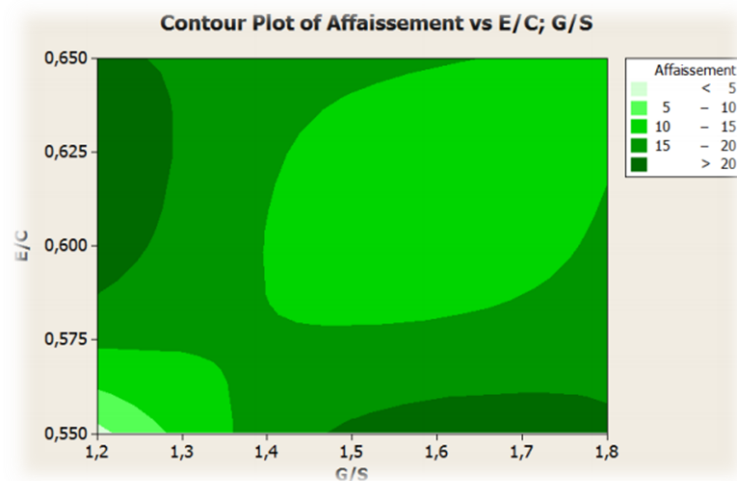


Figure 2.16. : Réponse de l'affaissement en fonction du rapport E/C et G/S.

Pour résistance mécanique en compression :

$$\text{Compression } 14 \text{ j} = 54,3 + 0,0022 C - 44,7 E/C - 4,25 G/S$$

Les résultats montrés par les figures 2.17. et 2.18 montrent que la résistance en compression sera supérieure à 25 dans le cas où le dosage en ciment varie entre 380 et 400 kg/m³ avec un rapport G/S entre 1,75 et 1,8 et un rapport E/C entre 0,55 et 0,575.

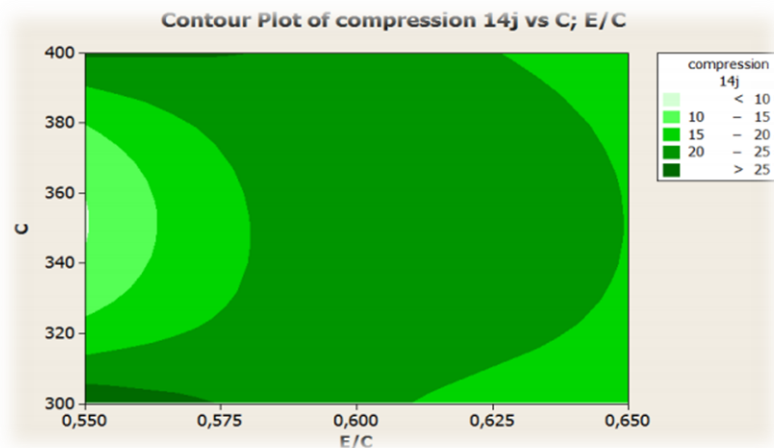


Figure 2.17. : Réponse de la résistance en compression en fonction du ciment et du rapport E/C.

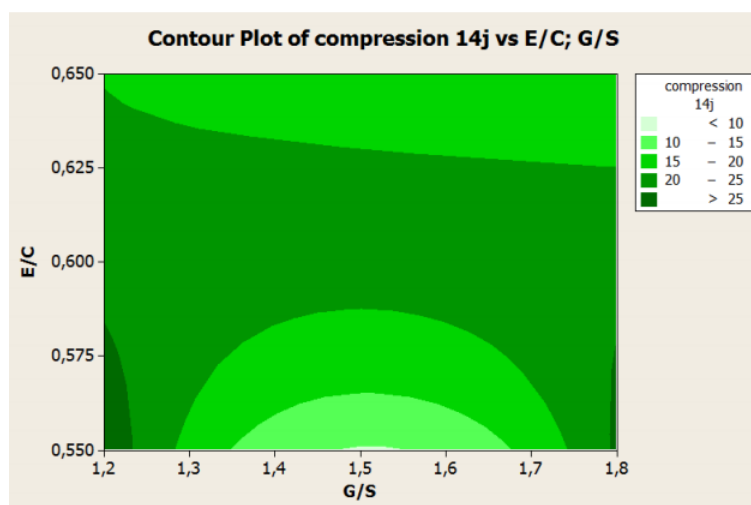


Figure 2.18. : Réponse de la résistance en compression en fonction du rapport E/C et G/S.

Conclusion :

L'état de l'art sur la méthode des plans d'expériences nous a permis de bien comprendre le fonctionnement global de celle-ci, d'une manière exhaustive ainsi que l'intérêt de son utilisation.

Par ailleurs, nous avons cité quelques exemples d'application de cette méthode dans le domaine des matériaux cimentaires.

Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer la partie expérimentale réalisée au laboratoire. Afin d'aboutir à des résultats à interpréter, en commençant par la caractérisation des matériaux utilisés pour la formulation des bétons.

Références bibliographiques :

AYAD MOHAMED ET BARKA YASSINE. (2013) ; Modélisation des bétons ordinaires par les plans d'expériences, mémoire du Master, université ABou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.130 p.

BELLA NABIL, ASROUN AISSA, TIDJAR BOUDJAMAA, YAHIAOUI HICHAM, BENABDELKADER BOUFELDJA. (2007) ; Application de la méthode des plans d'expériences a l'optimisation des procédures de bétonnage par temps chaud, université de Tlemcen, Algérie. 11p.

BEZZINA BELGACEM. (2012) ; Etude de nouvelle formulation d'adjuvant hydrofuge pour applications diverses, Magister, université de Guelma, Algérie. 124p.

BOUKLI HACENE S. M. A, (2010) ; Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCEM. Thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen. 193p.

DOMONE P.L, (2006) ; A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, University College London. 12p.

GENDRE LIONEL, SAVARY ARNAUD, SOULIER BRUNO. (2009) ; Les plans d'expériences. 14p.

GOUPY JAQUES. (2013) ; Introduction aux plans d'expériences. 5ème édition. Paris, Dunod. 401p.

KAOUA ABDELHAKIM. (2008) ; Détermination de modèles prédictifs des caractéristiques essentielles du béton de la région de M'sila. (Plan d'expérience), Magister, M'sila, Algérie. 122p.

TALEB O., GHOMARI F., BOUKLI HACENE S.M.A, (2012) : Modélisation des bétons autobloquants par les plans d'expérience, 1st International Conférence on Civil Engineering, 8 – 9 May 2012, Université de Laghouat, Algérie.

TINSON WALTER. (2010) ; Constructions et analyses statiques. Springer. Berlin.482p

TRIBOULET PHILIPPE. (2008) ; Notions de bases sur les plans d'expériences, 49p.

VIVIER STEPHANE. (2002) ; Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisée par éléments finis, thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 309p.

WILLIAM YF, CREVELING M.C, (1995). Engineering method for robust product design. MA: Addison – Wesley.

CHAPITRE 3

Caractérisation des matériaux

&

Formulation du béton de référence

Pour avoir une bonne qualité des bétons, il y a lieu de connaître au préalable toutes les caractéristiques des constituants qui forment le mélange des bétons. Ces caractéristiques sont déterminées au sein de notre laboratoire « EOLE ».

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes caractéristiques de tous les matériaux nécessaires pour la formulation de nos bétons. La méthode de DREUX-GORISSE nous a permis de donner la formulation du béton de référence.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3 :

I. Caractérisation des constituants...	44
II. Formulation du béton de référence.....	59
Conclusion.....	61
Normes	62

I. Caractérisation des constituants :

I.1. Identification et analyse du sable :

Le sable utilisé provient de la carrière de l'Entreprise Nationale des Granulats l'ENG (Sidi El Abdelli). C'est des granulats calcaires concassés.

I.1.1. Propriétés dimensionnelles (EN 933-1 et 933-2) :

L'analyse granulométrique a été réalisée selon les démarches de la norme (NA2607 / NF P18-560). La courbe granulométrique du sable est représentée sur la figure 3.1.

Le sable contient 18,48% de fines dont le diamètre est inférieur à 80 μm . Pour la confection des bétons, ces fines peuvent nécessiter une demande en eau plus élevée.

Le sable utilisé est de catégorie 'D' suivant la norme (NFP 18 – 540).

Tableau 3.1. : Teneur en fines de la fraction 0/4 mm.

Catégorie	Passants (%) au tamis de 0,08
A	≤ 12
B	≤ 15
C	≤ 18
D	Pas de spécifications

La figure 3.1 : Montre aussi que le sable utilisé présente une granulométrie continue, ce qui est favorable pour améliorer la compacité du mélange.

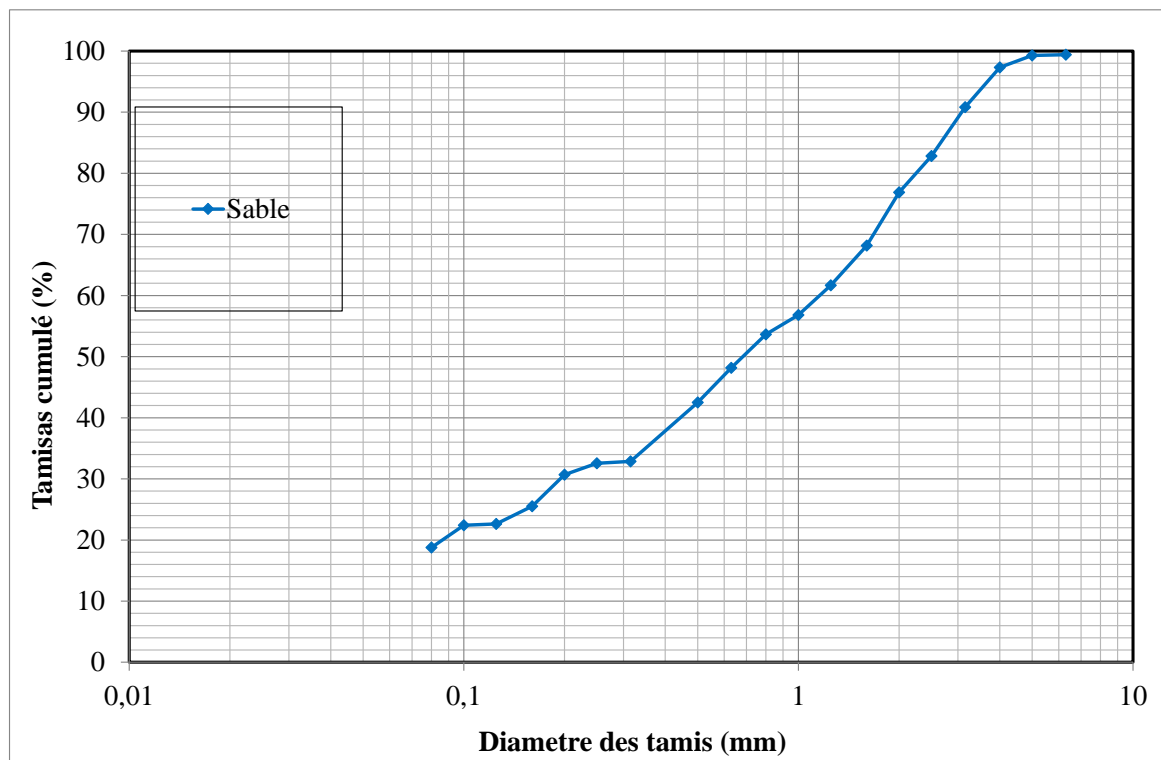


Figure 3.1. : Analyse granulométrique du sable.

I.1.2. Le module de finesse du sable :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, Le module de finesse est calculé selon la norme (NFP 18-540), Le module de finesse du sable est égale à 3,06.

Le sable utilisé est conforme aux exigences de la norme (P 18-541) qui fixe un module de finesse compris entre 1,8 à 3,2. Toutefois, son module de finesse de 3,06, correspond à un sable un peu grossier, Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

I.1.3. Equivalent de sable :

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique. L'équivalent de sable est déterminé selon la norme (NA 455 / NF P 18-598).

L'équivalent de sable en utilisant le piston est égal à 70,78, ce qui montre que le sable est propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de qualité selon la norme (NF P 18-541).

I.1.4. Foisonnement du sable :

Pour des raisons pratiques, surtout dans le cas d'utilisation de nos bétons quand le sable est exposé à la pluie, nous avons jugé utile d'étudier le foisonnement du sable. Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure 3.2.

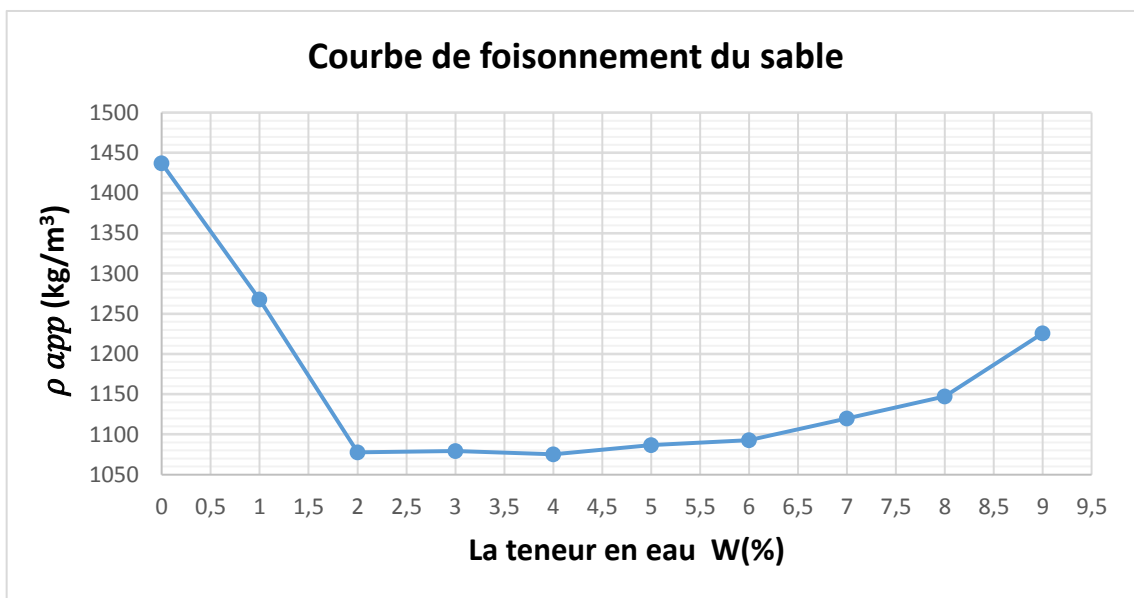


Figure 3.2. : Courbe de foisonnement du sable.

I.1.5. Essai au bleu de méthylène dit essai à la tâche :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène, pour cela on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sable imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre.

La valeur au bleu des fines (VB) a été réalisée selon les démarches de la norme (NFP 94-068). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) incolore.
→ Le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) teintée de bleu.
→ Le test est positif.

La valeur au bleu des fines (VB) est donnée par la formule suivante :

Avec :
$$VB = \frac{V_v}{M} \times 10 = \frac{5}{200} \times 10 = 0,25.$$

V_v : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif (en cm^3).
 M : masse sèche de la prise d'essai (en g).

Comme $VB = 0,25 < 1 \Rightarrow$ sable non argileux.



Figure 3.3. : L'essai au bleu de méthylène.

I.2. Analyse granulométrique des Graviers :

Les trois classes du gravier (4/8), (8/16) et (16/25) proviennent aussi de la carrière de l'ENG. Les courbes granulométriques des trois classes sont représentées sur la figure 3.3.

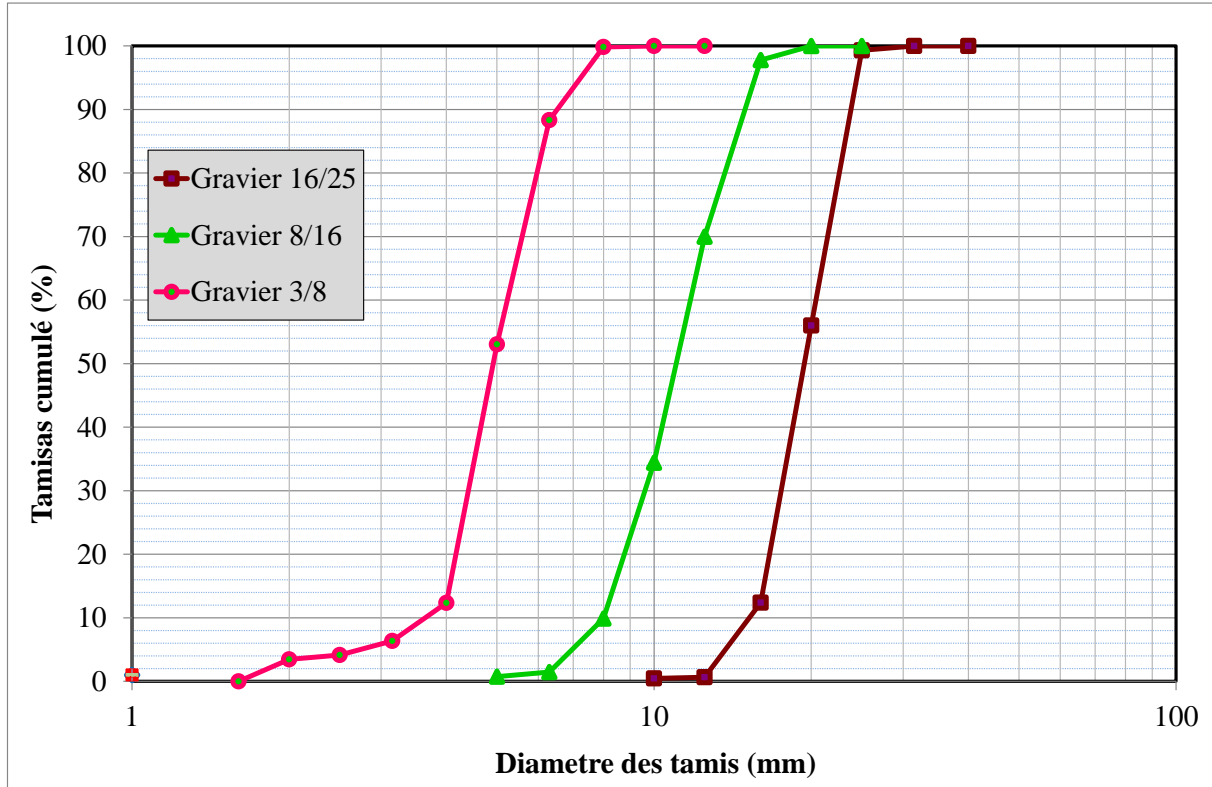


Figure 3.4. : Courbe granulométrique des différents graviers.

I.2.1. Propriétés physiques :

I.2.1.1. Masses volumiques apparentes et absolues (NA 255) :

La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu). La méthode du ballon est plus précise car la mesure se fait à travers des lectures de pesées. Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents granulats, sont récapitulés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2. : Masses volumiques apparentes et absolues des granulats.

	$\rho_{\text{apparente}} [\text{kg} / \text{m}^3]$	$\rho_{\text{absolue}} [\text{kg} / \text{m}^3]$
Sable	1637,7	2664,00
Gravier 4/8	1310,86	2559,90
Gravier 8/16	1317,06	2579,09
Gravier 16/25	1179,6	2535,49

I.2.1.2. Absorption des graviers et du sable (NF P 18-554) :

Le coefficient d'absorption a été déterminé pour l'ensemble des granulats selon la norme (NA255/NF P 18-554) en utilisant la relation suivante :

$$Ab = \frac{Mi - Ms}{Ms} \times 100$$

Où M_s : la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 103 °c.

M_i : la masse de l'échantillon imbibé, surface sèche, après être soigneusement épongé ou séché par un séchoir pour le sable.

Pour un béton de qualité, il est préférable que le coefficient "Ab" ne dépasse pas 2 %.



Figure 3.5. : L'essai d'absorption pour le sable.

Les résultats des différents coefficients d'absorption sont résumés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. : Les coefficients d'absorption des différents granulats.

Matériaux	Mi [kg]	Ms [kg]	Ab (%)
Sable	0,5000	0,4916	1,7087
G 4/8	0,3000	0,2952	1,6260
G 8/16	0,2970	0,2934	1,2269
G 16/25	0,2982	0,2950	1,0847

L'ensemble des granulats présentent des coefficients d'absorption ≤ 5 % et répondent aux exigences de la norme (P18-540). Mieux encore, ces coefficients sont inférieurs à 2%, cela implique encore une fois que les graviers peuvent être utilisés pour des bétons de bonne qualité. Toutefois, Il est nécessaire d'ajouter les quantités d'eau absorbées par les granulats lors de la confection des bétons.

I.2.1.3. Propreté des graviers (N P 18-591) :

L'étude de la propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'impuretés par lavage de la poussière adhérentes aux grains en utilisant la formule de la norme (NF P 18-591) :

$$P = \frac{M1-M2}{M2} \times 100$$

Où M1 : est la masse des granulats secs avant lavage.

M2 : est la masse des granulats secs après lavage.

Les résultats des essais des différentes classes des graviers sont regroupés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. : Résultats de l'essai sur les impuretés des graviers.

Matériaux	M1 [kg]	M2 [kg]	Mi =M1-M2 [kg]	i = [Mi/M2].100
G 4/8	1,0000	0,9652	0,0348	3,60
G 8/16	1,0000	0,9864	0,0136	1,37
G 16/25	1,0000	0,9904	0,0096	0,96

Ces valeurs sont comparées avec le coefficient d'impureté « i » qui montre que le matériau est considéré comme propre si $i < 3\%$ pour les gravillons provenant de concassage de roches massives.

À lecture des résultats, il est clair que les graviers 8/16 et 16/25 sont plus propres par rapport au gravier 4/8.

I.2.1.4. Forme des granulats : Coefficient d'aplatissement :

Le coefficient d'aplatissement a été étudié par nos soins au niveau du labotaoire LTPO selon la norme (NA 256 / NF P18-541) :



Figure 3.6. : Les tamis à mailles carrées de l'essai « forme des granulats ».

Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus le coefficient d'aplatissement est élevé, plus le granulat contient d'éléments plats. Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

Les résultats obtenus pour les trois classes du gravier sont regroupés dans le tableau 3.7.

I.2.1.5. Coefficient de résistance à l'usure des graviers :

Le coefficient de résistance à l'usure des graviers a été déterminé en utilisant l'essai Micro – Deval selon la norme (NA 457 / XP P 18-545).

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et nettement inférieures à 35 % comme tolérés par la norme. Ces résultats sont rassemblés dans le tableau 3.7.

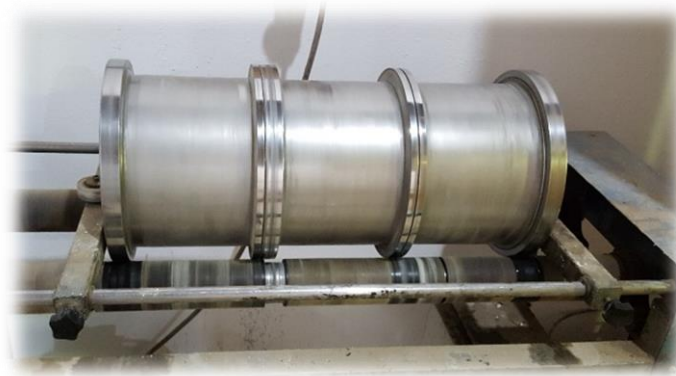


Figure 3.7. : L'essai Micro Duval.

I.2.1.6. Essai Los Angeles : "LA" :

L'essai Los Angeles a été aussi réalisé au niveau du laboratoire LTPO par nos soins conformément à la norme (NA 458).

Les graviers répondent aux exigences de la norme (P 18-541) qui exige des valeurs maxima tolérées inférieures à 40.

Les valeurs du coefficient Los Angeles varient de 28% à 32%, ce qui est favorable sur le plan de la résistance vis-à-vis de l'usure et de la fragmentation par choc.

Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 3.7.



Figure 3.8. : La machine de l'essai Los Angeles.

I.2.2. Mesure de la compacité des granulats :

La compacité a été évaluée en utilisant le banc d'essai LCP N°61 pour chaque granulat le tableau 3.5. ensuite pour des combinaisons granulaires comme indique le tableau 3.6.

Tableau 3.5. : Compacité des différents granulats.

Matériaux	Sable	(G4/8)	(G8/16)	(G16/25)
$\rho(\text{app})[\text{Kg}/\text{m}^3]$	1640,48	1382	1342,47	1244,85
$\rho(\text{réel})[\text{Kg}/\text{m}^3]$ [NF EN 1097-6]	2664,00	2559,90	2579,09	2535,49
Compacité	0,6157	0,5398	0,5205	0,4909

Tableau 3.6. : Compacité des mélanges granulaires.

Matériaux	(G4/8) (33%) (G8/16) (67%)	(G4/8) (50%) (G8/16)(50%)	(G4/8) (67%) (G8/16) (33%)
$\rho(\text{app})[\text{Kg}/\text{m}^3]$	1667,97	1666,11	1658,70
$\rho(\text{réel})[\text{Kg}/\text{m}^3]$	2617,80	2622,37	2626,97
Compacité	0,637	0,635	0,631

- **Bilan :**

Tableau 3.7. : Tableau récapitulatif de la caractérisation des granulats.

Caractéristiques des granulats :		Classes granulaires			
		S 0/4	G 4/8	G 8/16	G 16/25
Masse volumique apparente [kg/m ³] NA 255		1637,70	1310,86	1317,06	1179,60
Masse volumique absolue [kg/m ³] NA 255		2664,00	2559,90	2579,09	2535,49
Equivalent de sable (%) NA 455	ESP	70,78	*	*	*
	ESV	75,77			
Module de finesse NFP 18-540		3,06	*	*	*
Teneur en fines (%) XP P 18 – 540		18,48	*	*	*
Foisonnement de sable (%)		Wopt = 4 % lui correspond $\rho_{app} = 1075,4 \text{ kg/m}^3$			
Coefficient d'absorption (%) NA 255		1,70	1,62	1,22	1,08
Essai de propreté (impuretés) (%)		*	3,60	1,37	0,96
Compacité (%)		61,57	53,98	52,05	49,04
Coefficient d'aplatissement (%) NA 256		*	12,32	9,29	5,64
Essai Los Angeles (%) NA 458		*	28	32	29
Essai Micro Deval (%) NA 457		*	8	17	15

I.3. Le ciment :

Dans le cadre de notre recherche, nous avons utilisé un ciment portland composé CEM II/A 42,5 largement disponible dans notre région, produit par la société des ciments de Béni-Saf (S.C.I.B.S.). Ce choix a aussi été motivé par des raisons écologiques qui incitent à favoriser l'utilisation des ciments composés. Ce ciment est principalement constitué de clinker et de pouzzolane comme l'indique la figure 3.9.

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme (NF P 18-558).

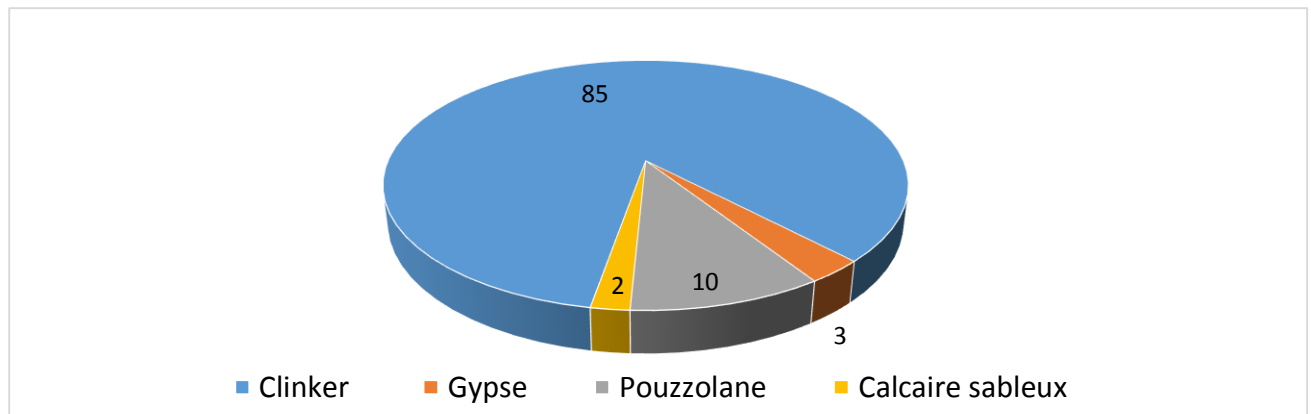


Figure 3.9. : Composition du ciment.

Les détails des propriétés chimiques, minéralogique et physico – mécaniques sont regroupés respectivement sur les tableaux 3.8. et 3.9.

Tableau 3.8. : Composition chimique et minéralogique du ciment. (Rapport du laboratoire LTPO)

Composition chimique	Éléments %	Clinker	Chaux vive, Oxyde de calcium (CaO) (%)	50,62
			Oxyde de fer (III) (Fe ₂ O ₃) (%)	4,15
			Bauxite, Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃) (%)	4,67
Composition minéralogique	Minéraux du clinker	Teneur en % rapportée au clinker	Célite, Aluminate tricalcique (C ₃ A) (%)	5,35
			Félite, Alumino -ferrite- (C ₄ AF) (%)	12,62

Selon la norme (NA 442), les résultats des analyses effectuées caractérisent un ciment CPJ avec une teneur en C₃A = 5,35 %.

Tableau 3.9. : Caractéristiques physico - mécaniques du ciment. (Rapport du laboratoire LTPO)

Masse volumique apparente		[kg/m ³]	1010,63
Masse volumique absolue (pycnomètre à liquide)		[kg/m ³]	3124,57
Début de prise			02H45'
Fin de prise			04h30'
Résistance à la compression	(MPa)	2 jours	12,339
		7 jours	19,920
		28 jours	35,225

I.4. Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires utilisés sont de classe 0/125 μm , issus de concassage des roches de la carrière de l'ENG. Ces fillers calcaires sont principalement constitués d'oxyde de calcium avec une concentration massique d'environ 53%. Les essais au bleu ont montré que les fillers sont dépourvus d'argile.

La densité absolue des fillers calcaires est 2,7 alors que sa masse volumique apparente est de 741 Kg/m^3 .

I.5. Eau :

L'eau utilisée est celui de la commune de Chetouane. Dans le cadre de cette recherche, une nouvelle analyse de l'eau a été réalisée Les résultats de l'analyse sont résumés dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10. : Composition de l'eau de gâchage. (Rapport du laboratoire LTPO)

Cations	Calcium	Magnésium (Mg)	Sodium (Na)	Potassium (K)	Balance cations
[mg/l]	110,621	42,282	-	-	-
Anions	Chlorures (Cl)	Sulfates (SO ₄)	Carbonates (CO ₃)	Bicarbonates (HCO ₃)	Balance anions
[mg/l]	99,400	312,740	NEANT	473,515	885,655
Conductivité électrique ($\mu\text{s/cm}$)	765	Matière en suspension [mg/l]	0,000	Matière en suspension	0,000
Résidu sec à 105°C [mg/l]	790	Anhydride carbonique libre [mg/l]	9,263	PH (base)	8,000

Les résultats de l'analyse chimique de cette eau répondent aux prescriptions de la norme (XP P 18-303) et (NF EN 1008) (juillet 2003), ceci dit que l'échantillon d'eau qui a été analysé peut être destiné comme eau de gâchage pour plusieurs utilisations, du béton précontraint ou coulis, du béton armé ou avec insert, ou du béton armé et sans insert.

I.6. Les additions organiques (NF EN 934-2):

Afin d'optimiser la formulation sur le plan de la fluidité, il était nécessaire d'étudier l'influence de plusieurs adjuvants de type superplastifiants haut réducteur d'eau qui diffèrent par leurs compositions chimiques et leurs modes d'action.

- **ORAFLOW HM THM 17200 (SP1)** : est un superplastifiant, haut réducteur d'eau pour béton prêt à l'emploi, à base de Polycarboxylates dit troisième génération. Ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 17200.

Etat	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité à 20° C	1,06 ± 0,01 g/cm ³
pH à 20°C	4,5 ± 6,5
Teneur en Na₂O	< 1 %
Extrait sec	32 % ± 1%

- **ORAFLOW HM THM 15400 (SP2)** : est aussi un superplastifiant, haut réducteur d'eau de troisième génération pour les BPE, à base de Polycarboxylates. Ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau 3.12.

Tableau 3.12. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 15400.

Etat	Liquide
Couleur	Marron clair
Densité à 20° C	1,11 ± 0,02 g/cm ³
pH à 20°C	0,5 ± 1
Teneur en Na₂O	≤ 2,5 %
Teneur en inos Cl⁻	≤ 0,1 %

- **ORAFLOW HM THM 13600 (SP3)** : est un superplastifiant, non chloré de nouvelle génération à base d'éther Polycarboxylique modifié, conçu pour les bétons à haute qualité de performance et d'ouvrabilité. Ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13. : Caractéristique de l'ORAFLOW HM THM 13600.

Etat	Liquide
Couleur	Brun
Densité à 20° C	1,05 ± 0,02 g/cm ³
pH à 20°C	5,5 ± 1
Teneur en Chlorure	< 0,1 %
Extrait sec	22 ± 1 %

• **SOLUFLOW ® 3085 (SP4)** : est un superplastifiant de nouvelle génération à base d'éther Polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour les BPE. Ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau 3.14.

Tableau 3.14. : Caractéristique du SOLUFLOW ® 3085.

Etat	Liquide
Couleur	Brun foncé
Densité à 20° C	1,14 ± 0,01 g/cm ³
pH à 20°C	5,5 ± 1,5
Teneur en Na₂O	< 1 %
Teneur en ion Cl⁻	< 0,1 %
Extrait sec	34 ± 1,5 %

I.7. Détermination des dosages de saturation :

La détermination du dosage de saturation a été effectuée en utilisant l'essai de Kantro qui se base sur la mesure des étalements en utilisant un mini-cône de dimension 19/38/57 mm (figure 3.10). Les essais ont été réalisés en adoptant deux rapports E/C : 0,4 et 0,5.



Figure 3.10. : Essai de KANTRO.

Les résultats obtenus pour chaque adjuvant sont regroupés respectivement sur les tableaux 3.15. , 3.16. , 3.17. et 3.18. et aussi sur la figure 3.11 et 3.12.

Tableau 3.15. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant "ORAFLOW HM THM 17200 (SP1) ".

Adj (%)	0%	0,5%	1%	1,2%	1,5%	2%	
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	3	4	
Volume adj (ml)	0	0,94	1,88	2,26	2,83	3,77	
Étalement (mm)	50	230	245	250	250	250	Avec E/C = 0,4
	195	270	270	270	270	270	Avec E/C = 0,5

Tableau 3.16. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant ORAFLOW HM THM 15400 (SP2).

Adj (%)	0%	0,5%	1%	1,2%	1,5%	2%	
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	3	4	
Volume adj (ml)	0	0,90	1,80	2,16	2,70	3,60	
Étalement (mm)	50	200	200	225	240	240	Avec E/C = 0,4
	195	240	260	265	265	265	Avec E/C = 0,5

Tableau 3.17. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant ORAFLOW HM THM 13600 (SP3).

Adj (%)	0%	0,5%	1%	1,2%	1,5%	2%	
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	3	4	
Volume adj (ml)	0	0,95	1,90	2,28	2,15	3,80	
Étalement (mm)	50	145	200	210	230	230	Avec E/C = 0,4
	195	220	230	230	230	230	Avec E/C = 0,5

Tableau 3.18. : Résultats d'étalement des pâtes en utilisant SOLUFLOW ® 3085 (SP4).

Adj (%)	0%	0,5%	1%	1,2%	1,5%	2%	
Masse adj (g)	0	1	2	2.4	3	4	
Volume adj (ml)	0	0,90	1,81	2,18	2,72	3,63	
Étalement (mm)	50	140	160	160	170	170	Avec E/C = 0,4
	100	160	170	170	170	170	Avec E/C = 0,5

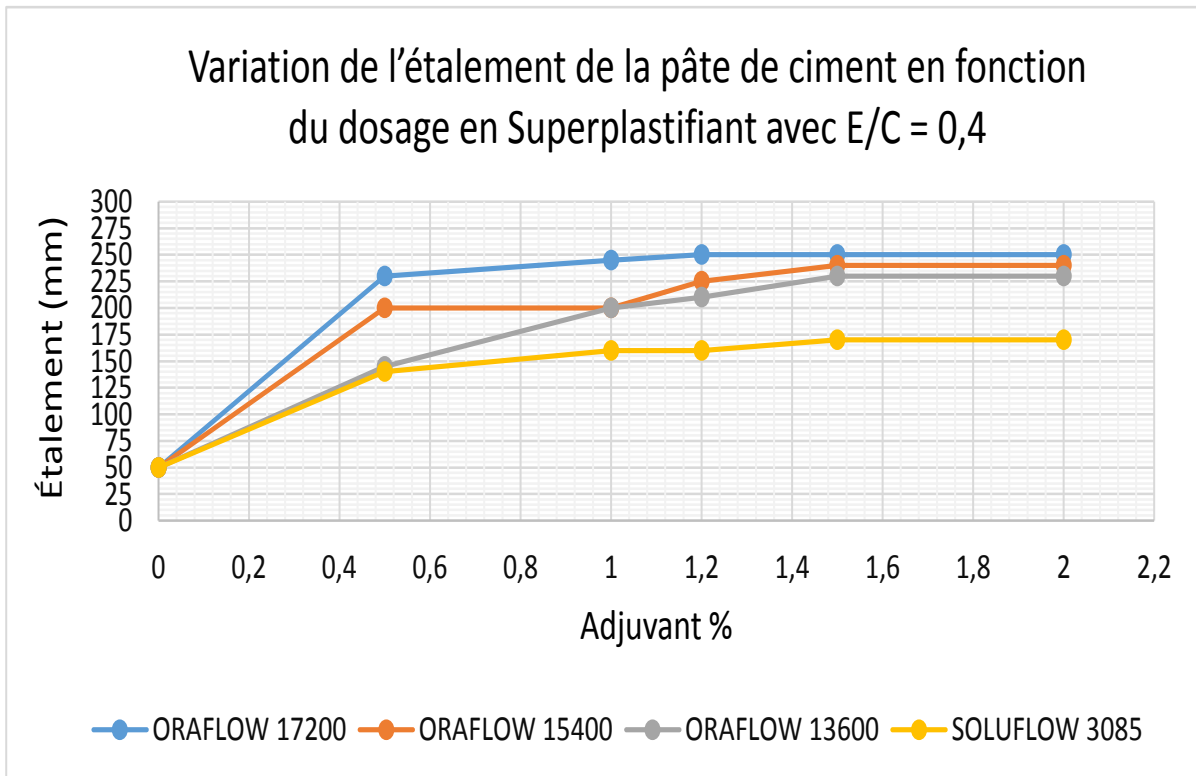


Figure 3.11. : Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en Superplastifiant pour E/C = 0,4.

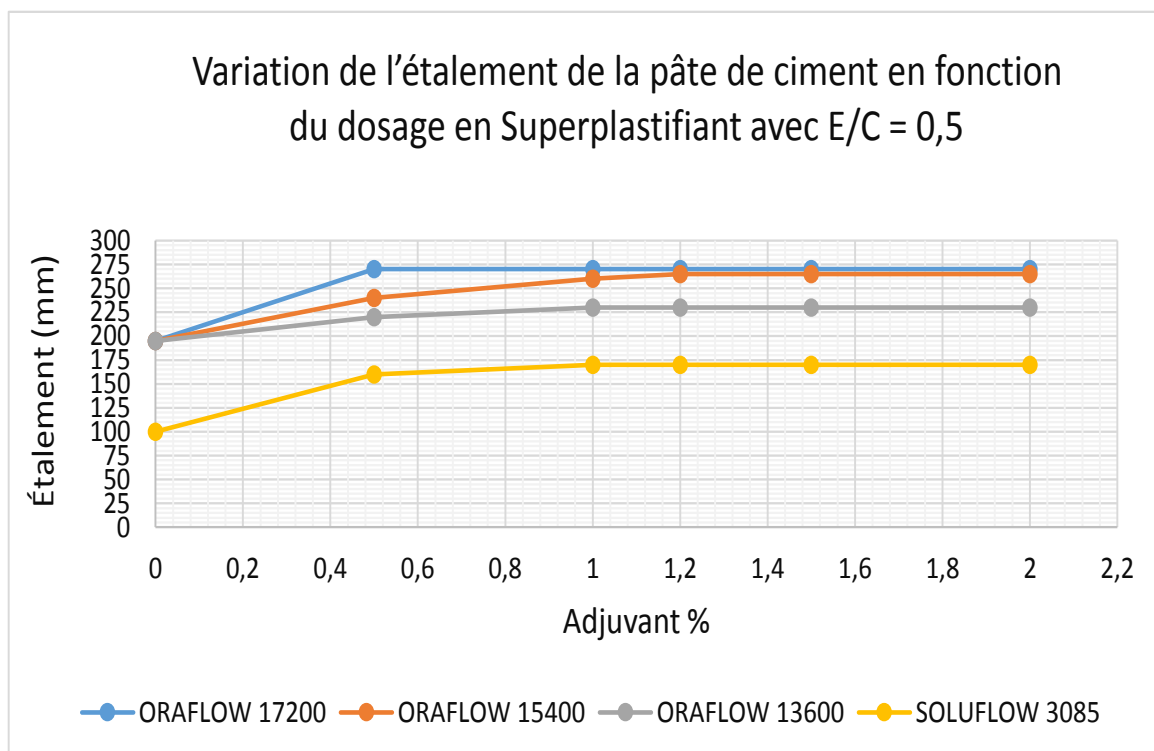


Figure 3.12. : Variation de l'étalement de la pâte de ciment en fonction du dosage en Superplastifiant pour E/C = 0,5.

Commentaires :

L'essai de KANTRO a pour objectif d'optimiser l'utilisation du dosage du superplastifiant, c'est-à-dire de chercher l'adjuvant qui donnera la meilleure fluidité possible avec un pourcentage minimal.

Dans notre étude, nous avons traité 4 adjuvants de type superplastifiant. L'adjuvant "ORAFLOW HM THM 17200 " a donné les meilleurs résultats d'étalement par rapport aux autres pour les deux rapports E/C = 0,4 et E/C = 0,5. En plus, le dosage de saturation de cet adjuvant reste le plus faible (0,5%).

Nous avons aussi noté que l'utilisation de l'" ORAFLOW HM THM 17200 " permet d'aboutir à des bétons stable tout en assurant une bonne compatibilité avec le ciment, contrairement à l'adjuvant "SOLUFLOW ® 3085" qui a causé un durcissement rapide dès son contact avec le ciment.

II. Formulation du béton de référence :**II. 1.Choix des données de base :****II. 1.1. Résistance :**

La résistance visée est de 40 MPa.

II. 1.2. Ouvrabilité :

Notre objectif est de confectionner un béton très plastique avec un affaissement qui varie de 10 à 15 cm.

II. 1.3. Dimension maximale D des granulats :

Graphiquement, nous avons déterminé le Dmax qui est égal à 24,16 mm.

II. 1.4. Le dosage en ciment C :

Le dosage en ciment est de 350 kg/m³.

II. 1.5. Le rapport C/E :

Le rapport massique C/E après calcul est égal à 2,172.

Le dosage est ensuite corrigé en fonction du Dmax.

II. 1.6. Détermination de la composition granulaire :

Les pourcentages des granulats : (figure 3.13.)

Sable : 44%

Gravier 4/8 : 11%

Gravier 8/16 : 21%

Gravier 16/25 : 24 %

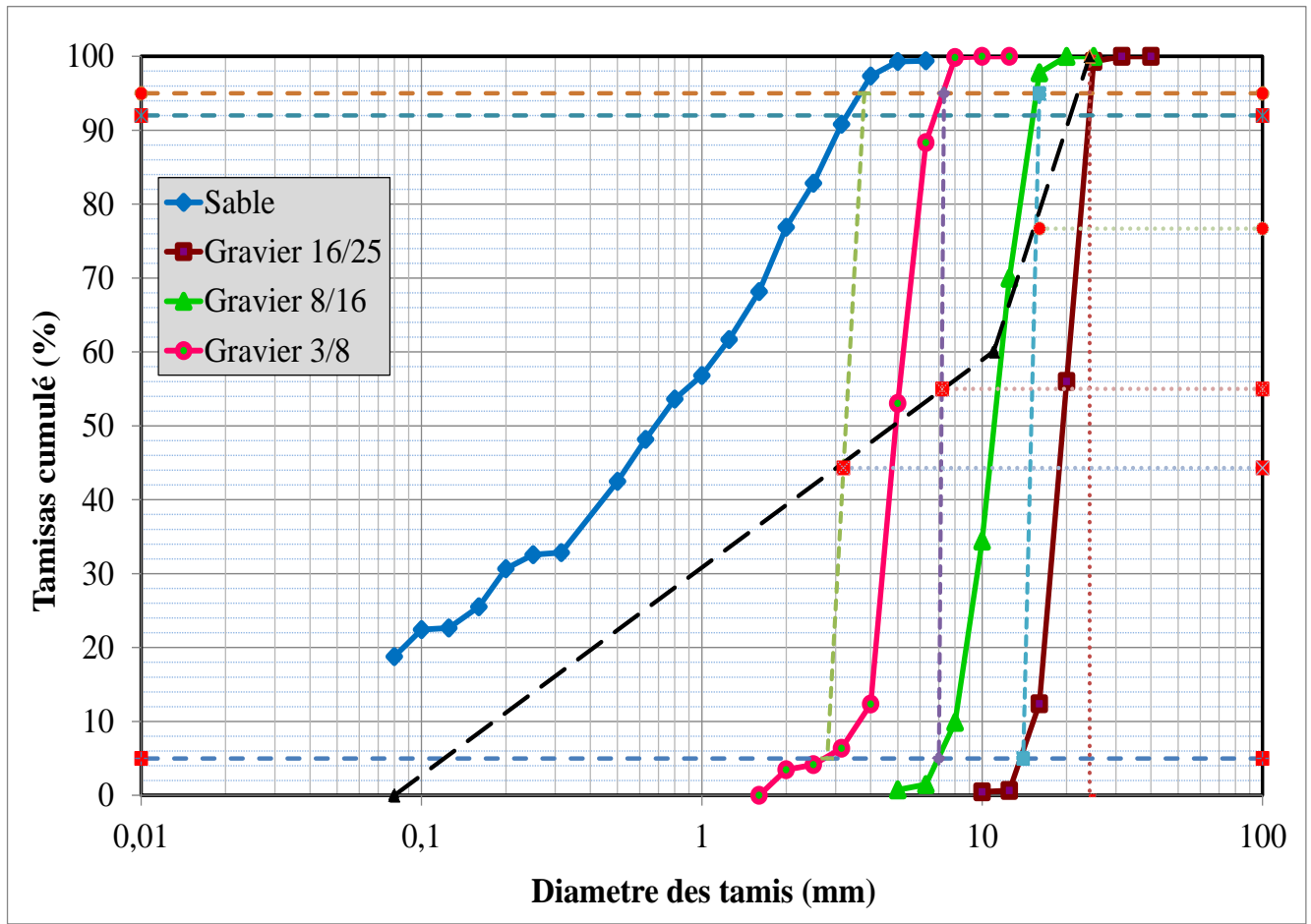


Figure 3.13. : Détermination des débits en volume absolus des matériaux.

II. 2.Composition de la formulation de référence :

Pour le béton de référence, l'absorption des granulats et l'eau apportée par les adjuvants ont été pris en considération dans le volume d'eau.

La composition finale pour 1 m³ est représentée dans le tableau 3.19.

Tableau 3.19. : La composition pondérale et volumique.

Constituants	Composition pondérale (kg)	Composition volumique(l)
Ciment	350 Kg	112,015 litres
Eau	185,871 Kg	802,676 litres
Sable	802,676 Kg	301,305 litres
G 4/8	192,827 Kg	75,326 litres
G 8/16	370,883 Kg	143,804 litres
G 16/25	416,702 Kg	164,348 litres
Adjuvant 'ORAFLOW 17200 '	1,75kg	1,645 litre

E/C	0,53
Affaissement	10,5 cm
Résistance à 3 j	15,64 Mpa
Résistance à 28 j	34,68 Mpa

Conclusion :

Les différentes techniques utilisées pour la caractérisation des matériaux sont utilisées en prenant toutes les précautions et en respectant les démarches normalisées.

Les résultats des essais montrent que le sable utilisé est propre à faible pourcentage de fines argileuses. Toutefois, il est constitué d'une grande quantité d'éléments fins ($< 80\mu\text{m}$). Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme (NA 255).

Les granulats utilisés sont assez propres avec un coefficient d'absorption conforme à la norme en vigueur. L'utilisation de ces granulats peut conduire à des bétons ayant de bonnes résistances mécaniques.

L'étude des adjuvants nous a permis de montrer que « ORAFLOW HM THM 17200 » reste le superplastifiant le plus efficace sur le plan de la fluidité mais aussi sur le plan économique.

Dans le chapitre suivant nous allons proposer une nouvelle méthode basant sur le logiciel MINITAB qui va nous permettre d'avoir les différents modèles prédictifs pour l'ensemble des réponses.

Normes :

NA 255 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 1990.

NA 256 : Granulats - Mesure du coefficient d'aplatissement, 1990.

NA 442 : Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

NA 455 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines - Equivalent de sable, 1990.

NA 457 : Granulats - Détermination de l'homogénéité des granulats (D3 4mm), Essai Micro Deval, 1990.

NA 458 : Granulats - Essai de Los Angeles, 1990.

NA 2607 : Analyse Granulométrique par Tamisage, 1990.

NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 2012.

NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures, 1996.

NF EN 934-2 : “Adjuvant pour béton, mortier et coulis. Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage“, AFNOR, 2002, 26p.

NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, 2003.

NF EN 1097-6: Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2014.

XP P 18-303 : Eau de gâchage pour béton, 1999.

NFP 18 – 540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, 1997.

P 18-541 : Granulats - Granulats pour béton hydrauliques – Spécifications, 1994.

XP P 18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification, 2011.

NF P 18-554 : Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux – GRANULATE, 1990.

NF P 18-558 : Granulats. Détermination de la masse volumique absolue des fines, 1981.

NF P18-560 : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage – GRANULATE, 1990.

N P 18-591 : Granulats - Détermination de la propreté superficielle – GRANULATE, 1990.

NF P 18-598 : Granulats - Équivalent de sable - GRANULATE, 1991.

NFP 94-068 : Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la taché, 1993.

CHAPITRE 4

Étude Statistique

&

Analyse des résultats

Ce chapitre sera consacré aux traitements statistiques et aux interprétations des résultats obtenus par la méthode des plans d'expériences qui a permis d'évaluer l'influence de trois paramètres clés : le dosage en fillers calcaires, le rapport G/S et le dosage des granulats 16/25 sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques à 3 et 28 jours.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 04 :

I. Introduction.....	64
II. Formulation des bétons.....	64
III. Les plans d'expériences.....	66
Conclusion.....	82
Références bibliographiques.....	83

I. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la composition des différents bétons étudiés en précisant le choix et les niveaux des facteurs, des plans d'expérience et les réponses. Des modèles prédictifs avec interaction entre les différents facteurs seront ensuite déterminés et interprétés.

II. Formulation des bétons :

II.1. Bétons de références :

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué "douze "gâchées au sein du laboratoire, dans un premier temps les bétons sont formulés par la méthode Dreux-Gorisse (2 gâchées de référence) qui sont représentés dans le tableau 4.1. puis les bétons formulés en utilisant les plans d'expériences, les gâchées sont décrites dans le tableau 4.4.

Pour le béton de référence, nous avons confectionné deux bétons en changeant l'adjuvant utilisé. Nous avons remarqué une prise rapide du ciment quand l'adjuvant "SOLUFLOW @3085" est utilisé. Ce résultat est probablement dû à une incompatibilité entre le ciment "Bénisaf" et cet adjuvant. Par contre, l'utilisation de l'adjuvant "ORAFLOW HM THM 17200" a donné l'ouvrabilité souhaitée.

Les formulations et les résultats à l'état frais de ces bétons sont regroupés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. : Les constituants des bétons de références.

	Unité	Essai N° 01(Réf)	Essai N° 02(Réf)
Ciment [C]	Kg	350	350
Eau [E]	l	184,98	185,87
Adjuvant [Adj.]	l	3,07 (MBS 3085)	1,64 (17200)
Sable [S]	Kg	802,67	802,67
Graviers 4/8 [G4/8]	Kg	192,82	192,82
Graviers 8/16 [G8/16]	Kg	370,88	370,88
Graviers 16/25 [G16/25]	Kg	416,0	416,70
Fillers Calcaire [FC]	Kg	87,50	87,50
Rapport G/S [G/S]		1,22	1,22
Rapport E/C [E/C]		0,52	0,53
Rapport E/L [E/L]		0,42	0,42
Affaissement [Aff]	cm	10,5	10,5

II.2.Bétons étudiés :

En basant sur la formulation des bétons par la méthode de Dreux-Gorisse, et après avoir déterminé la composition du béton de référence, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences pour les autres compositions, en se basant sur les étapes suivantes :

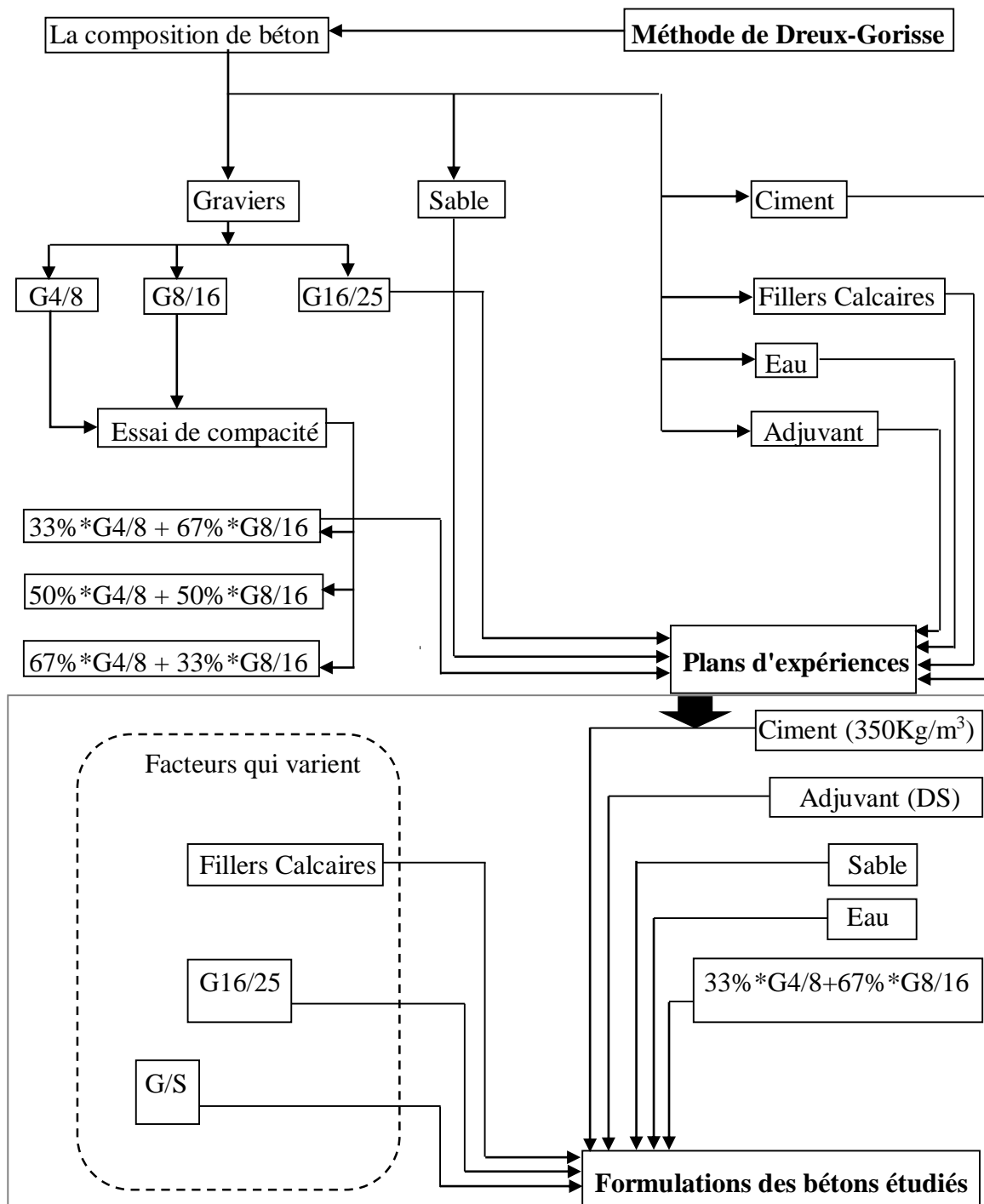


Figure 4.1. : Organigramme des formulations des bétons étudiés.

II.3. Mode de malaxage :

Le mode de malaxage a été identique pour l'ensemble des essais afin de mener une étude rationnelle.

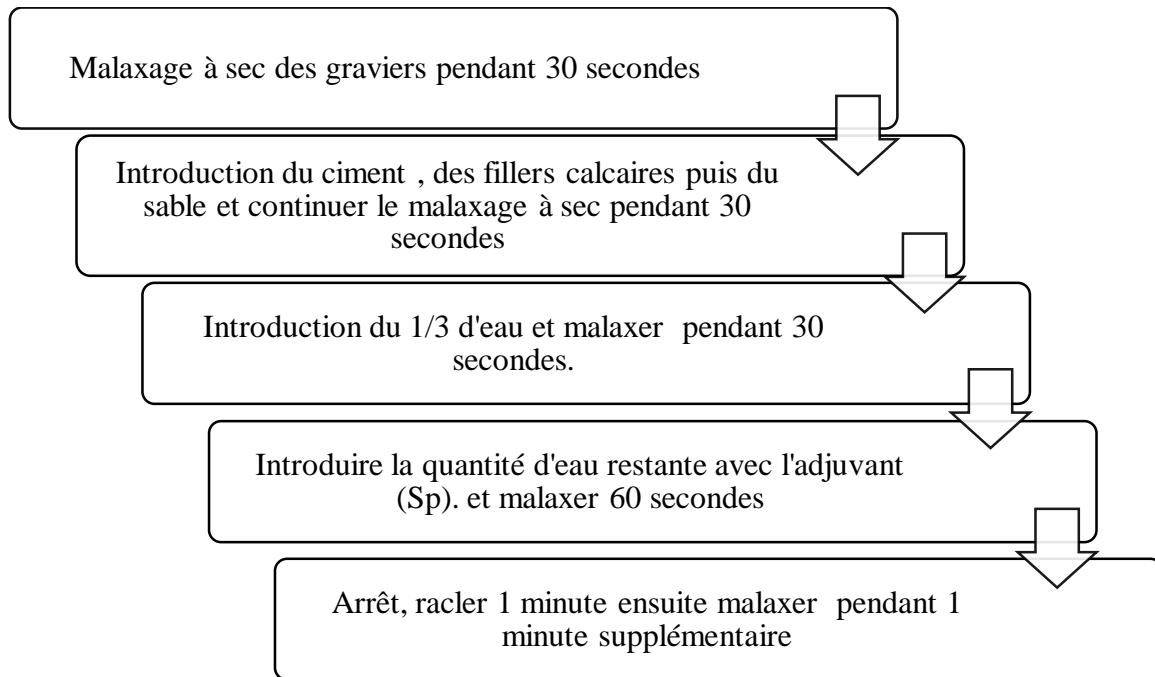


Figure 4.2. : Le mode de malaxage suivi.

III. Les plans d'expériences :

III.1. Choix des facteurs :

Les facteurs contrôlables considérés dans notre étude sont le dosage en fillers calcaire qui peut améliorer la résistance à jeune âge, le rapport G/S qui permet d'optimiser le squelette granulaire, et le dosage en granulats 16/25 qui peut influencer non seulement sur la résistance mais aussi sur la pompabilité des bétons.

III.2. Niveaux des facteurs :

Les niveaux des facteurs qui définissent le domaine expérimental et le domaine de validité des modèles mathématiques développés dans ce chapitre, sont choisis à partir de la littérature. Le rapport G/S trouvé dans des études antérieures varie généralement de 1,2 à 1,8 alors que le pourcentage des fillers calcaires ajouté aux bétons ordinaires peut atteindre jusqu'à 20% de la masse du ciment.

En ce qui concerne le dosage en gravier 16/25 et pour répondre à une problématique bien précise, nous avons essayé d'étudier la possibilité de le supprimer totalement de la composition du béton. Donc nous avons fait varier son dosage jusqu'à 450 Kg/m³ (Valeur proche de la formulation du béton de référence).

Nous avons donc essayé de concevoir un domaine d'étude, tout en restant dans une plage usuelle et pratique.

Tableau 4.2. : Niveaux des facteurs.

Facteurs	Niveaux	
FC [kg/m³]	0	- 1
	87,5	+ 1
G/S	1,2	- 1
	1,8	+ 1
G 16/25 [Kg/m³]	0	- 1
	450	+ 1

III.3. Choix du plan d'expérience :

Un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis. Avec un plan de trois facteurs à deux niveau nous avons un maximum de 2^3 essais, c'est-à-dire 8 formulations.

Le plan d'expérience est réalisé sur un seul block (01)

Nombre de points centraux : 2

Tableau 4.3. : Matrice des effets.

N° d'essai	Block	FC	G/S	G16/25
3	1	0	1,2	0
4	1	87,5	1,2	0
5	1	0	1,8	0
6	1	87,5	1,8	0
7	1	0	1,2	450
8	1	87,5	1,2	450
9	1	0	1,8	450
10	1	87,5	1,8	450
11	1	43,75	1,5	225
12	1	43,75	1,5	225

III.4. Interactions :

Pour le plan factoriel (FC, G/S, G16/25), les interactions considérées sont les suivantes : FC*G/S ; FC * G16/25 ; G/S * G16/25 ; FC * G/S * G16/25.

III.5. Réponses :

Les réponses sont : l'affaissement, résistance à la compression à 3 jours ainsi que la résistance à 28 jours.

R Square (R^2) : Coefficient de détermination.

La valeur du « R^2 » renseigne sur le degré de validité du modèle. Généralement pour une étude de béton le modèle peut est accepté partir d'une valeur du « R^2 » supérieur à «60%» (A.Kaoua, 2008).

III.6. Formulation des bétons :**Tableau 4.4. :** Formulation des bétons étudiés.

Essais	[C]	[FC]	[E]	$\frac{E}{C}$	$\frac{E}{L}$	[S]	[G4/8]	[G8/16]	[G16/25]	$\frac{G}{S}$	[Adj]
	[Kg]	[Kg]	[Kg]			[Kg]	[Kg]	[Kg]	[Kg]		[l]
N°03	350	0	186,96	0,53	0,53	810	320	650	0	1,2	1,64
N°04	350	87,50	186,96	0,53	0,42	810	320	650	0	1,2	1,64
N°05	350	0	187,36	0,53	0,53	636	377,50	766,50	0	1,8	1,64
N°06	350	87,50	186,36	0,53	0,42	636	377,50	766,50	0	1,8	1,64
N°07	350	0	185,73	0,53	0,53	810	171,50	348,50	450	1,2	1,64
N°08	350	87,50	185,73	0,53	0,42	810	171,50	348,50	450	1,2	1,64
N°09	350	0	185,12	0,52	0,52	636	229	465	450	1,8	1,64
N°10	350	87,50	185,12	0,52	0,42	636	229	465	450	1,8	1,64
N°11	350	43,75	186,00	0,53	0,47	712	278	565	225	1,5	1,64
N°12	350	43,75	186,00	0,53	0,47	712	278	565	225	1,5	1,64

Tableau 4.5. : Caractérisation des bétons étudiés.

Essais	Affai- ssement	Mv du béton frais	Rc à 3 j	Mv du béton durci	Rc à 28 j	V Ultra- son	E	
							Ec	Ed
	[Cm]	[Kg/m ³]	[MPa]	[Kg/m ³]	[MPa]	[m/s]	[MPa]	
N°03	17	2344,15	17,85	2333,15	24,37	4721,03	37444,04	47731,96
N°04	1	2369,98	9,07	2353,33	22,06	4631,57	36038,42	46337,65
N°05	16	2384,81	12,24	2372,37	22,39	4680,85	36809,39	47711,75
N°06	2	2357,06	11,98	2350,37	27,06	4856,51	39623,95	50883,63
N°07	18	2414,46	11,13	2399,16	32,11	4533,27	34524,90	45256,11
N°08	1	2374,76	14,16	2357,54	26,07	4824,56	39104,31	50369,50
N°09	18,5	2445,55	14,81	2408,72	28,50	4776,37	38327,03	50620,54
N°10	1,5	2427,47	11,60	2406,81	28,03	4423,88	32878,79	43407,60
N°11	2	2396,76	17,23	2391,50	33,36	4996,59	41942,73	54803,97
N°12	2	2358,98	14,73	2348,93	26,27	4621,84	35887,16	46056,88

III.7. Analyse des résultats :

III.7.1. Analyse des résultats relatifs à l'affaissement :

L'étude expérimentale a montré que l'affaissement varie de 1 à 18,5 (Figure 4.3.).



Figure 4.3. : L'affaissement au cône d'Abrams (affaissement de 10 mm et 185 mm).

Il est clair que la présence des fillers calcaires réduits à de faibles taux réduisent le frottement entre les granulats et améliorent la fluidité. Toutefois au-delà d'un certain seuil, l'effet devient inverse et conduit à des problèmes de frictions et donc à un blocage lors de l'écoulement. Ceci dit que les fillers calcaires en excès ont un effet négatif sur l'ouvrabilité. En effet, les résultats montrent que les fillers calcaires restent un paramètre qui influe significativement sur l'affaissement. L'augmentation de son dosage dans le béton diminue l'affaissement et rend le béton plus ferme. Ce résultat peut être aussi dû à cause des fines qui ont tendance à absorber l'eau libre qui était destiné à la fluidité.

Ces résultats peuvent aussi être expliqués par le fait que les fillers calcaires absorbent une partie du superplastifiant destiné à la défloculation du ciment. Une partie d'eau reste donc piégée entre les particules du ciment, ce qui amène à une diminution de la fluidité.

- **Modèle Mathématique :**

$$\text{Affaissement} = 17,52 - 0,22 *FC - 1,66*G/S - 0,0044*G16/25 + 0,038 (FC*G/S) + (7,6.E-05)*(FC*G16/25) + (5,55.E-03)* (G/S*G16/25) - (8,46.E-05) *(FC*G/S*G16/25)$$

$$R^2 = 85,58 \%$$

Le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur l'affaissement.

$R^2 = 85,58 \% \geq 60 \%$. Donc le modèle est validé.

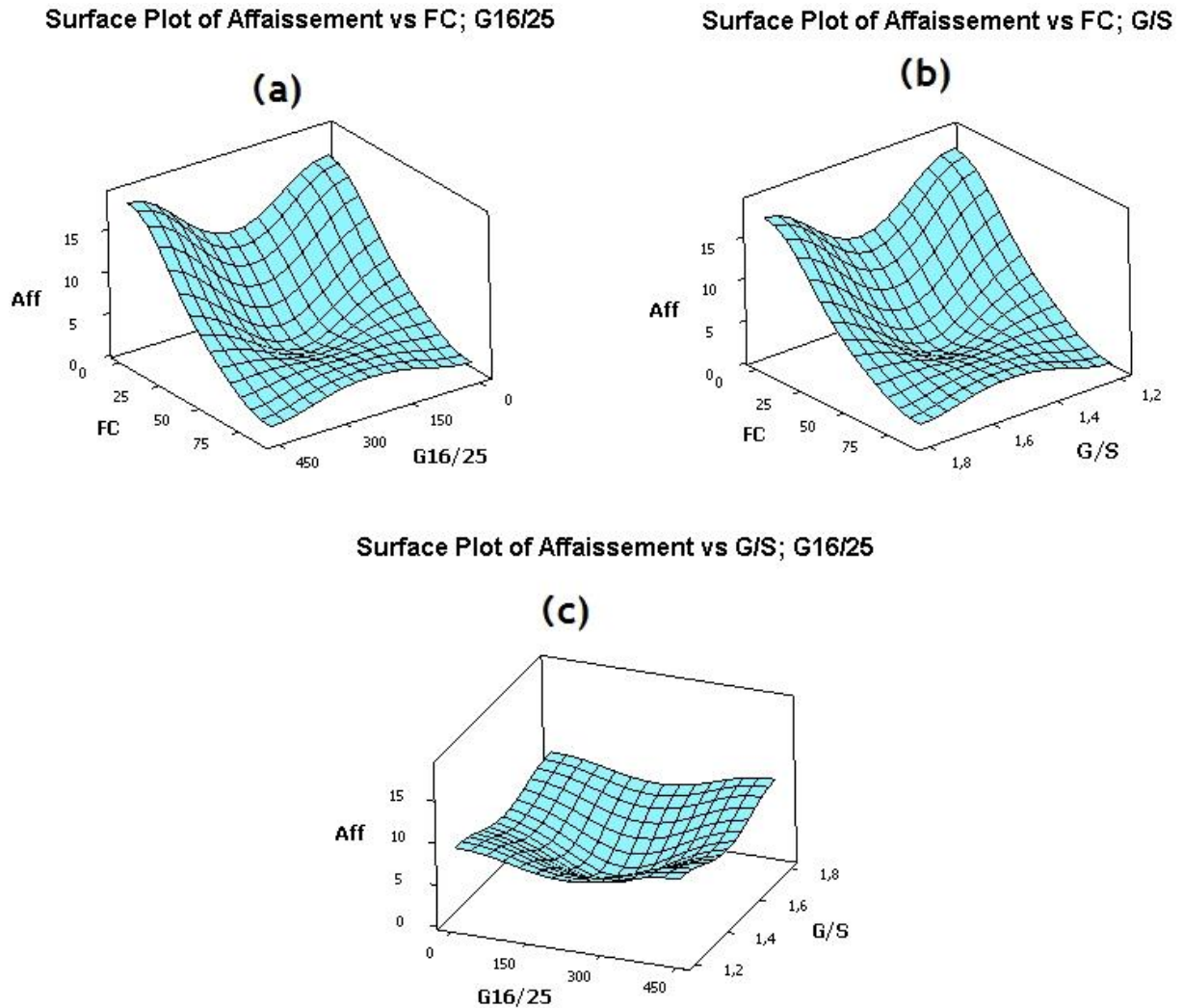


Figure 4.4. : Surface de réponse de volume de l'affaissement en fonction de FC et G/S et G16/25.

• **Interprétations :**

- Si on associe environ 30 kg des fillers (environ 10%) ajoutés à la formulation du béton de référence avec une quantité des graviers 16/25 inférieure à 150 kg, on aura une augmentation importante de l'affaissement (figure 4.4.a.).
- Pour avoir un béton fluide, le rapport G/S doit être moins de 1,4 avec une quantité des fillers calcaires inférieure à 25 % de la quantité prévu (87,50 kg), (figure 4.4.b.).
- La figure 4.4.c montre que pour une quantité de G16/25 compris entre 150 et 300 kg et un rapport G/S compris entre 1,4 et 1,6 l'affaissement diminue et le béton devient ferme dans ces intervalles.

III.7.2. Analyse des résultats relatifs à la résistance à 3 jours :



Figure 4.5. : Essai de la résistance à la compression.

L'utilisation des fillers calcaires a pour objectif d'éliminer la porosité et donner un béton plus compact. Elle est efficace pour avoir des résistances importantes à 3 jours à condition que la quantité des FC ne dépasse pas les 10% de la masse du ciment, au-delà de ce taux nous avons trouvé que l'effet s'inverse, donc nous recommandons un optimum de 10 %.

En plus, le fait que les fillers calcaires réagissent avec les superplastifiants, des grumeaux de ciment peuvent se former, ce qui amène à une formation moins importante des C-S-H et donc la résistance diminue.

La formulation de béton conseillé pour atteindre une très bonne résistance à 3 jours ; la quantité des graviers 16/25 ne doit pas dépasser 50 % de la quantité trouvée par la méthode Dreux-Gorisse. (Gâchée 11 au tableau 4.6.) avec un G/S égale à 1,5 et un dosage de 10% des fillers calcaires (en fonction de masse du ciment).

- **Modèle Mathématique :**

$$R_c(3) = 29,695 - 0,295*FC - 9,350*G/S - 0,0562*G16/25 + 0,162*(FC*G/S) + 0,00104*(FC*G16/25) + 0,0344*(G/S*G16/25) - (6,247.E-04)*(FC*G/S*G16/25)$$

$$R^2=72,92 \%$$

Le signe plus (-) indique que les facteurs influent négativement sur la résistance.

$R^2=72,92 \% \geq 60 \%$. Donc le modèle est validé.

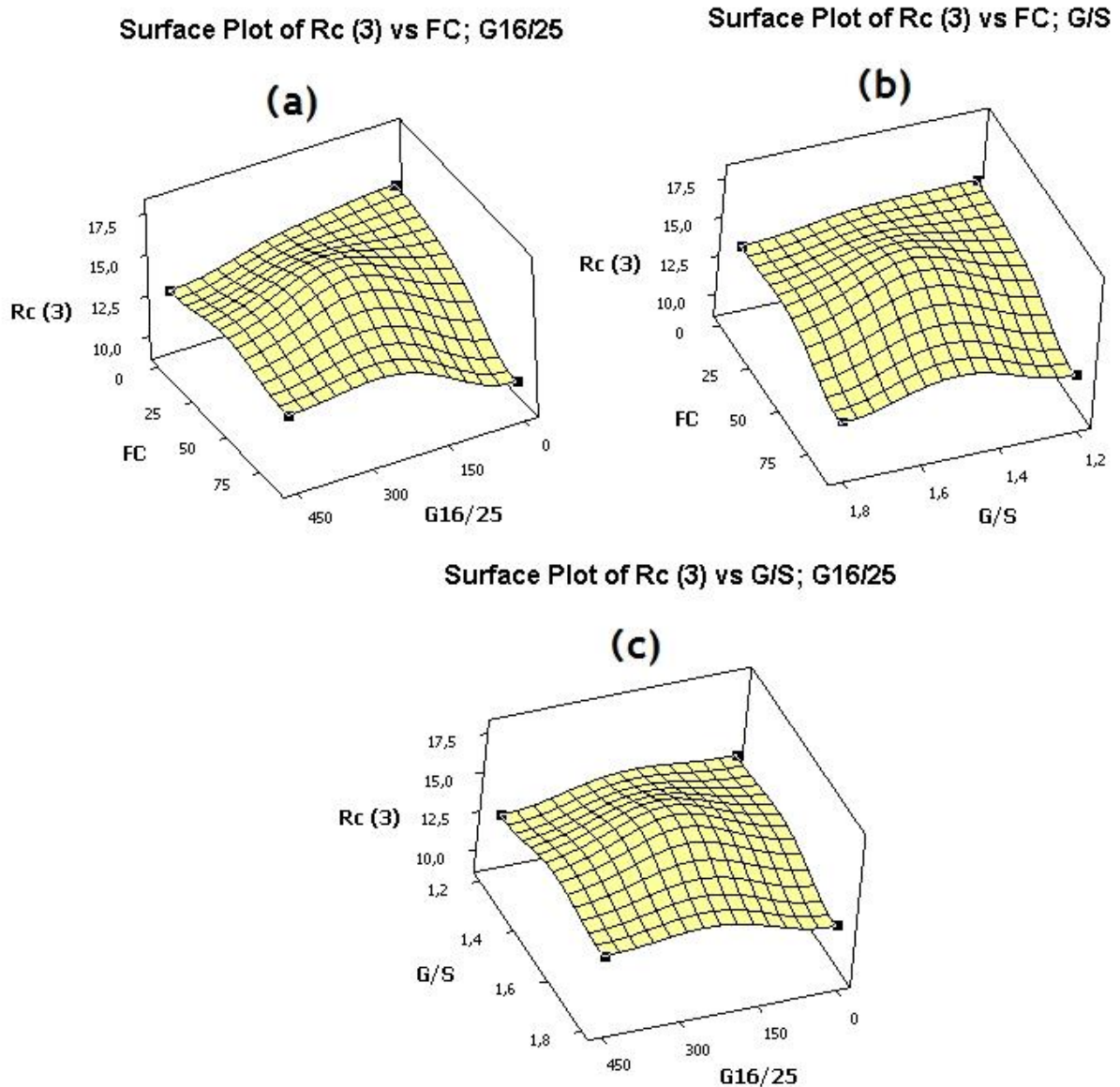


Figure 4.6. : Surface de réponse de volume de la résistance à 3 jours en fonction de FC et G/S et G16/25.

• **Interprétations :**

- A partir du modèle mathématique, nous constatons que les interactions entre les paramètres ont un effet non négligeable sur la résistance à 3 jours.
- Pour une meilleure résistance à la compression à 3 jours, il est recommandé d'avoir une quantité des G16/25 entre 150 et 300 kg et les fillers calcaires ne dépassant pas le taux de 10 % de la masse du ciment. (figure 4.6.a)
- Les graviers 16/25 sont indispensables lors la formulation des bétons, les résultats montré par la figure 4.6.c affirme que l'absence de cette classe mène à des faibles résistances.

III.7.3. Analyse des résultats relatifs à la résistance à 28 jours :

Il est évident que le gravier 16/25 est indispensable pour atteindre une meilleure résistance à 28 jours.

Le rapport G/S doit être compris entre 1,5 et 1,8 pour des résultats satisfaisants.

- **Modèle Mathématique :**

$$R_c(28) = 28,33 - 0,185*FC - 3,30*G/S + 0,024*G16/25 + 0,132*(FC*G/S) - (2,31.E-5)*(FC*G16/25) - 0,0060*(G/S*G16/25) - (5,95.E-5)*(FC*G/S*G16/25)$$

$$R^2 = 79,70 \%$$

$R^2 = 79,70 \% \geq 60 \%$, on peut valider ce modèle.

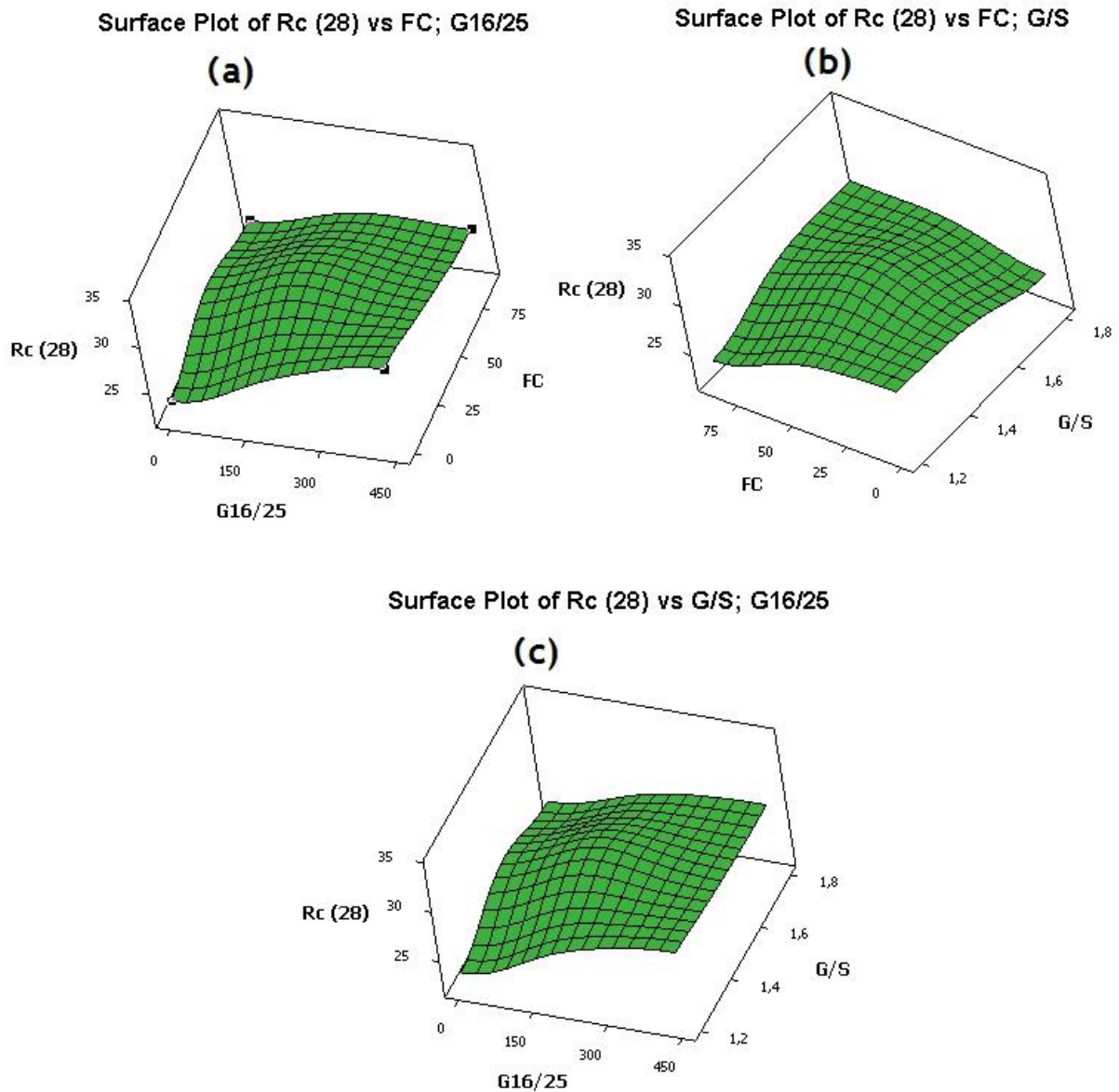


Figure 4.7. : Surface de réponse de volume de la résistance à 28 jours en fonction de FC et G/S et G16/25

- **Interprétations :**

- La résistance à 28 jours augmente proportionnellement avec la quantité des graviers 16/25 quel que soit la valeur de G/S (figure 4.7.a).
- La figure 4.7.b montre que les fillers calcaires ont un effet négatif sur la résistance lorsqu'ils sont utilisés à des taux de 20% (87,50kg) spécialement quand le rapport G/S est proche de 1,2.

La figure 4.8. représente l'évolution des résistances de 3 à 28 j. Nous remarquons d'une façon générale que les bétons ont atteint au moins la moitié de leurs résistances à 3 jours seulement.

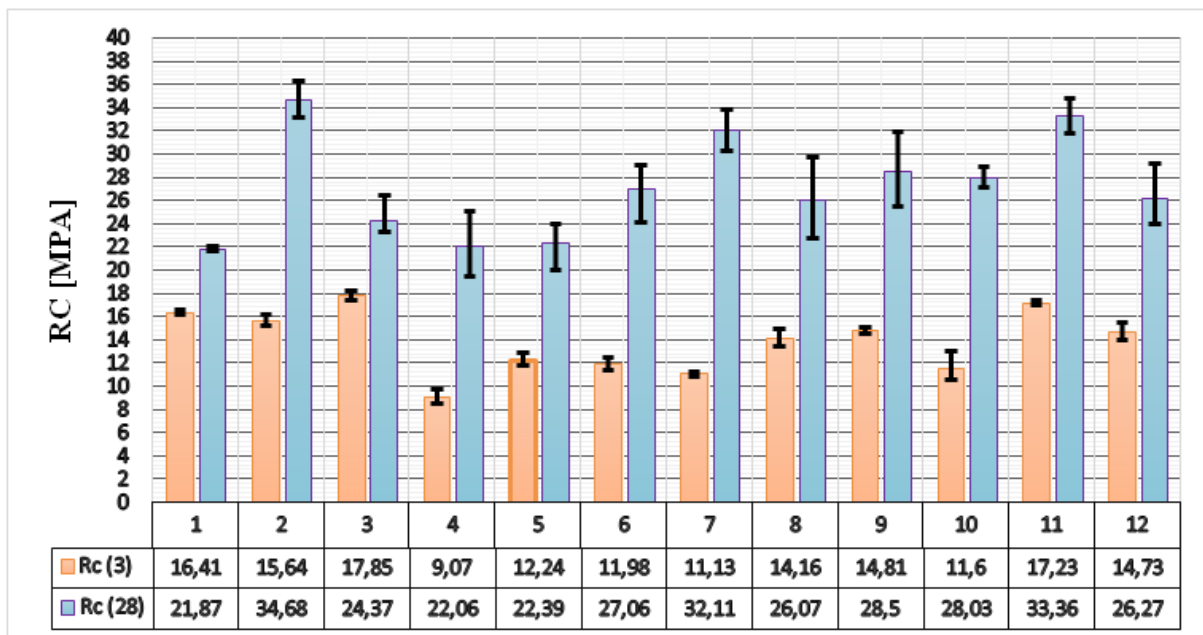


Figure 4.8 : Histogramme représente les résistances à la compression à 3 jours et à 28 jours.

III.7.4. Analyse des résultats relatifs à la masse volumique à l'état frais :

$$Mv(f) = 2260,45 + 1,519*FC + 67,766*G/S + 0,198*G16/25 - 1,020*(FC*G/S) - 0,00549*(FC*G16/25) - 0,0354*(G/S*G16/25) + 0,00318*(FC*G/S*G16/25)$$

$R^2 = 90,48 \% \geq 60 \%$. Et il est proche de 100 %, modèle validé.

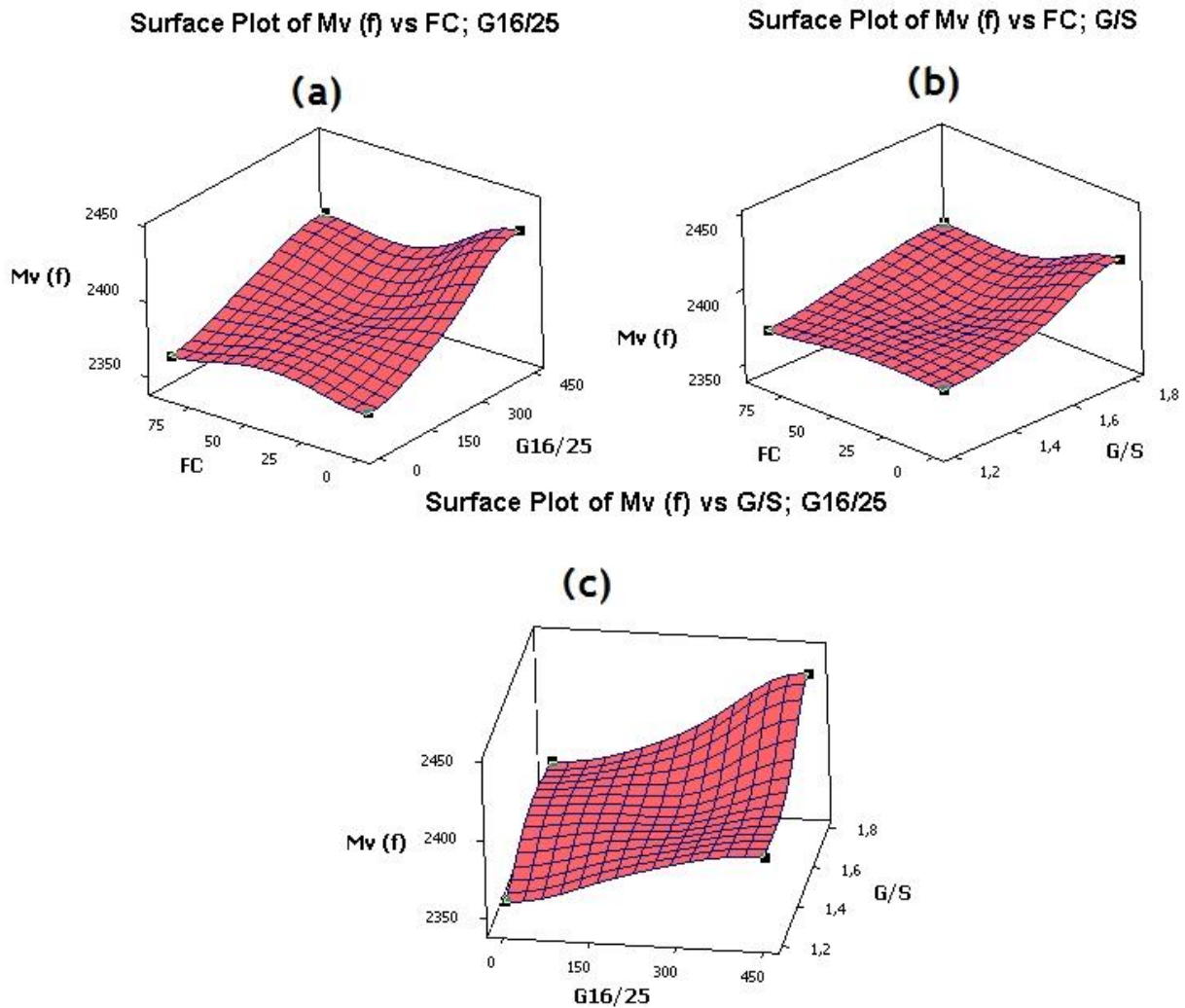


Figure 4.9. : Surface de réponse de volume de la masse volumique à l'état frais en fonction de FC et G/S et G16/25.

- **Interprétations :**

- Les résultats de la figure 4.8.a. montrent que la masse volumique augmente en augmentant la quantité des G16/25, ce qui a impliqué l'augmentation des résistances.
- Pour avoir un béton compacte, qui donne une bonne résistance à la compression, la figure 4.9.c nous guide à utiliser une quantité de G16/25 au-delà de 300 kg et un rapport G/S qui oscille entre 1,4 au 1,8.

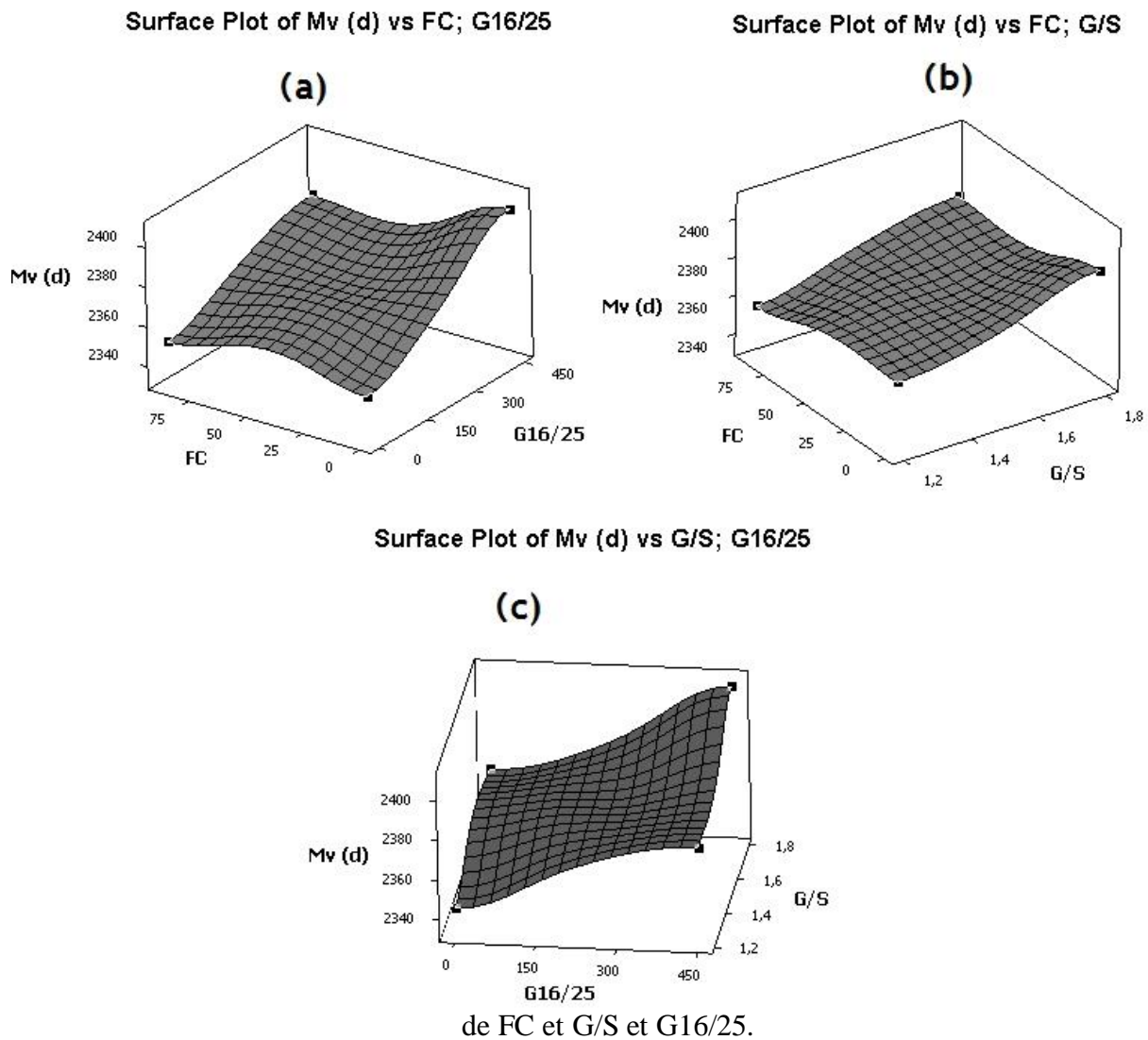
III.7.5. Analyse des résultats relatifs à la masse volumique à l'état durci :

- **Modèle Mathématique :**

$$Mv(d) = 2254,22 + 1,194*FC + 65,366*G/S + 0,278*G16/25 - 0,803*(FC*G/S) - 0,0057*(FC*G16/25) - 0,109*(G/S*G16/25) + 0,0034*(FC*G/S*G16/25)$$

$$R^2 = 86,42 \%$$

Le signe plus (+) indique que les facteurs influent positivement sur l'affaissement.

Figure 4.10. : Surface de réponse de volume de la masse volumique à l'état durci en fonction

- **Interprétations :**

- La figure 4.10.a montre que la résistance augmente quand on augmente la quantité des G16/25, avec l'utilisation des fillers calcaires de l'intervalle qui varie entre 25% au 50 % de la quantité ajoutée des fillers calcaires.
- La masse volumique a l'allure croissante si les G16/25 et G/S augmentent, c'est-à-dire avec l'augmentation des graviers dans le mélange. (figure 4.10.c).



Figure 4.11. : Comparaison de différentes valeurs des masses volumiques.

La figure 4.11. montre que la masse volumique diminue légèrement de l'état frais à l'état durci du béton à cause du départ d'eau par évaporation.

III.7.6. Analyse des résultats relatifs au module d'élasticité :

III.7.6.2. Estimation du module d'élasticité selon la vitesse du son :

Pour estimer le module d'élasticité, des essais ont été réalisés avec l'ultrason. En effet, la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans un béton dépend de sa densité et influence le module d'élasticité du béton.

Il est possible de déterminer le module d'élasticité en fonction de la vitesse du son et la masse volumique en utilisant la relation suivante (H.Munzer, 1994) :

$$E_d = \frac{(1+\nu).(1-2\nu)}{(1-\nu)} (\gamma \cdot V^2)$$

$$\text{Avec } V = \frac{L}{T}$$

Où

γ : masse volumique du béton (expérimentale) ; $\nu = 0,2$ (coefficient de Poisson),

V : vitesse du son [km/s]

La masse volumique peut être estimée selon l'équation suivante (H.Munzer, 1994):

$$\gamma_v = 1,67 + 0,155 V ; \text{ et } E_c = k \cdot V^2$$

Où γ_v (t/m³)

E_c [GPa] : module d'élasticité statique sécant selon la SIA 162/1

v [km/s] : vitesse du son dans le béton ;

$k = 1.68$ pour $t \geq 180$ jours ; et $k = t^{0,1}$ pour $t < 180$ jours ;

t : âge du béton jours.

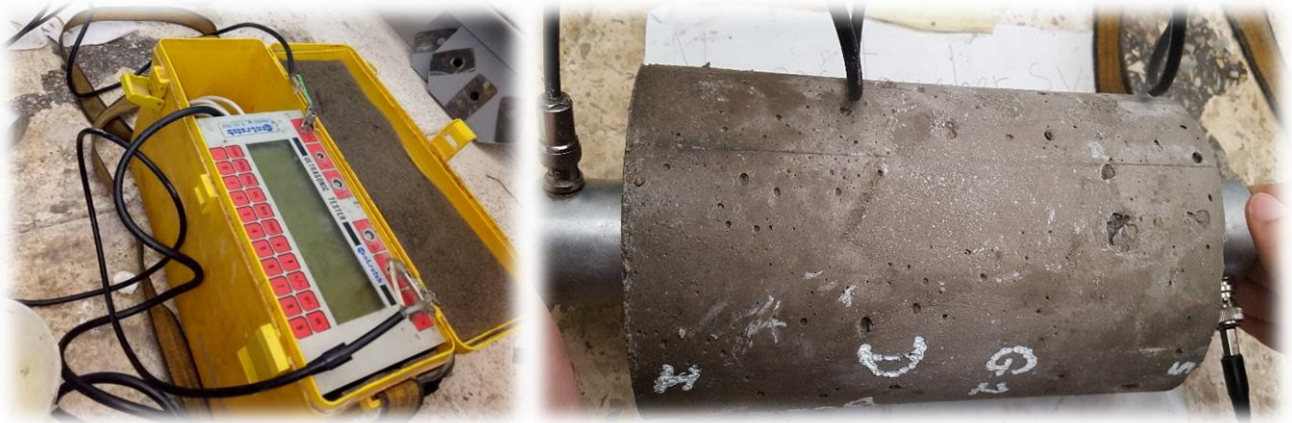


Figure 4.12. : L'essai de l'ultrason.

III.7.6.3. La relation entre le module d'élasticité statique et le module d'élasticité dynamique :

Les travaux antérieurs ont montré que le module d'élasticité statique est toujours inférieur au module d'élasticité dynamique, et ce rapport tend vers l'unité d'autant plus que la résistance du béton augmente (Takabayashi 54 cité dans M.E.A.Bouakkaz), ce qui explique éventuellement qu'il n'y a pas de conversion simple de la valeur du module d'élasticité dynamique, E_d , qui est facile à mesurer, en une estimation du module élastique, E_c , dont la connaissance est nécessaire pour la conception des structures en béton. Malgré cela, différentes relations empiriques, valables dans un domaine limité, ont été proposées.

L'expression suivante est tirée de la norme britannique CP110 : 1972 pour la conception des structures. Les deux modules sont exprimés en GPa:

$$E_c = 1.25 \cdot E_d - 19$$

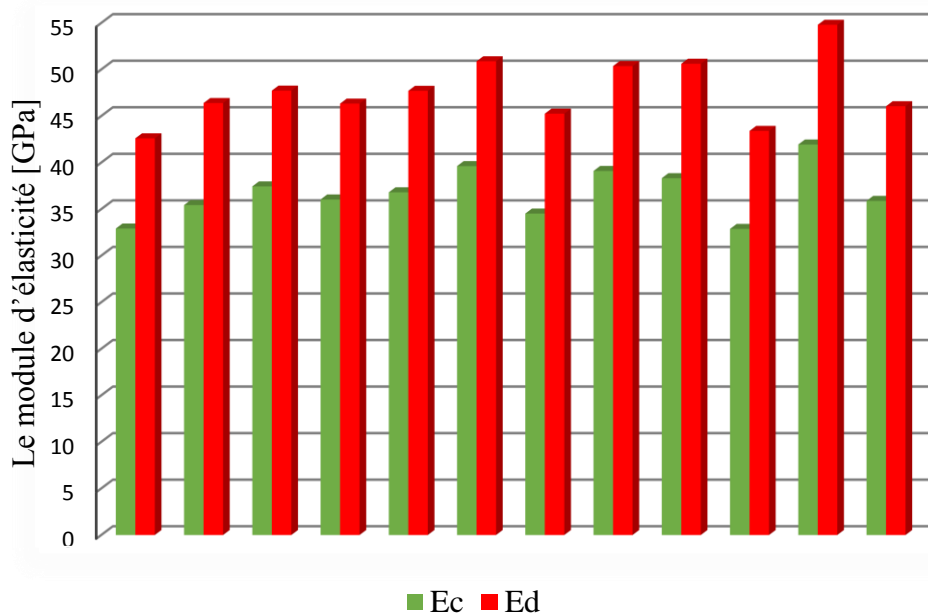


Figure 4.13. : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité.

- **Modèle Mathématique :**

Le module d'élasticité dynamique = $-120,305*FC - 33,7*G/S - 29,4336*G16/25 + 86,975*(FC*G/S) + 1,02331(FC*G16/25) + 19,9431*(G/S*G16/25) - 0,715027*(FC*G/S*G16/25)$

$R^2 = 62,27\%$

Le module d'élasticité statique = $-112,525*FC - 1057,8*G/S - 26,2060*(G16/25) + 80,384*(FC*G/S) + 0,875700*(FC*G16/25) + 16,4325*(G/S*G16/25) + 0,60308*(FC*G/S*G16/25)$

$R^2 = 70,59\%$

Tableau 4.6. : Tableau récapitulatif.

	[C]	[E]	[Adj]	[S]	[G4/8]	[G8/16]	[G16/25]	[FC]	$\frac{G}{S}$	$\frac{E}{C}$	$\frac{E}{L}$	Aff	Rc (3)	Rc (28)	Fr (3)	Fr(28)
Essai	Kg	l	l	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg				Cm	MPa	MPa	kN	kN
N°01	350	184,98	3,07	802,67	192,82	370,88	416,70	87,50	1,22	0,52	0,42	10,5	16,41	21,87	155,94	207,83
N°02	350	185,87	1,64	802,67	192,82	370,88	416,70	87,50	1,22	0,53	0,42	10,5	15,64	34,68	148,63	329,57
N°03	350	186,96	1,64	810	320	650	0	0	1,2	0,53	0,53	17	17,85	24,37	169,63	231,59
N°04	350	186,96	1,64	810	320	650	0	87,50	1,2	0,53	0,42	1	9,07	22,06	86,19	209,64
N°05	350	187,36	1,64	636	377,50	766,50	0	0	1,8	0,53	0,53	16	12,24	22,39	116,32	212,77
N°06	350	186,36	1,64	636	377,50	766,50	0	87,50	1,8	0,53	0,42	2	11,98	27,06	113,84	257,15
N°07	350	185,73	1,64	810	171,50	348,50	450	0	1,2	0,53	0,53	18	11,13	32,11	105,77	305,15
N°08	350	185,73	1,64	810	171,50	348,50	450	87,50	1,2	0,53	0,42	1	14,16	26,07	134,56	247,75
N°09	350	185,12	1,64	636	229	465	450	0	1,8	0,52	0,52	18,5	14,81	28,50	140,74	270,84
N°10	350	185,12	1,64	636	229	465	450	87,50	1,8	0,52	0,42	1,5	11,60	28,03	110,23	266,37
N°11	350	186,00	1,64	712	278	565	225	43,75	1,5	0,53	0,47	2	17,23	33,36	163,74	317,03
N°12	350	186,00	1,64	712	278	565	225	43,75	1,5	0,53	0,47	2	14,73	26,27	139,98	249,65

Tableau 4.7 : Tableau récapitulatif.

Essais	T	Masse	ρ à l'état frais(Mvf)	ρ à l'état durci (Mvd)	Vitesse	Qualité	Ec(28)	Ed(28)
	[μ s]	[Kg]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[m/s]		[MPa]	[MPa]
1	49,7	4,95298	2380,26	2369,02	4426,55	Bonne	32918,49	42608,37
2	47,9	5,00997	2420,78	2396,28	4592,90	Excellente	35439,14	46398,64
3	46,6	4,87798	2344,15	2333,15	4721,03	Excellente	37444,04	47731,96
4	47,5	4,92017	2369,98	2353,33	4631,57	Excellente	36038,42	46337,65
5	47	4,95998	2384,81	2372,37	4680,85	Excellente	36809,39	47711,75
6	45,3	4,91398	2357,06	2350,37	4856,51	Excellente	39623,95	50883,63
7	48,53	5,01599	2414,46	2399,16	4533,27	Excellente	34524,90	45256,11
8	45,6	4,92897	2374,76	2357,54	4824,56	Excellente	39104,31	50369,50
9	46,06	5,03598	2445,55	2408,72	4776,37	Excellente	38327,03	50620,54
10	49,73	5,03198	2427,47	2406,81	4423,88	Bonne	32878,79	43407,60
11	44,03	4,99998	2396,76	2391,50	4996,59	Excellente	41942,73	54803,97
12	47,60	4,91097	2358,98	2348,93	4621,84	Excellente	35887,16	46056,88

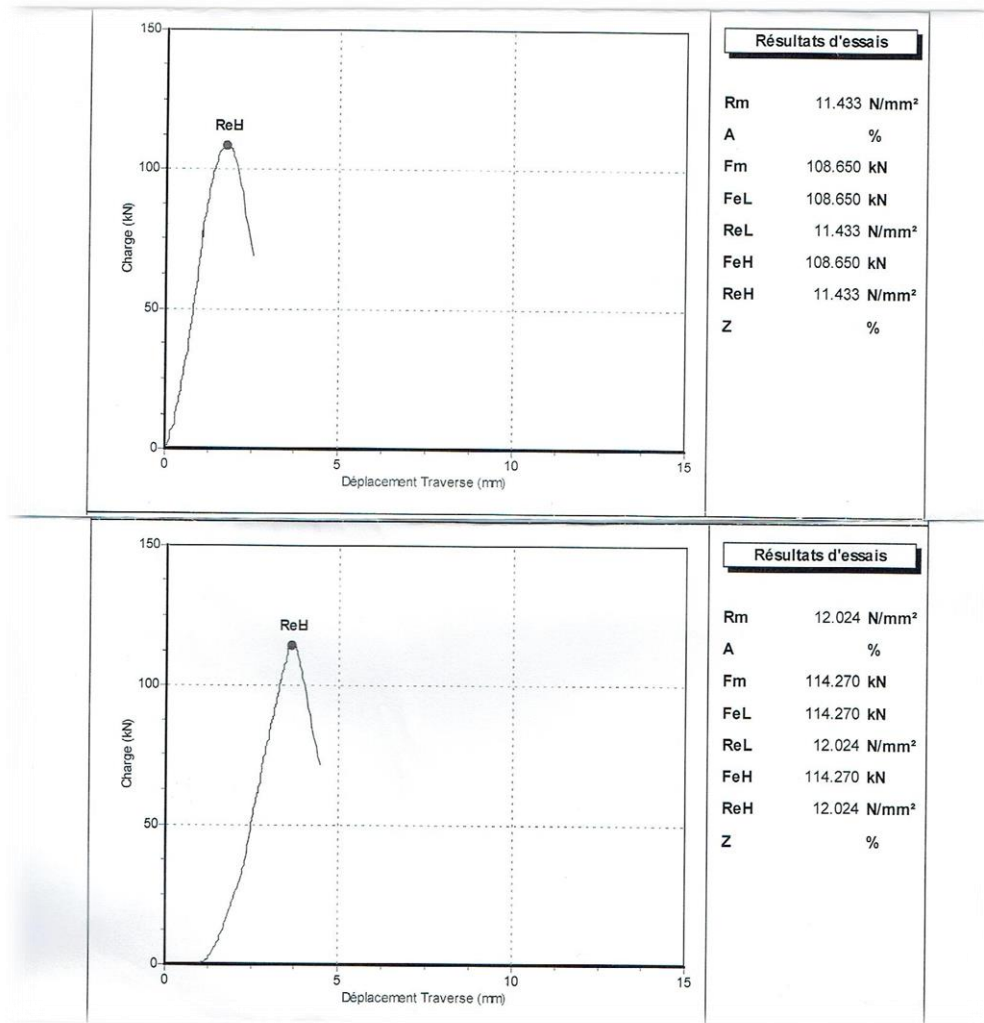


Figure 4.14. : Comportement du béton lors l'essai d'écrasement.

La figure 4.14. montre que le béton reste un matériau qui n'est pas ductile car la rupture suit directement le palier linéaire qui représente la phase élastique.

Conclusion :

Après examen des résultats obtenus, on peut déduire les constatations suivantes :

Les résultats trouvés ont clairement fait sortir que la résistance à la compression au jeune âge augmente en ajoutant 10 % des fillers calcaires qui reste un optimum, avec un rapport G/S variant entre 1,4 et 1,6 et la quantité des graviers 16/25 qui doivent être en moyenne au environ de 300 Kg pour 1 m³.

Donc il est possible de diminuer légèrement la quantité des granulats 16/25.

Pour avoir un béton compact avec une bonne résistance à 28 jours, la présence des trois classes des graviers est obligatoire.

Les résultats obtenus ont montré que les fillers ont un effet négatif sur l'affaissement au-delà d'un certain seuil. Toutefois il est recommandé d'ajouter 10% de fillers calcaires.

La méthode des plans d'expériences a permis d'évaluer plusieurs paramètres et leurs interactions à la fois et de prédire des modèles prédictifs. Toutefois, il faut rappeler que ces modèles ne sont valables que dans leur domaine expérimental dans les fourchettes étudiées.

Références bibliographiques :

BOUAKKAZ MOHAMMED EL AMIN. (2012) : 'Caractérisation du béton par les méthodes non destructives – application de la méthode de fréquence de résonance', Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen ; 88p.

KAOUA ABDELHAKIM. (2008) ; Détermination de modèles prédictifs des caractéristiques essentielles du béton de la région de M'sila. (Plan d'expérience), magistère, M'sila, Algérie. 122p.

MUNZER HASSAN. (1994) : "Critères Découlant D'essais De Charge Pour L'évaluation Du Comportement Des Ponts En Béton Et Pour Le Choix De La Précontrainte", Thèse de Doctorat N° 1296, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne.

Norme :

CP110 : norme britannique, Inspection Béton, REGLEMENT BRITANNIQUE DE BETON ARME, 1972.

Conclusion Générale

Les travaux réalisés et présentés dans ce mémoire portent sur l'amélioration de la qualité des bétons adjuvés à court terme. L'étude visait également à étudier la possibilité de diminuer le dosage des granulats 16/25 pour éviter les problèmes de blocage lors de la mise en place. Une partie statistique complète notre recherche dont l'objectif est de développer des modèles prédictifs pour l'affaissement et les résistances à 3 et à 28 jours.

La recherche bibliographique a clairement montré que la variation de chaque constituant du béton peut significativement modifier le comportement rhéologique ou mécanique du mélange.

La bibliographie nous a aussi permis de distinguer les fourchettes des dosages des différents constituants sur lesquelles nous nous sommes basés pour élaborer le plan expérimental.

A partir des essais de caractérisation, nous avons remarqué que les granulats répondent aux exigences des normes et permettent d'obtenir des bétons de bonne qualité vis-à-vis de la maniabilité et de la résistance.

Les essais de Kantro ont montré que les adjuvants ne réagissent pas de la même manière avec le ciment. Nous avons noté que l'adjuvant « ORAFLOW HM THM 17200 » à base de polycarboxylates reste le plus recommandé pour obtenir les meilleures performances rhéologiques. Par contre le superplastifiant « SOLUFLOW ®3085 » est incompatible avec le ciment de Béni Saf.

La méthode des plans d'expériences a permis de mettre en place un plan expérimental et surtout faciliter l'analyse des résultats tout en considérant les interactions entre les facteurs sur les réponses.

Dans le contexte de l'amélioration de la compacité des bétons, les fillers calcaires au-delà d'une certaine quantité ont un effet négatif sur le béton à l'état frais. Ils ont tendance à réagir avec les adjuvants nécessaires pour la défloculation des grains de ciment et induisent donc à une diminution de l'ouvrabilité. Il est donc primordial d'ajouter au mélange une quantité de superplastifiant pour les fillers calcaires.

Sur le plan de la résistance à jeune âge, il est recommandé d'ajouter un dosage en filler équivalent à 10% de la masse du ciment pour garantir des résistances élevées à jeune âge et à 28 jours.

La classe granulaire 16/25 est indispensable pour assurer une bonne résistance du béton. Toutefois, il est possible de substituer la moitié de cette classe granulaire par une autre dont le diamètre maximal est inférieur tout en assurant de bonnes résistances au jeune âge et à 28 jours.

Nous avons aussi constaté pour les bétons étudiés que la moitié de la résistance est atteinte après seulement 3 jours du contact eau / ciment.

Les modèles dérivés sont basés sur une approche de conception factorielle se sont révélés intéressants pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du mélange. Ces modèles statistiques restent un moyen efficace pour estimer l'affaissement et les résistances à 3 et 28 jours à partir du taux des fillers, du rapport G/S et du dosage en granulat 16/25. Cependant ils ne sont valables que dans le domaine des fourchettes étudiées.

En perspective, il serait intéressant d'étaler cette recherche sur d'autres types d'additions minérales comme les cendres volantes, la fumée de silice ainsi que d'autres types d'additions organiques pour étudier leurs influences sur le comportement à jeune âge.

Pour continuer d'avancer sur cet axe de recherche, il serait aussi judicieux d'étudier l'influence de la température de cure sur le développement des résistances et de chercher d'autres techniques qui permettraient d'améliorer la résistance à jeune âge.

Annexes

1. Planning du programme expérimental.
2. Fiche technique de l'ORAFLOW HM THM 13600.
3. Fiche technique de l'ORAFLOW HM THM 15400.
4. Fiche technique de l'ORAFLOW HM THM 17200.
5. Fiche technique du SOLUFLOW ® 3085.

Tableau A.1. : Planning du programme expérimental.

Une gâchée = **g**

L'écrasement à 3 jours = **e**

L'écrasement à 28 jours = **r**

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12
14/03	g											
15/03												
16/03												
17/03												
18/03	e											
19/03		g										
20/03												
21/03												
22/03		e										
23/03												
24/03												
25/03			g									
26/03				g								
27/03												
28/03			e									
29/03				e								
30/03												
31/03												
01/04					g							
02/04						g						
03/04												
04/04					e							
05/04						e						
06/04												
07/04												
08/04							g					
09/04								g				
10/04												
11/04	r						e					
12/04								e				
13/04												
14/04												
15/04									g			
16/04		r								g		
17/04												
18/04									e			

19/04										e		
20/04												
21/04												
22/04			r									
23/04				r						ce		
24/04												
25/04											ce	
26/04										e		
27/04												
28/04												
29/04					r							e
30/04						r						
01/05												
02/05												
03/05												
04/05												
05/05												
06/05							r					
07/05								r				
08/05												
09/05												
10/05												
11/05												
12/05												
13/05								r				
14/05									r			
15/05												
16/05												
17/05												
18/05												
19/05												
20/05												
21/05										r		
22/05												
23/05												r



Groupe
NEMER

ORAFLOW HM 13600

Super plastifiant / Haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.



Présentation :

ORAFLOW HM 13600 est un superplastifiant un superplastifiant non chloré de nouvelle génération à base d'éther polycarboxylique modifié, conçu pour les bétons à haute qualité de performance et d'ouvrabilité.

Propriétés :

- Augmente la résistance mécanique et l'imperméabilité.
- Diminue la vibration et le risque de fissuration.
- Augmente l'adhérence sur les aciers.
- Donne un béton fluide et améliore le module d'élasticité.
- Permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus d'une heure et demi avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.
- Augmente considérablement la fluidité du béton.
- Améliore la qualité des parements de la texture du béton.

Domaines d'application :

- Béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité.
- Béton à performance mécanique initiale élevée.
- Industrie du béton prêt à l'emploi.
- Chantiers de génie civil.
- Très haut fluidifiant en augmentant le dosage.

Caractéristiques :

-Aspect :	Liquide
-Couleur :	Brun
-Ph :	5,5 ± 1
-Teneur en chlorure:	<0,1%
-Extrait sec :	22±1%
- Masse volumique	1,05±0,02g/cm ³

Consommation :

Le dosage recommandé est de : 0,3 à 3% du poids du ciment, soit : 0,28 à 2,86L pour 100KG de ciment selon les performances recherchées.

Conditionnement :

- Cubi de 1100kg.
- Fut de 220kg.
- En vrac.

Conservation :

Se conserve 1 an dans son emballage intact.

Construction

ORAFLOW HM 13600

Super plastifiant / Haut réducteur d'eau pour
béton à faible E/C, hautes performances et long
maintien d'ouvrabilité

STOCKAGE :

Dans un local fermé, à une température supérieure à 5°C.

Mise en œuvre :

ORAFLOW HM 13600 est ajouté dans le béton en différé, c'est-à-dire après
l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur.

Précautions d'emploi :

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Mentions légales :

Produit réservé à un usage strictement professionnel.

Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale de nos produits, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que notre société a acquise à ce jour.

En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés.

Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements.

Les droits de propriété détenus par les tiers doivent être respectés.

Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos conditions de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur commande.

Fiche technique établie le : 17/02/2015.

Dernière mise à jour établie le : 26/05/2015



Groupe
NEMER

Construction

ORAFLOW HM 15400

Superplastifiant / Haut réducteur d'eau
Pour béton prêt à l'emploi.



Présentation :

ORAFLOW HM 15400 est un super plastifiant haut réducteur d'eau, de nouvelle génération, à base de Polycarboxylates modifiés. Il se présente sous forme liquide de couleur marron clair.

Propriétés :

- Procure de la robustesse vis-à-vis de la ségrégation.
- Donne un bel aspect de parement au décoffrage.
- Un super plastifiant haut réducteur d'eau.
- Prolonge le maintien de la rhéologie.
- Améliore la stabilité, et rend la formule moins sensible aux variations d'eau.

Domaines d'application :

- Fabrication des bétons plastiques et fluides.
- Bétons pompés, avec ou sans fumée de silice.
- Bétons pompés sur longues distances.
- Adapté à l'industrie du BEP et à l'utilisation sur chantiers.

Caractéristiques :

- Aspect : Liquide
- Couleur : Marron clair
- Ph $0,5 \pm 1$
- Densité $1,11 \pm 0,02$
- Teneur en Na₂O : $\leq 2,5\%$
- Teneur en inos CL : $\leq 0,1\%$

Rhéologie 04	Résistance initiale 03	Réduction d'eau 04
-----------------	------------------------------	--------------------------

Consommation :

Le dosage recommandé est de : 0,25 à 2,5 % du poids de liant, selon les performances recherchées.

Dosage usuel du ORAFLOW HM 15400 est de 0,3 à 1%.

ORAFLOW HM 15400

Superplastifiant / Haut réducteur
d'eau pour béton prêt à l'emploi.

Conditionnement :

Fut de 220kg.
Cube de 1100kg.
En vrac

Conservation :

Se conserve 1 an dans son emballage intact.

STOCKAGE :

ORAFLOW 15400 est stocké dans des conditions de températures supérieures à + 5°C et inférieure à 35°C.

Précautions d'emploi :

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Mentions légales :

Produit réservé à un usage strictement professionnel.

Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale de nos produits, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que notre société a acquise à ce jour.

En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés.

Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de nos fiches techniques, remise sur demande Fiche technique établie le : 17/02/2015.

Dernière mise à jour établie le : 26/05/2015

Fabriqué par la Sarl Orachem Concrete Adresse : Rue
de la gare, lot n°129, Boutlelis, Oran. Site web:
www.orachemconcrete.com E-mail:
contact@orachemconcrete.com Fax: 041 42 29 12.



Groupe
NEMER

Construction

ORAFLOW THM 17200

Superplastifiant / Haut réducteur d'eau
Pour béton prêt à l'emploi.



Présentation :

ORAFLOW THM 17200 est un superplastifiant , réducteur d'eau, de nouvelle génération, à base de polycarboxylate , recommandé pour les bétons prêts à la l'emploi, les chantiers et travaux public.

Propriétés :

- ORAFLOW THM 17200 est un superplastifiant puissant adapté à la Fabrication de bétons plastiques à autoplçants homogènes transportés sur de longues distances et pompés.
- Améliore les caractéristiques du béton à l'état frais et durci.
- Augmente les performances mécaniques des bétons.
- Apporte aux bétons une bonne qualité de parement.
- Longue rhéologie, jusqu'à 3 heures.
- Robustesse à la ségrégation

Domaines d'application :

- Améliore la stabilité et limite la ségrégation du béton.
- Bétons autoplçants : rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- Béton durci : permet de réduire significativement le rapport E/C , ce qui améliore la durabilité
- Ouvrage d'art.
- Bétons plastiques très fluides.

Caractéristiques :

- Aspect : Liquide
- Couleur : Brun clair
- Ph 4,5 ± 6,5
- Densité 1,06± 0,01
- Teneur en Na₂O : <1%

Rhéologie	Résistance initiale	Réduction d'eau
06	02	05



Groupe
NEMER

Construction

ORAFLOW HM THM 17200

Superplastifiant / Haut réducteur d'eau pour béton prêt à l'emploi.



Consommation :

Le dosage recommandé est de : 0,2 à 3% du poids du ciment, selon la fluidité et les performances recherchées.

Conditionnement :

Fut de 230kg.
Cubi de 1100kg.
En vrac

Conservation :

Se conserve 1 an dans son emballage intact.

Mise en œuvre :

ORAFLOW THM 17200 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

Précautions d'emploi :

Manipulation non dangereuse.
En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit.

Mentions légales :

Produit réservé à un usage strictement professionnel.

Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale de nos produits, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que notre société a acquise à ce jour.

En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés.

Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements.

Fiche technique établie le : 17/02/2015.

Dernière mise à jour établie le : 26/05/2015

Fabriqué par la Sarl Orachem Concrete Adresse : Rue
de la gare, lot n°129, Boutlelis, Oran. Site web:
www.orachemconcrete.com E-mail:
contact@orachemconcrete.com Fax: 041 42 29 12.

SOLUFLOW® 3085

Superplastifiant/ Haut réducteur d'eau

Conforme à la norme NF EN
934-2 tab 1, 3.1 et 3.2.

Description

Le **SOLUFLOW® 3085** est un superplastifiant de nouvelle génération, à base d'éther polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi et les chantiers de génie civil.

Le **SOLUFLOW® 3085** est adapté à la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants homogènes sur une large gamme de résistance mécanique et transportés sur de longues distances et pompés.

Le **SOLUFLOW® 3085** permet une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité.

Domaines d'applications

Le **SOLUFLOW® 3085** est utilisé pour ;

- Béton prêt-à-l'emploi.
- Ouvrages d'art
- BHP et BTHP
- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons auto-plaçants
- Des bétons de haute qualité.
- Des bétons avec de long maintien de rhéologie, même par temps chaud.
- Des bétons plastique ou fluide.

Utilisé à maniabilité constante, le **SOLUFLOW® 3085** permet de réaliser des réductions d'eau très importantes avec des résistances mécaniques finales très élevées.

Propriétés

Le **SOLUFLOW® 3085** améliore les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci.

- Il augmente l'ouvrabilité.
- Il augmente les performances mécaniques des bétons.
- longue rhéologie (>1h),

Il procure au béton :

- Une augmentation de l'imperméabilité
- Une augmentation de la compacité.
- Une augmentation des résistances mécaniques.
- Une augmentation de la fluidité du béton.
- Une augmentation de la densité.
- Une augmentation de la durabilité.

Le **SOLUFLOW® 3085** est compatible avec tous les ciments.

Caractéristiques

- Aspect liquide
- Couleur brun foncé

Données techniques

- Densité 1,140 g/cm³ ± 0,01
- pH 5.5 ± 1.5
- Extrait sec 34 ± 1.5%
- Teneur en ion Cl⁻ < 0.1 %
- Teneur en Na₂O éq. < 1%

Conditionnement

- Bidon de 5 kg
- Bidon de 10 kg
- Fût de 230 kg
- Cubitainers de 1150 kg

Stockage

Le **SOLUFLOW® 3085** se conserve dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Conservation

Dans son emballage d'origine, le produit se conserve 12 mois.

Consommation

Le dosage du **SOLUFLOW® 3085** est en fonction des effets recherchés.

Plage d'utilisation recommandée

0,3 à 2.8 % du poids du ciment.

Mise en œuvre

Le **SOLUFLOW® 3085** est ajouté dans l'eau de gâchage ou dans le malaxeur au moment de la confection du béton.

Dans le cas d'un ajout différé sur le béton frais et dans un camion malaxeur, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse pendant 1 minute par m³ de béton (avec un minimum total de 6 minutes).

Remarques

En cas de gel, le produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

Précautions d'emploi

Manipulation non dangereuse.
En cas de contact avec la peau, un simple lavage suffit. Consulter la fiche de données de sécurité.

Mawads Building Solutions

Adresse : Zone Industrielle Oued S'Mar N° 37 / 154 - Algiers, 16000 - Algeria
Mobile : +213 (0) 560 016 829 - www.mbsolutions-dz.com - E-mail : info@mbsolutions-dz.com

Les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils et ne constituent pas une garantie de performance. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Toutes nos fiches techniques sont mises à jour régulièrement, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

Résumé

Ce travail présente les résultats d'un programme à caractère expérimental dans lequel les méthodes des plans d'expériences et des surfaces de réponse sont utilisées pour répondre à une problématique du secteur socio – économique sur la résistance des bétons à jeune âge et la possibilité de diminuer le dosage de la classe granulaire 16/25 qui est souvent responsable de blocage dans les conduites d'une pompe.

Un plan factoriel complet a été donc utilisé pour modéliser l'influence de trois paramètres clés liés à la cohésion du mélange et à sa résistance. Les paramètres considérés dans cette étude sont : la teneur des fillers calcaires, le rapport G/S ainsi que le dosage en graviers 16/25.

Les propriétés du béton ont été déterminées par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams pour l'ouvrabilité et par des essais destructifs et non destructifs pour estimer les résistances à 3 jours et 28 jours ainsi que le module de Young.

Les résultats ont montré qu'il est possible de réduire légèrement le dosage des graviers 16/25 sans pour autant nuire à la résistance mécanique.

D'un autre côté, un ajout d'une petite quantité de fillers calcaires (environ 10% de la masse du ciment) permet d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BPE.

Par ailleurs, des modèles pour prédire l'affaissement et la résistance ont été développés dans ce travail. Ils offrent des informations concernant l'optimisation d'un BPE.

Mots clés : BPE, plans d'expériences, formulation, jeune âge, ouvrabilité, résistance mécanique, fillers calcaires.

ملخص

يقدم هذا العمل النتائج المحصل عليها من طرف البرنامج التجريبي الذي تستخدم فيه التصاميم التجريبية وأسطح الاجابات لحل الاشكالية المطروحة من طرف القطاع الاجتماعي والاقتصادي التي تتعلق بمقاومة الخرسانة في السن المبكر وامكانية التقليل من تركيز المجاميع اي كمية الحصى 16/25 التي غالب ما تكون سبب في انسداد انابيب المضخة.

يستخدم تصميم المضروب الكامل لنمذجة تأثير العوامل الرئيسية الثلاث المتعلقة بتماسك الخليط بالمقاومة، العوامل المذكورة سابقا هي: محتوى من الحشوة الجيرية، نسبة الرمل/ المجاميع، كمية الحصى 16/25.

خصائص الخرسانة تم اختبارها عبر اختبار هبوط الخرسانة بواسطة مخروط "Abrams" لمعرفة خاصية امتداد وتوسع الخليط. وعبر الاختبارات المدمرة وغير مدمرة لتقدير مقاومة الخرسانة التي سنها 3 ايام و28 يوم وايضا تقدير معامل "Young".

أظهرت النتائج المحصل عليها انه من الممكن تقليل كمية الحصى 16/25 دون التأثير على المقاومة الميكانيكية. من ناحية أخرى، اضافة كمية قليلة من حشو الحجر الجيري (حوالي 10 % من كتلة الاسمنت) تساعد على تحسين الخصائص الانسيابية والميكانيكية للخرسانة الجاهزة.

في هذا العمل، تم تطوير النماذج التي تسمح بتنبؤ قيم هبوط الخرسانة وقيم المقاومة، هذه النماذج تزود بالمعلومات المتعلقة بتحسين الخرسانة الجاهزة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الجاهزة، التصاميم التجريبية، التركيب، السن المبكر، قابلية التشغيل، المقاومة الميكانيكية، الحشوات الكلسية.

Summary

This work represents the results of an experimental character program within which the methods of the experimental designs and the response surfaces are used to answer an issue of the socio-economic sector on the resistance of the prime concrete and the possibility of reducing the dosage of the 16/25 granular class which is often responsible for the blockage in the pipes of a pump.

A complete factorial design was therefore used to model the influence of three key parameters related to the cohesion of the mixture and its resistance. The parameters considered in this study are: the calcareous fillers content, the G/S ratio and the 16/25 gravel dosage.

The properties of the concrete were determined by the Abrams cone collapse test for workability and by destructive and non-destructive tests to estimate the 3-day and 28-day strength as well as the Young's modulus.

The results have shown that it is possible to slightly reduce the 16/25 gravel dosage without compromising the mechanical strength.

On the other hand, adding a small amount of limestone fillers (about 10% of the cement mass) improves the rheological and mechanical characteristics of the BPE.

In addition, models to predict subsidence and resistance have been developed in this work; they offer information about optimizing a BPE.

Key Words: BPE, experimental designs, formulation, young age, workability, mechanical resistance, calcareous fillers.