

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

SPECIALITE : GENIE CIVIL

OPTION : INGENIERIE DES STRUCTURES

Thème:

**MODÉLISATION DES BETONS ORDINAIRES
PAR DES PLANS D'EXPERIENCES**

Présenté par :

AYAD MOHAMED

BARKA YASSINE

Soutenu le 24 Juin 2013 devant le jury composé de

Pr. Ghomari Fouad	Univ.Tlemcen	Président
Mr. Baghli Abdellatif	Univ.Tlemcen	Examineur
Dr. Bezzar Abdelillah	Univ.Tlemcen	Examineur
Dr. Boukli Hacene Sidi Mohammed El Amine	Univ.Tlemcen	Encadreur
Mr. Taleb Omar	Univ.Tlemcen	Encadreur

Dédicaces

Avec l'aide du tout Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

A mon très cher père,

Je voudrais partager ce succès avec lui, Que dieu le protège et le garde.

A ma très chère maman,

*Que dieu la protège pour moi, je ne pourrai jamais la remercier assez
Pour ce qu'elle fait pour moi.*

A mes frangins,

Qui sont très présents pour me soutenir

A mes chers amis et amis

Yassine

Dédicaces

Avec l'aide du tout Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

*A mes chers parents sur qui j'ai pu compter et me ressourcer
d'affection et de bénédictions durant toute ma vie ;*

*A mes frangines ,
qui m'ont beaucoup aider, soutenue et encouragée.*

A mes chers amies et amis :

A toutes les personnes que j'aime.

Mohamed

RÉSUMÉ

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.

Notre travail a pour but de déterminer à l'aide de la méthode des plans d'expériences, un ensemble de modèles prédictifs en fonction de la proportion des constituants des bétons formulés à base de matériaux locaux.

Un plan factoriel a été donc utilisé pour modéliser, l'influence de cinq paramètres clés liés à la cohésion du mélange et à sa résistance. Les paramètres considérés dans cette étude sont : les teneurs en ciment, en eau, en sable, en gravier ainsi que le volume des vides.

Notre étude comporte deux phases essentielles :

Une première phase dont l'objectif est la détermination des principales caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés, le choix de la méthode de formulation et la réalisation des différentes gâchées dans le domaine de notre étude.

La deuxième phase dont l'objectif est l'établissement des modèles mathématiques qui permettent de prédire la maniabilité du béton ainsi que sa résistance à 28 jours tout en mettant en évidence les corrélations et les interactions qui existent entre les différents constituants grâce au logiciel MINITAB (Ver. 16).

Mots Clés : béton ordinaire, formulation, modélisation, plans d'expériences

ABSTRACT

The study of performance of the concrete in a fresh and hardened state requires a particular knowledge of the influence of the various elements which constitute it.

The purpose of our work is to determine using the method of the experimental designs, a whole of predictive models according to the proportion of the components of the concretes formulated containing local materials.

A factorial design was thus used to model, the influence of five key parameters dependent on the cohesion of the mixture and its resistance. The parameters considered in this study are: contents of cement, water, sand, gravel as well as the volume of the vacuums.

Our study comprises two essential phases:

In the first time, the objective is to determine the principal physical and mechanical characteristics of materials used the choice of the method of formulation and the realization of the various batches in the field of our study.

In the second time, the objective is to establish the mathematical models which make it possible to predict the handiness of the concrete like its resistance to 28 days while highlighting the correlations and the interactions which exist between the various components thanks to software MINITAB (Worm. 16) <

Key Words: ordinary concrete, formulation, modeling, experimental designs

ملخص

سلوك الخرسانة في حالة الطازجة والمتصلدة يتطلب معرفة خاصة من تأثير العناصر المختلفة التي تشكل عليه تحدد باستخدام طريقة من التجارب، ومجموعة من النماذج التنبؤية على أساس نسبة من مكونات الخرسانة المصنوعة من المواد المحلية، ويهدف عملنا
ثم كان هناك تصميم مضروب المستخدمة لنمذجة تأثير خمسة معايير رئيسية تتعلق تماسك الخليط ومقاومته محتويات الأسمنت والماء والرمل والحصى، وحجم الفراغ: المعلمات تعتبر في هذه الدراسة هي دراستنا لديه مرحلتين رئيسيتين

المرحلة الأولى بهدف تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الرئيسية من المواد المستخدمة، واختيار طريقة صياغة وتنفيذ مختلف الضائع في مجال دراستنا

المرحلة الثانية هدفها هو إنشاء النماذج الرياضية التي تتنبأ قابلية من الخرسانة ومقاومته إلى 28 يوماً مع تسليط < (النسخة 16) MINITAB الضوء على العلاقات المتبادلة والتفاعلات بين المكونات المختلفة من خلال برامج

كلمات البحث:

صياغة ملموسة عادي، والنمذجة، تصميم التجارب

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené au sein du laboratoire de structures du département de génie civil, de la faculté de technologie de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.

Nous tenons dans un premier temps à adresser nos remerciements les plus vifs à nos encadreurs Monsieur Boukli Hacène Sidi Mohammed El Amine Maître de Conférences Classe A et Monsieur Taleb Omar Maître Assistant, Enseignants au département de Génie Civil de l'université de Tlemcen pour leur soutien, leur disponibilité et leurs précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier également Professeur Ghomari Fouad de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant la présidence du jury de ce mémoire de fin d'études.

Nous remercions aussi Monsieur Baghli Abdellatif et Docteur Bezzar Abdelillah, pour leurs conseils précieux et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de participer au jury de ce mémoire de fin d'études.

Nous adressons nos remerciements et notre sympathie à nos chères enseignants de l'université de Tlemcen pour toutes les connaissances acquises au cours de notre formation.

Notre gratitude la plus profonde à tous nos amis de la promotion ainsi qu'à tous le personnel du laboratoire de Structures du département de Génie Civil de l'université de Tlemcen.

Un grand merci à nos deux chères familles.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	5
REMERCIEMENTS	7
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	15
INTRODUCTION GENERALE	17
CHAPITRE I	19
ETAT DE L'ART	19
SUR LE MATERIAU BETON	19
I.1 Introduction	20
I.2 Historicité du béton	20
I.3 Les composants d'un béton	21
I.3.1 Pâte de ciment.....	22
I.3.2 Granulats.....	24
I.4 Malaxage des constituants	24
I.5 Propriétés essentielles d'un béton	26
I.5.1 A l'état frais	26
I.5.2 A l'état durci	27
I.6 Essais réalisés sur les bétons	27
I.6.1 A l'état frais	27
I.6.2 A l'état durci	29
I.7 Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton	32
I.7.1 Influence du rapport eau/ciment (E/C)	32
I.7.2 Influence du dosage en ciment	34
I.7.3 Influence du type de ciment.....	36
I.7.4 Influence du squelette granulaire.....	37
I.7.5 Influence du rapport granulat /ciment (G/C)	37
I.7.6 Dimension maximale des granulats D_{max}	39
I.7.7 Influence du squelette granulaire sur l'affaissement	40
I.7.8 Influence de l'air occlus sur l'affaissement et la résistance	41

I.8 METHODES DE FORMULATION DES BETONS	42
I.8.1 Introduction	42
I.8.2 Méthodes de formulation.....	42
I.9 Conclusion	47
LES PLANS D'EXPERIENCES	48
II.1 Principe	49
II.2 Démarche méthodologique	50
II.2.1 Choix de la méthode d'expérimentation	51
II.2.2 Analyse des résultats	51
II.3 Conditions d'application des plans d'expériences	51
II.4 Vocabulaire de base des plans d'expériences	52
II.5 Les types de plans d'expériences	60
II.5.1 Plans factoriels complets.....	60
II.5.2 Plans fractionnaires	63
II.5.3 Plans de mélange	64
II.5.4 Les plans hybrides	64
II.6 Modélisation par la méthode des plans d'expériences	65
II.6.1 Principes généraux	65
II.6.2 Signification des effets de facteurs :	66
II.6.3 Notions de statistique appliquées aux plans d'expériences.....	66
II.6.4 Validation du modèle :	69
II.7 Application des plans d'expériences sur le matériau béton	70
II.7.1 sur les bétons ordinaires : (Kaoua, 2008).....	70
II.7.2 Sur les bétons autoplaçants :(Taleb et col, 2012).....	72
II.7.3 Sur l'optimisation des procédures de bétonnage par temps chaud : (Bella et Col., 2011)	75
III.1 Introduction	79
III.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment	79
III.2.1 Composition chimique et minéralogique	79
III.2.1 Caractéristiques Physico mécaniques :	79
III.2.2 Interprétation des résultats	81
III.2.3 Agrégats (sable et graviers)	81
III.2.4 Masses volumiques apparentes et absolues	83
III.2.5 Foisonnement du sable.....	84

III.3 Caractérisation des bétons étudiés.....	86
III.3.1 caractérisation du béton à l'état frais	86
III.3.2 Confection des éprouvettes	87
III.3.3 Caractérisation du béton à l'état durci	88
III.4 Conclusion	89
IV.1 Mise en application des plans d'expériences :.....	91
IV.2.1 Facteurs :.....	91
IV.2.2 Niveaux des facteurs :.....	91
IV.2.3 Choix du plan d'expérience pour notre étude :.....	91
IV.2.4 Interactions	93
IV.1 Formulations des bétons étudiés.....	95
IV.3 L'air occlus	96
IV.3.1 Introduction.....	96
IV.3.2 Résultats des essais: (Volume de l'air occlus).....	96
IV.3.3 Analyse des résultats.....	97
IV.4 Affaissement	104
IV.4.1 Introduction.....	104
IV.4.2 Résultats des essais: (Affaissement).....	105
IV.4.3 Analyse des résultats.....	106
IV.5 Résistance mécanique en compression.....	115
IV.5.1 Introduction.....	115
IV.5.2 Résultats des essais: (Résistance)	116
IV.5.3 Analyse des résultats.....	117
IV.5 Conclusion	124
CONCLUSION GÉNÉRALE	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	127
ANNEXES.....	130

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I. 1: pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [Deghifel Moussa, 2010].....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I. 2: pâte de ciment.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I. 3: L'influence des superplastifiants [Dreux G., Fiesta J., 1998].....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I. 4: cycle de malaxage [Ngoc-dong, 2007].....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I. 5: accroissement de la densité du béton au cours de malaxage [Cazacliu et col, 2006].....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I. 6: Essai d'affaissement.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I. 7: aéromètre à béton de 5 litres de capacité.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure I. 8: machine d'essai de compression centrée.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure I. 9: traction directe.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure I. 10: traction par fendage</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 11: traction par flexion.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 12: Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport eau/ciment [S.M.A Boukli Hacene, 2010].....</i>	<i>32</i>
<i>Figure I. 13: Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E [Neville, 2000].....</i>	<i>33</i>

Figure I. 14: Relation entre la résistance calculée d'une pate pure de ciment et le rapport C/E [Nielsen, 1993].....33

Figure I. 15: la relation entre C/E et la résistance à la compression (f_c) d'après la formule de Bolomey [G. Dreux et J. Festa, 1998]34

Figure I. 16: Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression a court terme du béton [Baron et Ollivier, 1996]35

Figure I. 17: influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [Baron et Ollivier, 1996].....36

Figure I. 18: Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [G. Dreux et J. Festa, 1998].....37

Figure I. 19: influence du rapport G/C sur la résistance du béton [Neville, 2000].....38

Figure I. 20: la relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10x30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5 [Stock et Col, 1979].....38

Figure I. 21: influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment [Neville, 2000]..... 40

Figure I. 22: Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement [S.M.A. Boukli Hacene, 2010]..... 41

Figure I. 23: Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus [S.M.A. Boukli Hacene, 2010]..... 41

Figure I. 24: courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse43

Figure II. 1: Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. Boukli Hacene, 2010] 50

Figure II. 2: transformation des coordonnées réelles en coordonnées centrées réduites54

Figure II. 3: Domaine expérimental [M. Pillet, 1992]..... 55

Figure II. 4: Effet d'un facteur56

Figure II. 5: L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse. 60

Figure II. 6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental..... 61

Figure II. 7: Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut..... 61

Figure II. 8: triangle de Féret, 1892 [Baron et Olivier, 1996]..... 64

Figure II. 9: Courbe iso valeur du rapport E/C. Pour (G/S = 1.6) (Vréel)..... 71

Figure II. 10: Courbe iso valeur du rapport E/C..... 71

Figure II. 11: Surface de réponse de l'étalement en fonction de l'eau et des superplastifiants..... 73

Figure II. 12: Surface de réponse de l'étalement en fonction du ciment et des filler 73

Figure II. 13: Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=50 \text{ kg/m}^3$)..... 74

Figure II. 14: Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=150 \text{ kg/m}^3$)..... 74

Figure II. 15:Evaporation.....76

Figure II. 16: Retrait plastique.....76

Figure II. 17: Retrait total.....76

Figure II. 18: Résistance à la compression à 3J.....77

Figure II. 19: Résistance à la compression à 14J.....77

Figure III. 1: Courbes granulométriques des granulats (ENG).....82

Figure III. 2: Courbe de foisonnement de sable (carrière ENG). 84

Figure III. 3: Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Affaissement égal à 4,8 cm)..... 86

Figure III. 4: Aéromètre à béton..... 86

Figure III. 5: Conservation des éprouvettes.....87

Figure III. 6: Appareil de surfacage des éprouvettes.....88

Figure III. 7: Machine d'essai de compression..... 89

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I. 1: classe de consistance (Slump test) [R. Dupain- R. Lanchon-JC. Saint Arroman, 2000].</i>	28
<i>Tableau I. 2: classe de consistance vébé. De V_0 à V_4. De ferme à fluide [Cimbéton, 2006].</i>	28
<i>Tableau I. 3: dosage en ciment [BAEL 91]</i>	35
<i>Tableau II. 1: deux facteurs à deux niveaux</i>	53
<i>Tableau II. 2: Calcul des coefficients dans le cas d'une matrice Hadamard</i>	59
<i>Tableau II. 3: La matrice d'expériences.</i>	62
<i>Tableau II. 4: Nombre d'écart-types à prendre en compte pour déterminer la probabilité que la moyenne soit dans l'intervalle de confiance.</i>	69
<i>Tableau II. 5 : niveaux des facteurs</i>	70
<i>Tableau II. 6: niveaux des facteurs</i>	72
<i>Tableau II. 7: niveaux des facteurs</i>	75
<i>Tableau III. 1: Analyse chimique du ciment</i>	79
<i>Tableau III. 2: Composition minéralogique du clinker selon Bogue.</i>	79
<i>Tableau III. 3: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment</i>	80

Tableau III. 4: Identification des propriétés des granulats de l'ENG.....85

Tableau IV. 1: niveaux des facteurs..... 91

Tableau IV. 2:Matrice des effets.....92

Tableau IV. 3: Matrice général des effets et leur interaction.....93

Tableau IV. 4: Formulations des bétons constituées.....95

Tableau IV. 5: Résultats des essais(VAO)..... 96

Tableau IV. 6: Résultats des essais(VAO) au point central..... 101

Tableau IV. 7: Résultats des essais: (Affaissement).....105

Tableau IV. 8: Résultats des essais (aff) au point central.....109

Tableau IV. 9: Résultats des essais: (Résistance)..... 116

Tableau IV. 10: Résultats des essais(R_{C28}) au point central.....120

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours le béton est devenu le matériau le plus utilisé au monde dans le domaine du génie civil. A ce jour, On estime que 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments administratifs, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore. Ce matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Cependant, et vue son indispensabilité dans le domaine de la construction, le matériau béton a été et reste toujours sujet à de multiples travaux d'étude et de recherche. Même si l'avancée est jugée considérable, les études d'adaptation et de formulation s'avèrent nécessaires en chaque région du globe.

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons.

L'objectif de ce présent travail est de voir l'influence des différents constituants d'un béton ordinaire sur son comportement et de mettre à la disposition des utilisateurs des bétons de la région de Tlemcen un ensemble de modèles mathématiques simples à caractère prédictif des propriétés essentielles du béton à savoir l'ouvrabilité, la quantité d'air occlus et la résistance mécanique.

En vue d'étudier l'influence des différents paramètres du mélange, l'approche classique consiste souvent à varier un seul paramètre du mélange et mesurer son effet sur le comportement du béton en maintenant tous les autres paramètres constants. Cette approche semble un peu longue et produit des informations limitées vu que les interactions entre les paramètres du mélange ne peuvent pas être évaluées. Pour y remédier, nous utilisons un modèle expérimental en se basant sur des plans d'expériences pour évaluer l'influence des divers paramètres du mélange et leurs interactions sur les caractéristiques des bétons ordinaires.

Le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé à partir des travaux de thèse du Docteur Boukli Hacene [Boukli Hacene S.M.A., 2010]. Une série de formulations a été effectuée dans le but d'estimer le volume d'air occlus, l'affaissement et la résistance mécanique à la compression dans le béton à l'état frais et durci.

Afin de mieux comprendre l'utilité de ces modèles, nous avons essayé de les présenter graphiquement pour identifier les tendances majeures et prédire la meilleure direction pour les futures études.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Après une introduction générale, le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le matériau béton, il présente aussi les détails relatifs sur les constituants du béton et les méthodes de formulation. Le deuxième chapitre traite la démarche méthodologique des plans d'expériences et regroupe les différentes notions de statistique appliquées à cette méthode. La caractérisation des différents matériaux utilisés est présentée dans le troisième chapitre. Dans le dernier chapitre, nous présentons l'étude expérimentale visant à déterminer les relations existantes entre les différents paramètres caractérisant le comportement des bétons, en utilisant la méthode de recherche que nous avons adoptée et qui a été présentée, ce chapitre est consacré également à une analyse des résultats obtenus. Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôture ce mémoire de fin d'études.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LE MATERIAU BETON

I.1 Introduction

Le béton est un mélange de plusieurs composants très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes [Georges Dreux, Jean Festa, 1998]. Ce matériau présente des caractéristiques qui sont fonction de celles de ces composants.

Le béton ordinaire est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le liant peut être «hydraulique», car il fait prise par hydratation, il est appelé ciment, on obtient dans ce cas un béton de ciment, ou béton tout court. Le liant peut être aussi un hydrocarboné appelé aussi bitume, ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

Le béton classique est constitué d'éléments de granulométrie différente. Le spectre granulométrique se poursuit également avec la poudre de ciment et parfois avec un matériau de granulométrie encore plus fine comme la fumée de silice. La continuité du spectre granulométrique peut être étendue vers les faibles granulométries de manière à améliorer la compacité, donc les performances mécaniques du béton [Béton – Définition, 2008].

L'eau joue un double rôle : hydratation de la poudre de ciment et amélioration de l'ouvrabilité. En l'absence d'adjuvant de type super plastifiant, la quantité d'eau est déterminée par les conditions de mise en œuvre. Un béton contient donc une part importante d'eau libre, ce qui tend à favoriser une forte porosité et donc une faible résistance du béton durci. En ajoutant un super plastifiant, appelé aussi haut réducteur d'eau, la quantité d'eau utilisée décroît et les performances mécaniques du matériau sont améliorées, c'est le cas des bétons à hautes performances (BHP).

I.2 Historicité du béton

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [Cimbéton, 2006].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci.

Au 20^{ème} siècle, le béton se développa considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre.

Dans les années quatre -vingt et quatre-vingt-dix du siècle dernier, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau par l'emploi de défloculants, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et à une excellente durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons fermes à plus pour les bétons autoplacants, qui sont caractérisés d'ailleurs par des étalements. De même, les résistances en compression à 28 jours peuvent varier de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa.

I.3 Les composants d'un béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et le plus souvent, adjuvants (figure I.1) qui constituent un ensemble plus ou moins homogène. Les composants sont très différents : les masses volumiques dans les bétons courants varient de 1 t/m³ (pour l'eau) à 3 t/m³ (pour ciment); les dimensions de leurs grains varient de 0.5 µm (grains du ciment) à 25 mm (gravillons).

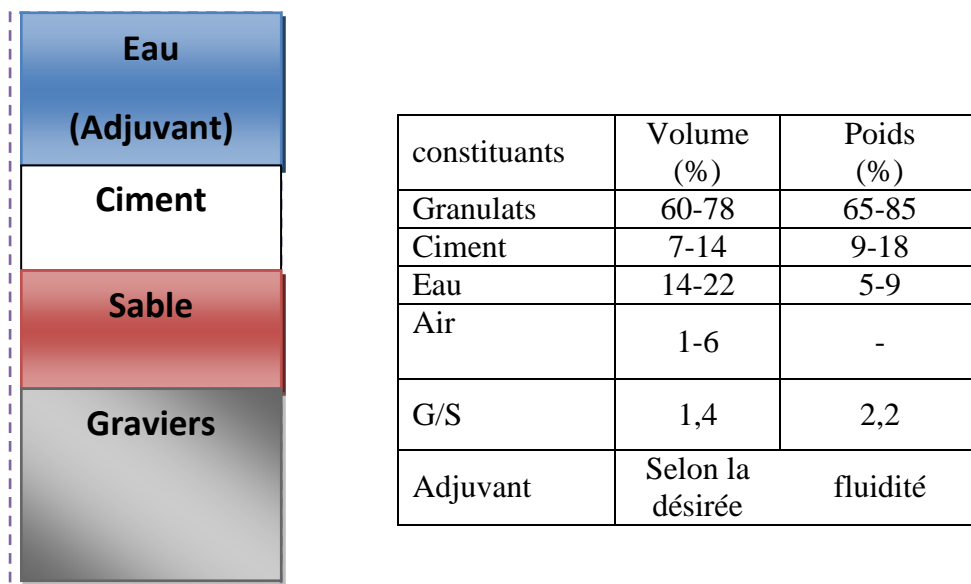


Figure I. 1: pourcentage des constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [Deghfel Moussa, 2010]

I.3.1 Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble (ciment + eau + air + additions+ adjuvants). La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité [Nguyen T.L.H, 2007]. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension des particules suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau.

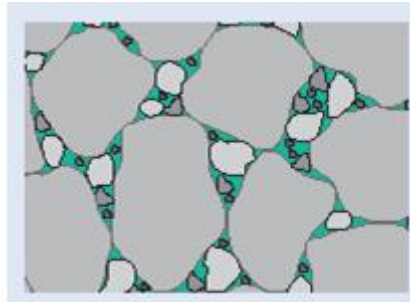


Figure I. 2: pâte de ciment

I.3 .1.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

I.3.1.2 Eau

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau est constituée de molécules polaires de H₂O dont la taille est approximativement égale à 1 angström. Ces particules exercent les unes sur les autres des forces d'attraction de type Van der Waals qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques. L'eau étant un milieu diélectrique qui modifie les forces inter

granulaires. Son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (tels que les ciments et les fines).

I.3.1.3 Additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [Nguyen, 2007]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [El Barrak, 2005]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [Lapointe, 1997].

I.3.1.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés aux bétons à des petites doses permettent d'améliorer certaines de ses propriétés [Dupain, Lanchon, Saint-Arroman, 2000]. Ils permettent de réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants et les plastifiants.

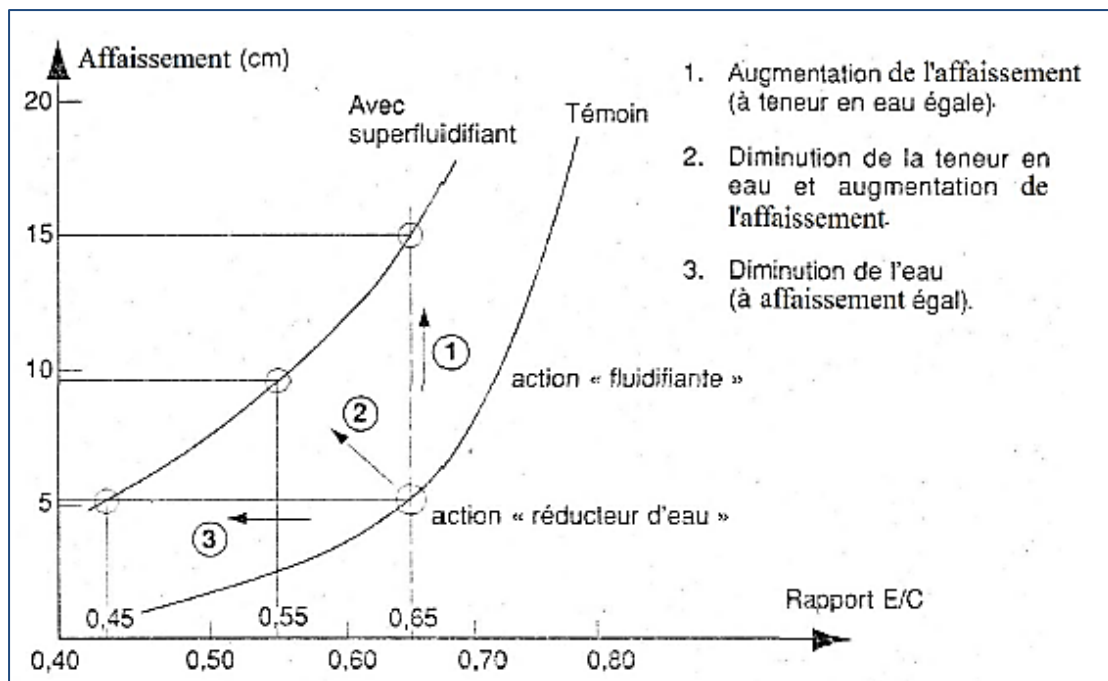


Figure I. 3: L'influence des superplastifiants [Dreux G., Fiesta J., 1998]

I.3.2 Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble des grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturel ou artificiel [NF P 15-010].

La dimension de ces granulats varie d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable avec $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$
- Gravillon avec $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$
- Gravier avec $D > 6,3 \text{ mm}$.

Ils proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [Adam M. Neville, 1992]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci.

I.4 Malaxage des constituants

Les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Ceci se fait soit avec un malaxeur à béton à train valseur qui consiste en un brassage forcé des divers constituants du béton, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par gravité en soulevant un volume de matériau et en le laissant par la suite tomber dans la masse.

Lors d'un essai en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux ayant des propriétés quasiconstantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur. Selon Neville [Nguyen, 2007], ces paramètres influent de manière significative sur la teneur en air du mélange. Suivant la norme NF P 18-305, un temps de malaxage minimal de 35 et 55 secondes est respectivement exigé pour les bétons ne comportant pas d'adjuvant ou d'additions.

La durée totale du cycle de malaxage (figure I.4) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

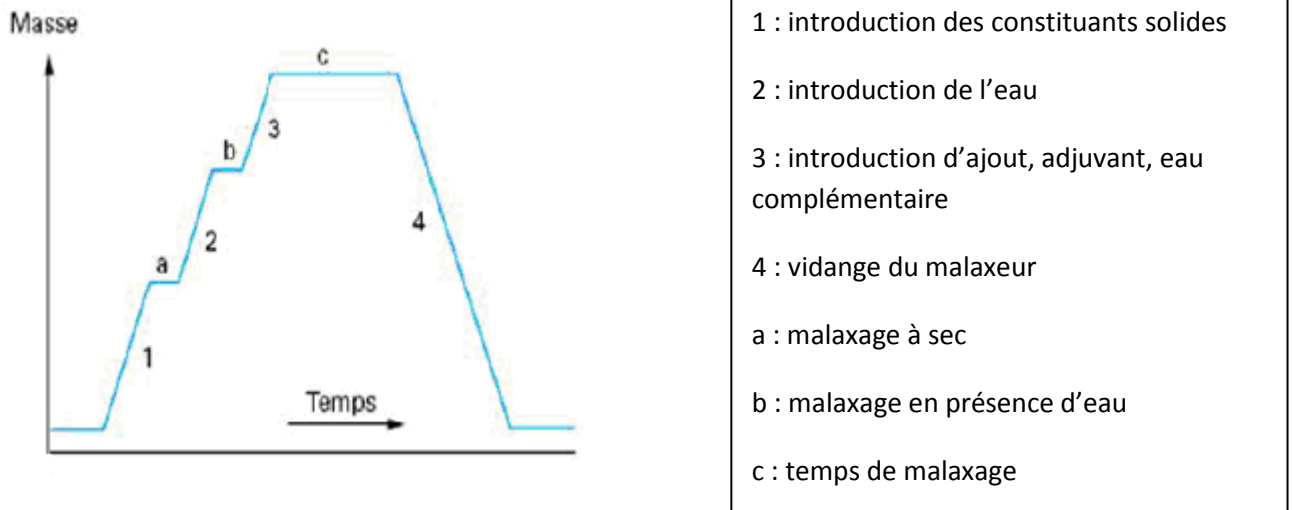


Figure I. 4: cycle de malaxage [Ngoc-dong, 2007]

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

Le temps est un paramètre très important pour l'homogénéisation du béton lors de son malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours de malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air [Cazacliu et col, 2006]. Ceci augmente donc la masse volumique « densité » et la compacité du béton (figure I.5).

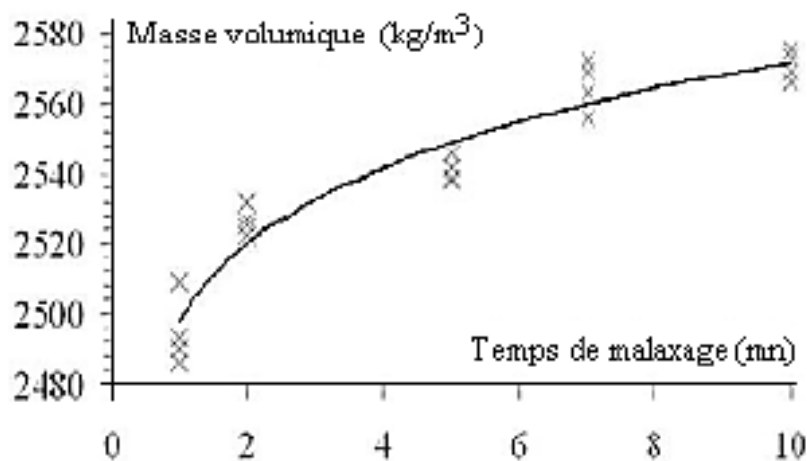


Figure I. 5: accroissement de la densité du béton au cours de malaxage [Cazacliu et col, 2006]

I.5 Propriétés essentielles d'un béton

Les propriétés essentielles pour le béton sont définies comme étant la qualité qui permet de garantir la facilité de sa mise en œuvre; qualité sur laquelle repose différents aspects du béton une fois durci (résistance, enrobage des armatures,...). Sachant que la tendance actuelle est tournée vers une multitude de techniques de bétonnage et de serrage (béton pompé, béton projeté, béton autocompactant, autonivelant,...), il est donc nécessaire de prendre en considération ce paramètre dans les études de formulation du béton.

Pour répondre aux conditions des cahiers de charge des ouvrages, il est nécessaire de bien caractériser les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci.

I.5.1 A l'état frais

Le béton à l'état frais est caractérisé par son ouvrabilité qui est régie par les paramètres rhéologiques qui sont le seuil de cisaillement et la viscosité.

L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. [Dreux, Festa (1998)] ont défini l'ouvrabilité du béton comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage du ferrailage. Faury (1958) souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons. Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction.

[De Larrard, Sitzkar, Hu (1993)] ont développé un rhéomètre à béton, pour l'analyse des paramètres rhéologiques. Il s'agit d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon De Larrard, le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. [Hu, 1995] a montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens.

Le béton à l'état frais est considéré comme un fluide Binghamien qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \dots \dots \dots (I.1)$$

τ : contrainte de cisaillement (Pa)

τ_0 : seuil de cisaillement (Pa)

μ : viscosité plastique (Pa.s⁻¹)

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1})

I.5.2 A l'état durci

Le béton frais va évoluer pour aboutir au béton durci. Il est incontournable de suivre l'évolution du béton sous différents aspects :

- Chimique, car il s'agit bien d'un ensemble de réactions.
- Physique, car le développement de la microstructure s'accompagne de phénomènes physiques qui définiront un état initial de la structure.
- Mécanique, car les aspects précédents conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence [Chanvillard, (1999)].

Le béton durci est un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment, il apparait donc en première analyse, que ses propriétés mécaniques dépendent :

- De celles de la pâte liante
- De celles des granulats
- L'interface pâte-granulats

I.6 Essais réalisés sur les bétons

I.6.1 A l'état frais

I.6.1.1 Essai d'affaissement [NF P 18-451]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre au laboratoire et au niveau des chantiers. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm.

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Selon la norme NF P 18 -451 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Figure I. 6: Essai d'affaissement

Tableau I. 1: classe de consistance (Slump test) [R. Dupain- R. Lanchon-JC. Saint Arroman, 2000].

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très plastique TP	10 à 15	3
Fluide FL	> 16	

I.6.1.2 Essai vété [NF EN 12350-3]

Cet essai est utilisé pour tester les bétons de faible ouvrabilité, il consiste en la mesure du temps nécessaire que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l'effet d'une vibration donnée [Cimbéton, 2006].

Tableau I. 2: classe de consistance vété. De V0 à V4. De ferme à fluide [Cimbéton, 2006]

Classe vété	V0	V1	V2	V3	V4
Temps à l'essai Vété	> 31 s	30s à 21s	20s à 11s	10s à 5s	< 5s

I.6.1.3 Volume d'air occlus [NF EN 12350-7]

La quantité d'air occlus dans le béton frais est mesurée à l'aide d'un aéromètre. L'air occlus est le volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après la mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange de granulats, de l'ouvrabilité du béton et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). La mise en œuvre du béton frais pour la mesure du volume d'air occlus à l'aide de l'aéromètre doit être effectuée conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-443, qui consiste à comprimer le mélange étudié et à mesurer la variation du volume résultant de l'application d'une pression déterminée.



Figure I. 7: aérateur à béton de 5 litres de capacité

I.6.2 A l'état durci

I.6.2.1 Essai de résistance à la compression

La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. Le béton est un matériau qui travaille bien en compression. La connaissance de ses propriétés mécanique est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance mécanique en compression du béton est mesurée par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm.

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs et les vibrations pendant un minimum de 16 heures et un maximum de 3 jours [NF EN 12390-2]. Après démoulage, les éprouvettes doivent généralement être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une hygrométrie relative $\geq 95\%$.

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [NF EN 12390-3/4]



Figure I. 8: machine d'essai de compression

I.6.2.2 Essai de résistance à la traction

La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 16x32 cm par l'essai de fendage conformément à la norme NF P 18-408. La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais :

- **Traction directe :**

C'est un essai très délicat à réaliser car il consiste en la mise en traction du cylindre en béton après collage des têtes de traction sur les deux faces. La difficulté rencontrée est le centrage de ces têtes. L'opération doit être réalisée sans efforts de flexion [G. Dreux et J. Festa, 1998].



Figure I. 9: traction directe

- **Traction par fendage : (essai brésilien) [NF EN 12390-6]**

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. Si « p » est la charge de compression maximale entraînant

l'éclatement du cylindre, « D » le diamètre nominal de l'éprouvette et « L » la longueur du cylindre, la résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$f_{tj} = 2 \times \frac{p}{\pi DL} \dots \dots \dots (I.2)$$

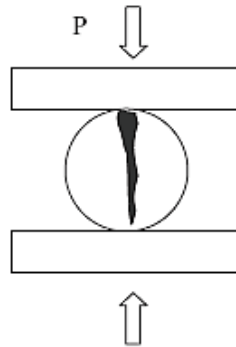


Figure I. 10: traction par fendage

· **Traction par flexion : [NF EN 12390-5]**

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de longueur « 4 a » et de côté « a » sous une flexion à quatre points et une charge totale « p ».

Le moment étant constant entre les deux points d'application de la charge :

La résistance à la traction est:

$$f_{tj} = \frac{Mv}{I} = \frac{6M}{a^3} \dots \dots \dots (I.3)$$

$$M = \frac{pa}{2}$$

$\frac{I}{v}$: module d'inertie = $\frac{a^3}{6}$. I : Moment d'inertie de la section.

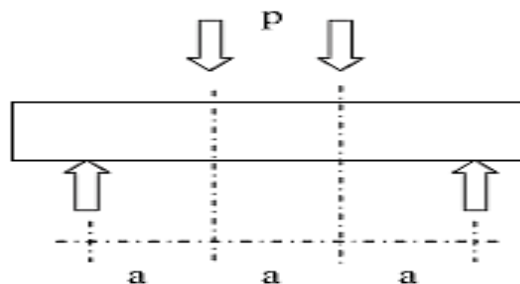


Figure I. 11: traction par flexion

I.7 Paramètres qui influent sur les caractéristiques du béton

I.7.1 Influence du rapport eau/ciment (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, M. Emborg, J. Carsward, 2003].

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. Le dosage du ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. On considère aussi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C. La formulation des bétons ordinaires doit impérativement passer par l'optimisation de ces paramètres.

Neville, (2000) a montré que la courbe qui représente la résistance en fonction du rapport E/C avait l'allure d'une hyperbole. Le même auteur a montré que cette relation ne dépendait ni du type des granulats utilisés ni de l'âge du béton. Ce résultat a aussi été trouvé par Boukli Hacene (2010) qui a montré aussi que cette relation dépend très peu du dosage en ciment (figure I.12).

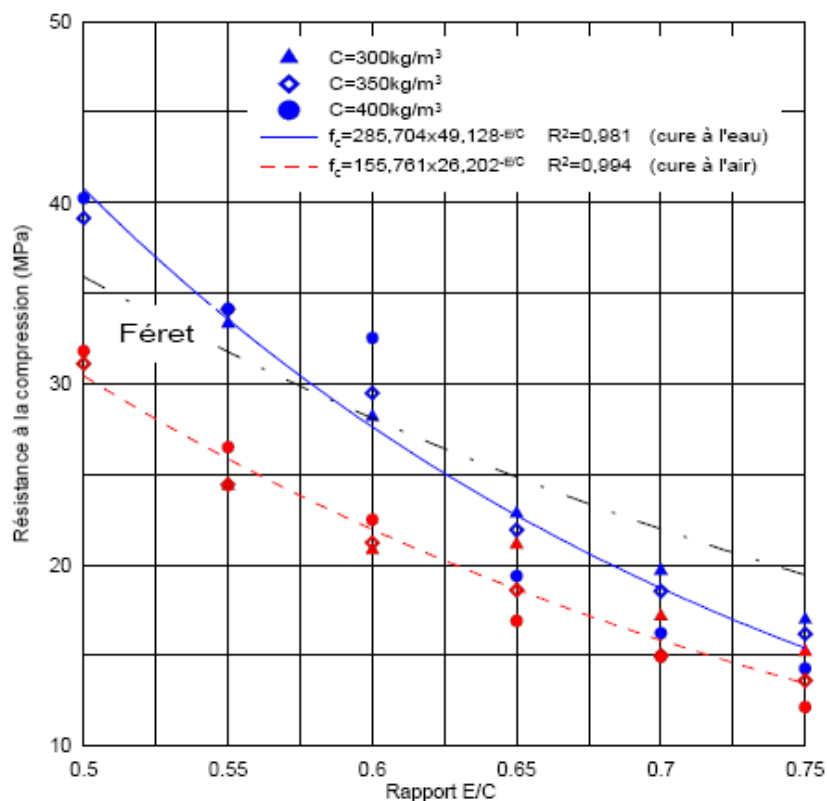


Figure I. 12: Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport eau/ciment [S.M.A Boukli Hacene, 2010]

Cependant d'autres auteurs ont montré que la relation était plutôt linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre 0.4 et 0.85 (figure I.13) [Alexander et Ivanusec, 1982 ; Kakizaki, 1992].

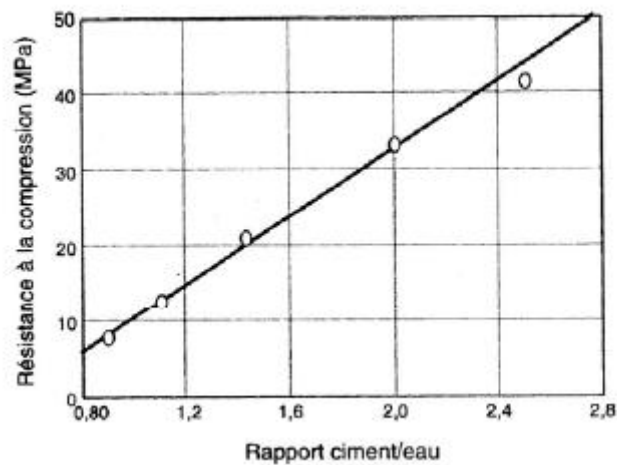


Figure I. 13: Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E [Neville, 2000]

Nielsen (1993) a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport (C/E) n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la (figure I.14), pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

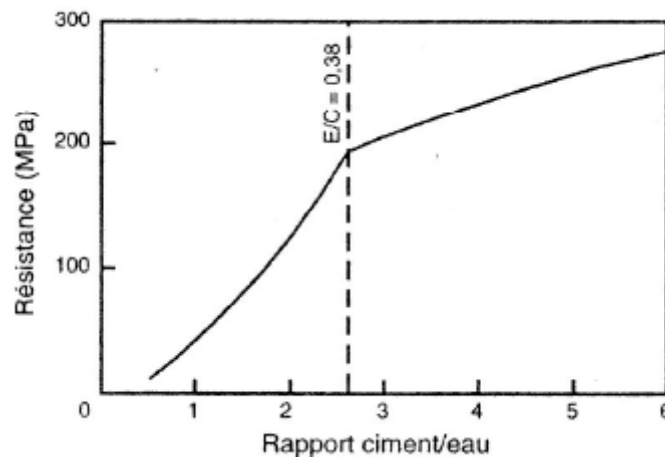


Figure I. 14: Relation entre la résistance calculée d'une pate pure de ciment et le rapport C/E [Nielsen, 1993]

La (figure I.15) montre que la relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E d'après la formule de Bolomey est linéaire et croissante surtout dans l'intervalle de C/E entre 1,5 et 2,5 c'est-à-dire entre 0,4 et 0,66 pour E/C.

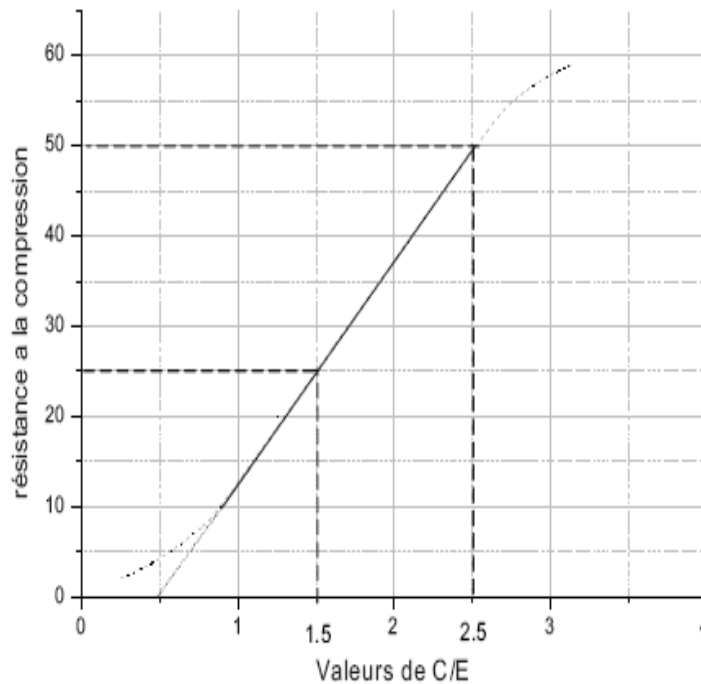


Figure I. 15: la relation entre C/E et la résistance à la compression (f_c) d'après la formule de Bolomey [G. Dreux et J. Festa, 1998]

$$f_c = G \times C_E (C / E - 0.5) \dots \dots \dots (I.4)$$

G : coefficient de granularité égale à 0.5.

C_E : classe vraie du ciment, égale à 50 MPa.

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [Ollivier et Buil, 1992].

I.7.2 Influence du dosage en ciment

Pour un dosage en eau constant, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C du béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme [Baron et Ollivier, 1996].

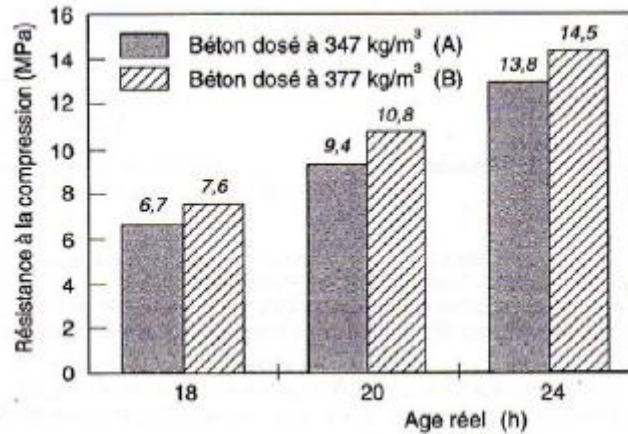


Figure I. 16: Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression au jeune âge du béton [Baron et Ollivier, 1996]

La (figure I.16) montre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [Baron et Ollivier, 1996].

Nombreux sont les textes réglementaires qui spécifient des dosages minimaux en ciment tel que :

- la norme P 18 011 sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivants [P18 011]:

- $C \geq \frac{550}{\sqrt{D}}$ pour des environnements à moyenne agressivité.
- $C \geq \frac{700}{\sqrt{D}}$ pour des environnements à forte et très forte agressivité.

D : Dimension maximale des granulats.

- Le BAEL 91 prescrit des dosages minimaux permettant d'obtenir des résistances caractéristiques dans les cas courants (CC) et les cas d'autocontrôle Surveillé (AS) [BAEL 91]:

Tableau I. 3: dosage en ciment [BAEL 91]

Classe du ciment	32,5N et 32,5R		42,5N et 42,5R	
	CC	AS	CC	AS
$D_{\max}=16$	300 kg/m ³			
20	350 kg/m ³	325 kg/m ³	325 kg/m ³	300 kg/m ³
25	à justifier	400 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³
30	non admis	à justifier	à justifier	à justifier

Baron et Ollivier (1996) ont montré que l'augmentation du dosage en ciment amène à réduire le rapport E/C pour obtenir le même affaissement. En effet, un béton dosé à 377 kg/m³ de ciment a nécessité une teneur en eau de 192 l (soit E/C = 0,5) pour obtenir un affaissement de 7 cm. Le même affaissement a été obtenu pour un béton dosé à 347 kg/m³ et un volume d'eau de 186l (E/C = 0,53). Cela s'explique par une plus grande quantité de liant qui disperse les granulats et améliore la fluidité.

I.7.3 Influence du type de ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. Plus la classe de résistance est élevée et plus la résistance à la compression est élevée, à toutes les échéances. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la (figure I.17). Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera à dosage identique dans le béton des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5N tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [Baron, Ollivier, (1996)].

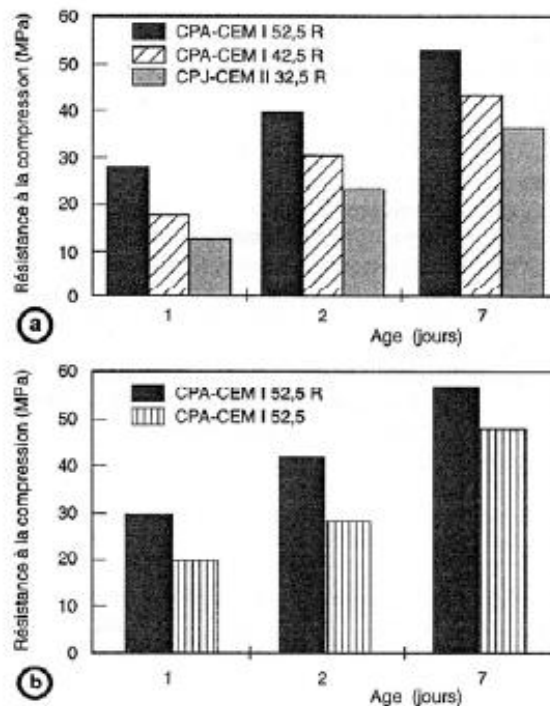


Figure I. 17: influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [Baron et Ollivier, 1996]

I.7.4 Influence du squelette granulaire

Moins influente que le dosage en ciment ou le dosage en eau, la composition granulométrique du mélange n'intervient que d'une manière relativement faible sur la plupart des propriétés du béton.

Sauf pour la résistance à la compression où nous pouvons voir (fig. I.18) que pour des valeurs de (G/S) supérieures à « 2.2 » la résistance à la compression augmente considérablement, une augmentation certainement positive mais prise sur le compte de l'ouvrabilité, parce qu'en pratique on ne dépasse pas les valeurs de 1.5 à 1.6 pour avoir un béton ouvrable [G. Dreux et J. Festa, 1998].

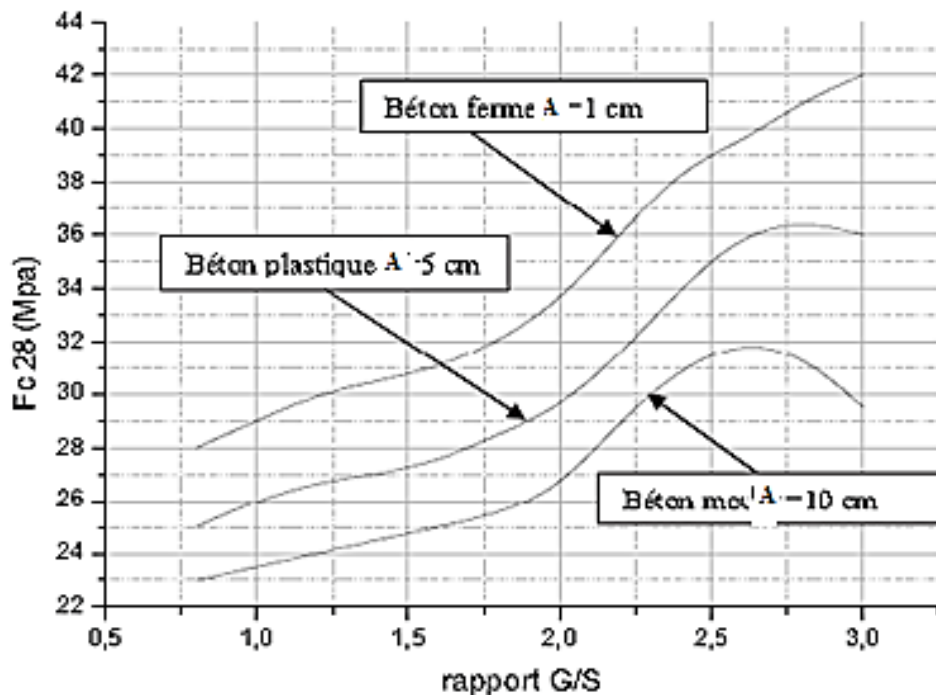


Figure I. 18: Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [G. Dreux et J. Festa, 1998].

I.7.5 Influence du rapport granulat /ciment (G/C)

Le rapport granulat /ciment (G/C) est un facteur de deuxième importance quand à la résistance, mais pour un rapport E/C constant. Erntroy et Shacklock(1954) Cités par Neville(2000) ont montré qu'un béton plus faiblement dosé en granulats était plus résistant (figure I .19).

Cependant un optimum de G/C a pu être distingué qui est de l'ordre de 3.

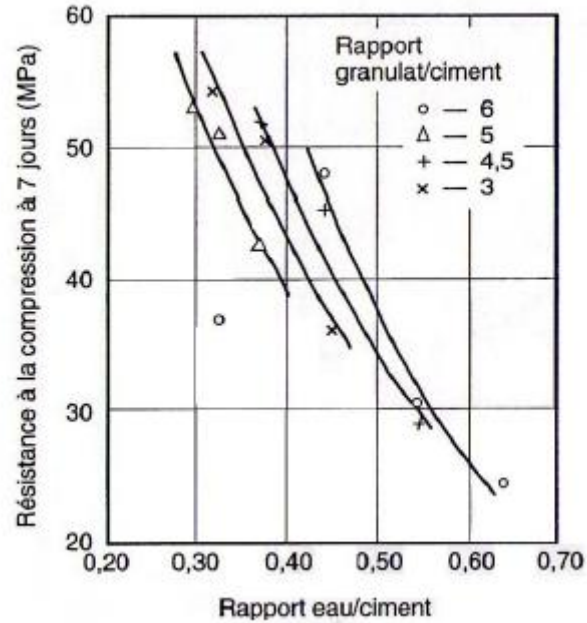


Figure I. 19: influence du rapport G/C sur la résistance du béton [Neville, 2000]

Autres études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20%, il y a une diminution de la résistance à la compression alors qu'entre 40 et 80% on remarque une augmentation de la résistance [Stock et Col, 1979]. L'allure générale de ce comportement est représentée sur la (figure I.20) Cette tendance se vérifie quel que soit le rapport eau/ciment [Kawakami, 1972].

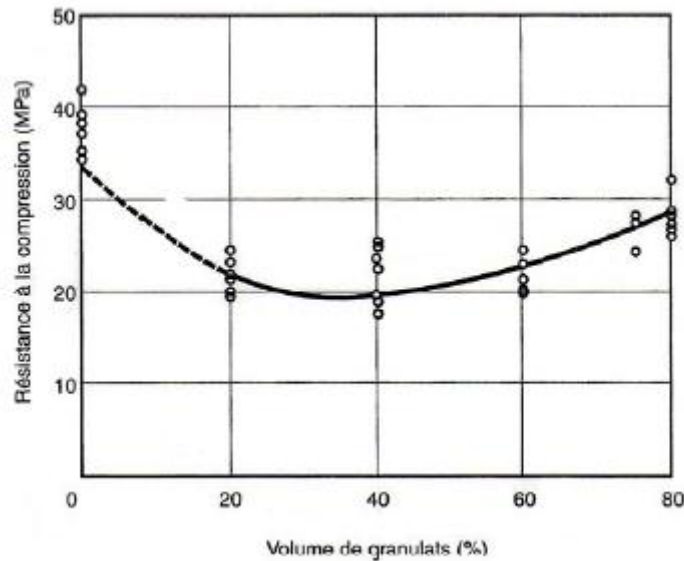


Figure I. 20: la relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10x30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5 [Stock et Col, 1979]

Stock et Col. (1979) ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie liés par la même matrice de ciment. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Les essais de résistance à la compression sur les éprouvettes cubiques ont donné des résultats assez dispersés. Il est à noter que l'effet du granulat peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand l'ouvrabilité diminue [De Larrard et Belloc, 1999].

I.7.6 Dimension maximale des granulats D_{max}

L'utilisation des granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de D_{max} reste conditionné par le [BAEL 91] :

- L'ouvrabilité demandée
- Les dimensions de l'ouvrage et l'épaisseur des pièces
- L'espacement des armatures
- L'enrobage des armatures

L'effet négatif de l'augmentation de la dimension maximale du granulat dans le béton s'applique à l'échelle de toutes les grosseurs, mais l'effet de la dimension des grains sur la diminution de la demande en eau est particulièrement important en dessous de 38,1 mm (figure I.21). Pour des dimensions supérieures, le bilan des deux effets dépend du dosage du béton [Neville, 2000]

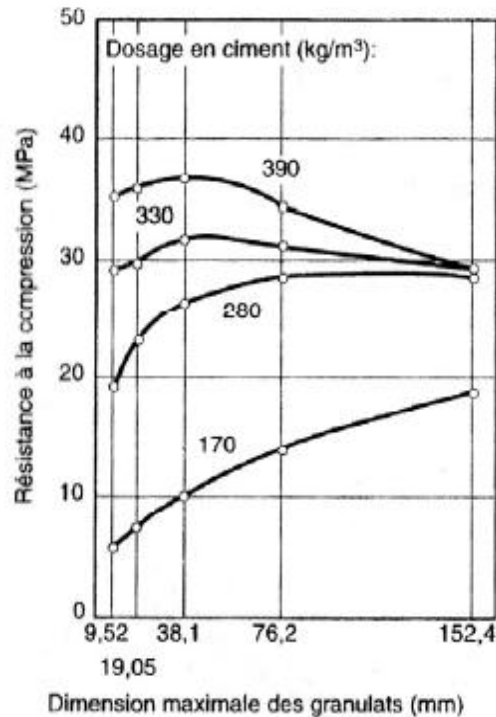


Figure I. 21: influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment [Neville, 2000].

I.7.7 Influence du squelette granulaire sur l'affaissement

Une étude réalisée sur des bétons autoplaçants a fait ressortir que l'augmentation de la fraction volumique granulaire avait une influence négative sur les propriétés rhéologiques des bétons [O. Taleb, F. Ghomari, S.M.A. Boukli Hacene, 2013]. Cependant 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].

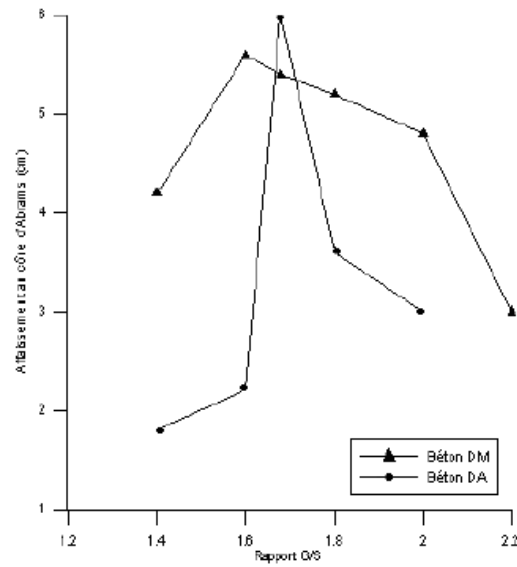


Figure I. 22: Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement [S.M.A. Boukli Hacene, 2010]

I.7.8 Influence de l'air occlus sur l'affaissement et la résistance

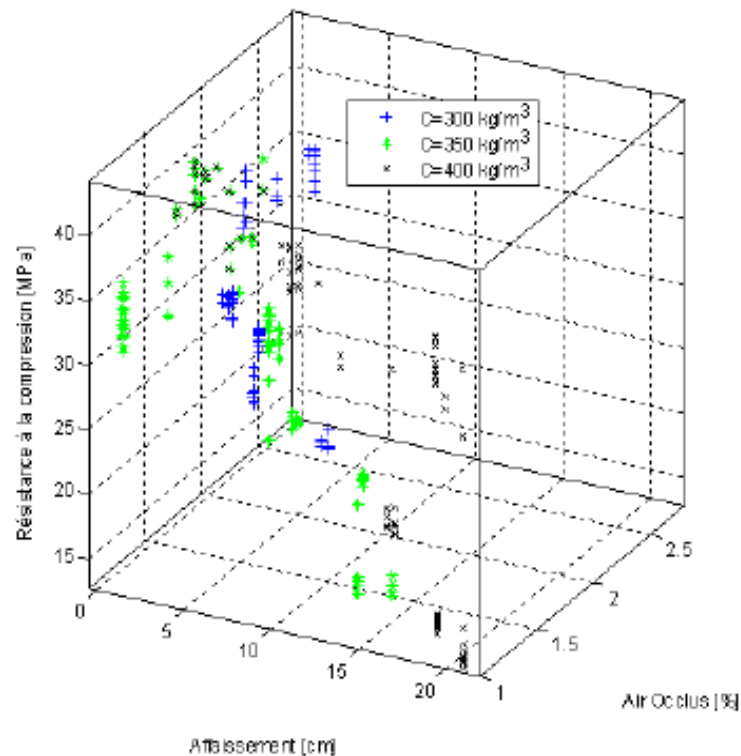


Figure I. 23: Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus [S.M.A. Boukli Hacene, 2010]

L'analyse réalisée sur l'ensemble des mesures effectuées est représentée en tridimensionnel sur la (figure I.23) et montre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus. Il est clair, que la teneur en air croît avec la diminution de l'affaissement, c'est-à-dire, lorsqu'on passe des bétons fluides aux bétons fermes. En retour, cet air affectera la résistance à la compression [S.M.A. Boukli Hacène, 2010].

I.8 METHODES DE FORMULATION DES BETONS

I.8.1 Introduction

Avec l'apparition des nouveaux matériaux et l'exigence des chantiers, le formulateur est soumis à une pression croissante en termes de délais et de couts. Malheureusement, les entreprises négligent le problème de la formulation des bétons, même si de cet acte fondateur découle une grande partie des caractéristiques du chantier et de l'ouvrage réalisé.

I.8.2 Méthodes de formulation

I.8.2.1 Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) ; dont la courbe soit la plus proche que possible de la courbe de référence théorique [Dreux, Festa, 1998].

La formule de base est la suivante :

$$P=A + (100-A)\sqrt{d/D} \dots\dots\dots(I.5)$$

Avec :

P est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D est le diamètre du plus gros grain

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

I.8.2.2 Méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants [De Larrard, 2000]. Sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique (figure I.24).

Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés [Dupain, Lanchon, Saint-Arroman, 2000].

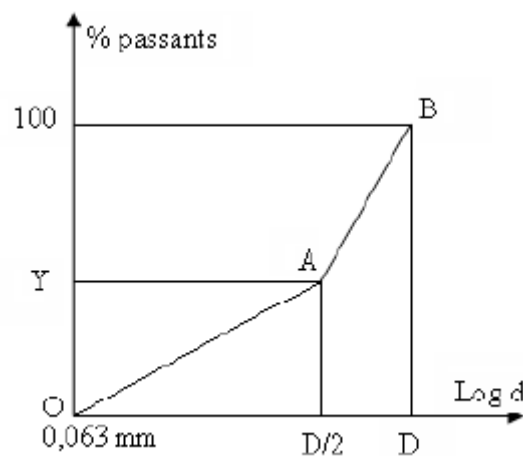


Figure I. 24: courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse

Sur un graphe d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB (figure I.24) Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D des plus gros granulats, c'est-à-dire :

Point B ($X = D_{\max}$ et $Y = 100\%$)

Point O ($X = 0.063$ et $Y = 0$)

Le point de brisure A aux coordonnées suivantes :

- En abscisses (à partir de la dimension D du tamis)

Si : $D \leq 20$ mm ; l'abscisse est D/2.

Si : $D \geq 20$ mm l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38(5 mm) et le module correspondant à D.

En ordonnées : $y=50-\sqrt{D}+K$

Où K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage de la forme des granulats roulés ou concassés (Annexe I.1) et également du module de finesse du sable.

Une correction supplémentaire sur K peut être effectuée (cas de sable grossier) en la valeur $K_s=6M_f -15$ ou M_f étant le module de finesse du sable qui varie de 2 à 3 [Dreux et Festa, 1998].

I.8.2.3 Méthode de Faury

Cette méthode qui date de 1942 s'inspire des travaux de Caquot Faury.

Faury prend comme échelle :

- en abscisse, la $\sqrt[5]{d}$

-en ordonnée, la décimale suivant le pourcentage en volume absolu de matière passant à travers les passoires correspondantes.

La granulométrie optimum d'un béton est un mélange (dans une certaine proportion) de deux sortes de grains (sable et gravier).

La courbe de référence à suivre se compose de deux tronçons de droite.

La première donne la granulométrie des grains fins et moyens $0 \text{ } \frac{D}{2}$. Cette droite coupe l'axe des abscisses en un point fixe d'abscisse $d_0=0,0065$.

La deuxième droite est celle de gros grains $D \text{ } \frac{D}{2}$. L'ordonnée $Y \text{ } \frac{D}{2}$, appelée point de brisure, indique le pourcentage en volume des grains $0 \text{ } \frac{D}{2}$. Sa valeur est donnée par la formule expérimentale

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \dots\dots\dots (I.6)$$

D : grosseur maximum de l'agrégat en mm

R : rayon moyen du coffrage en mm

A : coefficient tenant compte de la forme des agrégats et de la consistance du béton (Annexe I.2)

B : dépend du serrage. Il varie de 1 pour une vibration puissante à 1,5 pour un serrage moyen.

I.8.2.4 Méthode de JOISEL

Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus généralisante. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{D}$, où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant $\sqrt[m]{D}$ comme graduation des abscisses, Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire.

I.8.2.5 Méthode de VALETTE

Méthode essentiellement expérimentale, elle nécessite un nombre de calculs préparatoires. Plus connue sous la désignation de « dosage des béton à compacité maximale », « dosage des béton à minimum de sable » ou « dosage des béton à granularité discontinue ». Son principe est de mesurer le volume de vide d'un sable mouillé, et le comblé par un volume égale de pâte pure de ciment. On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec l'ouvrabilité désirée.

I.8.2.6 Méthode des volumes absolus

La méthode des volumes absolus est une méthode de préformulation adaptée au béton. Elle permet la composition de mélanges dont le volume total est précisé en amont. Ses qualités lui confèrent un caractère à la fois précis et aléatoire, c'est la plus adaptée pour un travail de recherche.

Sachant qu'un mélange de béton est composé habituellement d'eau, ciment, sable et gravier. Cette méthode inclut le volume de l'air emprisonné dans le mélange. Elle permet de varier chaque volume (V_X) de ces composants sans pour autant changer le volume total.

On a :

$$V_{ciment} + V_{eau} + V_{sable} + V_{gravier} + V_{vide} = V_{total}$$

- Si les composants sont exprimés en masse, la relation devient :

$$\frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_E}{\rho_E} + \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M_G}{\rho_G} + V_v = V_t$$

Avec :

$\rho_C, \rho_E, \rho_S, \rho_G$: Masses volumiques absolues.

- L'humidité que peut contenir les granulats peut être prise en compte en la

retranchant et la rajouter au volume de l'eau, les masses volumiques absolues des matériaux humides seront remplacées par les masses volumiques absolues sèches.

Cette opération peut être négligée lorsqu'il s'agit de petites gâchées et dont les composants sont préparés par pesée [Adam M. Neville, 1992].

- L'ajout d'autres composants supplémentaire est introduit dans l'équation comme c'est le cas des autres composants, le principe est que le volume reste constant.
- Le seul inconvénient que peut altérer la précision de cette méthode réside dans l'évaluation du volume de l'air occlus que va contenir le mélange après.

I.8.2.7 Méthode des plans d'expériences

L'approche classique consiste à varier un seul paramètre du mélange et mesurer son effet sur le comportement du béton en maintenant tous les autres paramètres constants. Malheureusement, cette méthode est longue et les interactions entre les paramètres du mélange ne peuvent pas être évaluées.

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons.

Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport E/L, le rapport Additions / Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S, ...

Après analyse statistique en utilisant certains logiciels comme : Minitab, Statistica, ... des modèles peuvent être obtenus en fonction des différents facteurs.

I.9 Conclusion

Bien que, pour l'usage courant, toute formulation de béton répond plus ou moins au besoin, il existe des proportions des constituants qui offrent de meilleurs caractéristiques aux bétons. De nombreux recherches ont été réalisées pour la mise au point de méthodes de formulation d'une part, et pour optimiser l'utilisation des constituants d'autre part afin de trouver un compromis entre des propriétés parfois contradictoires : ouvrabilité qui contrôle la mise en place du béton et résistance mécanique qui conditionne la capacité portante de l'ouvrage.

A partir de cette recherche bibliographique, nous avons remarqué qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les caractéristiques recherchées.

CHAPITRE II

LES PLANS D'EXPERIENCES

II.1 Principe

La technique des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats.

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. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

II.2 Démarche méthodologique

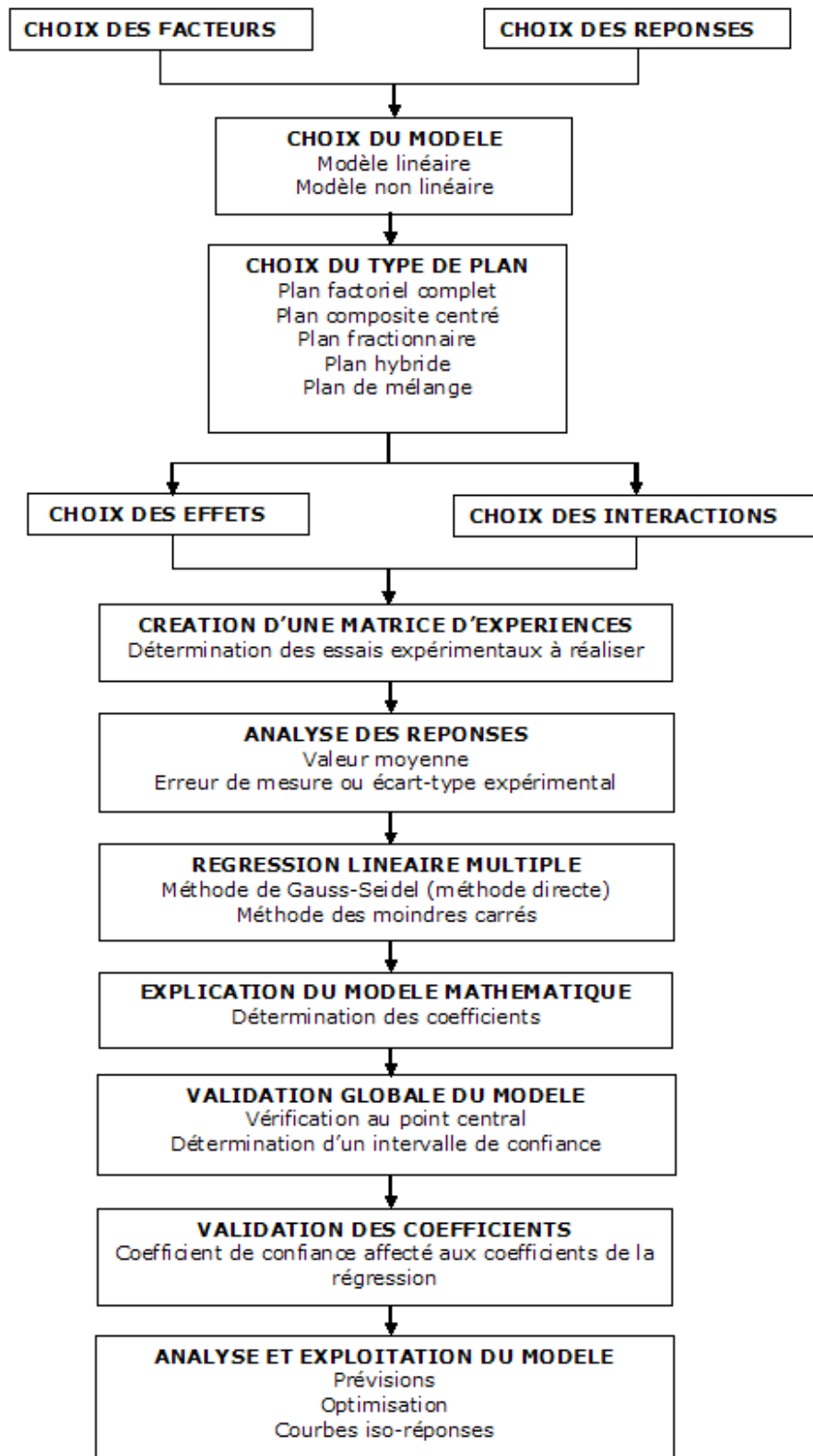


Figure II. 1: Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. Bouklí Hacene, 2010]

II.2.1 Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

II.2.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

II.3 Conditions d'application des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications au béton s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais et la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées [Sier, 1993] :

- 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 soit très

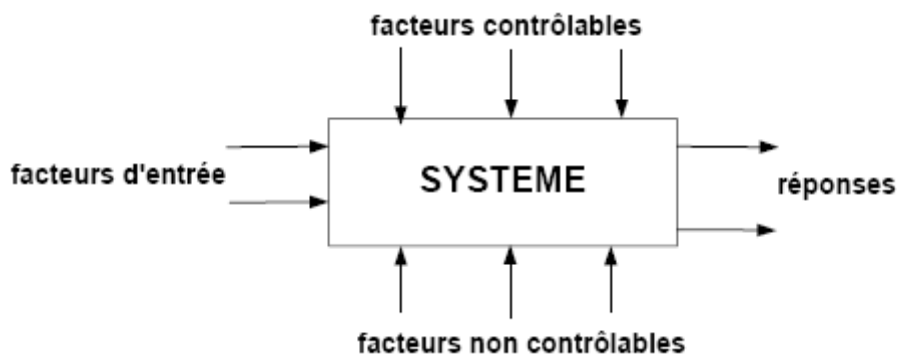
petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- Condition 2 :

La réponse doit être homoscedastique. Cela signifie que 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.4 Vocabulaire de base des plans d'expériences

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs.



Parmi les facteurs on distinguera:

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

Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée. Ils existent deux types :

-Facteur quantitatifs

Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue par exemple le dosage en ciment, pourcentage d'adjuvant, masse de sable etc. Et rarement à variation discontinue ex: classe de ciment qui est fixée par le cimentier.

-Facteurs qualitatifs :

Facteurs dont la valeur est non mesurable, comme la qualité, le type, la marque, le procédé ou d'autre caractéristique qu'on ne peut quantifier par exemple le type de ciment (CPA. CPJ. CLK...), le procédé de vibration du béton (table vibrante ou aiguille).

- **Niveau d'un facteur :**

Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur et un niveau inférieur. Pour les facteurs quantitatifs la valeur est algébrique, donc classé numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables, alors peu importe leur classement l'important est de mettre une borne inférieure et une borne supérieure (+1 et -1). Les niveaux extrêmes de chaque facteur délimitent le domaine de l'étude [G. SADO et M. C SADO, 1991].

- **Valeurs centrées réduites ou codées :**

L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quel que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1).

Par exemple :

Tableau II. 1: deux facteurs à deux niveaux

Facteur	Niveau (-1)	Niveau (+1)
Dosage en ciment (kg/m ³)	300	400
Masse du sable (kg/m ³)	600	700

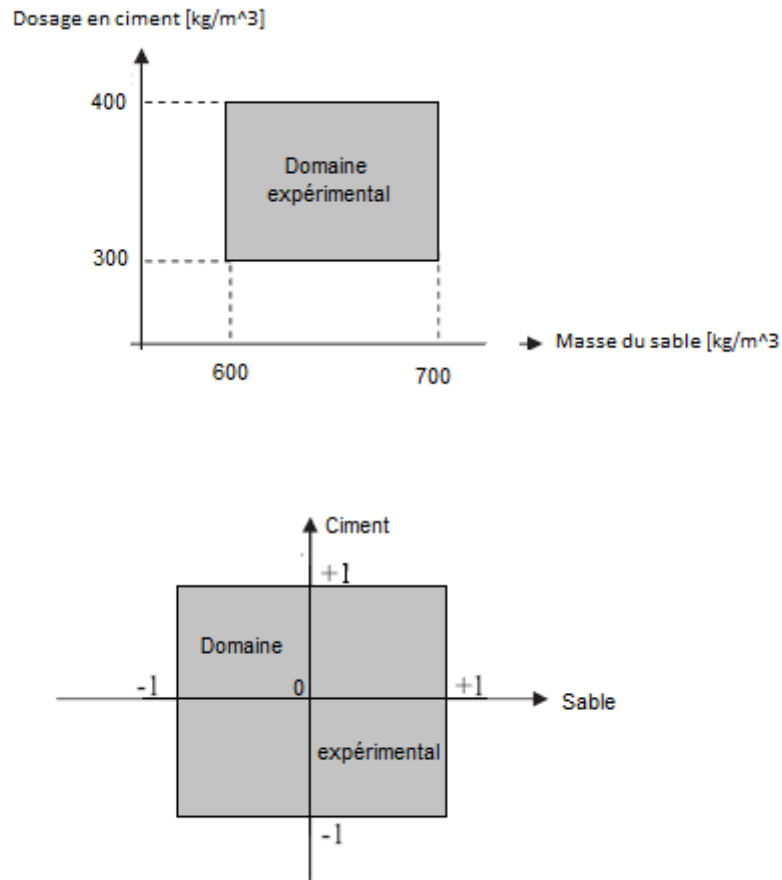


Figure II. 2: transformation des coordonnées réelles en coordonnées centrées réduites

Pour le passage des valeurs réelles aux valeurs centrées réduites dans le cas de facteurs ayant plus de deux niveaux nous avons : [Z. BOUDAUD, Z.RAHMOUNI, D. BREYSSE, 2003]

$$a = \frac{[2*B - (B^+ + B^-)]}{(B^+ - B^-)} \dots\dots\dots (II.1)$$

Où :

a: Niveau du facteur en valeur centré réduite.

B: Niveau du facteur en valeur réelle.

B⁺ : Niveau supérieur du facteur en valeur réelle.

B⁻ : Niveau inférieur du facteur en valeur réelle.

Exemple :

Pour le facteur dosage en ciment C nous avons $C^+ = 400 \text{ kg/m}^3$ et $C^- = 300 \text{ kg/m}^3$.
Donc pour $C = 350 \text{ kg/m}^3$ la valeur centrée réduite est:

$$a = \frac{[2 \cdot 350 - (400 + 300)]}{(400 - 300)} = 0$$

- **Domaine expérimental**

Le domaine est délimité par les niveaux supérieurs et inférieurs de chaque facteur [M. Pillet, 1992].

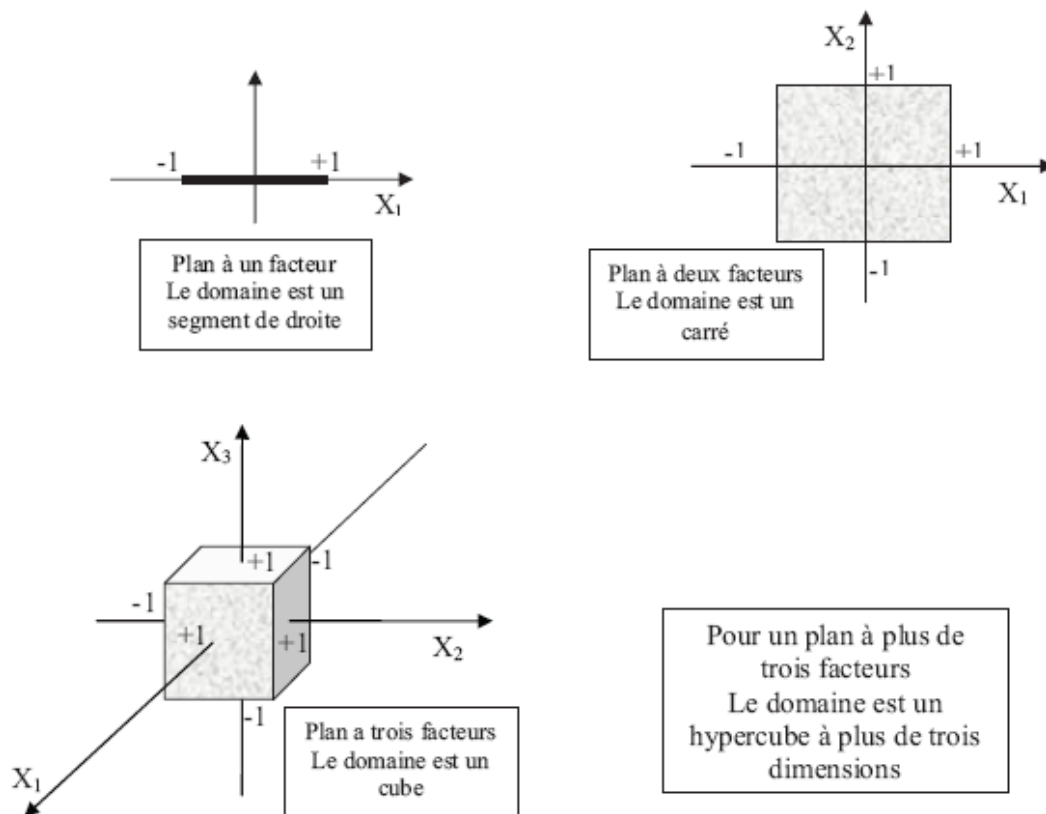


Figure II. 3: *Domaine expérimental* [M. Pillet, 1992].

- **La réponse**

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.

• **L'effet d'un facteur**

L'effet d'un facteur [X_i] est la comparaison entre les valeurs prises par la réponse [Y] lorsque ce dernier passe du niveau (-1) au niveau (+1) [J. BARON et J. P OLIVIER, 1996].

Il est caractérisé par une constante notée « A_i » qui sera :

- Positive si cette variation du facteur est favorable à l'accroissement de la réponse (Figure II.4.a).

- Négative si elle est favorable à la diminution de la valeur de la réponse (Figure II.4.b).

- Nulle si elle est sans influence sur le système (Figure II.4.c).

Cette constante intervient dans le modèle mathématique décrivant cette réponse.

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i \dots \dots \dots (II.2)$$

Y : Réponse prédite par le modèle.

A_0 : Constante du modèle elle répond à la moyenne des résultats de mesure.

X_i : Facteur « i ».

A_i : Effet du facteur « i ».

k : Nombre de facteurs étudiés.

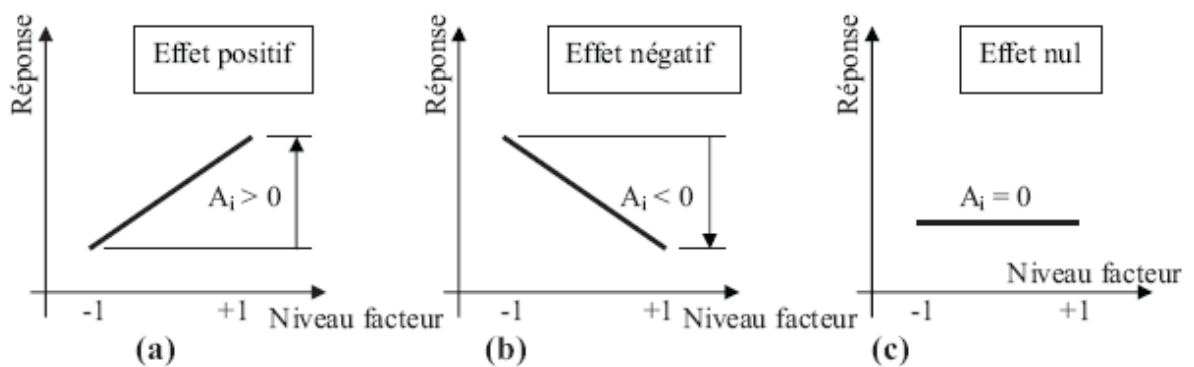


Figure II. 4: Effet d'un facteur

- **Interaction**

Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrées. On parle d'interaction entre deux facteurs X_i et X_j quand l'effet du facteur X_i sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur X_j . Dans la plupart des cas, les études se limitent au premier ordre (interactions entre deux facteurs) [M. Pillet, 1992].

Noté « A_{ij} » l'interaction intervient dans le modèle de la manière suivante

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{ij} A_{ij} X_i X_j \dots \dots \dots (II.3)$$

A_{ij} : Effet d'interaction $X_i X_j$

- **Matrice des effets**

La matrice des essais à réaliser pour obtenir le plan d'expériences optimal se déduit en fait des critères permettant d'obtenir les coefficients avec le maximum de précision.

Le système d'équations à résoudre doit présenter des coefficients devant les inconnues (qui sont les coefficients du modèle à déterminer) pouvant se mettre sous la forme d'une matrice nommée **matrice des effets**. Par exemple pour le plan de deux niveaux à deux facteurs la matrice des effets s'écrira sous la forme :

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Cette matrice est dite matrice de Hadamard.

Pour cette matrice les vecteurs colonnes sont orthogonaux deux à deux. Cette propriété n'est pas suffisante pour obtenir la variance minimale pour l'estimation des coefficients. Hadamard a montré que la matrice X devait aussi vérifier la condition :

$$X^t \cdot X = N \cdot I \dots \dots \dots (II.4)$$

Où

X^t : la matrice transposée de X.

I : la matrice identité.

N : le nombre d'expériences réalisées. N doit être un multiple de 4.

Par exemple on verra que pour un plan complet à n facteurs, le nombre d'expériences N sera égal à :

$$N = 2^n$$

Soit 8 expériences avec 3 facteurs permettant la détermination des 8 coefficients du modèle et 16 expériences avec 4 facteurs.

• **Modélisation mathématique de la réponse**

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse y aux facteurs $x_1, x_2, \dots, x_i \dots, x_n$. Ce modèle théorique est postulé a priori. Il s'agit d'un modèle polynomial.

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,k=1 \\ i \neq j \neq k}}^n a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \dots \dots (II.5)$$

Où

a_0, a_1, \dots, a_n : sont les coefficients du polynôme.

x_i : représente un niveau du facteur i

x_j : représente un niveau du facteur j

y : la repense ou la grandeur d'intérêt

Les termes produits de type par exemple $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ correspondent aux interactions d'ordre 2.

Les termes produits de type par exemple $a_{ijk} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_k$ correspondent aux interactions d'ordre 3.

Pour un plan factoriel à 3 facteurs x_1, x_2 et x_3 , on obtient :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots \dots \dots (II.6)$$

• **Modélisation expérimentale**

Deux compléments doivent être apportés au modèle purement mathématique précédemment décrit.

Le premier complément est le manque d'ajustement. Cette expression traduit le fait que le modèle choisi par l'expérimentateur avant les expériences est probablement un peu différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le *manque d'ajustement*, on le note par la lettre D.

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, dans le cas général, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtiendra pas exactement le même résultat. Il y a une dispersion des résultats. Les dispersions ainsi constatées sont appelées *erreurs aléatoire* ou *erreurs expérimentales* et on les note par la lettre e.

La relation générale (II.3) doit être modifiée ainsi :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + D + e \dots \dots \dots (II.7)$$

• **Calcul des coefficients**

Dans le cas d'une matrice de Hadamard, les coefficients peuvent aisément être calculés avec une simple calculatrice ou un tableur.

On reprend pour cela l'exemple du plan de deux facteurs à deux niveaux. Les résultats de calcul des coefficients sont récapitulés dans le tableau (II.2).

Tableau II. 2: Calcul des coefficients dans le cas d'une matrice Hadamard

N° essai	Constante	X ₁	X ₂	X ₃	Répons e
1	1	-1	-1	1	y ₅
2	1	1	-1	-1	y ₆
3	1	-1	1	-1	y ₇
4	1	1	1	1	y ₈
coefficient	a ₀ = $\frac{+y_5+y_6+y_7+y_8}{4}$	a ₁ = $\frac{-y_5+y_6-y_7+y_8}{4}$	a ₂ = $\frac{-y_5-y_6+y_7+y_8}{4}$	a ₃ = $\frac{+y_5-y_6-y_7+y_8}{4}$	

• **Les surfaces de réponse**

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée *surface de réponse* (figure II.5).

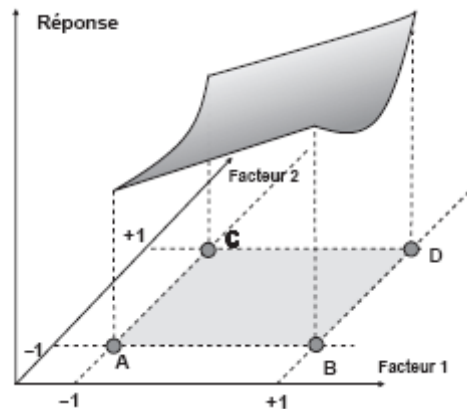


Figure II. 5: L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse.

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

II.5 Les types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman. Pour pouvoir expliquer d'avantage cette méthode de plans d'expériences nous allons donner dans ce qui suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hybrides.

II.5.1 Plans factoriels complets

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels, c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets. Avec deux niveaux et k facteurs, ceux-ci sont notés 2^k . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard. Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté : 2^2 . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de

mesures aux extrémités du domaine expérimental, ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés.

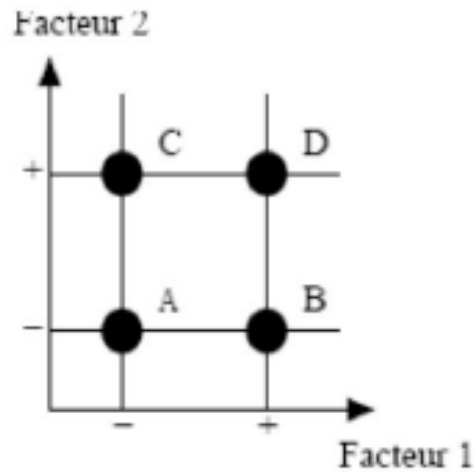


Figure II. 6: Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental

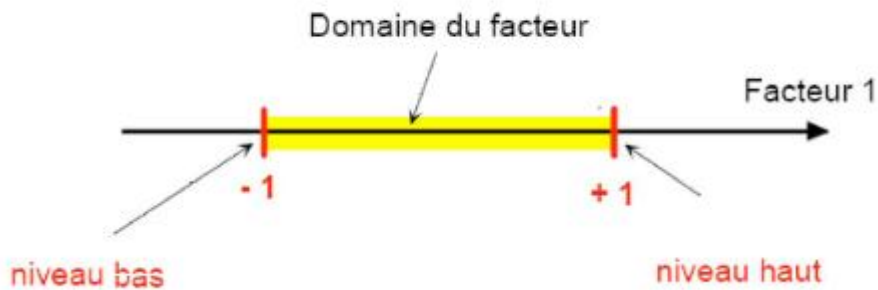


Figure II. 7: Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

II.5.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans

peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

II.5.1.1.1 Plans à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \dots \dots \dots (II.7)$$

y : est la réponse

$x_{1,2}$: représente le niveau attribué au facteur 1,2

β_0 : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude

β_1 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1

β_2 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2

β_{12} : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2

e : est l'écart.

La matrice d'expériences se construit selon le tableau suivant pour le cas des plans 2^2 et avec des facteurs β_1, β_2 .

Tableau II. 3: La matrice d'expériences

N° ESSAI	β_1	β_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

II.5.1.1.2 Plans factoriels à k facteurs

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation :

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \sum \beta_{ij} x_i^2 + \beta_{ij \dots z} x_i x_j \dots x_z + e \dots (II.8)$$

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k .

Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.

Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante:

- colonne du 1^{er} facteur: alternance de -1 et +1
 - colonne du 2^e facteur: alternance de -1 et +1 de 2 en 2
 - colonne du 3^e facteur: alternance de -1 et +1 de 4 en 4
 - colonne du 4^e facteur: alternance de -1 et +1 de 8 en 8
- Et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

II.5.1.2 Plans factoriels complets à trois niveaux

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan 3^2 . S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3^3), il faut exécuter 27 essais. En général s'il y a k facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 3^k essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

II.5.2 Plans fractionnaires

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ($N=n^k$), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser. D'où les plans fractionnaires.

Les plans fractionnaires optimaux sont des plans issus des plans factoriels complets. Leur intérêt principal est de réduire cette charge expérimentale en focalisant sur les effets les plus intéressants sans pour autant affecter de façon compromettante l'efficacité du plan [J. Goupy, 2003].

Il existe deux types :

a. Plans fractionnaires (2^{k-p}) :

Ce plan consiste à utiliser pour l'étude de « k » facteurs la matrice d'effet d'un plan factoriel complet $2^{k-1}, 2^{k-2}, 2^{k-3} \dots$. Ce qui permet de réduire le nombre d'essais par 2^p .

Nous remarquons que pour un plan factoriel complet les interactions d'ordre deux et plus sont le plus souvent négligeables. L'astuce est que les interactions les moins influentes sont remplacées par les facteurs « $k - p$ », « k », en suivant leurs mêmes alternances de signes. Le plan obtenu est dit fractionnaire 2^{k-p} [J. Goupy, 2003].

II.5.3 Plans de mélange

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés [G.Sado et M.C Sado, 1991] d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. C'est le cas du triangle de Féret (figure II.7) ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

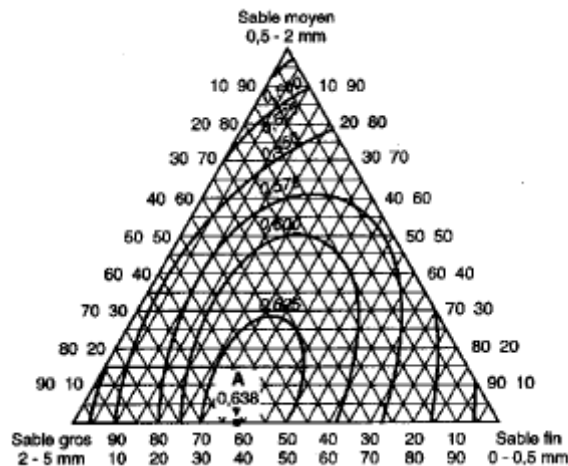


Figure II. 8: triangle de Féret, 1892 [Baron et Olivier, 1996]

Les sommets de triangle représentent chacun des facteurs. Les courbes d'isocompacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en A.

II.5.4 Les plans hybrides

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemore [Brereton R, 2006]. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'isovariance par rotation.

L'orthogonalité garantie la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'isovariance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride.

Les plans hybrides se désignent de la manière suivante : on indique le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

II.6 Modélisation par la méthode des plans d'expériences

Pour permettre la prévision de la réponse et l'optimisation du système, la méthode des plans d'expériences de part sa conception et sa structure permet une représentation mathématique de la réponse « y » en fonction des facteurs sujets de l'étude.

Nous nous limiterons aux modèles polynomiaux linéaires en utilisant la régression linéaire multiple qui se base principalement sur la méthode des moindres carrés.

Deux conditions doivent être respectées [Baron et Olivier, 1996] :

- Le nombre minimal des essais effectués doit être égal au nombre des inconnues A_i , et augmente avec le degré du polynôme. Donc il est de notre intérêt de rechercher les modèles les plus simples avant tout.
- le modèle constitué doit être validé afin que les prévisions soient fiables.

II.6.1 Principes généraux

Les modèles recherchés sont des modèles exprimant la réponse « y_j » en fonction des facteurs « X_i » et leurs interactions :

$$y_j = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_1 X_3, \dots, X_1 X_2 X_3, \dots)$$

En plus explicite:

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{ij} A_{ij} X_i X_j + \sum_{ijl} A_{ijl} X_i X_j X_l + \dots \quad (\text{II.9})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_j \\ y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & X_i & \dots & X_i X_j & \dots & X_i X_j X_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_{ij} \\ A_{ijl} \end{bmatrix}$$

De façon condensée :

$$[y] = [X] \cdot [A] \dots \dots \dots \quad (\text{II.10})$$

Où les inconnues du problème sont les composantes du vecteur [A]

$$[A] = [X]^{-1} \cdot [y] \dots \dots \dots (II.11)$$

II.6.2 Signification des effets de facteurs :

Le calcul d'un effet de facteur ou d'une interaction entre facteurs fait intervenir l'ensemble des résultats de mesure. Or ces derniers sont collectés tout le long de la campagne expérimentale, ils sont entachés d'erreurs de mesure. Et que seul l'écart type de mesure permet son estimation.

Après avoir établi le modèle mathématique, il s'agit de savoir si les coefficients du modèle (facteurs et interactions) sont significativement différents de zéro. En effet, des valeurs mathématiques voisines de zéro peuvent être la conséquence de la dispersion expérimentale autour d'une valeur moyenne nulle. On va donc comparer la valeur du coefficient à l'erreur de mesure. Si ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur, on conclura à la nullité de l'effet (ou de l'interaction) envisagé.

II.6.3 Notions de statistique appliquées aux plans d'expériences

a. Erreur expérimentale

En général, on prend la moyenne arithmétique comme valeur centrale et l'écart-type comme mesure de la dispersion.

b. Moyenne

Par définition, la moyenne arithmétique d'un ensemble de valeurs est la somme de toutes les valeurs divisées par le nombre de valeurs.

c. Ecart- type

La définition de l'écart-type est un peu moins simple que celle de la moyenne. Nous allons décrire son calcul pas à pas :

- On commence par calculer les écarts à la moyenne, c'est-à-dire la différence entre chaque valeur et la moyenne.
- La variance est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre de valeurs moins 1.
- Enfin l'*écart-type* est obtenu en prenant la racine carrée de la variance.

d. Intervalle de confiance des réponses

Nous venons de voir l'importance de l'écart-type de la population des réponses qui est considéré comme une évaluation de l'erreur expérimentale ou erreur pure. L'estimation de l'écart-type(S) d'une population de réponses à partir d'un échantillon est obtenue à l'aide de la relation :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \check{y}_i)^2} \dots\dots\dots (II.12)$$

Mais la qualité de cette estimation dépend du nombre *n* de valeurs prises en compte pour calculer l'écart-type. Si l'échantillon contient beaucoup de mesures, l'écart-type calculé sera de bonne qualité, c'est-à-dire proche de l'écart-type de la population. Si l'échantillon contient peu de mesures, l'écart-type calculé sera de moins bonne qualité et il faudra prendre des précautions supplémentaires pour l'utiliser. L'intervalle de confiance *I_c* dépend :

- de la probabilité choisie par l'utilisateur ; cette probabilité est souvent de 95 ou 99 % ;
- de la qualité de l'écart-type calculé.

On a :

$$I_c = k \sigma_{\text{échantillon}}$$

e. Analyse de la variance

L'analyse de la variance consiste à rechercher les sources de variation des réponses. On suppose que les réponses ont été calculées avec le modèle postulé, $y_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + e_i$, en utilisant la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire en minimisant la somme des carrés des écarts. Dans ce cas, les réponses calculées s'écrivent et les écarts (*e*) prennent des valeurs particulières *r_i* qui s'appellent les *résidus*. Les résidus sont donc des valeurs particulières des écarts. On a :

$$\check{y}_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Avec ces nouvelles notations, la relation donnant la réponse peut s'écrire :

$$y_i = \check{y}_i + r_i$$

L'analyse classique de la variance fait intervenir non pas les réponses mais la différence entre les réponses et leur moyenne.

f. Coefficient de détermination (R^2)

L'analyse de la variance permet de calculer une statistique très utile : le R^2 ou R carré. Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne) :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponse scaculée scorigées de la moyenne}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées corrigées de la moyenne}}$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées. Le R^2 est égal à 1.

Si le modèle fournit des réponses calculées égales à la moyenne, la somme des carrés des réponses calculées est égale à 0. Le R^2 est égal à 0. On dit que le modèle n'a pas de puissance d'explication.

Le R^2 est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses.

Le R^2 joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls. Si les résidus sont nuls, le R^2 est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté. Le R^2 est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

g. Résidus

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée.

h. P-value

La P -value est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. On calcule cette P -value à partir du rapport du coefficient à son écart-type (test de Student). La probabilité d'acceptation des coefficients à une p -value de 0,10.

i. Fisher

Le F de Fisher qui est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui

de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs. Si le F de Fisher est proche de 1 (forte probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus.

j. Variance de mesure : [J. Goupy et col, 2006]

$$V(y) = s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\check{y}_0 - y_{0i})^2 \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

V(y): Variance de mesure.

y_0 : Moyenne des essais au centre du domaine.

y_{0i} : Essai « i » au centre du domaine.

II.6.4 Validation du modèle :

La validation du modèle issue de la régression linéaire se fait en comparant les valeurs mesurées au centre du domaine avec ceux prédits par le modèle en ce même point.

Le modèle est validé si la réponse « y_0 » mesuré au centre du domaine appartient à l'intervalle:

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y)$$

$y_{\text{modèle}}$: Valeur donné par le modèle au centre.

$\sigma(y)$: Écart type des mesures

Tableau II. 4: Nombre d'écart-types à prendre en compte pour déterminer la probabilité que la moyenne soit dans l'intervalle de confiance.

		Nombre de mesures ayant servi à calculer s						
		2	3	4	5	10	20	∞
Pourcentage de cas où l'hypothèse est correcte	70 %	1,96	1,38	1,25	1,19	1,10	1,06	1,03
	90 %	6,31	2,92	2,35	2,13	1,83	1,73	1,64
	95 %	12,71	4,3	3,18	2,78	2,26	2,06	1,96
	99 %	63,66	9,92	5,84	4,60	3,25	2,86	2,58

II.7 Application des plans d'expériences sur le matériau béton

II.7.1 sur les bétons ordinaires : (Kaoua, 2008)

- **Facteurs et leurs niveaux**

Tableau II. 5 : 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 :**

Les réponses sont :

- Volume d'air occlus
- Maniabilité du béton frais (affaissement)
- Résistances mécaniques à 7 et 28 jours (compression et traction)

- **Modèles et figures adoptées:**

Pour l'affaissement (Aff)

$$\text{Aff} = 9.31 + 0.640 \text{ E/C} - 0.5 \text{ Q} - 0.526 \text{ E/C} * \text{G/S} + 0.6 \text{ E/C} * \text{Q}.$$

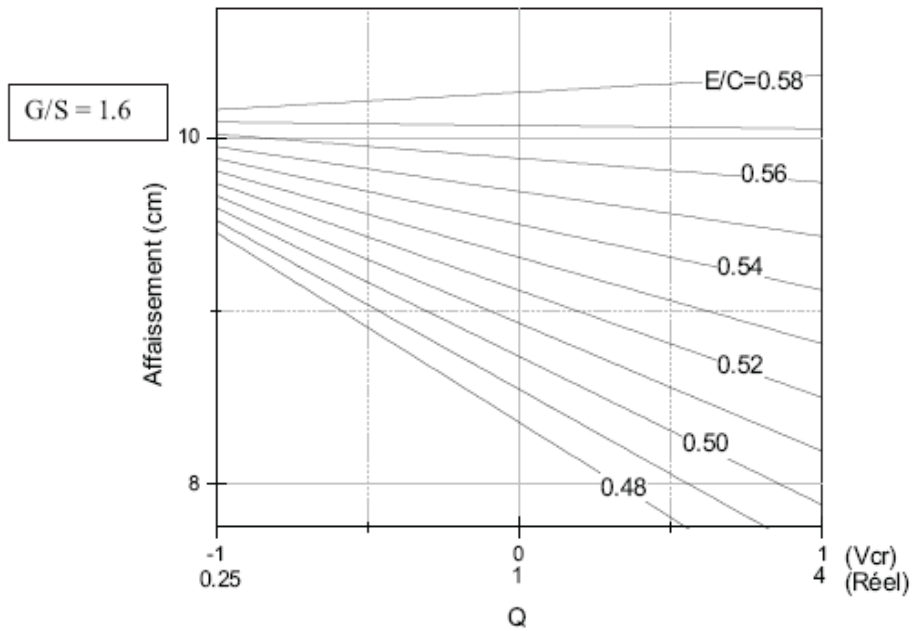


Figure II. 9: Courbe iso valeur du rapport E/C. Pour (G/S = 1.6) (Vréel)

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

$$R_{C28} = 29.1 - 4.23 E/C.$$

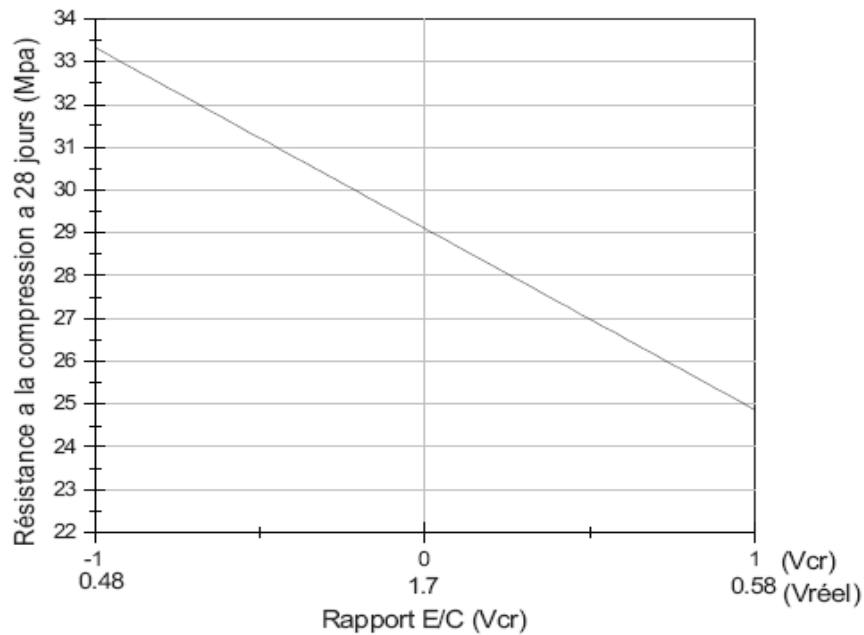


Figure II. 10: Courbe iso valeur du rapport E/C.

L'augmentation du rapport « E/C » présent dans la courbe induit une diminution de la résistance en compression à 28 jours, ce qui se traduit par une meilleure relation (E/C) et Résistance.

II.7.2 Sur les bétons autoplaçants :(Taleb et col, 2012)

- **Facteurs et leurs niveaux**

Tableau II. 6: niveaux des facteurs

Facteurs	Niveaux	
Ciment [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
S _p [%]	1,5	-1
	2	+1

- **Réponses :**

Les réponses sont :

- L'étalement
- La résistance à la compression (R_{c28})

- **Modèles et figures adoptées :**

Pour l'étalement (ETAL) :

$$\text{ETAL (mm)} = 737,22 - 1,88 C + 31,25 E - 28,12 F + 33,13 \text{ Sp} - 10 C * E - 11,88 C * F + 6,88 C * \text{Sp} - 21,25 E * \text{Sp} + 18,13 F * \text{Sp} + 15 C * E * \text{Sp} + 16,88 C * F * \text{Sp} - 11,25 E * F * \text{Sp}$$

$$R^2 = 99,71\%$$

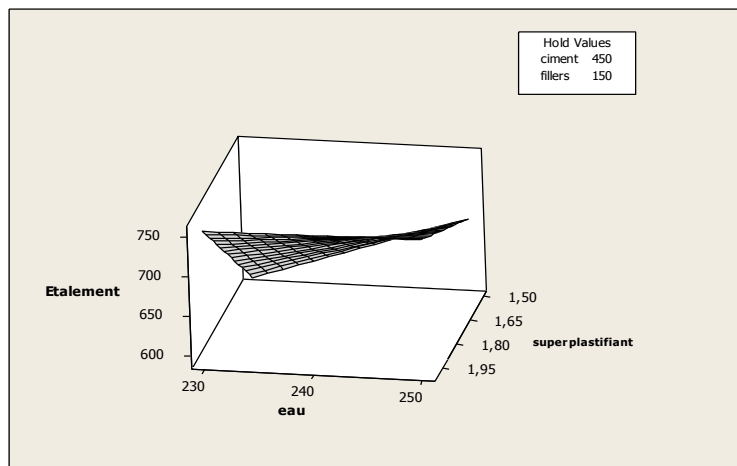


Figure II. 11: Surface de réponse de l'étalement en fonction de l'eau et des superplastifiants

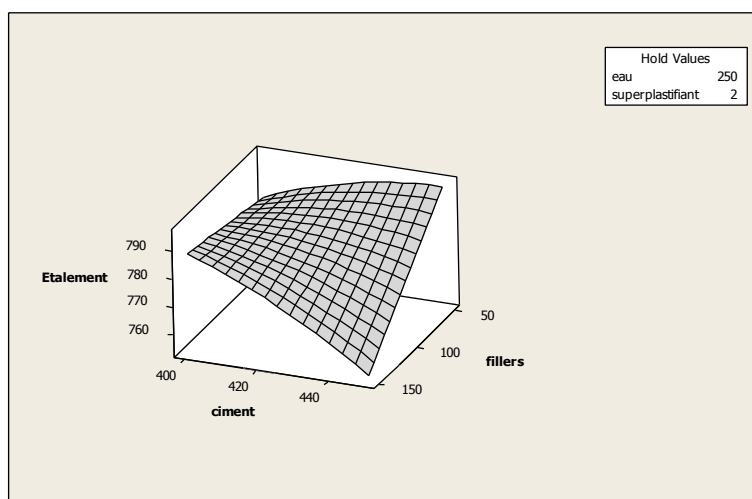


Figure II. 12: Surface de réponse de l'étalement en fonction du ciment et des filler

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

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

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

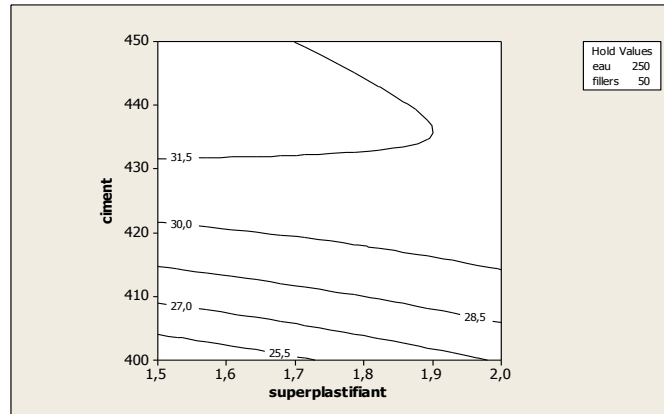


Figure II. 13: Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=50 \text{ kg/m}^3$)

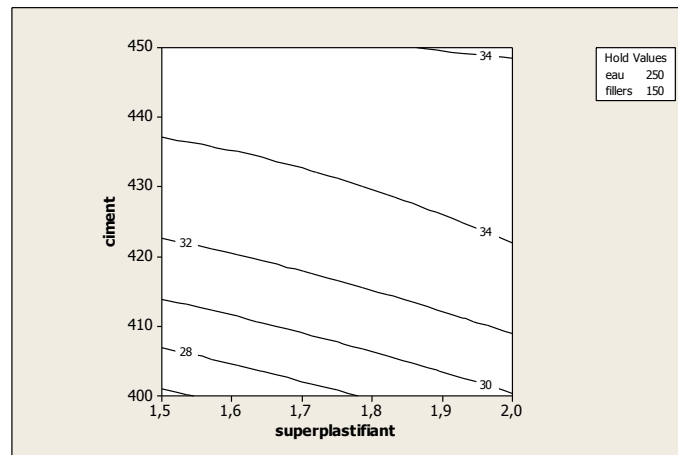


Figure II. 14: Iso-réponse de la résistance en fonction du dosage en ciment et en superplastifiant ($E= 250 \text{ l/m}^3$, $F=150 \text{ kg/m}^3$)

Ainsi, en plus de l'effet positif du ciment sur l'amélioration de la résistance les figures II.12 et II.13 montrent 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. Nos résultats viennent consolider les résultats de plusieurs auteurs qui ont montré que les fillers de calcaires réagissent avec les C₃A pour former un carboaluminate qui a des propriétés cimentaires, et réagir aussi avec les C₃S et les C₂S pour former le carboaluminate de calcium hydraté (Domone P.L, 2007).

Cependant, les deux figures montrent que le superplastifiant utilisé a participé à réduire la résistance des mélanges. Ce résultat ne peut pas être généralisé pour toutes les additions organiques.

II.7.3 Sur l'optimisation des procédures de bétonnage par temps chaud : (Bella et Col., 2011)

- **Facteurs et leurs niveaux**

Tableau II. 7: niveaux des facteurs

Facteurs	Niveaux	
Fibre(FB)	0	-1
	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 :

- Evaporation.
- Retrait plastique
- Retrait total
- La résistance à la compression à 3 et 14 Jours

- Modèles et figures adoptées :

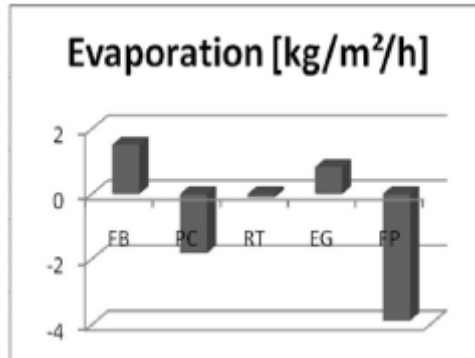


Figure II. 15:Evaporation.

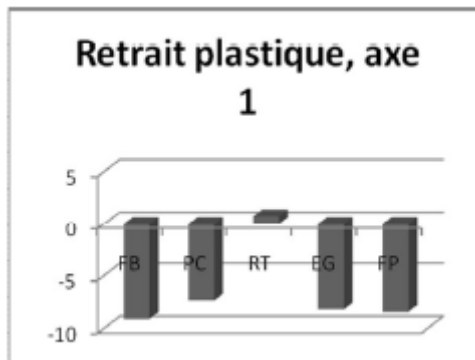


Figure II. 16: Retrait plastique.

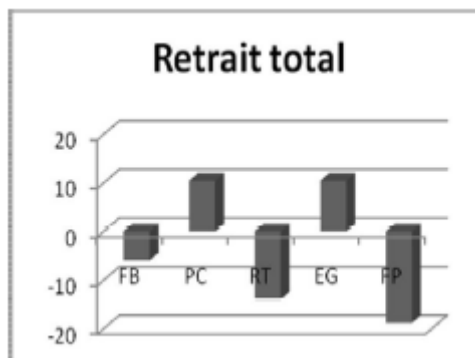


Figure II. 17: Retrait total.

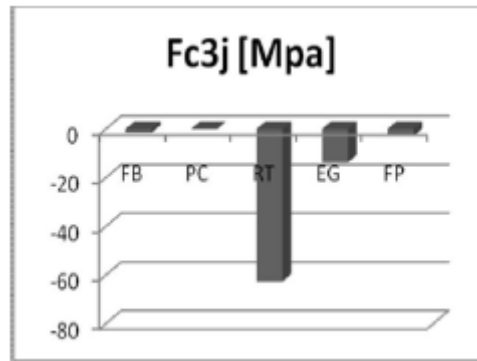


Figure II. 18: Résistance à la compression à 3J.

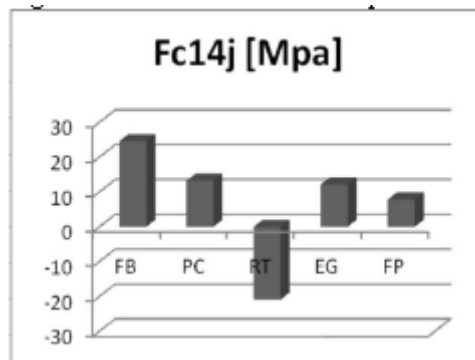


Figure II. 19: Résistance à la compression à 14J.

Pour la résistance à court terme (Figure II.17) l'effet du troisième facteur (retardateur) est le plus important avec une valeur égale à 62, ensuite l'eau glacée avec un effet moins important égale à 13, pour les autres facteurs leurs effets sont négligeables.

Tous les facteurs sont influents dans la résistance à moyen terme (14 jours) comme le montré la (Figure II.18), avec une influence importante des fibres avec un effet égal à 24, ensuite on a l'eau glacée et le produit de cure avec des effets supérieurs à 12, on trouve la couverture en film plastique avec un effet supérieur à 7, le retardateur à un effet négatif avec une valeur de (- 21).

Conclusion II.8

Les plans d'expériences offrent un simple et efficace de réduire le cout et d'augmenter la robustesse des études expérimentales effectuées lors de la conception ou de la variation d'un produit. Ils permettent d'utiliser toute la connaissance du produit dont le concepteur peut disposer a priori, offrent un cadre de modélisation rigoureux, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires.

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1 Introduction

Dans notre travail, nous avons utilisé des matériaux qui se trouvent dans notre région (Tlemcen). Le ciment utilisé est un CPJ – CEM II/A 42.5 en provenance de la cimenterie de Béni -Saf.

Les granulats utilisés proviennent de la carrière de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) de Sidi Abdelli (Tlemcen).

Nous avons procédé dans un premier temps à des essais de caractérisation dans le laboratoire du département de génie civil de l'université de Tlemcen.

III.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment

III.2.1 Composition chimique et minéralogique

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont résumées dans les Tableaux III.1 et III.2.

Tableau III. 1: Analyse chimique du ciment [L T P O]

Caractéristiques	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Perte au feu	Insolubles
Teneurs [%]	22,76	63,43	0,21	3,57	5,96	1,91	2,37	2,16

Tableau III. 2: Composition minéralogique du clinker selon Bogue [L T P O].

Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneurs [%]	39,86	35,20	9,75	10,86

III.2.1 Caractéristiques Physico mécaniques :

III.2.1.1 Masses volumiques (apparente et absolue)

Les masses volumiques (apparente et absolue) ont été déterminées conformément à la norme NF P 18-558. Nous avons utilisé deux méthodes pour le calcul de la masse volumique absolue, la méthode du densitomètre de Le Chatelier ainsi que celle du pycnomètre à liquide. La masse volumique mentionnée dans le tableau III.3 est la moyenne de trois essais réalisés.

Et nous avons réalisé trois essais pour chacune d'entre-elles.

Les résultats de la masse volumique, apparente et absolue sont récapitulés dans le tableau III.3

III.2.1.2 Essai de consistance

L'objectif de cet essai est de déterminer, pour le ciment CEM II/A 42.5 que nous avons utilisé, la quantité d'eau nécessaire pour obtenir la consistance désirée. Cette dernière a été mesurée par la sonde de Vicat conformément aux prescriptions de la norme NF EN 196-3.

Les résultats concernant la consistance sont résumés dans le tableau III.3

III.2.1.3 Essai de prise

L'objectif de cet essai est de déterminer le temps de prise d'un matériau finement moulu le ciment. Le temps de prise des ciments est déterminé par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment de consistance normalisée (pâte « normale ») et ceci jusqu'à une profondeur spécifiée (NF EN 196-3). L'appareil de Vicat permet d'estimer le temps qui sépare la mise en contact du ciment et de l'eau, le début de la prise (enfoncement de l'aiguille Vicat jusqu'à 4 mm du fond) et la fin de prise (enfoncement quasi nul)

Le temps de début de prise Vicat est indiqué sur le tableau III.3

Tableau III. 3: Caractéristiques physico - mécaniques du ciment

Masse volumique apparente (kg/m ³)	953
Masse volumique absolue (Densitomètre le Chatelier) (kg/m ³)	2980
Masse volumique absolue (pycnomètre à liquide) (kg/m ³)	2985
Consistance (%)	27.5
Le temps de début de prise	2h :55

III.2.2 Interprétation des résultats

Les masses volumiques (apparente et absolue) du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 [Normes Algériennes, 1992], compris entre 900 -1100 kg/m³ pour la masse volumique apparente et 2900 – 3150 kg/m³ pour la masse volumique absolue.

La consistance obtenue est conforme à la norme NF EN 196-3 où les valeurs sont généralement comprises entre 26 et 33%. De même, un temps de prise minimal de 60 minutes est prescrit par la norme NF P 15-301 pour les ciments de classe 42,5.

III.2.3 Agrégats (sable et graviers)

Les granulats utilisés proviennent d'une grande carrière de la région de Tlemcen, située à Sidi Abdelli, il s'agit de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ce choix est dicté par le fait que cette carrière approvisionne principalement la région de part son importance en production.

III.2.3.1 Analyse granulométrique

Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme NA 453 et les analyses granulométriques faites conformément à la norme EN 933-2.

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sur la figure III.1

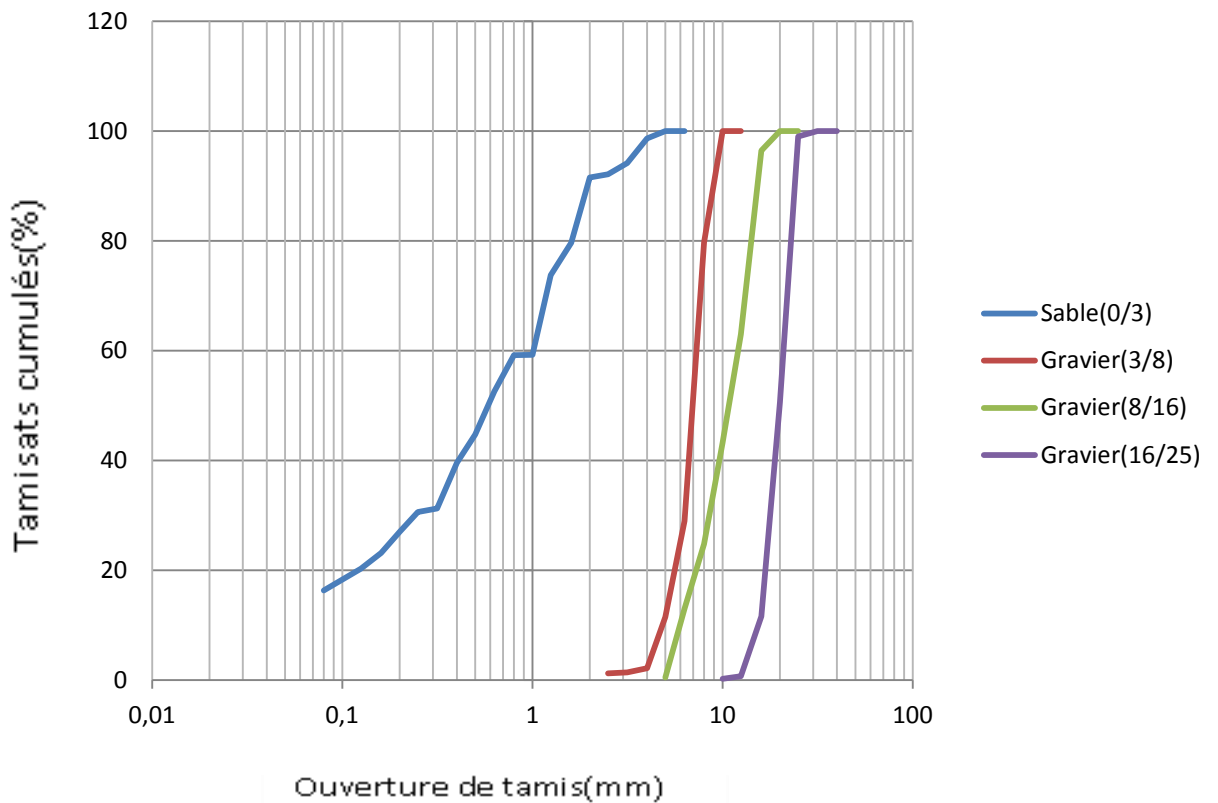


Figure III. 1: Courbes granulométriques des granulats (ENG)

L'analyse granulométrique nous a donné, une teneur en fines de 16.34% et un module de finesse de 2.99 pour le sable, comme indiqué sur le tableau III.4.

La carrière de l'ENG produit un sable avec un module de finesse respectif grossier avec de légère discontinuité (figures III.1). La norme P 18-541 fixe les limites pour le module de finesse de 1.8 à 3.2 selon les gisements et prescrit un module optimum de 2.5.

III.2.3.2. 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.

L'essai de propreté des granulats consiste à déterminer le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm conformément à la norme NF P18-591.

- **Essai de propreté des graviers**

Les graviers de carrière présente une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés. Les résultats des essais sont résumés dans le tableau III.4.

- **Essai d'équivalent de sable**

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...).

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme NFP 18-598.

Les essais nous ont donné un équivalent de sable de 84.45 %. La carrière de l'ENG produise donc un sable propre qui répond aux exigences de la norme P 18-541 qui fixe les limites à $ESV \geq 65$ et $ESP \geq 60$ pour les sables concassés ou broyés. Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau III.4.

III.2.4 Masses volumiques apparentes et absolues

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme NA 255. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé deux méthodes :

- Méthode de l'éprouvette graduée (simple et rapide, mais elle n'est pas très précise).
- Méthode du ballon (plus précis, mais plus délicat. Il n'y a plus de lectures de volumes, mais seulement des pesées).

Les graviers de la carrière présentent des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2500 kg/m^3 et 2700 kg/m^3 . Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le tableau III.4.

III.2.5 Foisonnement du sable

L'importance du foisonnement dépend du pourcentage d'humidité présent dans le sable et de la finesse de celui-ci. L'augmentation de volume d'un sable humide, par rapport au volume occupé par un sable saturé et sec en surface, croît en fonction de l'humidité du sable jusqu'à un taux de 5 à 8 % [Neville, 2000]. Sous l'effet d'une addition d'eau, les films fusionnent et l'eau se déplace vers les vides entre les grains entraînant une diminution du volume total du sable jusqu'à ce que, complètement saturé, son volume soit approximativement le même que celui du sable sec obtenu avec la méthode de remplissage du récipient. La figure III.2 illustre ce qui précède.

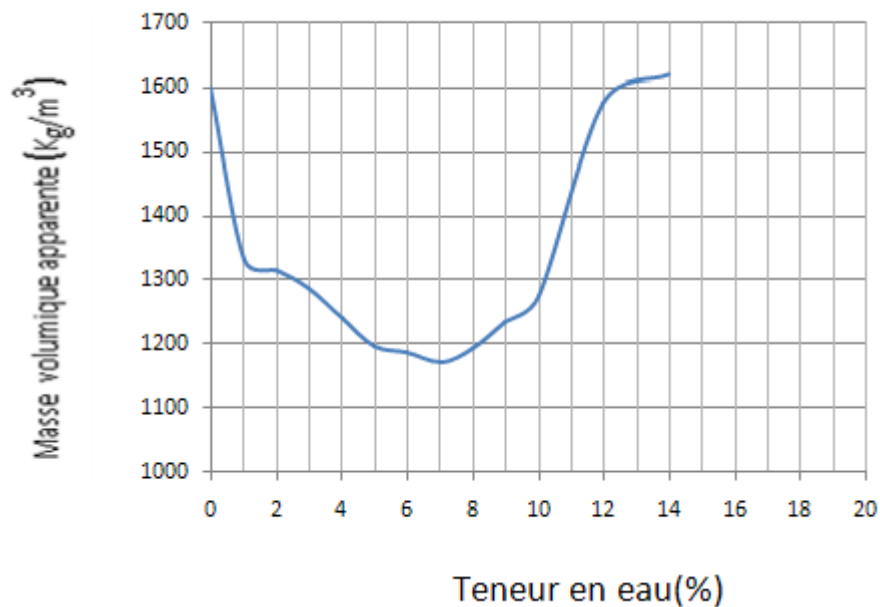


Figure III. 2: Courbe de foisonnement de sable (carrière ENG)

Les résultats concernant les caractéristiques géométriques, physico-chimiques, physiques et mécaniques des granulats utilisés sont récapitulés dans le tableau III.4

Tableau III. 4: Identification des propriétés des granulats de l'ENG

Les caractéristiques Des granulats	Classes granulaires			
	Sable (0/3)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	Gravier (16/25)
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1427	1350	1420	1370
Masse volumique absolue (kg/m^3)	$M_{vé}$	2500	2585	2587
	M_{vb}	2560		
Equivalent de sable(%)	84.45	-	-	-
Foisonnement de sable	$W_{opt}=7\%$ lui Correspond $\rho_{app}=1172.8 \text{ kg/m}^3$			
L'essai de propreté (impureté) (%)	-	1.09	0.73	0.50
Module de finesse	2.99	-	-	-
Teneur en fines(%)	16.34	-	-	-

$M_{vé}$: la masse volumique absolue (méthode de l'éprouvette graduée)

M_{vb} : la masse volumique absolue (méthode du ballon)

III.3 Caractérisation des bétons étudiés

III.3.1 caractérisation du béton à l'état frais

Pour chaque formulation étudiée, nous avons caractérisé les paramètres suivants:

III.3.1.1 L'affaissement

La mise en œuvre du béton frais pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectuée d'après la norme Algérienne NA 431. La figure III.3 présente une photo de cet essai permettant d'avoir la consistance du béton.



Figure III. 3: Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Affaissement égal à 4,8 cm)

III.3.1.2 Le volume d'air occlus

Nous avons déterminé la teneur en air de nos bétons en utilisant l'aéromètre par la méthode préssiométrique selon la norme (NF P18-353).



Figure III. 4: Aéromètre à béton

III.3.2 Confection des éprouvettes

III.3.2.1 Remplissage des moules

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément selon la norme en vigueur. Une fois le malaxage terminé, nous avons effectué l'essai d'affaissement. Par la suite, le béton a été mis dans des moules cylindriques 16x32 cm conformément à la norme NA 2600, au moyen d'une main écope. Pour chaque formulation, nous avons réalisé 3 éprouvettes.

III.3.2.2 Mise en place du béton

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

- lorsque l'affaissement mesuré est inférieur ou égale à 9, nous avons procédé à la mise en place du béton dans le moule cylindrique 16x32 cm en deux couches. Nous avons utilisé dans ce cas la table vibrante comme moyen de serrage, et ceci conformément à la norme NF P 18-422.

- lorsque l'affaissement mesuré est supérieur ou égale à 10, nous avons procédé à la mise en place du béton en deux couches d'égale importance par piquage à raison de 10 coups par couche, conformément à la norme NF P 18-423.

Enfin, nous procédons à l'arasement de la surface supérieure de l'éprouvette à l'aide d'une règle d'arasement, conformément à la norme NF P 18-404.

III.3.2.3 Conservation des éprouvettes

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un seul mode de conservation du béton. Les éprouvettes ont été totalement immergées dans l'eau à une température ambiante de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (figure III.5), conformément à la norme NA 426.



Figure III. 5: Conservation des éprouvettes

III.3.3 Caractérisation du béton à l'état durci

La résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton avec les indicateurs de durabilité sont les éléments clés pour une durabilité des structures en béton.

A 28 jours, chaque éprouvette réalisée a été soumise aux essais suivants:

III.3.3.1 Mesure de la masse volumique apparente

Après avoir essuyé les éprouvettes, nous les avons pesées pour pouvoir calculer leurs masses volumiques apparentes.

III.3.3.2 Essai de résistance à la compression

III.3.3.2.1 Surfaçage des faces de chargement

Nous avons procédé au surfaçage des éprouvettes à l'aide du soufre conformément aux exigences de la norme. Il adhère convenablement au béton et ne l'affecte en aucun cas.

Le surfaçage a pour but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement ainsi que l'orthogonalité de celles-ci par rapport aux génératrices du cylindre (figure III.6). Toutefois, il permet aussi de diminuer le frettage.



Figure III. 6: Appareil de surfaçage des éprouvettes

III.3.3.2 Conduite de l'essai

L'essai pour la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, est exécuté conformément aux prescriptions de la norme NA 427. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai (figure III.7) avec une précision de 0.5 MPa.



Figure III. 7: Machine d'essai de compression

III.4 Conclusion

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 et sa consistance est conforme à la norme NF EN 196-3.

Les essais réalisés, sur les granulats de carrière choisie, ont présenté de bonnes propriétés physiques, physico- chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme P 18-541. L'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, de résistances et de durabilité.

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSE DES RESULTATS

IV.1 Mise en application des plans d'expériences :

IV.2.1 Facteurs :

Les facteurs ciblés par cette recherche sont les composants principaux nécessaires à la confection du béton : Eau, ciment, sable, graviers et air occlus, plus précisément : Volume d'eau (**E**), quantité de ciment (**C**), quantité de sable (**S**), quantité des graviers(**G**), pourcentage d'air occlus (**A**), le tout par unité de volume du mélange à l'état frais.

IV.2.2 Niveaux des facteurs :

Le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé en se basant sur les travaux de recherche du Docteur Boukli Hacène [S.M.A Boukli Hacene, 2010] Une série de formulations a été donc effectuée.

Tableau IV. 1: niveaux des facteurs

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

IV.2.3 Choix du plan d'expérience pour notre étude :

Avec un plan de cinq facteurs à deux niveaux, nous avons un nombre d'essai égal à $2^5 = 32$, et vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis.

Plan factoriel complet 2^5 (cinq facteurs à deux niveaux)

La matrice des effets selon le plan factoriel choisi est comme suit :

Tableau IV. 2:Matrice des effets.

N ^o ESSAI	CIMENT	EAU	SABLE	GRAVIERS	AIR OCCLUS
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1
20	1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	1	-1	1
22	1	-1	1	-1	1
23	-1	1	1	-1	1
24	1	1	1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	1
26	1	-1	-1	1	1
27	-1	1	-1	1	1
28	1	1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	1
30	1	-1	1	1	1
31	-1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1

IV.2.4 Interactions

- **D'ordre trois :**

Pour le plan factoriel (C, E, S, G, A), les interactions sont les suivantes :

C*E, C*S, C*G, C*A, E*S, E*G, E*A, S*G, S*A, G*A, C*E*S, C*E*G, C*E*A, E*S*G, E*S*A, S*G*A

Matrice des effets

Tableau IV. 3: Matrice générale des effets et leur interaction

N ⁰	C	E	S	G	A	CE	CS	CG	CA	ES	EG	EA	SG	SA	GA
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
5	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
8	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
9	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
16	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
18	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1
19	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1
20	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
21	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
23	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
24	1	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
25	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
26	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
27	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
28	1	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
29	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
30	1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
31	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

MODELISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES

N°	CES	CEG	CEA	ESG	ESA	SGA
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	1	1	-1	-1	-1
3	1	1	1	1	1	-1
4	-1	-1	-1	1	1	-1
5	1	-1	-1	1	1	1
6	-1	1	1	1	1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1
8	1	-1	-1	-1	-1	1
9	-1	1	-1	1	-1	1
10	1	-1	1	1	-1	1
11	1	-1	1	-1	1	1
12	-1	1	-1	-1	1	1
13	1	1	-1	-1	1	-1
14	-1	-1	1	-1	1	-1
15	-1	-1	1	1	-1	-1
16	1	1	-1	1	-1	-1
17	-1	-1	1	-1	1	1
18	1	1	-1	-1	1	1
19	1	1	-1	1	-1	1
20	-1	-1	1	1	-1	1
21	1	-1	1	1	-1	-1
22	-1	1	-1	1	-1	-1
23	-1	1	-1	-1	1	-1
24	1	-1	1	-1	1	-1
25	-1	1	1	1	1	-1
26	1	-1	-1	1	1	-1
27	1	-1	-1	-1	-1	-1
28	-1	1	1	-1	-1	-1
29	1	1	1	-1	-1	1
30	-1	-1	-1	-1	-1	1
31	-1	-1	-1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1

IV.1 Formulations des bétons étudiés

A partir du plan factoriel établi, les formulations des bétons dans le domaine d'étude sont établies comme suit :

Tableau IV. 4: Formulations des bétons constituées

Formulations	Ciment (kg/m³)	Eau (kg/m³)	Sable (kg/m³)	Gravier (kg/m³)	Air occlus (%)
1	300	165	600	1030	0.5
2	400	165	600	1030	0.5
3	300	225	600	1030	0.5
4	400	225	600	1030	0.5
5	300	165	700	1030	0.5
6	400	165	700	1030	0.5
7	300	225	700	1030	0.5
8	400	225	700	1030	0.5
9	300	165	600	1150	0.5
10	400	165	600	1150	0.5
11	300	225	600	1150	0.5
12	400	225	600	1150	0.5
13	300	165	700	1150	0.5
14	400	165	700	1150	0.5
15	300	225	700	1150	0.5
16	400	225	700	1150	0.5
17	300	165	600	1030	3.0
18	400	165	600	1030	3.0
19	300	225	600	1030	3.0
20	400	225	600	1030	3.0
21	300	165	700	1030	3.0
22	400	165	700	1030	3.0
23	300	225	700	1030	3.0
24	400	225	700	1030	3.0
25	300	165	600	1150	3.0
26	400	165	600	1150	3.0
27	300	225	600	1150	3.0
28	400	225	600	1150	3.0
29	300	165	700	1150	3.0
30	400	165	700	1150	3.0
31	300	225	700	1150	3.0
32	400	225	700	1150	3.0

IV.3 L'air occlus

IV.3.1 Introduction

Le volume d'air occlus (VAO) dépend de plusieurs facteurs tels que : dosage en eau, ciment, la forme des granulats, la granulométrie du mélange, les moyens de serrage. L'estimation de ce paramètre par des modèles est donc nécessaire.

La mesure du volume d'air occlus sera effectuée sur toutes les gâchés de béton à l'aide d'un aéromètre à béton d'une capacité de 5 litres. Une fois les résultats obtenus, ils seront utilisés pour construire un modèle mathématique prédictif reliant le VAO aux composants du mélange.

IV.3.2 Résultats des essais: (Volume de l'air occlus)

Pour chaque formulation nous avons mesuré le pourcentage d'air occlus que nous résumons sur le tableau IV.5.

Tableau IV. 5: Résultats des essais(VAO).

N° formulations	VAO (%)
1	1,1
2	1,3
3	0,8
4	0,9
5	1,4
6	1,8
7	0,9
8	1,2
9	1,2
10	1,9
11	0,8
12	1,2
13	1,7
14	2
15	1
16	1,2
17	1,3
18	2,3
19	0,8
20	1,7
21	1,5
22	2,1
23	1,2

24	0,9
25	1
26	1,7
27	0,4
28	0,8
29	1,6
30	2,3
31	0,8
32	1

IV.3.3 Analyse des résultats

Pour l'analyse des résultats nous avons utilisé le logiciel spécialisé en statistique et plan d'expérience « MINITAB Ver. 16.0). Ce logiciel est performant pour les calculs de régression et de validation.

a. Modélisation

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$VAO(\%)=A_0+A_1.C+A_2.E+A_3.S+A_4.G+A_5.A+A_{12}.C.E+A_{13}.C.S+A_{14}.C.G+A_{15}.C.A+A_{23}.E.S+A_{24}.E.G+A_{25}.E.A+A_{34}.S.G+A_{35}.S.A+A_{45}.G.A+A_{123}.C.E.S+A_{124}.C.E.G+A_{125}.C.E.A+A_{234}.E.S.G+A_{235}.E.S.A+A_{345}.S.G.A$$

b. Détermination des coefficients du modèle :(Ai)

Les coefficients du modèle sont obtenus par le logiciel à l'aide d'une régression multiple.

Volume d'air occlus: (VAO)

MODELISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES

Analyse de régression : VAO en fonction de : **C ; E ; S ; G ; A ; CE ; CS ; CG ; ES ; EG ; EA ; SG ; SA ; GA.CES, CEG, CEA, ESG, ESA, SGA**

Estimated Effects and Coefficients for VAO (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		1,3063	0,03653	35,76	<u>0,000</u>
C	0,4250	0,2125	0,03653	5,82	<u>0,001</u>
E	-0,6625	-0,3312	0,03653	-9,07	<u>0,000</u>
S	0,2125	0,1063	0,03653	2,91	<u>0,027</u>
G	-0,0375	-0,0187	0,03653	-0,51	0,626
A	0,0625	0,0312	0,03653	0,86	0,425
C*E	-0,1500	-0,0750	0,03653	-2,05	<u>0,086</u>
C*S	-0,1250	-0,0625	0,03653	-1,71	<u>0,138</u>
C*G	0,0250	0,0125	0,03653	0,34	0,744
C*A	0,1000	0,0500	0,03653	1,37	0,220
E*S	-0,1125	-0,0563	0,03653	-1,54	<u>0,175</u>
E*G	-0,1125	-0,0563	0,03653	-1,54	<u>0,175</u>
E*A	-0,1125	-0,0563	0,03653	-1,54	<u>0,175</u>
S*G	0,1125	0,0562	0,03653	1,54	<u>0,175</u>
S*A	-0,0375	-0,0188	0,03653	-0,51	0,626
G*A	-0,2375	-0,1187	0,03653	-3,25	<u>0,017</u>
C*E*S	-0,0500	-0,0250	0,03653	-0,68	0,519
C*E*G	-0,0000	-0,0000	0,03653	-0,00	1,000
C*E*A	-0,0750	-0,0375	0,03653	-1,03	0,344
C*S*G	0,0250	0,0125	0,03653	0,34	0,744
C*S*A	-0,1000	-0,0500	0,03653	-1,37	0,220
C*G*A	-0,0500	-0,0250	0,03653	-0,68	0,519
E*S*G	-0,0125	-0,0062	0,03653	-0,17	0,870
E*S*A	-0,0125	-0,0063	0,03653	-0,17	0,870
E*G*A	-0,0125	-0,0062	0,03653	-0,17	0,870
S*G*A	0,1625	0,0813	0,03653	2,22	<u>0,068</u>

$R^2 = 96,47\%$

MODELE 01 (valeurs codées)

VAO(%)=1.3063 + 0.2125 C - 0.3312 E + 0.1063 S - 0.0187 G + 0.0312 A - 0.0750.(CE) - 0.0625.(CS) + 0.0125.(CG) + 0.05.(CA) - 0.0563.(ES) - 0.0563.(EG) - 0.0563.(EA) + 0.0562.(SG) - 0.0188.(SA) - 0.1187.(GA) - 0.0250.(CES) - 0.0375.(CEA) + 0.0125.(CSG) - 0.05.(CSA) - 0.0250.(CGA) - 0.0062.(ESG) - 0.0063.(ESA) - 0.0062.(EGA) + 0.0813.(SGA)

$R^2 = 96,47\%$

MODELISATION DES BETONS ORDINAIRES PAR DES PLANS D'EXPERIENCES

Estimated Coefficients for VAO using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-16,2818
Ciment	<u>0,003358</u>
Eau	<u>-0,078854</u>
Sable	<u>0,022948</u>
Graviers	0,0246771
Air occlus	8,74792
Ciment*Eau	<u>0,000201667</u>
Ciment*Sable	<u>-2,28333E-05</u>
Ciment*Graviers	-3,83333E-05
Ciment*Air occlus	0,0223667
Eau*Sable	<u>0,000160694</u>
Eau*Graviers	<u>0,000018750</u>
Eau*Air occlus	<u>0,0106944</u>
Sable*Graviers	<u>-3,47917E-05</u>
Sable*Air occlus	-0,0176667
Graviers*Air occlus	<u>-0,0127917</u>
Ciment*Eau*Sable	-3,33333E-07
Ciment*Eau*Graviers	-1,07752E-20
Ciment*Eau*Air occlus	-2,00000E-05
Ciment*Sable*Graviers	8,33333E-08
Ciment*Sable*Air occlus	-1,60000E-05
Ciment*Graviers*Air occlus	-6,66667E-06
Eau*Sable*Graviers	-6,94444E-08
Eau*Sable*Air occlus	-3,33333E-06
Eau*Graviers*Air occlus	-2,77778E-06
Sable*Graviers*Air occlus	<u>2,16667E-05</u>

$R^2 = 96,47\%$

MODELE 01 (valeurs non codées)

$VAO(\%) = -16,2818 + 0,003358C - 0,078854 E + 0,022948 S + 0,0246771 G + 8,74792 A + 0,000201667.(CE) - 2,28333E-05.(CS) - 3,83333E-05.(CG) + 0,0223667.(CA) + 0,000160694.(ES) + 0,000018750.(EG) + 0,0106944.(EA) - 3,47917E-05.(SG) - 0,0176667.(SA) - 0,0127917.(GA) - 3,33333E-07.(CES) - 1,07752E-20.(CEG) - 2,00000E-05.(CEA) + 8,33333E-08.(CSG) - 1,60000E-05.(CSA) - 6,66667E-06.(CGA) - 6,94444E-08.(ESG) - 3,33333E-06.(ESA) - 2,77778E-06.(EGA) + 2,16667E-05.(SGA)$

$R^2 = 96,47\%$

c. Signification des facteurs :

A partir des résultats du logiciel la signification des coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « P » [Plans d'expériences (2003)]:

- $p \leq 0.01$ très significatif.

- $p \leq 0.05$ significatif.
- $p \leq 0.1$ peu significatif.
- $p > 0.1$ très peu à non significatif.

Une nouvelle régression est relancée en éliminant les facteurs et interactions non Significatifs (des facteurs et interactions avec un $p \geq 0.2$).

Analyse de régression : VAO en fonction de : **C ; E ; S ; CE ; CS ; ES ; EG ; EA ; SG ; GA ; SGA**

Estimated Effects and Coefficients for VAO (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		1,3062	0,03023	43,22	0,000
C	0,4250	0,2125	0,03023	7,03	0,000
E	-0,6625	-0,3312	0,03023	-10,96	0,000
S	0,2125	0,1063	0,03023	3,52	0,002
G	-0,0375	-0,0187	0,03023	-0,62	0,543
A	0,0625	0,0312	0,03023	1,03	0,315
C*E	-0,1500	-0,0750	0,03023	-2,48	0,023
C*S	-0,1250	-0,0625	0,03023	-2,07	0,053
E*S	-0,1125	-0,0563	0,03023	-1,86	0,079
E*G	-0,1125	-0,0563	0,03023	-1,86	0,079
E*A	-0,1125	-0,0563	0,03023	-1,86	0,079
S*G	0,1125	0,0562	0,03023	1,86	0,079
G*A	-0,2375	-0,1187	0,03023	-3,93	0,001
S*G*A	0,1625	0,0813	0,03023	2,69	0,015

$R^2 = 92,75\%$

MODELE 02 (en valeurs codées)

VAO(%) = 1.3063 + 0.2125 C - 0.3312 E + 0.1063 S - 0.0750.(CE) - 0.0625.(CS) - 0.0563.(ES) - 0.0563.(EG) - 0.0563.(EA) + 0.0562.(SG) - 0.1187.(GA) + 0.0813.(SGA)

$R^2 = 92,75\%$

Estimated Coefficients for VAO using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-16,2818
Ciment	0,003358
Eau	-0,078854
Sable	0,022948
Graviers	0,0246771
Air occlus	8,74792
Ciment*Eau	0,000201667
Ciment*Sable	-2,28333E-05
Eau*Sable	0,000160694
Eau*Graviers	0,000018750
Eau*Air occlus	0,0106944
Sable*Graviers	-3,47917E-05
Graviers*Air occlus	-0,0127917
Sable*Graviers*Air occlus	2,16667E-05

$R^2 = 92,75\%$

MODELE 02 (en valeurs non codées)

VAO(%)=-16,2818+ 0,003358C -0,078854 E + 0,022948 S +0,000201667. (CE) -2,28333E-05. (CS) + 0,000160694. (ES) +0,000018750. (EG) + 0,0106944. (EA) -3,47917E-05. (SG) - 0,0176667. (SA) -0,0127917. (GA) + 2,16667E-05. (SGA)

d. La validation du modèle

Les résultats du volume d'air occlus obtenus au point central

Tableau IV. 6: Résultats des essais(VAO) au point central.

Formulations	Volume d'air occlus moyenne (%)
1	1
2	1.3
3	1

$$\check{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{3} (1 + 1 + 1.3) = 1.1$$

$$V(y) = s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\check{y}_0 - y_{0i})^2 = \frac{1}{3-1} [(1.1 - 1)^2 + (1.1 - 1)^2 + (1.1 - 1.3)^2]$$

$$V(y) = 0.03$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{V(y)}{N}} = 0.0306$$

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y) = 1.3063 \pm 9.92 * 0.0306 u$$

$$\left[\begin{array}{l} 1.0 < 1.1 < 1.6 \\ R^2 = 96.47 \% > 0.65 \end{array} \right] \Rightarrow \text{la validation du modèle VAO}$$

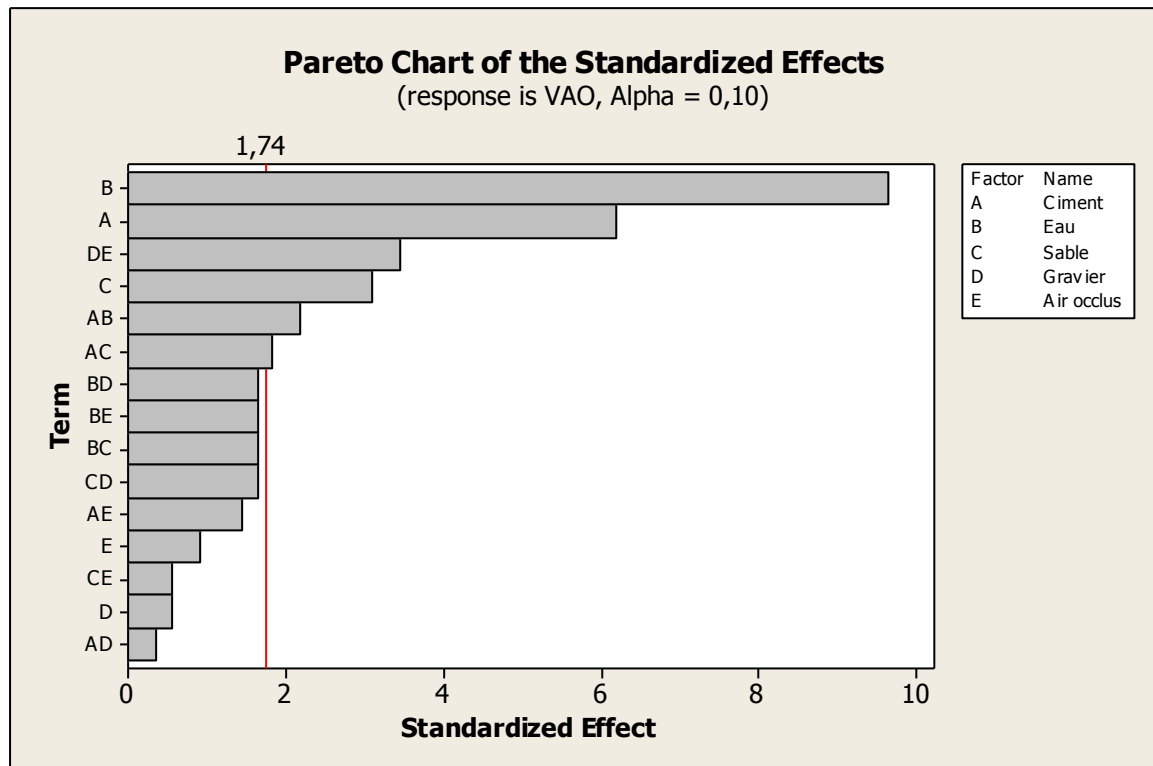


Figure IV. 1: Diagramme de Pareto des effets normalisés de volume d'air occlus

A partir du diagramme de Pareto (figure IV.1) et du modèle établi, il est clair que l'influence de l'eau est la plus importante suivi du dosage en ciment, et ensuite par divers effets couplés de ces paramètres. Ces résultats rejoignent ceux de Kaoua (2008).

L'accroissement du dosage en sable influe aussi le volume d'air occlus en l'augmentant. Cependant, nous avons remarqué que les graviers n'ont pas d'influence significative sur le volume d'air occlus. En outre, l'interaction (S*G) a un effet non négligeable sur cette réponse (VAO) ; cela veut dire que le rapport G*S est un paramètre influant sur le volume d'air occlus.

En conclusion, on peut mentionner que l'augmentation du volume d'air occlus est proportionnelle à l'augmentation des constituants ayant une granulométrie plus fines (ciment, sable), raison pour laquelle la porosité augmente lorsqu'il n'y a plus de particules fines dans le mélange.

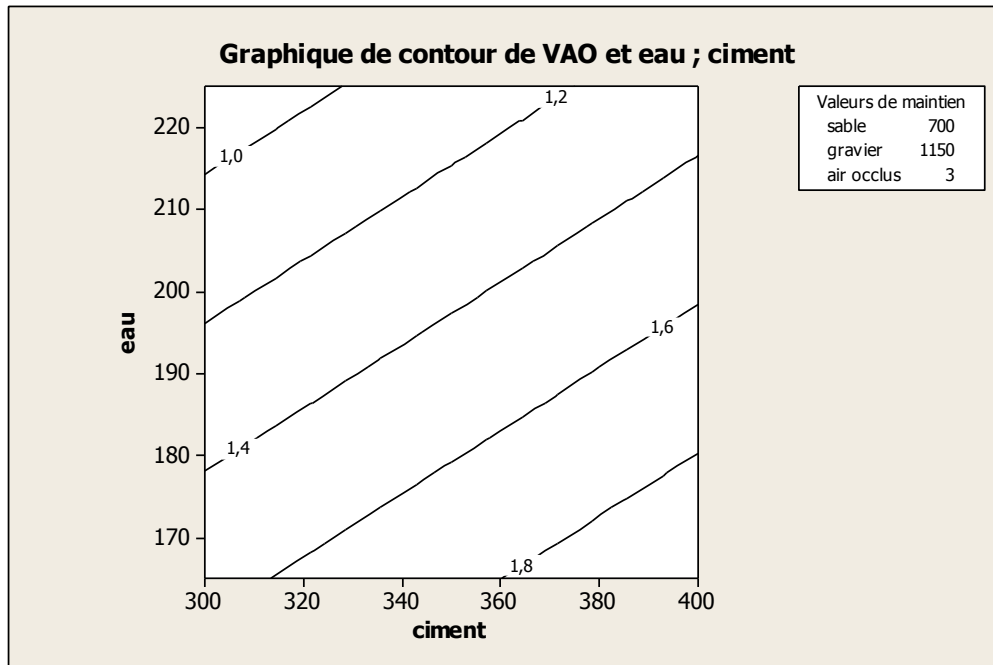


Figure IV. 2: Iso-réponse de volume d'air occlus en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=700 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$)

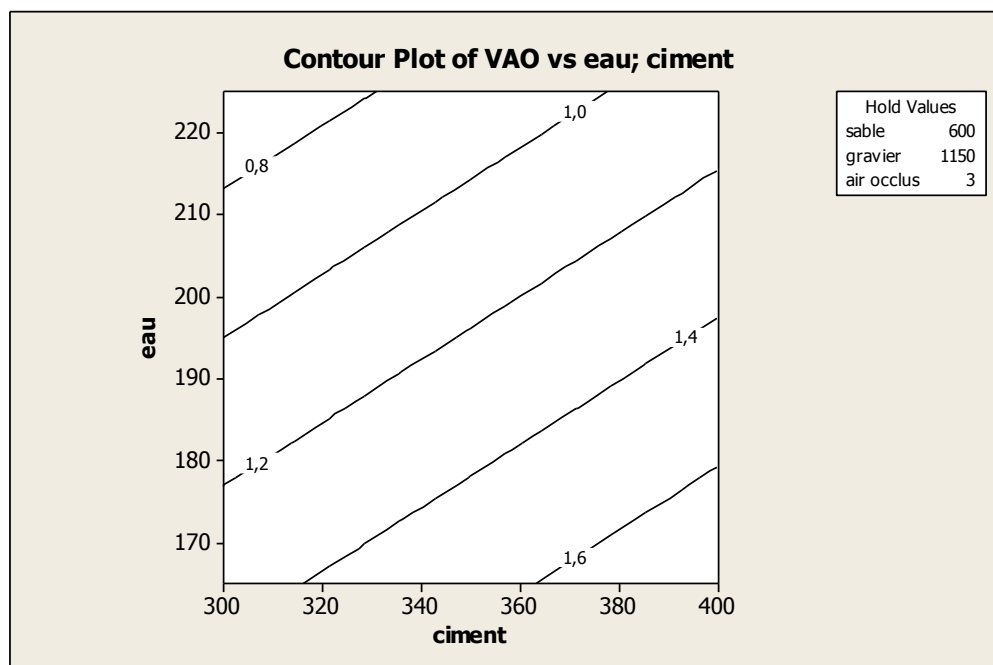


Figure IV. 3: Iso-réponse de volume d'air occlus en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=600 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$)

Les (figures IV.2 et IV.3) montrent clairement que les bétons contenant plus de sable nécessitent un plus grand dosage en eau pour un volume d'air occlus maintenu

constant. Par exemple pour un dosage en ciment constant égale à 380kg/m^3 , un dosage en gravier de 1150kg/m^3 et un dosage du sable de 600kg/m^3 , le volume d'air occlus prend une valeur de 1.4% pour un dosage d'eau de 190l/m^3 . Cependant 210l/m^3 d'eau est nécessaire pour avoir le même volume d'air occlus avec un béton formulé de 700kg/m^3 de sable. Cela montre que le sable adsorbe l'eau.

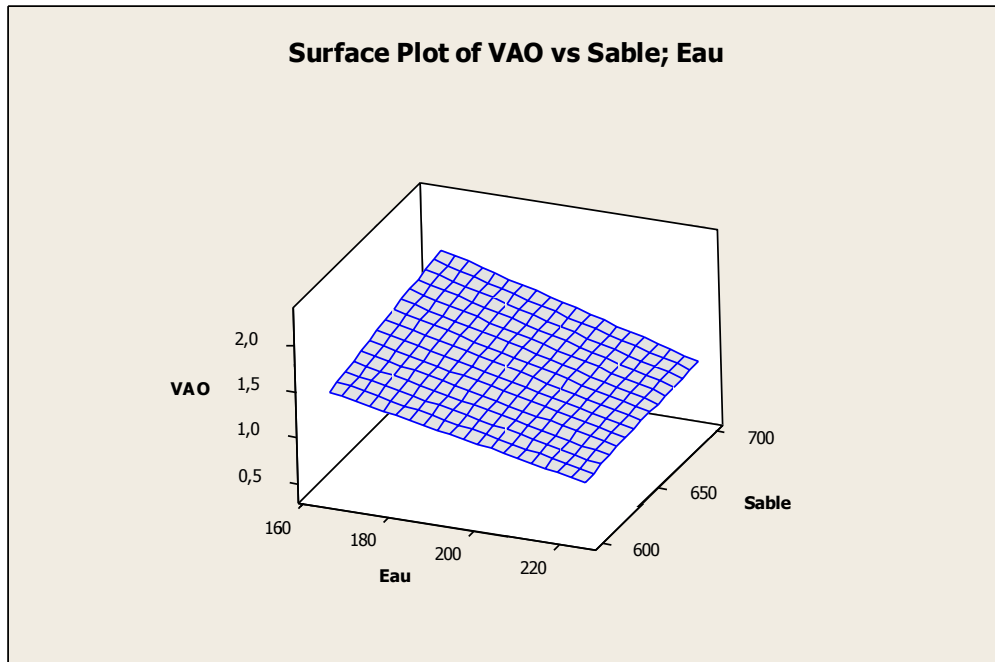


Figure IV. 4: Surface de réponse de volume d'air occlus en fonction d'eau et de sable ($C=350\text{kg/m}^3$, $G=1090\text{kg/m}^3$)

La figure IV.4 montre que pour un dosage en ciment et en gravier donnés, l'augmentation du dosage en eau et la diminution du dosage en sable entraîne une diminution de volume d'air occlus.

IV.4 Affaissement

IV.4.1 Introduction

L'affaissement (Aff) dépend de plusieurs facteurs tels que : dosage en eau, ciment, la forme des granulats. C'est la caractéristique la plus importante pour un béton à l'état frais afin de justifier le moyen de serrage. Il est donc nécessaire de trouver le modèle pour prédire cette caractéristique.

Comme pour la mesure de la réponse précédente, la détermination de l'affaissement sera effectuée sur toutes les formulations à l'aide d'un cône d'Abrams. Une fois les résultats obtenus, ils seront utilisés pour construire un modèle mathématique prédictif reliant l'affaissement aux composants du mélange.

IV.4.2 Résultats des essais: (Affaissement)

Nous avons procédé à une seule lecture de l'affaissement pour chaque formulation (essai) et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau IV.7.

Tableau IV. 7: Résultats des essais: (Affaissement)

N° formulations	Affaissement (cm)
1	6
2	0,5
3	18
4	9
5	2
6	0,5
7	15,8
8	10
9	1
10	0,3
11	17
12	14
13	0,8
14	0,1
15	16
16	6
17	2,8
18	0,5
19	19
20	10
21	0,5
22	0,1
23	16
24	11,3
25	0,5
26	0,2
27	18
28	15,5
29	0,9
30	0
31	16
32	7

IV.4.3 Analyse des résultats

a. Modélisation

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$\text{Aff (cm)} = A_0 + A_1.C + A_2.E + A_3.S + A_4.G + A_5.A + A_{12}.C.E + A_{13}.C.S + A_{14}.C.G + A_{15}.C.A + A_{23}.E.S + A_{24}.E.G + A_{25}.E.A + A_{34}.S.G + A_{35}.S.A + A_{45}.G.A + A_{123}.C.E.S + A_{124}.C.E.G + A_{125}.C.E.A + A_{234}.E.S.G + A_{235}.E.S.A + A_{345}.S.G.A$$

b. Détermination des coefficients du modèle :(Ai)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée sur le logiciel d'analyse statistique MINITAB 16.

Affaïssement: (Aff)

Analyse de régression : Aff en fonction de : C ; E ; S ; G ; A ; CE ; CS ; CG ; ES ; EG ; EA ; SG ; SA ; GA.CES, CEG, CEA, ESG, ESA, SGA

Estimated Effects and Coefficients for AFFAÏSSEMENT (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		7,353	0,2034	36,14	0,000
C	-4,081	-2,041	0,2034	-10,03	0,000
E	12,619	6,309	0,2034	31,01	0,000
S	-1,831	-0,916	0,2034	-4,50	0,004
G	-0,544	-0,272	0,2034	-1,34	0,230
A	0,081	0,041	0,2034	0,20	0,848
C*E	-2,544	-1,272	0,2034	-6,25	0,001
C*S	-0,044	-0,022	0,2034	-0,11	0,918
C*G	0,694	0,347	0,2034	1,71	0,139
C*A	0,444	0,222	0,2034	1,09	0,317
E*S	-0,969	-0,484	0,2034	-2,38	0,055
E*G	0,594	0,297	0,2034	1,46	0,195
E*A	0,794	0,397	0,2034	1,95	0,099
S*G	-0,631	-0,316	0,2034	-1,55	0,172
S*A	-0,006	-0,003	0,2034	-0,02	0,988
G*A	0,281	0,141	0,2034	0,69	0,515
C*E*S	-0,706	-0,353	0,2034	-1,74	0,133
C*E*G	-0,194	-0,097	0,2034	-0,48	0,651
C*E*A	-0,119	-0,059	0,2034	-0,29	0,780
C*S*G	-1,719	-0,859	0,2034	-4,22	0,006
C*S*A	-0,069	-0,034	0,2034	-0,17	0,871
C*G*A	-0,231	-0,116	0,2034	-0,57	0,590
E*S*G	-1,444	-0,722	0,2034	-3,55	0,012
E*S*A	-0,244	-0,122	0,2034	-0,60	0,571
E*G*A	-0,281	-0,141	0,2034	-0,69	0,515
S*G*A	-0,106	-0,053	0,2034	-0,26	0,803

R² = 99,49%

MODELE 01 (valeurs codées)

$$\text{Aff (cm)} = 7.353 - 2.041 C + 6.309 E - 0.916 S - 0.272 G + 0.041 A - 1.272.(CE) - 0.022.(CS) + 0.347.(CG) + 0.222.(CA) - 0.484.(ES) + 0.297.(EG) + 0.397.(EA) - 0.316.(SG) - 0.003.(SA) + 0.141.(GA) - 0.353.(CES) - 0.097.(CEG) - 0.059.(CEA) - 0.859.(CSG) - 0.034.(CSA) - 0.116.(CGA) - 0.722.(ESG) - 0.122.(ESA) - 0.141.(EGA) - 0.053.(SGA)$$

$$R^2 = 99,49\%$$

Estimated Coefficients for affaissement using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	2812,31
Ciment	<u>-4,96884</u>
Eau	<u>-6,85842</u>
Sable	<u>-4,10531</u>
Graviers	-2,46188
Air occlus	-53,2719
Ciment*Eau	<u>0,00344118</u>
Ciment*Sable	0,00717342
Ciment*Graviers	<u>0,00410344</u>
Ciment*Air occlus	0,0504833
Eau*Sable	<u>0,0101815</u>
Eau*Graviers	<u>0,00586458</u>
Eau*Air occlus	<u>0,132042</u>
Sable*Graviers	<u>0,00348885</u>
Sable*Air occlus	0,0319167
Graviers*Air occlus	0,0340625
Ciment*Eau*Sable	<u>-4,70833E-06</u>
Ciment*Eau*Graviers	-1,07639E-06
Ciment*Eau*Air occlus	-3,16667E-05
Ciment*Sable*Graviers	<u>-5,72917E-06</u>
Ciment*Sable*Air occlus	-1,10000E-05
Ciment*Graviers*Air occlus	-3,08333E-05
Eau*Sable*Graviers	<u>-8,02083E-06</u>
Eau*Sable*Air occlus	-6,50000E-05
Eau*Graviers*Air occlus	-6,25000E-05
Sable*Graviers*Air occlus	-1,41667E-05

$$R^2 = 99,49\%$$

MODELE 01 (valeurs non codées)

$$\text{Aff (cm)} = 2812,31 - 4,96884C - 6,85842E - 4,10531S - 2,46188 G - 53,2719A + 0,00344118.(CE) + 0,00717342.(CS) + 0,00410344.(CG) + 0,0504833.(CA) + 0,0101815.(ES) + 0,00586458.(EG) + 0,132042.(EA) - 0,00348885.(SG) + 0,0319167.(SA) + 0,0340625.(GA) - 4,70833E-06.(CES) - 1,07639E-06.(CEG) - 3,16667E-05.(CEA) - 5,72917E-06.(CSG) - 1,10000E-05.(CSA) - 3,08333E-05.(CGA) - 8,02083E-06.(ESG) - 6,50000E-05.(ESA) - 6,25000E-05.(EGA) - 1,41667E-05.(SGA)$$

$$R^2 = 99,49\%$$

c. Signification des facteurs :

La signification des coefficients des facteurs et des interactions est toujours déterminée suivant la valeur obtenue de « P » [Plans d'expériences (2003)]:

- $p \leq 0.01$ très significatif.
- $p \leq 0.05$ significatif.
- $p \leq 0.1$ peu significatif.
- $p > 0.1$ très peu à non significatif.

Une nouvelle régression est relancée en éliminant les facteurs et interactions non Significatifs (des facteurs et interactions avec un $p \geq 0.2$).

Analyse de régression :

Aff en fonction de : **C ; E ; S ; CE ; CG ; ES ; EG ; EA ; SG ; CES; CSG;ESG**

Estimated Effects and Coefficients for AFFAISSEMENT (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		7,353	0,1500	49,01	0,000
C	-4,081	-2,041	0,1500	-13,60	0,000
E	12,619	6,309	0,1500	42,05	0,000
S	-1,831	-0,916	0,1500	-6,10	0,000
G	-0,544	-0,272	0,1500	-1,81	0,088
A	0,081	0,041	0,1500	0,27	0,790
C*E	-2,544	-1,272	0,1500	-8,48	0,000
C*G	0,694	0,347	0,1500	2,31	0,034
E*S	-0,969	-0,484	0,1500	-3,23	0,005
E*G	0,594	0,297	0,1500	1,98	0,064
E*A	0,794	0,397	0,1500	2,64	0,017
S*G	-0,631	-0,316	0,1500	-2,10	0,051
C*E*S	-0,706	-0,353	0,1500	-2,35	0,031
C*S*G	-1,719	-0,859	0,1500	-5,73	0,000
E*S*G	-1,444	-0,722	0,1500	-4,81	0,000

$R^2 = 99,22\%$

MODELE 02 : (Valeurs codées)

Aff (cm)=7.353 - 2.041 C + 6.309 E - 0.916S - 1.272.(CE)+0.347.(CG)-0.484.(ES) + 0.297.(EG) + 0.397.(EA) - 0.316.(SG) - 0.353.(CES) - 0.859.(CSG) - 0.722.(ESG)

$R^2 = 99,22\%$

Estimated Coefficients for affaissement using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	2812,31
Ciment	-4,96884
Eau	-6,85842
Sable	-4,10531
Ciment*Eau	0,00344118
Ciment*Graviers	0,00410344
Eau*Sable	0,0101815
Eau*Graviers	0,00586458
Eau*Air occlus	0,132042
Sable*Graviers	0,00348885
Ciment*Eau*Sable	-4,70833E-06
Ciment*Sable*Graviers	-5,72917E-06
Eau*Sable*Graviers	-8,02083E-06

MODELE 02 (valeurs non codées)

$$\text{Aff (cm)} = 2812,31 - 4,96884C - 6,85842E - 4,10531S + 0,00344118.(CE) + 0,00410344.(CG) + 0,0101815.(ES) + 0,00586458.(EG) + 0,132042.(EA) - 0,00348885.(SG) - 4,70833E-06.(CES) - 5,72917E-06.(CSG) - 8,02083E-06.(ESG)$$

$$R^2 = 99,22\%$$

a. La validation du modèle

Les résultats d'affaissement obtenus au point central

Tableau IV. 8: Résultats des essais (aff) au point central.

Formulations	affaissement moyenne (cm)
1	5
2	5.3

$$\check{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{2} (5 + 5.3) = 5.15$$

$$V(y) = s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\check{y}_0 - y_{0i})^2 = \frac{1}{2-1} [(5.15 - 5)^2 + (5.15 - 5.3)^2]$$

$$V(y) = 0.045$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{V(y)}{N}} = 0.0375$$

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y) = 7.353 \pm 63.66 * 0.0375$$

$$4.965 < 5.15 < 9.740$$

$$\left[\begin{array}{l} 4.965 < 5.15 < 9.740 \\ R^2 = 99.49 \% > 0.65 \end{array} \right] \Rightarrow \text{la validation du modèle d'affaissement}$$

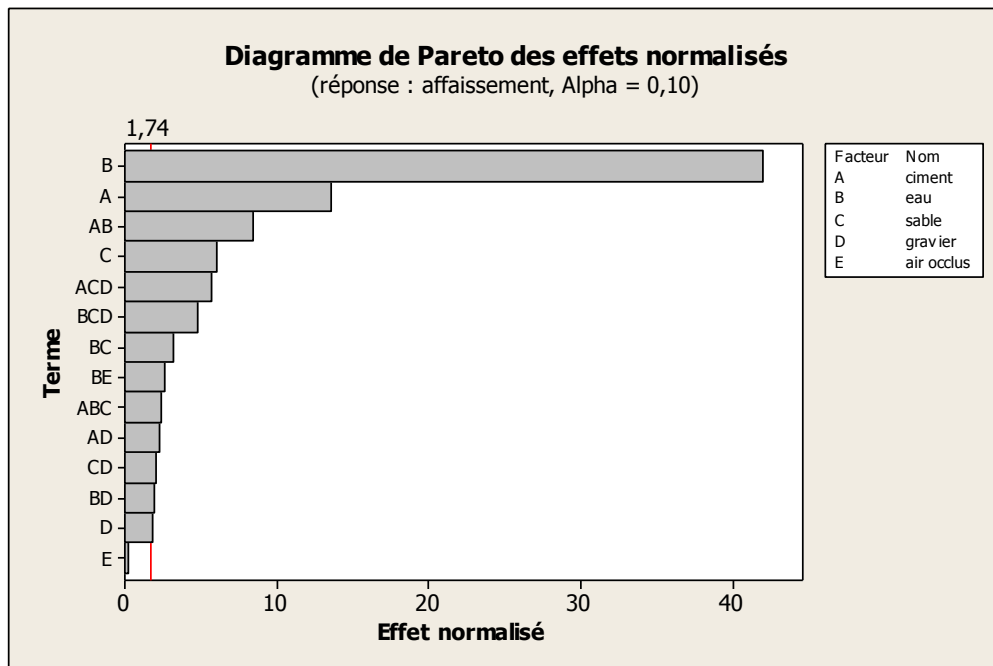


Figure IV. 5: Diagramme de Pareto des effets normalisés de l'affaissement

Tous les effets qui s'étendent au-delà de la ligne de référence sont significatifs au niveau par défaut de 0,1.

A partir du modèle et du diagramme de Pareto (figure IV.5), nous constatons que l'augmentation de l'affaissement est conditionnée d'abord par l'accroissement du dosage en eau, suivie par la diminution du dosage en ciment et en sable, ensuite la diminution des différents effets couplés.

b. Interprétation physique

. Eau (E)

L'augmentation de la quantité d'eau (E) et du rapport (E/C) a pour conséquence d'apporter un surplus à l'eau libre du mélange donc une augmentation de la plasticité du béton (un affaissement plus important). Ce qui explique le signe positif obtenu dans le modèle.

Vu la valeur du coefficient (**6.309**), l'augmentation du volume permet facilement d'augmenter la maniabilité du béton. Mais ce n'est pas la solution recommandée car dans un chantier cette initiative aura des conséquences très néfastes sur la résistance d'où l'intérêt de trouver une autre solution en se basant sur les modèles établi.

. Ciment (C) et Sable (S)

Précédé d'un signe négatif, les facteurs (C) et (S) influent sur la valeur d'affaissement de façon contraire, son augmentation induit une diminution de (Aff) et inversement.

La présence du ciment et du sable (amorphe d'eau) dans le mélange béton sont avec une quantité importante qui influe sur sa maniabilité et se traduit par une diminution de l'affaissement.

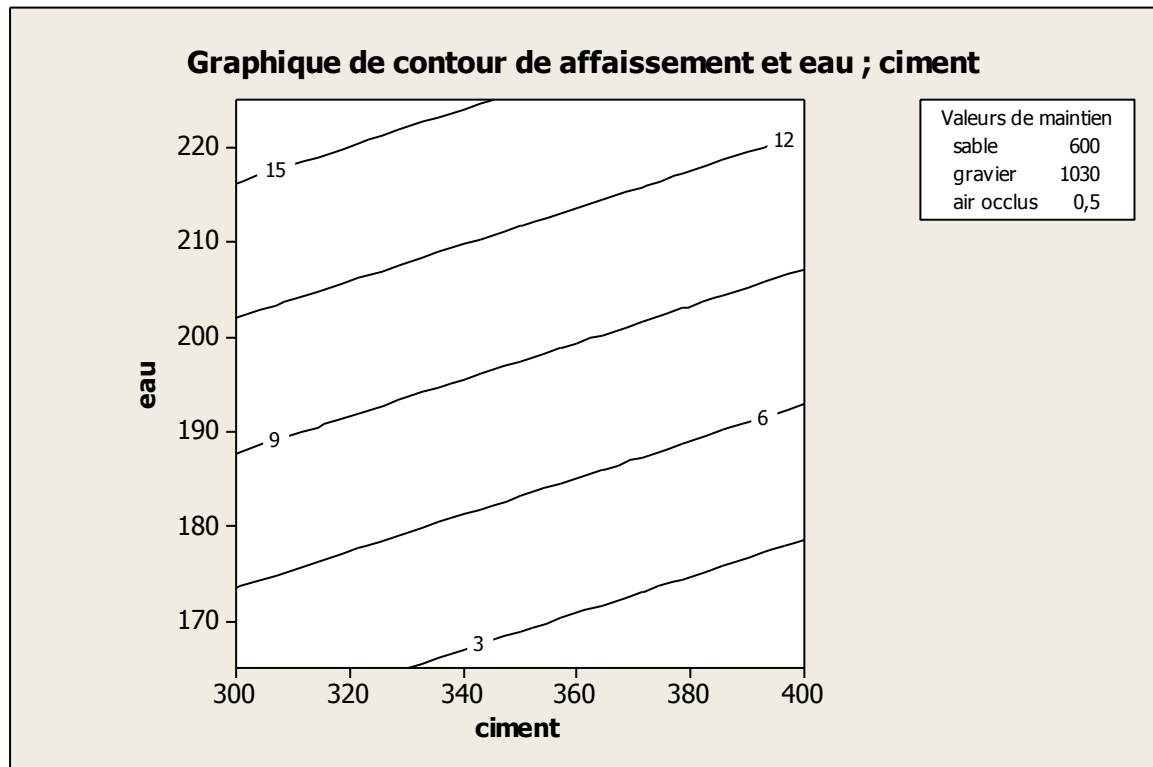


Figure IV. 6: Iso-réponse de l'affaissement en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=600 \text{ kg/m}^3$, $G=1030 \text{ kg/m}^3$, $A=0.5\%$)

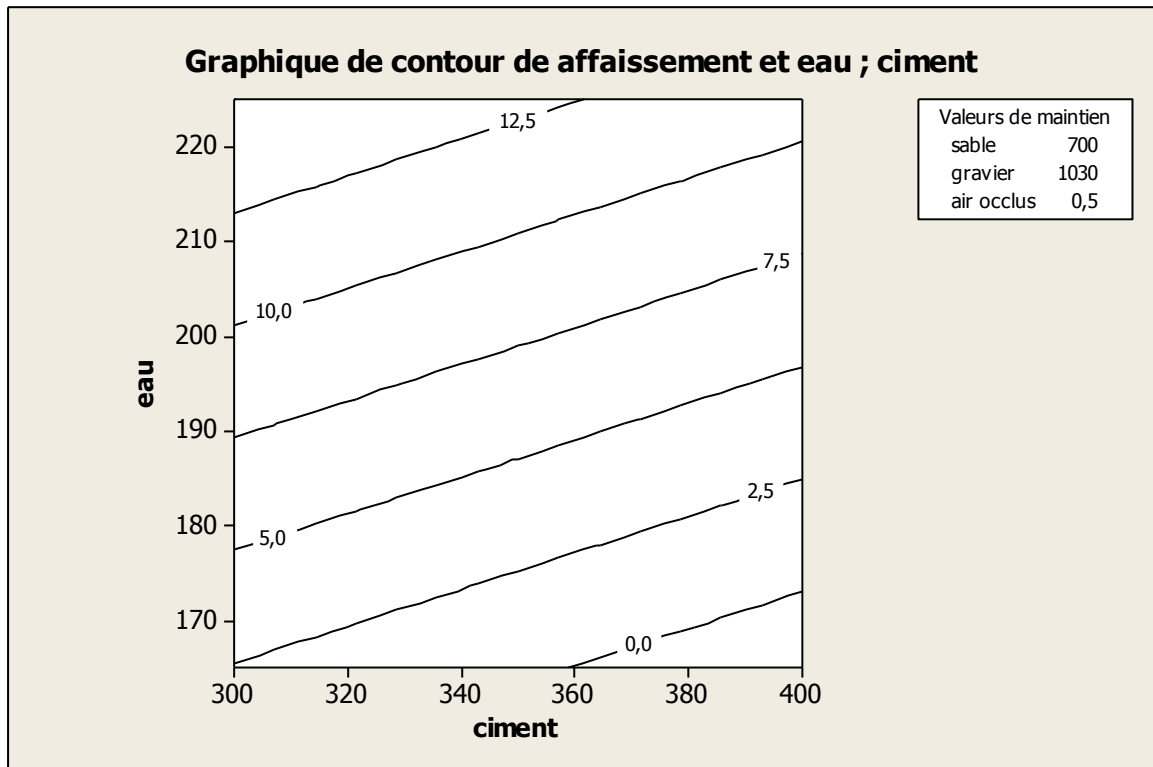


Figure IV. 7: Iso-réponse de l'affaissement en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=700 \text{ kg/m}^3$, $G=1030 \text{ kg/m}^3$, $A=0.5\%$)

Les (figures IV.6 et IV.7) montrent clairement que les bétons contenant plus de sable nécessitent un plus grand dosage en eau pour assurer le même affaissement. Par exemple pour un dosage en ciment constant égale à 380 kg/m^3 , un dosage en gravier de 1030 kg/m^3 et un dosage en sable de 600 kg/m^3 , l'affaissement prend une valeur de 11cm pour un dosage d'eau de 212 l/m^3 . Cependant 210 l/m^3 d'eau est nécessaire pour avoir le même affaissement avec un béton formulé de 700 kg/m^3 de sable.

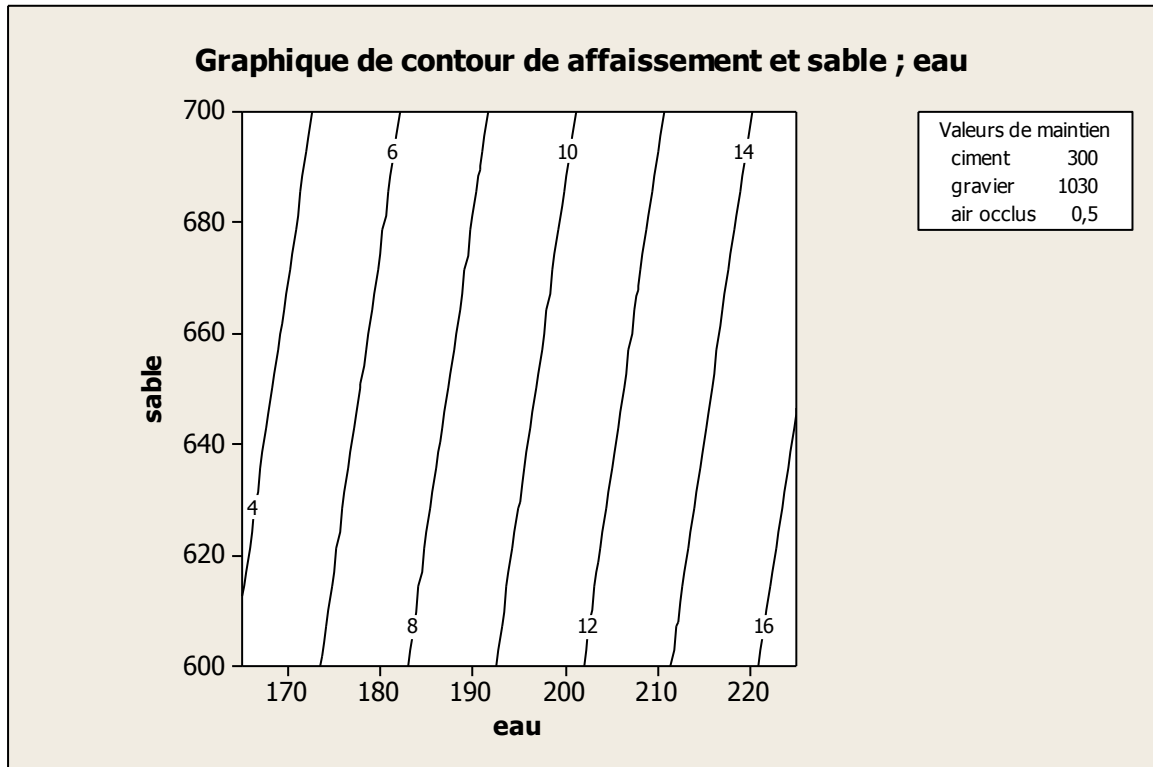


Figure IV. 8: Iso-réponse de l'affaissement en fonction du dosage en eau et en sable ($C=300 \text{ kg/m}^3$, $G=1030 \text{ kg/m}^3$, $A=0.5\%$)

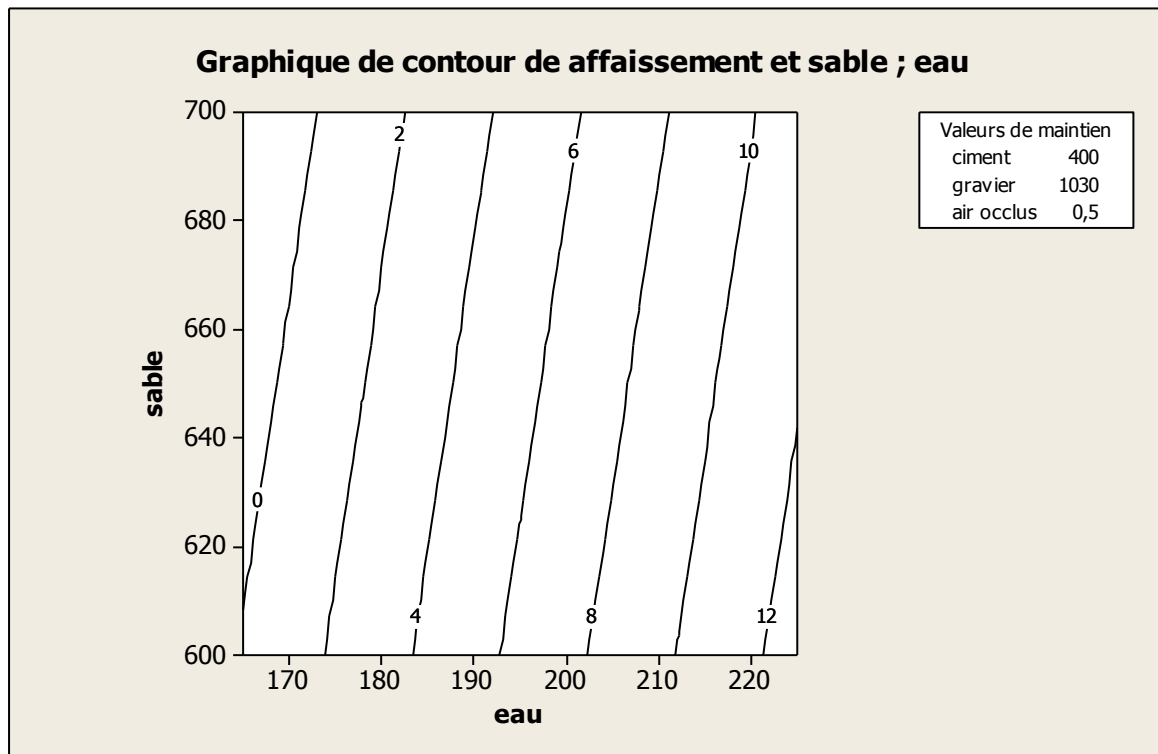


Figure IV. 9: Iso-réponse de l'affaissement en fonction du dosage en eau et en sable ($C=400 \text{ kg/m}^3$, $G=1030 \text{ kg/m}^3$, $A=0.5\%$)

Les (figures IV.8 et IV.9) montrent clairement que les bétons contenant plus de ciment nécessitent un plus grand dosage en eau pour assurer le même affaissement.

Par exemple pour un dosage de sable constant égal à 685 kg/m^3 , un dosage en gravier de 1030 kg/m^3 et un dosage en ciment de 300 kg/m^3 , l'affaissement prend une valeur de 10 cm pour un dosage d'eau de 200 l/m^3 . Cependant 220 l/m^3 d'eau est nécessaire pour avoir le même affaissement avec un béton formulé de 400 kg/m^3 de ciment.

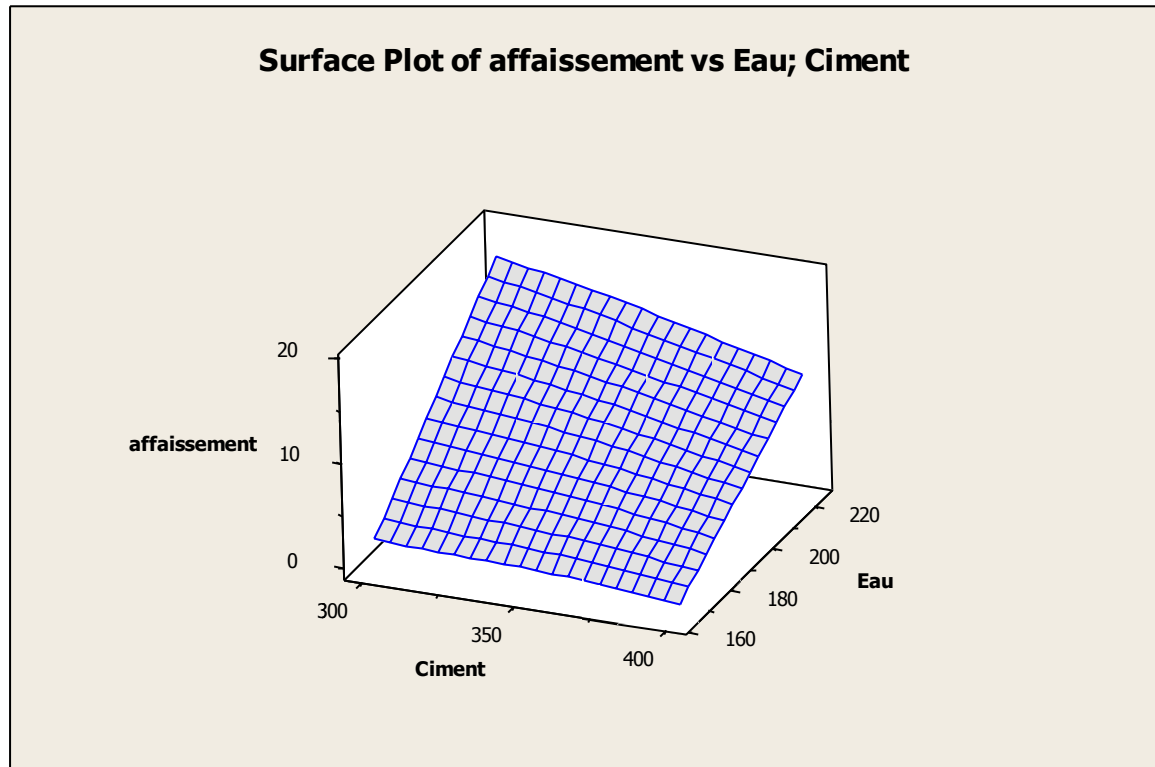


Figure IV. 10: Surface de réponse de l'affaissement en fonction d'eau et de ciment ($S=650 \text{ kg/m}^3$, $G=1090 \text{ kg/m}^3$)

La figure (IV.10) montre que pour un dosage de sable et de gravier donnés, l'augmentation du dosage en ciment et la diminution du dosage en eau entraîne une diminution de l'affaissement.

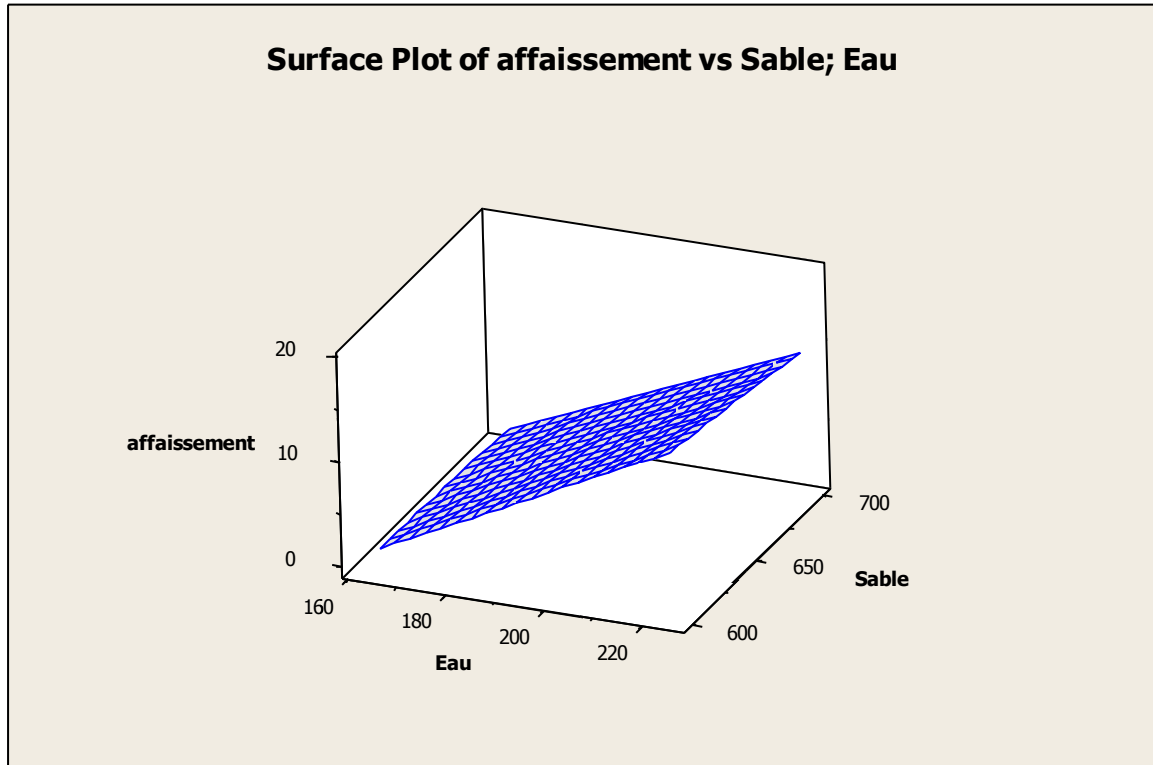


Figure IV. 11: Surface de réponse de l'affaissement en fonction d'eau et de sable ($C=350 \text{ kg/m}^3$, $G=1090 \text{ kg/m}^3$)

La (figure IV.11) montre que pour un dosage de ciment et de gravier donnés, l'augmentation du dosage en eau et la diminution du dosage en sable entraîne une augmentation de l'affaissement.

IV.5 Résistance mécanique en compression

IV.5.1 Introduction

La résistance (R_c) dépend aussi de plusieurs facteurs tels que : dosage en eau, ciment, C'est la caractéristique la plus importante pour la formulation d'un béton. Nous avons donc réalisé la mesure de la résistance sur trois éprouvettes ($16 \times 32 \text{ cm}^2$) pour chaque béton confectionné à l'aide d'une Machine de compression. Après avoir éliminé les valeurs aberrantes par le test de la loi normale, nous avons calculé la moyenne de la résistance pour chaque formulation à partir des valeurs restantes. Ces moyennes sont mentionnées dans le tableau (IV.7). Elles seront utilisées pour construire un modèle mathématique prédictif reliant la résistance aux composants du mélange.

IV.5.2 Résultats des essais: (Résistance)

Nous avons procédé à trois mesures pour chaque formulation (essai) et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau IV.9.

Tableau IV. 9: Résultats des essais: (Résistance)

N° formulations	Résistance 1	Résistance2	Résistance3	Moyenne de la résistance(MPa)
1	18,6	24,1	24,9	22,53
2	28,7	26,9	36	30,53
3	19,7	15	16,7	17,13
4	19,5	32,6	28,3	26,80
5	28	29,3	29	28,76
6	30,4	33,7	35,8	33,30
7	19,8	19,5	21,2	20,16
8	22,4	24,8	21,5	22,90
9	22,7	23,2	19,8	21,90
10	14,7	14,8	14	14,50
11	33,6	29	29,9	30,83
12	18,8	16,1	21,2	18,70
13	24,9	21,2	36,4à éliminer	23,05
14	36,7	32,9	45,4	38,33
15	19,3	32,8	14à éliminer	26,05
16	26,2	15,8	29,1	23,70
17	35,8	33,7	32,4	33,96
18	35,4	28,2	29,9	31,16
19	14,7	14,7	13,9	14,43
20	21,6	26,6	21,9	23,36
21	24,1	31,1	18,3	24,50
22	45,3	45,1	30,2à éliminer	45,20
23	17,5	23,4	22,2	21,03
24	20,3	31	26,4	25,90
25	28,2	29,4	26	27,86
26	20,1	37,5	35,9	31,16
27	15,4	15,8	17,9	16,36
28	31,6	30,3	32	31,30
29	32,8	24,5	19	25,43
30	37,9	29,3	44,7	37,30
31	16,4	11,3	18,1	15,26
32	37,4	38,9	28,9	35,06

IV.5.3 Analyse des résultats

a. Modélisation

Le modèle linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$R_{C28}(\text{MPa}) = A_0 + A_1.C + A_2.E + A_3.S + A_4.G + A_5.A + A_{12}.C.E + A_{13}.C.S + A_{14}.C.G + A_{15}.C.A + A_{23}.E.S + A_{24}.E.G + A_{25}.E.A + A_{34}.S.G + A_{35}.S.A + A_{45}.G.A + A_{123}.C.E.S + A_{124}.C.E.G + A_{125}.C.E.A + A_{234}.E.S.G + A_{235}.E.S.A + A_{345}.S.G.A$$

b. Détermination des coefficients du modèle :(Ai)

Les coefficients du modèle sont obtenus à l'aide d'une régression multiple exécutée sur le logiciel d'analyse statistique MINITAB 16.

Résistance: (R_{C28})

Analyse de régression : R_{C28} en fonction de : C ; E ; S ; G ; A ; CE ; CS ; CG ; ES ; EG ; EA ; SG ; SA ; GA.CES, CEG, CEA, ESG, ESA, SGA

Estimated Effects and Coefficients for RC (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		26,204	0,9981	26,25	0,000
C	6,246	3,123	0,9981	3,13	0,020
E	-6,281	-3,141	0,9981	-3,15	0,020
S	3,338	1,669	0,9981	1,67	0,146
G	-0,304	-0,152	0,9981	-0,15	0,884
A	2,508	1,254	0,9981	1,26	0,256
C*E	-0,440	-0,220	0,9981	-0,22	0,833
C*S	3,433	1,717	0,9981	1,72	0,136
C*G	-0,833	-0,417	0,9981	-0,42	0,691
C*A	3,954	1,977	0,9981	1,98	0,095
E*S	-1,944	-0,972	0,9981	-0,97	0,368
E*G	3,498	1,749	0,9981	1,75	0,130
E*A	-2,952	-1,476	0,9981	-1,48	0,190
S*G	0,608	0,304	0,9981	0,30	0,771
S*A	-0,829	-0,415	0,9981	-0,42	0,692
G*A	0,329	0,165	0,9981	0,16	0,874
C*E*S	-2,977	-1,489	0,9981	-1,49	0,186
C*E*G	0,090	0,045	0,9981	0,04	0,966
C*E*A	2,373	1,186	0,9981	1,19	0,279
C*S*G	2,304	1,152	0,9981	1,15	0,292
C*S*A	0,675	0,337	0,9981	0,34	0,747
C*G*A	3,108	1,554	0,9981	1,56	0,170
E*S*G	-1,281	-0,641	0,9981	-0,64	0,545
E*S*A	2,385	1,193	0,9981	1,19	0,277
E*G*A	-0,206	-0,103	0,9981	-0,10	0,921
S*G*A	-1,525	-0,762	0,9981	-0,76	0,474

$R^2 = 88,81\%$

MODELE 01 (valeurs codées)

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = 26.204 + 3.123. C - 3.141. E + 1.669. S - 0.152. G + 1.254. A - 0.222. (CE) + 1.717.(CS) - 0.417.(CG) + 1.977.(CA) - 0.972.(ES) + 1.749.(EG) - 1.476.(EA) + 0.304.(SG) - 0.415.(SA) + 0.165.(GA) - 1.489.(CES) + 0.045.(CEG) + 1.186.(CEA) + 1.152.(CSG) + 0.337.(CSA) + 1.554.(CGA) - 0.641.(ESG) + 1.193.(ESA) - 0.103.(EGA) - 0.762.(SGA)$$

$$R^2 = 88,81\%$$

Estimated Coefficients for Résistance using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-48,82
Ciment	<u>3,90189</u>
Eau	<u>-8,96726</u>
Sable	<u>-0,22154</u>
Graviers	0,67286
Air occlus	152,218
Ciment*Eau	0,0111043
Ciment*Sable	<u>-0,00400393</u>
Ciment*Graviers	-0,00595358
Ciment*Air occlus	<u>-0,613703</u>
Eau*Sable	0,0129441
Eau*Graviers	<u>0,00550440</u>
Eau*Air occlus	<u>-0,624347</u>
Sable*Graviers	-0,00084295
Sable*Air occlus	0,053158
Graviers*Air occlus	-0,001757
Ciment*Eau*Sable	<u>-1,98472E-05</u>
Ciment*Eau*Graviers	4,97685E-07
Ciment*Eau*Air occlus	0,000632778
Ciment*Sable*Graviers	7,68056E-06
Ciment*Sable*Air occlus	0,000108000
Ciment*Graviers*Air occlus	<u>0,000414444</u>
Eau*Sable*Graviers	-7,11806E-06
Eau*Sable*Air occlus	0,000636111
Eau*Graviers*Air occlus	-4,58333E-05
Sable*Graviers*Air occlus	-2,03333E-04

$$R^2 = 88,81\%$$

MODELE 01 (valeurs non codées)

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = - 48,82 + 3,90189. C - 8,96726. E - 0,22154. S + 0,67286. G + 152,218. A + 0,0111043. (CE) - 0,00400393.(CS) - 0,00595358.(CG) - 0,613703.(CA) + 0,0129441.(ES) + 0,00550440.(EG) - 0,624347.(EA) - 0,00084295.(SG) + 0,053158.(SA) - 0,001757.(GA) - 1,98472E-05.(CES) + 4,97685E-07.(CEG) + 0,000632778.(CEA) + 7,68056E-06.(CSG) + 0,000108000.(CSA) + 0,000414444.(CGA) - 7,11806E-06.(ESG) + 0,000636111.(ESA) - 4,58333E-05.(EGA) - 2,03333E-04.(SGA)$$

$$R^2 = 88,81$$

c. Signification des facteurs :

A partir des résultats du logiciel la signification des coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « P » [Plans d'expériences (2003)]:

- $p \leq 0.01$ très significatif.
- $p \leq 0.05$ significatif.
- $p \leq 0.1$ peu significatif.
- $p > 0.1$ très peu à non significatif.

Une nouvelle régression est relancée en éliminant les facteurs et interactions non Significatifs (des facteurs et interactions avec un $p \geq 0.2$).

Analyse de régression : R_{C28} en fonction de : **C ; E ; S ; CS ; CA ; EG ; EA ; CES; CGA.**

Estimated Effects and Coefficients for RC (coded units)

Term	Effect	Coef	SECoef	T	P
Constant		26,204	0,7972	32,87	0,000
C	6,246	3,123	0,7972	3,92	0,001
E	-6,281	-3,141	0,7972	-3,94	0,001
S	3,338	1,669	0,7972	2,09	0,049
G	-0,304	-0,152	0,7972	-0,19	0,851
A	2,508	1,254	0,7972	1,57	0,131
C*S	3,433	1,717	0,7972	2,15	0,044
C*A	3,954	1,977	0,7972	2,48	0,022
E*G	3,498	1,749	0,7972	2,19	0,040
E*A	-2,952	-1,476	0,7972	-1,85	0,079
C*E*S	-2,977	-1,489	0,7972	-1,87	0,077
C*G*A	3,108	1,554	0,7972	1,95	0,065

$R^2 = 76,21\%$

MODELE 02 (Valeurs codées)

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = 26.204 + 3.123. C - 3.141. E + 1.669. S + 1.717. (CS) + 1.977. (CA) + 1.749. (EG) - 1.476. (EA) - 1.489. (CES) + 1.554. (CGA)$$

$R^2 = 76,21\%$

Estimated Coefficients for Résistance using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-48,82
Ciment	3,90189
Eau	-8,96726
Sable	-0,22154
Ciment*Sable	-0,00400393
Ciment*Air occlus	-0,613703
Eau*Graviers	0,00550440
Eau*Air occlus	-0,624347
Ciment*Eau*Sable	-1,98472E-05
Ciment*Graviers*Air occlus	0,000414444

$$R^2 = 76,21\%$$

MODELE 01 (valeurs non codées)

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = - 48,82 + 3,90189. C - 8,96726. E - 0,22154. S - 0,00400393.(CS) - 0,613703.(CA) + 0,00550440.(EG) - 0,624347.(EA) - 1,98472E-05.(CES) + 0,000414444.(CGA)$$

$$R^2 = 76,21\%$$

d. La validation du modèle

Les résultats de la résistance obtenus au point central

Tableau IV. 10: Résultats des essais(R_{C28}) au point central.

Formulations	Résistance moyenne (MPa)
1	31.3
2	32

$$\check{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{2} (31.3 + 32) = 31.65$$

$$V(y) = s_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\check{y}_0 - y_{0i})^2 = \frac{1}{2-1} [(31.65 - 32)^2 + (31.65 - 31.3)^2]$$

$$V(y) = 0.245$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\frac{V(y)}{N}} = 0.0875$$

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y) = 26.204 \pm 63.66 * 0.0875$$

$$20.633 < 31.65 < 31.774$$

$$\left[\begin{array}{l} 4.965 < 5.15 < 9.740 \\ R^2 = 88.81 \% > 0.65 \end{array} \right] \Rightarrow \text{la validation du modèle de la Résistance}$$

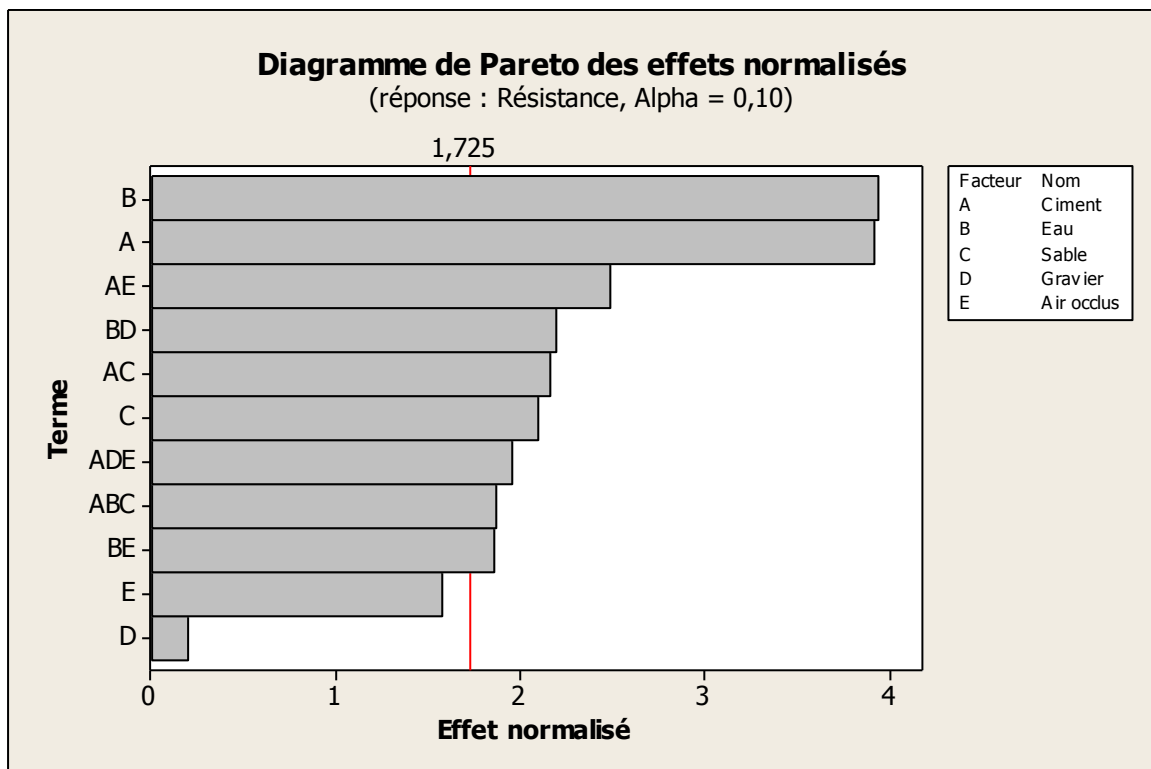


Figure IV. 12: Diagramme de Pareto des effets normalisés de Résistance du

A partir du modèle et du diagramme de Pareto, on constate que l'augmentation de la résistance est conditionnée d'abord par l'accroissement du dosage en ciment, suivie par la diminution du dosage en eau, ensuite de l'effet des différents effets couplés. Nous avons aussi remarqué que le paramètre (G*S) n'apparaît pas parmi les facteurs influençants, ce qui nous a ramené à conclure que le paramètre G*S n'influe pas sur la résistance dans le domaine étudié.

a. Interprétation physique

. Eau (E)

Nous remarquons que le facteur « E » est le plus influent en matière de résistance à la compression à long terme du béton. L'augmentation de sa valeur entraîne une diminution de la résistance à la compression du béton.

Cette augmentation de la quantité d'eau libre dans le mélange frais conduit à une élévation de la porosité du béton durci après évaporation. Donc le rend plus vulnérable à la compression.

. Ciment (C) et Sable(S)

Procédé d'un signe positif, les facteurs (C) et (S) influent sur la valeur de la résistance de façon proportionnelle, son augmentation induit l'accroissement du (R_{C28}) et inversement.

La présence du ciment et sable dans le mélange avec une quantité importante influe positivement sur le comportement mécanique du béton, d'abord par une plus grande hydratation du ciment et une formation plus importante des CSH d'un côté et par un accroissement de la densité lorsqu'il y a plus de sable dans le mélange d'un autre côté, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance.

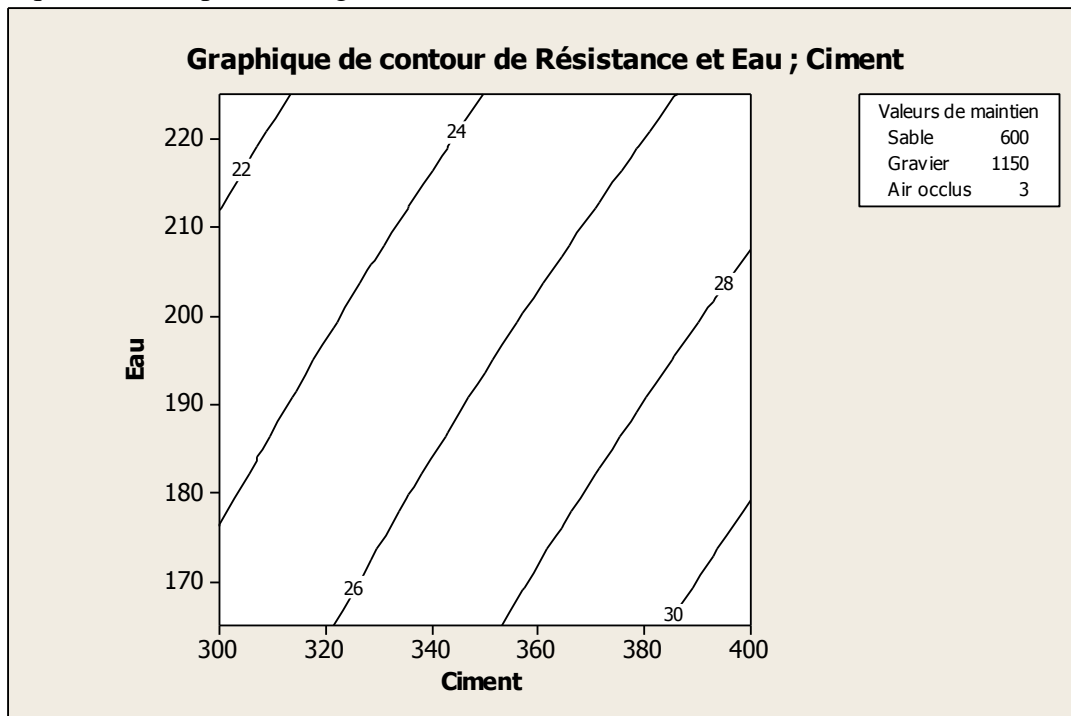


Figure IV. 13: Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=600 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$)

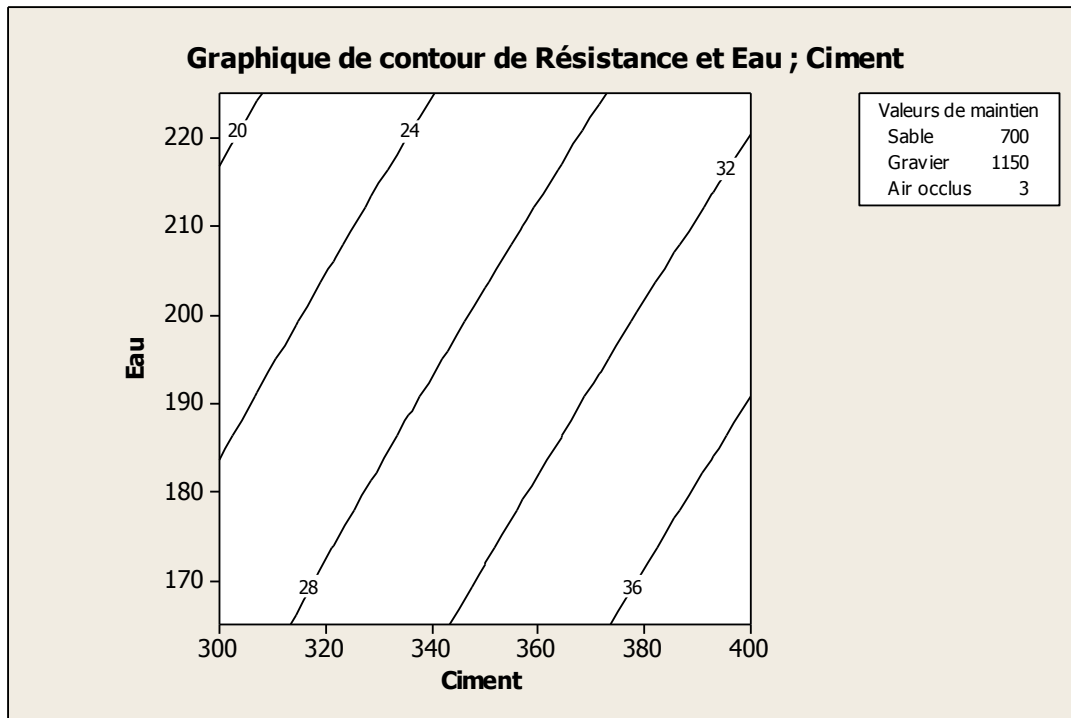


Figure IV. 14: Iso-réponse de la Résistance en fonction du dosage en eau et en ciment ($S=700 \text{ kg/m}^3$, $G=1150 \text{ kg/m}^3$, $A=3\%$)

Cependant, les résultats montrés par les (figures IV.13 et IV.14) montrent clairement 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 absorbé par le sable n'aura aucune influence sur la résistance mécanique.

Par exemple pour un dosage en ciment constant égale à 340 kg/m^3 , un dosage en gravier de 1150 kg/m^3 et un dosage du sable de 600 kg/m^3 , la résistance prendre une valeur de 25 MPa pour un dosage d'eau de 200 l/m^3 . Cependant 217 l/m^3 d'eau est nécessaire pour avoir la même résistance avec un béton formulé de 700 kg/m^3 de sable.

IV.5 Conclusion

Les modèles dérivés et basés sur une approche de conception factorielle se sont révélés intéressants pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du mélange.

Ces modèles statistiques fournissent un moyen efficace pour évaluer l'influence et les effets des variables du mélange. Ils sont valables pour un large éventail de mélanges dans les fourchettes étudiés.

Il faut rappeler que les modèles présentés ne sont valables que dans leur domaine expérimental.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche a pour but la maîtrise de la régularité de la qualité du béton dans la région de Tlemcen. Ce travail a été réalisé par l'utilisation des plans d'expériences qui nous ont permis d'obtenir trois modèles, un modèle de résistance, d'affaissement et volume d'air occlus, leurs utilisation s'avère très utile en pratique et nous permettent d'apprécier la composition d'un béton conforme.

Les mesures obtenues lors des essais réalisés nous ont permis la détermination des modèles prédictifs de l'affaissement, la résistance à la compression et volume d'air occlus.

Avec les valeurs codées

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = 26.204 + 3.123. C - 3.141. E + 1.669. S + 1.717. (CS) + 1.977. (CA) + 1.749. (EG) - 1.476. (EA) - 1.489. (CES) + 1.554. (CGA)$$

$$\text{Aff (cm)} = 7.353 - 2.041 C + 6.309 E - 0.916 S - 1.272.(CE) + 0.347.(CG) - 0.484.(ES) + 0.297.(EG) + 0.397.(EA) - 0.316.(SG) - 0.353.(CES) - 0.859.(CSG) - 0.722.(ESG)$$

$$\text{VAO(\%)} = 1.3063 + 0.2125 C - 0.3312 E + 0.1063 S - 0.0750.(CE) - 0.0625.(CS) - 0.0563.(ES) - 0.0563.(EG) - 0.0563.(EA) + 0.0562.(SG) - 0.1187.(GA) + 0.0813.(SGA)$$

Avec les valeurs non codées

$$R_{C28} \text{ (MPa)} = - 48,82 + 3,90189. C - 8,96726. E - 0,22154. S - 0,00400393. (CS) - 0,613703.(CA) + 0,00550440.(EG) - 0,624347.(EA) - 1,98472E-05.(CES) + 0,000414444.(CGA)$$

$$\text{Aff (cm)} = 2812,31 - 4,96884C - 6,85842E - 4,10531S + 0,00344118.(CE) + 0,00410344.(CG) + 0,0101815.(ES) + 0,00586458.(EG) + 0,132042.(EA) - 0,00348885.(SG) - 4,70833E-06.(CES) - 5,72917E-06.(CSG) - 8,02083E-06.(ESG)$$

$$\text{VAO(\%)} = -16,2818 + 0,003358C - 0,078854 E + 0,022948 S + 0,000201667. (CE) - 2,28333E-05. (CS) + 0,000160694. (ES) + 0,000018750. (EG) + 0,0106944. (EA) - 3,47917E-05. (SG) - 0,0176667. (SA) - 0,0127917.(GA) + 2,16667E-05.(SGA)$$

Des corrélations entre les diverses réponses expérimentales ont été établies afin de minimiser le nombre d'essais caractérisant ce béton dans le futur.

Les modèles développés peuvent être employés pour sélectionner les mélanges les plus économiques, tout en évitant de réaliser un grand nombre d'essais pour un mélange optimal et qui répond aux cahiers de charges.

Ces modèles peuvent être développés et améliorés en prenant en considération d'autres paramètres intrinsèques importants comme la granulométrie ou la forme des granulats. D'autres paramètres extrinsèques au béton peuvent aussi être étudiés comme l'influence de la température.

Enfin, les modèles trouvés peuvent être mis sous forme de programmes informatiques afin de faciliter leur exploitation par les utilisateurs.

Perspectives

La généralisation de ces modèles prédictifs demande une extension dans le domaine de la recherche et ouvre de nouvelles perspectives :

- Exploitation des résultats pour faciliter la formulation des BO.
- Substitution d'une partie du ciment par des additions minérales comme les fillers calaires, les pouzzolanes, le laitier des hauts fournaux, les fumées de silice etc....

Prendre en considération d'autres paramètres comme, la granulométrie, la forme des granulats, l'effet de la température etc....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADAM M. NEVILLE : Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles, 1992, p. 805.

ALEXANDER K.M, IVANUSEC I. (1982); Long term effects of cement SO₃ content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength, Cement and Concrete Research, 12, N° 1, pp. 51-60.

ALEXANDER K.M. et col. (1961), Discussion of Walker S. and Bloem D.L. (1960), "Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete", ACI Journal, Vol. 32, N° 9, pp. 1201-1258.

AFNOR. (2002) ; Normalisation française.

BARON J., OLLIVIER J.P. (1996); Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p.

BÉTON – DÉFINITION (2008) ; Encyclopédie scientifique en ligne : [www, techno-science, net](http://www.techno-science.net), 2008.

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

BOUDAUD. Z, RAHMOUNI. Z, BREYSSE. D. Etude des effets du cobroyage d'un clinker et du sable dunaire sur la broyabilité des liants et des caractéristiques d'un béton de sable. Actes du séminaire international GEOMAT'02. M'sila, Algérie 2003.

BRERETON.R, (2006): Consequences of sample size, variable selection, and model validation and optimisation for predicting classification ability from analytical data. *Trends in analyticalchemistry*, 2006, 25 (11)1103-1111.

CIMBÉTON (2006); Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.

CHANVILLARD G. (1999); Connaissances générales sur le matériau béton, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Lyon, 169 p.

CORDON W.A., GILLESPIE H.A. (1963), Variables in Concrete Aggregates and Portland cement Paste Which Influence the Strength of Concrete, Journal of the American Concrete Institute, Août.

CAZACLIU B., GUIEYSSE B., GARCIN O., BUISSON F., BAUDRU Y., CHANUT S., LALLEMANT-GAMBOA I. (2006) ; Laboratory evaluation of 9 mixers, rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 71 p.

DE LARRARD F., BELLOC A. (1999) ; L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N°219, Janvier Février, pp.41-52.

DREUX G., FESTA J. (1998) ; Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles ; Paris, 409 p.

DE LARRARD. (2000) ; structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.

DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C. (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p.

DE LARRARD F., SITZKAR J.C., HU C. (1993) ; Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 186, Juillet-Août, pp. 55-60.

EI BARRAK M. (2005), « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III –Paul Sabatier, Juillet. 229 p.

FAURY J. (1958) ; Le béton : Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, 3e édition, Dunod, Paris.

GOUPY J. Application des plans d'expériences, Dunod, Paris, 2003.

HU C. (1995) ; Rhéologie des bétons fluides, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA16, Paris.

J. P. MOUGIN. Cours de béton armé. BAEL 91.

GOUPY JACQUES • CREIGHTON LEE (2006) ; Introduction aux plans d'expériences, *les mélanges*, Dunod, Paris, 2001, 2006,304 p.

KAWAKAMI H. (1972); Effect of gravel size on strength of concrete with particular reference to sand content, Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV, Concrete and Cement Past Glass and Ceramics, pp. 96-103 (Society of Materials Science, Kyoto, Japan).

LAPOINTE R. (1997) ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, mai.

NGUYEN T.L.H., (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 139 p.

NGOC-DONG L. (2007) ; Amélioration de la régularité du béton en production, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 248 p.

NIELSEN L.F. (1993); Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations, *Materials and Structures*, 26, N° 159, pp. 255-60.

NORMES ALGERIENNES (1992) ; édition et diffusion Abou Hamou Moussa, Alger.

OLLIVIER J.P., BUIL M. (1992) ; Conception des bétons : la structure poreuse, "La durabilité des bétons", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Eds., Paris.

PILLET M. (1992) ; Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, les éditions d'organisation Ed., Paris.

PLANS D'EXPERIENCES (2003) ; Cours de 1ère année magistère. Département de génie civil. Université de M'sila.

UTSI. S, EMBORG .M, CARSWARD. J "Relation between workability and theological parameters", Therd International RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publication s.a.r.l, (2003) 311-322

STOCK A.F., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T. (1979); The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, *Mag. Concr. Res.*, 31, N° 109, pp. 225-34.

SIER. (1993) ; Informations et techniques. 1993. n°6.

SADO G. et SADO M.C. (1991) ; Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris.

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

ANNEXES

Annexe I.1 : Valeur du terme correcteur K [Dreux et Festa, 1998]

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

Annexe I.2: Valeurs de A données par Faury

Consistance	Sables et graviers roulés	Sables roulés et graviers concassés	Sables et graviers concassés
Très fluide (pas de serrage)	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Fluide (faible serrage)	30-32	32-34	36-38
Molle (serrage moyen)	28-30	30-32	34-36
Ferme (serrage soigné)	26-28	28-30	32-34
Très ferme (serrage puissant)	24-26	26-28	30-32
Terre humide (serrage très puissant)	22-24	24-26	28-30