

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ziane Achour - Djelfa
Faculté des sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil
Référence : FST/DGC/M2/.... / / 2017



جامعة الجلفة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de Fin d'Études

Présenté au

Domaine : Sciences et Techniques

Département : Génie Civil

Filière : Génie Civil

Spécialité : Gèotechniques et matériaux

Réalisé par

SAHEB FARES & MAHDJOUR OUMESAAD

Pour l'obtention du Diplôme de Master Académique

Intitulé

modélisation de conception de mélange Pour évaluer l'effet de la nature de sable sur les propriétés physico mécaniques de béton

Soutenu le : **03/07/2017**

Devant le jury de soutenance composé de :

Mr : ATTIA Ahmed	MAA	Université Djelfa	Encadreur
Mr : Hdji Trek	MAA	Université Djelfa	Examinateur
Mr : IBRAHIMI	MAA	Université Djelfa	Président
Dr :Gattala salim	MAA	Université Djelfa	CO-encadreur

Année universitaire :2016/2017

Remerciements

Je veux exprimer par ces quelques lignes de remerciements mes gratitudes envers tous ceux en qui, par leur présence et leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils.

Nous avons trouvé courage afin d'accomplir ce travail.

En fin, je ne peux achever ce travail sans exprimer mes gratitudes à notre encadreur Mr Attia Ahmed, pour son dévouement et son assistance tout au long de cette année.

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 AMIES ET AMIS

OUM ESAAD

DÉDICACES

AVEC L'AIDE DU TOUT PUISSANT, J'AI PU RÉALISER CE MODESTE TRAVAIL QUE JE DÉDIE

:

À MES CHERS PARENTS SUR QUI J'AI PU COMPTER ET ME RESSOURCER

D'AFFECTION ET DE BÉNÉDICTIONS DURANT TOUTE MA VIE ;

*À MES FRANGINES,
QUI M'ONT BEAUCOUP AIDER, SOUTENUE ET ENCOURAGÉE.*

À MES CHERS AMIES ET AMIS :

À TOUTES LES PERSONNES QUE J'AIME.

FARES

RÉSUMÉ

L'étude de la propriété 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.

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

ABSTRACT

The study of the property of concrete in the fresh and hardened state requires a particular knowledge of the influence of the different elements that constitute it.

Our work aims to determine, using the experimental design method, a set of predictive models according to the proportion of the constituents of the concretes formulated based on local materials.

Keywords: concrete, formulation, modeling, experimental design,

ملخص

سلوك الخرسانة في الحالة الصلبة والطازجة 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

كلمات البحث: ملموسة، وصياغة، و النمذجة ، وتصميما لتجارب

Table des matières

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

1. Introduction 2

2. Petit historique des plans d'expérience..... 2

3. Définition: 2

4. Conditions d'application des plans d'expériences 2

4.1. Choix de la méthode d'expérimentation 3

4.2. Vocabulaire de base des plans d'expériences 3

4.2.1. Facteur : 3

4.2.2. Facteur quantitatifs..... 4

4.2.3. Facteurs qualitatifs : 4

4.2.4. Domaine : 4

4.2.5. Réponses : 4

4.3. Espace expérimental 4

5. Les types de plans d'expérience 5

5.1. Plan hybrides 5

5.2. Les plans de Rechtschaffner..... 5

5.3. Les plans de Plackett et Burmann 6

5.3.1. Les tables de Taguchi..... 6

5.4. Les plans booléens 7

5.5. Plans de Doehlert 7

5.6. Les plans de Koshal..... 9

5.7. Plans factoriels complets 9

5.7.1. Plans factoriels complets à deux niveaux..... 10

5.7.2. Plans à deux facteurs 10

5.7.3. Plans factoriels à k facteurs 10

5.7.4. Plans factoriels complets à trois niveaux 11

5.8. Les plans de Mozzo 11

5.9. Plans de mélange	11
5.9.1. Contrainte fondamentale des mélanges	11
5.9.2. Représentation géométrique des mélanges.....	12
5.9.2.1. Mélange à deux constituants	12
5.9.2.2. Mélanges à quatre constituants	14
5.9.2.3. Plans de mélanges classiques.....	15
5.9.2.4. Plans en réseaux	15
5.9.2.5. Plans de mélanges centrés	17
5.9.2.6. Plans de mélanges centrés augmentés.....	18
5.9.3. Modèles mathématiques des plans de mélanges.....	18
5.9.3.1. Modèle du premier degré	18
5.9.3.2. Modèle du second degré	19
5.9.3.3. Modèle du troisième degré	19
5.9.4. Conclusion sur les plans de mélange	19
5.10. Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux2^{k-q}	19
5.10.1. Définition des plans factoriels fractionnaires.....	20
5.10.2. Application au plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}	20
6. Conclusion.....	21

Chapitre2 : ÉTAT DE L'ART

1.Introduction.....	22
2.Sables	22
2.1 Sable d'oued.....	23
2.2 Sable concassé.....	23
2.2.1.Définition.....	24
2.2.2.Technologie et procès de production des sables.....	25
2.2.3.Avantages des sables de concassage	25
2.2.4.Utilisation des sables de concassage	25
2.2.5.Caractéristiques des sables de concassage.....	26
2.2.6.Influence du taux de substitution en sable concassé sur les propriétés physiques.....	27

2.2.7. Influence du taux de substitution en sable concassé sur l'analyse granulométrique.....	28
2.2.8. Influence du taux de substitution en sable concassé sur la résistance à la compression	28
2.3. Sable de dune	30
2.3.1. Définition.....	30
2.3.2. Mécanismes de formation.....	30
2.3.3 Types des dunes	31
2.3.4. Physique des dunes.....	31
2.3.5. Diverses utilisations.....	31
2.3.6. Propriétés	32
2.3.7. Silice « quartz »	32
2.3.8. Influence du taux de substitution en sable de dune sur les propriétés physiques	32
2.3.9. Influence du taux de substitution en sable de dune sur l'analyse granulométrique	33
2.3.10. Influence du taux de substitution en sable de dune sur la résistance à la compression	33
3. Conclusion.....	35

Chapitre3 : Identification des matériaux

3.1 .Introduction	37
3.2. Caractéristiques des matériaux	37
3.2.1. Ciment Portland Composé	37
3.2.2. Eau	38
3.2.3. Sables	38
Propriétés physiques des sables	39
Les propriétés physiques des sables sont indiquées dans le tableau III.2.	39
3.2.4. Pierre concassée.....	40
Propriétés physiques des graviers	40
3.3. METHODES D'ESSAIS.....	40
3.3.1. Méthode des plans d'expériences	40
3.3.2. Essais réalisés.....	41

3.3.2.1. Maniabilité	41
3.3.2.2. Confection des éprouvettes et mode de cure	41
3.3.2.3. Essais de résistances mécaniques.....	42
Conclusion.....	42
Chapitre4 :Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expérience	
1.Introduction	43
2.Résultats expérimentaux	43
3.Conclusion.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté Les axes des facteurs sont orthogonaux entreeux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.....	5
Figure 2:Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre	6
Figure 3:Plan de Doehlert pour l'étude de deux facteurs.	7
Figure 4:Autre disposition possible des points d'un plan de Doehlert Pour l'étude de deux facteurs. Les points sont toujours régulièrement disposés dans l'espace expérimental.....	8
Figure 5:Extension d'un plan de Doehlert à deux facteurs.....	9
Figure 6:Plan de Koshal pour trois facteurs. Ces points forment le début d'un plan factoriel complet 2^3	9
Figure 7:Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental	10
Figure 8:Représentation d'un mélange dans un système d'axes cartésiens.....	12
Figure 9:Les compositionsdes mélanges à deux constituantspeuvent être représentées par lespoints du segment de droite AB.	12
Figure 10:Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite.	13
Figure 11: Le mélange 1 contient 20 % de A et 80 % de B.Le mélange 2 contient 77 % de A et 23 % de B.	13
Figure 12:Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral	14
Figure 13:Représentation des mélanges à quatre constituants par un tétraèdre régulier.	15
Figure 14:Plan de mélanges ne comportant que les trois produits purs.	15
Figure 15:Plan de mélanges en réseaux (Simplex Lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié.Ce plan est noté $\{3,2\}$	16
Figure 16:Plan de mélanges en réseaux (Simplex latticedesigns) comportant les trois produits purs et les mélanges $1/3-2/3$ et $1/3-1/3-1/3$.Ce plan estnoté $\{3, 3\}$	17
Figure 17:Plan de mélanges centrés (Simplex-centroiddesign Comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié Et le mélange équiportionnel des trois produits purs.	17
Figure 18:Plan de mélanges centré augmenté (Augmented Simplex-centroid designs) comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié, le mélange équiportionnel des trois produits et les mélanges situés aux centres de gravité des simplex unitaires.	18
Figure 19:Un plan factoriel complet 2^3 peut être divisé en deux plans factoriels fractionnaires 2^{3-1} , un plan noir et un plan gris.	20
Figure 20:Analyses granulométriques des granulats [9]	
Figure 21:Résistance à la compression en fonction de temps [9].....	
Figure 22:Résistance à la compression des bétons courants [12].....	
Figure 23:Résistance à la compression des bétons à superplastifiant[12]	
Figure 24:Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable [15]	
Figure 25:Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable [15]	
Figure 26:Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable [15]	
Figure 27.. Courbe granulométrique du sable d'oued et les graviers.....	38
Figure .28 Courbe granulométrique du sable concassé et sable de dune.....	39

Figure 29: Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours	45
Figure 30: Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours	46
Figure 31: Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 7 jours	46
Figure 32: Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion à 28 jours	47
Figure 33: Courbes iso-réponses de l'affaissement	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Plan de Doehlert pour deux facteurs.....	8
Tableau 2:Points d'extension du plan de Doehlert pour deux facteurs	8
Tableau 3:Propriétés physiques des sables [9]	27
Tableau 4:Quantités des matériaux par mètre cube de béton [9].....	28
Tableau 5:Propriétés physiques [15]	33
Tableau 6:Combinaisons des sables pour les bétons avec un dosage en ciment de 350kg/m ³	33
Tableau 7:Caractéristiques physique, chimique, minéralogique et mécanique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5	37
Tableau 8:Propriétés physiques des sables	39
Tableau 9:Propriétés physiques des graviers.....	40
Tableau 10:Détails des proportions des mélanges à 7 jours	43
Tableau 11:Détails des proportions des mélanges a 28 jours	44
Tableau 12:L'effet de l'interaction entre le sable d'oued et le sable des dunes sur la résistance mécanique	47
Tableau 13:les fourchettes optimales des sables	48
Tableau 14:Les effets du sable de carrière et dunes et sable d'oued sur la valeur de l'affaissement	49
Tableau 15:pourcentages des trois sables dans un mélange	49

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 propriétés physico mécanique de béton

L'objectif de ce présent travail est de voir l'influence de la nature de sable sur les propriété physico mécanique de béton et de mettre à la disposition des utilisateurs des bétons d un ensemble de modèles mathématiques simples à caractère prédictif des propriétés essentielles du béton à savoir l'ouvrabilité, 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

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres

Après une introduction générale, le premier chapitre traite la démarche méthodologique des plans d'expériences et regroupe les différentes notions de statistique appliquées à cette méthode et les différents types des plans d'expérience. Le deuxième chapitre présente la caractérisation des trois types de sable utilisés sable de dune et sable de concassage et sable d'oued. Présentation des essais expérimentaux réalisés auparavant par nos collègues sur les quels on va applique la méthode des plans d'expériences dans le troisième. Dans le dernier chapitre, nous présentons l'étude expérimentale visant à déterminer les l'effet de nature de sable sur les propriétés 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 et obtenir les modèles mathématiques. Enfin, une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives clôture ce mémoire de fin d'études.

CHAPITRE 1 :

LES PLANS D'EXPERIENCES

1. Introduction

Les essais de mise au point d'un produit ou d'un processus font partie intégrante du métier des ingénieurs. Ceux-ci sont souvent amenés à rechercher des valeurs des paramètres qui définissent les produits ou les paramètres de réglage des moyens de production afin d'obtenir les performances désirées.

Pour cela on utilise la technique du plan d'expériences qui est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser performances du système étudié.

2. Petit historique des plans d'expérience

- Les bases datent des années 1925 (R.A. FISHER)
- Dans le secteur Industriel, technique restée confidentielle jusqu'après la deuxième guerre mondiale ; développement au Japon entre les années 1950 et 1960 grâce notamment à TAGUCHI ; ses travaux sont diffusés aux Etats Unis et appliqués à grande échelle vers les années 1970.
- En Europe, les grandes Entreprises industrielles utilisent les plans expérimentaux à partir des années 1980. Actuellement cette méthode d'expérimentation est utilisée par l'ensemble des industriels petits et grands la méthode est maintenant considérée comme un **OUTIL DE LA QUALITE**, indispensable
- .au stade de la conception des produits pour permettre de fixer les paramètres de développement du produit de façon optimal. au cours de la production, comme complément indispensable des méthodes de maîtrise
- des proc

3. Définition:

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques.

Dans les paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit années trente, les premiers plans d'expériences structurés ont vu le jour en agronomie. Ces plans se sont développés au cours des dernières années et leur utilisation s'est étendue pour intéresser, finalement, tous les secteurs de production et de compétitive

4. Conditions d'application des plans d'expériences

- Condition 1 :

S'il y a un troisième facteur, on le représente aussi par un axe orienté et gradué, et 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.

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

- Condition 2 :

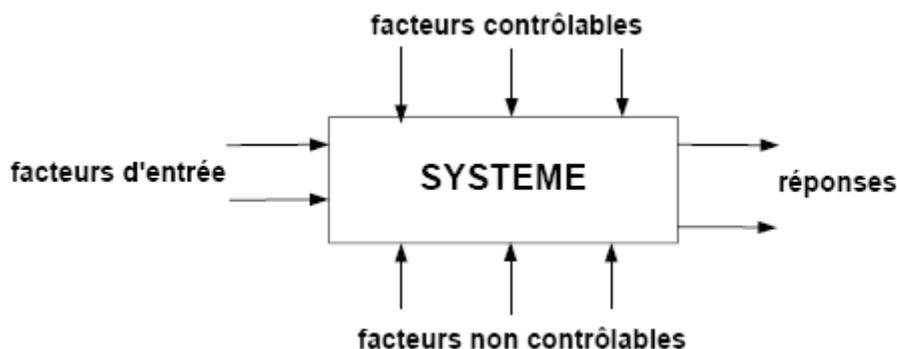
La réponse doit être homoscédastique. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

4.1.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.

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

4.2.1.Facteur :

Les facteurs sont les paramètres d'entrée qui interviennent sur le système ou le procédé. Un facteur est dit contrôlé si il est identifié et sa variation maîtrisée. Les facteurs non contrôlés sont responsables de la dispersion des paramètres de sortie et entraînent les bruits du système, qui viennent perturber les réponses et nécessitent la répétition d'une même combinaison de niveau des facteurs au cours des différentes expériences.

Un facteur peut être qualitatif ou quantitatif. Facteur significatif est un facteur qui, lorsqu'il varie, modifie la réponse du système.

4.2.2.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

4.2.3.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.)

4.2.4.Domaine :

La délimitation des niveaux de chaque facteur sera également examinée avec attention. Le domaine ne doit pas être trop petit pour que les conclusions aient une certaine généralité. Il ne doit pas être trop grand non plus, car les modèles mathématiques postulés risquent alors de ne plus être adaptés. Le meilleur compromis est difficile à trouver si l'on n'a pas suffisamment de connaissances sur le phénomène étudié. Il est conseillé, dans ce cas, de procéder à une étude préalable pour

4.2.5.Réponses :

Le choix de la ou des réponses est une étape capitale. Toute l'analyse et toutes les conclusions dépendent de ce choix. Une réponse mal adaptée au problème rendra l'expérimentation inutilisable ou conduira à des conclusions sans intérêt. La réponse sélectionnée doit permettre de répondre sans ambiguïté à la question posée. Ce choix n'est pas aussi simple que l'on pourrait le croire et c'est parfois la principale difficulté à laquelle on se heurte. Par exemple, nous avons passé beaucoup de temps et dépensé des trésors d'imagination pour trouver une réponse permettant de bien mesurer le pétillant d'une eau minérale ou pour évaluer le stress des contrôleurs du ciel.

4.3.Espace expérimental

Pour présenter l'espace expérimental nous utiliserons un espace à deux dimensions, ce qui facilitera les représentations graphiques. Il est ensuite facile d'étendre les notions introduites à des espaces multidimensionnels. Un facteur continu peut être représenté par un axe gradué et orienté. S'il y a un second facteur continu, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté.

Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure 1). L'espace expérimental comprend tous les points du plan « facteur1*facteur2 » et chacun d'eux représente une expérience

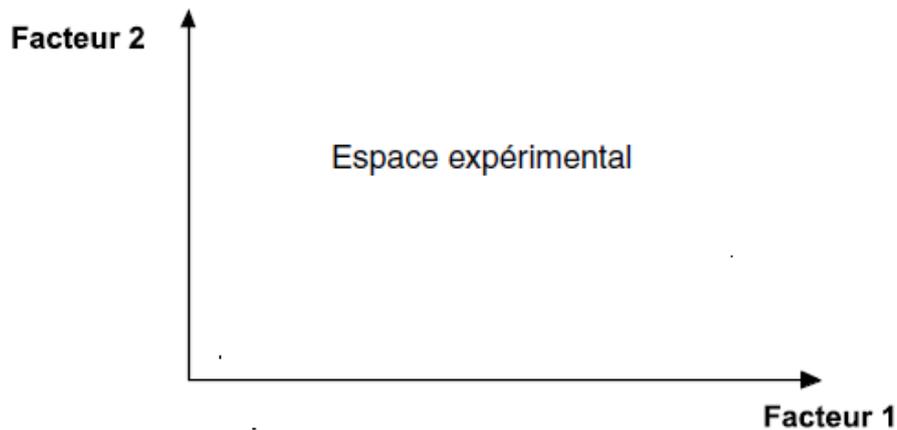


Figure 1: Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

5. Les types de plans d'expérience

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 ,.....ex

5.1. Plan hybrides

Les plans hybrides [2] 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'iso variance par rotation. L'orthogonalité garantie la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'iso-variance 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. la manière de plan hybrides : 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.

5.2. Les plans de Rechtschaffner

Permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux. Toutes les autres interactions sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Le modèle mathématique adopté au départ de l'étude est donc

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad \dots\dots(1)$$

Il suffit de choisir un plan fractionnaire de résolution III pour obtenir un plan de Rechtschaffner. Mais l'idée de ne déterminer que les effets principaux et les interactions d'ordre deux a été étendue par Rechtschaffner aux plans du second degré et aux facteurs prenant trois niveaux. Ces plans spéciaux sont indiqués dans des tables. Les plans de Rechtschaffner sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui auxquelles il conviendra de se référer en cas de besoin [3]. Il y a Les plans de Rechtschaffner pour seconde degré. Les plans de Rechtschaffner permettant d'établir un modèle du second degré sont des plans saturés. S'il y a k facteurs, il faut effectuer un nombre, n, d'essais égale :

$$n = (1/2) * (2 + 3k + k^2) \dots\dots(2)$$

5.3. Les plans de Plackett et Burmann

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman [4] sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement 2^k lignes (4, 8, 16, 32, etc).

Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction analogue à celui des plans de Kos

$$y = a_0 + \sum a_i x_i \dots \dots (3)$$

5.3.1. Les tables de Taguchi

Les Tables de Taguchi sont des plans de Plackett et Burman dans lesquels on a remplacé +1 par 1 et -1 par 2. Les noms des plans ont également été traduits. Le plan 23 est la Table L8 et le plan 24 est la Table L16. Le plan de 12 essais, appelé Table L12, est un plan de Plackett et Burman. A l'origine ces plans étaient utilisés avec un modèle sans interaction. Aujourd'hui, certaines personnes leur appliquent les résultats et les principes de la théorie classique.

Box et Behnken c'est c'est plans qui permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1, 0 et +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre les résultats des essais déjà effectués.

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube. Pour quatre facteurs ce plan est construit sur un hyper cube à quatre dimensions. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube ou de l'hyper cube, mais au milieu des arêtes ou au centre des faces (carrés) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de répartir tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère ou sur une hyper sphère suivant le nombre de dimensions. On ajoute des points au centre du domaine d'étude

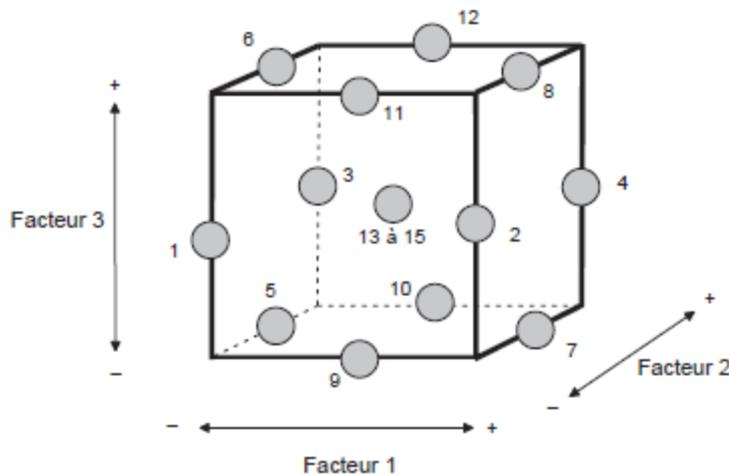


Figure 2: Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs. Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

Le plan de Box-Behnken pour trois facteurs est illustré par la figure 2. Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter des points d'expériences au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box-Behnken pour 3 facteurs possède donc $12 + 3$ essais, soit 15 essais. On pourra remarquer qu'avec 4 points au centre au lieu de 3, on obtient un plan qui répond au critère de presque-orthogonalité.

5.4. Les plans booléens

Les plans booléens [5] ressemblent aux plans factoriels à deux niveaux mais l'interprétation mathématique est complètement différente puisque la nature des variables est différente. Chaque essai permet de connaître la valeur d'un minterm (ou d'un maxterm). L'ensemble de tous les minterms donne la forme canonique de la fonction cherchée. La forme canonique est ensuite simplifiée grâce à l'une des méthodes classiques de simplification des fonctions booléennes (Méthode de Veitch la variance pour les variables discrètes. Si les facteurs d'étude sont des variables booléennes, c'est-à-dire ne prenant que deux valeurs, il faut trouver la fonction booléenne, ne prenant elle-même que deux valeurs, en fonction des valeurs des

5.5. Plans de Doehlert

Les points d'expériences des plans proposés par David H. Doehlert en 1970 [6] remplissent de manière uniforme l'espace expérimental. Pour deux facteurs les points expérimentaux sont situés aux sommets d'un hexagone régulier et il y a un point au centre (Figure .3). Ayant sept points expérimentaux, ce plan permet de calculer au moins sept inconnues, donc sept coefficients. Comme les points expérimentaux sont régulièrement répartis dans l'espace expérimental, il sera facile d'étendre le plan vers n'importe quelle direction de l'espace en ajoutant des points qui seront, eux aussi, régulièrement répartis.

Ces plans permettent également l'introduction facile de nouveaux facteurs. Les nouvelles expériences viendront compléter les premières et aucune expérience ne sera perdue. La seule précaution à prendre est de maintenir les facteurs non étudiés à une valeur constante (niveau 0) pendant l'étude des facteurs actifs.

Le tableau.1 est la traduction, sous forme de matrice d'expériences, de la figure .3. La disposition des points selon la figure.3 conduit à cinq niveaux pour le facteur 1 et trois niveaux pour le facteur 2. Avant d'attribuer les numéros aux facteurs, on Vérifiera qu'ils sont compatibles avec ces nombres de niveaux

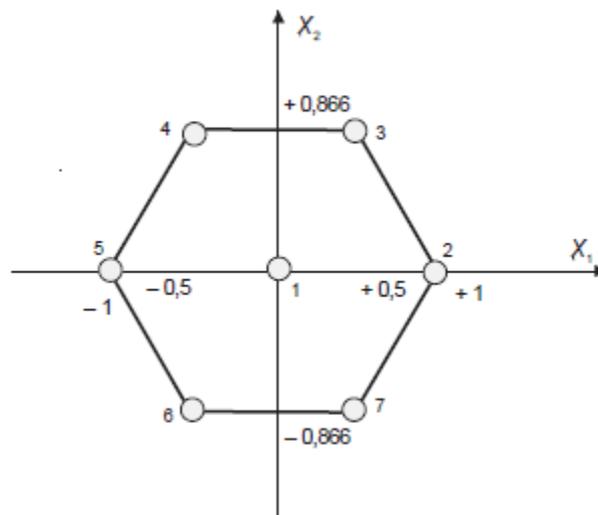


Figure 3: Plan de Doehlert pour l'étude de deux facteurs.

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

Les points sont régulièrement disposés sur un hexagone et il y a un point central

Tableau 1:Plan de Doehlert pour deux facteurs.

Essai n°	Facteur 1	Facteur 2
1	0	0
2	1	0
3	0.5	0.866
4	-0.5	0.866
5	-1	0
6	-0.5	-0.866
7	0.5	-0.866

Si l'on éprouve quelques difficultés, on peut toujours adopter un autre plan de Doehlert en faisant tourner l'hexagone. La figure.4 illustre une autre disposition du même plan après une rotation de 90°. C'est maintenant le facteur 1 qui a 3 niveaux et le facteur 2 qui en a 5.

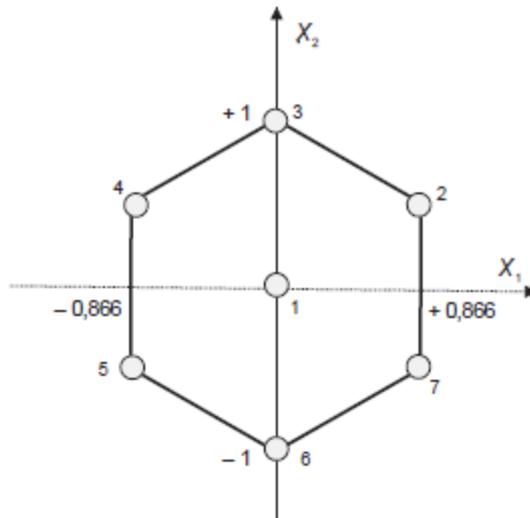


Figure 4:Autre disposition possible des points d'un plan de Doehlert Pour l'étude de deux facteurs. Les points sont toujours régulièrement disposés dans l'espace expérimental.

Tous les points du plan de Doehlert sont sur un cercle de rayon unité (en grandeurs centrées réduites). Le domaine défini par les plans de Doehlert est un domaine sphérique, un cercle dans un espace à deux dimensions, une sphère dans un espace à trois dimensions, une hyper sphère dans un espace à plus de trois dimensions.

Si les résultats recherchés ne sont pas dans le domaine d'étude, on peut étendre ce domaine dans la direction où l'on a le plus de chances de trouver la solution souhaitée. Il suffit d'ajouter trois points d'expériences (Tableau.2) et l'on retrouve un nouveau plan de Doehlert (Figure.5). En effet, les points n° 2, 1, 7, 8, 9, 10 et 3 forment un nouvel hexagone. On peut étendre le plan d'expériences

Tableau 2:Points d'extension du plan de Doehlert pour deux facteurs

Essai n°	Facteur 1	Facteur 2
8	1.5	-0.866
9	2	0
10	1.5	0.866

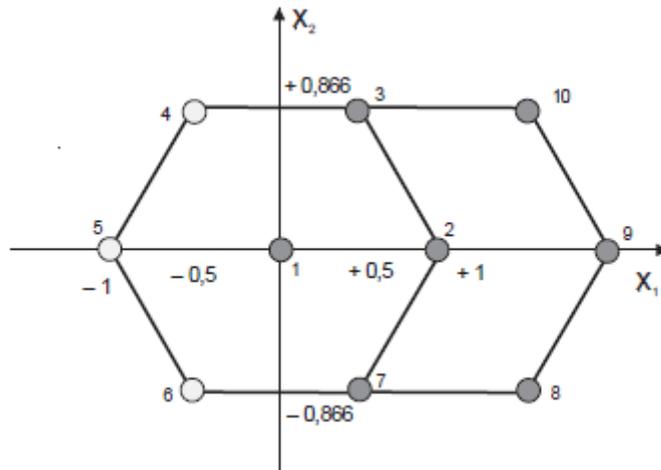


Figure 5: Extension d'un plan de Doehlert à deux facteurs.

Trois points suffisent pour retrouver un nouveau plan de Doehlert.

5.6. Les plans de Koshal

Les plans de Koshal [7] sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. On ne peut pas évaluer les interactions. Le modèle On ne peut pas évaluer les interactions. Le modèle mathématique est ces plans, peu connus, sont très pratiques pour dégrossir un problème. Ils offrent l'avantage de donner directement l'effet des facteurs. Ils forment le début d'un plan factoriel qu'il est toujours loisible de compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire. La Figure 6 illustre un plan de Koshal pour facteurs.

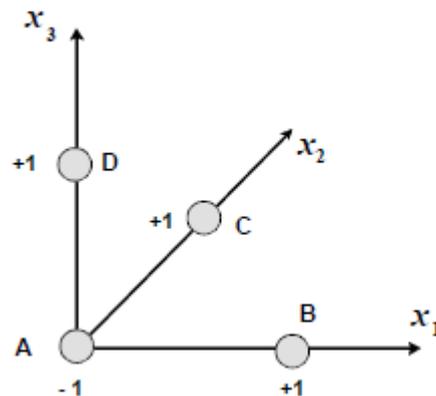


Figure 6: Plan de Koshal pour trois facteurs. Ces points forment le début d'un plan factoriel complet 2^3

5.7. Plans factoriels complets

Nous allons dans un premier temps présenté les plans factoriels [8], 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

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté : 22. 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.

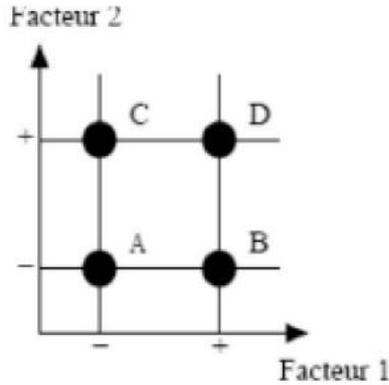


Figure 7:Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental

5.7.1.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 continus et pour les variables discrètes.

5.7.2.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 :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + e \dots \dots \dots (4)$$

- y : est la réponse
- x_{1,2} : représente le niveau attribué au facteur 1,2
- β₀ : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude
- β₁ : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1
- β₂ : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2
- β₁₂ : 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 22 et avec des facteurs β₁, β₂.

5.7.3.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 :

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \sum \beta_{ij} x_i^2 + \beta_{ij \dots z} x_i x_j \dots x_z + e \dots (5)$$

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.

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

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 2^{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.

5.7.4.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 3². S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3³), 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

5.8.Les plans de Mozzo

Les plans de Mozzo [9] présentent deux avantages : Ils sont séquentiels et le nombre de niveaux d'étude est restreint. On peut commencer par étudier deux facteurs en trois essais. Puis, si l'on désire étudier un troisième facteur, il suffit de réaliser trois essais supplémentaires. Douze essais permettent d'étudier quatre facteurs.

Les plans de Mozzo ne permettent pas tous d'établir un modèle du second degré. Il faut alors avoir recours aux plans quadratiques gigognes de Mozzo.

5.9.Plans de mélange

Un plan de mélange[10] est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés [G.Sadoet 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 ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

5.9.1.Contrainte fondamentale des mélanges

Soit un mélange ayant n constituants. Le premier constituant représente un certain pourcentage du mélange, le second constituant un autre pourcentage du mélange, etc. Ainsi, chaque constituant participe pour une certaine part au mélange total. Mais l'ensemble des constituants du mélange forme un tout et la somme de leurs teneurs est égale à 100 %. Lorsque l'on a défini les proportions des $n - 1$ premiers constituants, la proportion du dernier ne peut plus être choisie, elle est déjà déterminée. Si l'on note x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

La teneur de chaque constituant reste comprise entre 0 et 100 %. Lorsqu'on augmente la teneur de l'un des constituants, la teneur des autres est automatiquement diminuée pour que la somme de toutes les teneurs reste égale à 100 %.

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité, on écrira :

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. C'est à cause de cette contrainte que les mélanges doivent être étudiés à part car les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes des représentations utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

5.9.2.Représentation géométrique des mélanges

5.9.2.1.Mélange à deux constituants

Soit x_1 la teneur du premier constituant et x_2 la teneur du second. Adoptons la représentation cartésienne : l'axe Ox_1 est orthogonal à l'axe Ox_2 . Les axes sont gradués en proportions variant de 0 à 1. Un mélange quelconque contenant x_a de A et x_b de B est représenté par un point situé à l'intersection des coordonnées x_a et x_b (Figure 8). Ce point qui représente un mélange est appelé soit point de compositions, soit point de mélange, soit tout simplement point

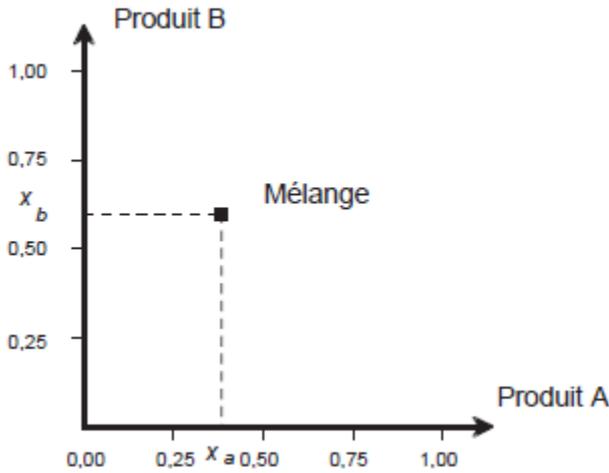


Figure 8: Représentation d'un mélange dans un système d'axes cartésiens.

La contrainte des mélanges introduit une relation entre x_a et x_b :

$$x_a + x_b = 1$$

Que l'on peut écrire

$$x_b = -x_a + 1$$

Cette dernière relation exprime que les points de coordonnées x_a et x_b sont sur une droite de pente -1 , coupant l'axe du produit A au point d'abscisse 1,00 (point A sur la figure 9) et l'axe du produit B au point d'ordonnée 1,00 (point B sur la figure 9). Les compositions x_a et x_b variant entre 0 et 1, il n'y a que le segment A B qui soit utile. Toutes les compositions possibles des mélanges des deux produits A

et B sont représentées par les points de ce segment de droit

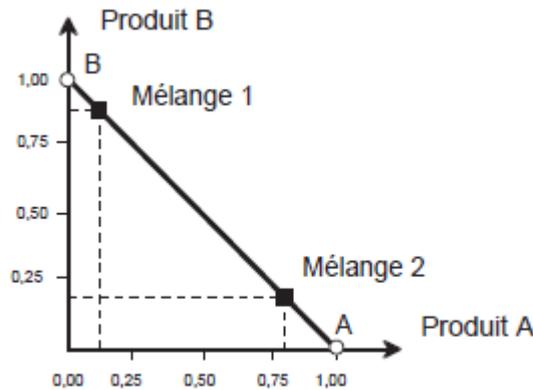


Figure 9: Les compositions des mélanges à deux constituants peuvent être représentées par les points du segment de droite AB.

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

On peut donc ne conserver que ce segment de droite et abandonner les axes Ox_1 et Ox_2 . Le produit pur A est représenté par l'une des extrémités du segment AB. Le produit B est représenté par l'autre extrémité. Ce segment porte une double graduation (Figure 10), celle des teneurs du premier produit et celle des teneurs du second produit. La lecture de la composition des mélanges sur ce segment demande un certain apprentissage. Elle se lit à la fois de droite à gauche et de gauche à droite.

Lecture du diagramme des mélanges binaires

Le segment de la figure 10 représente les mélanges des deux constituants A et B. Le produit A est à droite et le produit B est à gauche. La graduation inférieure est celle du produit A. Elle varie de 0 à gauche à 1 à droite. La graduation supérieure est celle du produit B. Elle varie de 0 à droite à 1 à gauche.

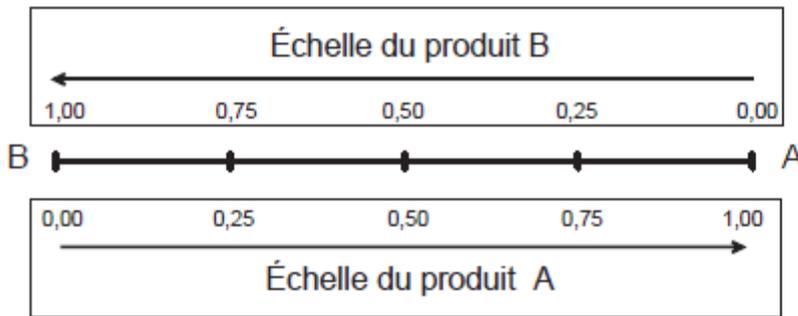


Figure 10: Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite.

Les échelles se lisent, l'une dans un sens, l'autre dans l'autre sens. La somme des teneurs, en un point de l'échelle, est égale à l'unité.

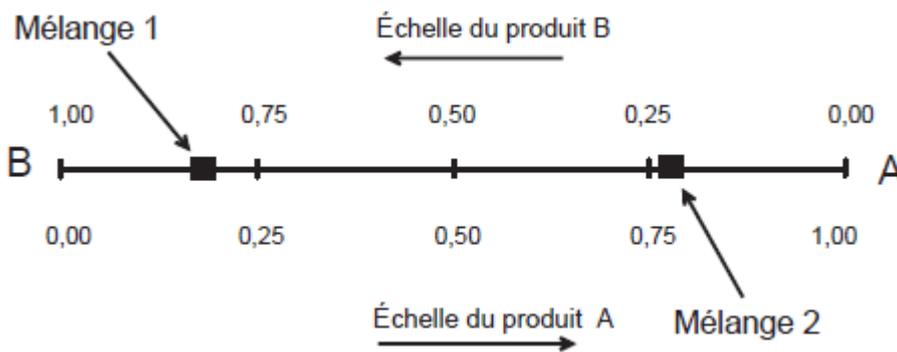


Figure 11: Le mélange 1 contient 20 % de A et 80 % de B. Le mélange 2 contient 77 % de A et 23 % de B.

Un premier mélange (mélange 1) est illustré par un point situé à 20 % de A et 80 % de B. Ce point est près de B et loin de A, ce qui est normal puisqu'il y a plus de B que de A dans le mélange (Figure 11). Un second mélange (mélange 2) est illustré par un point situé à 77 % de A et 23 % de B. Ce point est près de A puisque c'est le constituant le plus important. On peut supprimer l'une des deux échelles puisque la somme des teneurs en un point est toujours égale à 1. Connaissant l'une des teneurs, une simple soustraction donne la teneur complémentaire. C'est en général ce qui est fait.

Lecture du diagramme des mélanges ternaires

Un raisonnement semblable à celui que nous avons tenu pour deux constituants montre que l'on peut représenter les mélanges ternaires à l'aide d'un triangle équilatéral. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. Par exemple le côté gauche AB du triangle (Figure 12) représente les compositions des mélanges des seuls produits A

et B ; et ces mélanges ne contiennent pas de produit C. Chaque côté du triangle équilatéral est gradué de 0 à 1. On n'a laissé que l'échelle d'un seul produit sur chaque côté. L'échelle de l'autre produit se déduit par complément à 1. Le côté AB est gradué pour le produit A : 1 est au point A et 0 au point B. C'est l'échelle du produit A. Le côté BC est gradué pour le produit B : 1 est au point B et 0 est au point C. Le côté CA est gradué pour le produit C : 1 est au point C et 0 est au point A. Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. La teneur en produit A se lit sur le côté AB qui est l'échelle du produit A. On projette le point M sur AB parallèlement à BC (côté opposé à A). De même la teneur en B se lit sur l'échelle de B (côté BC) en projetant le point M sur BC parallèlement à AC (côté opposé à B). Enfin la teneur en C se lit sur l'échelle de C (côté AC) en projetant le point M sur AC parallèlement à AB (côté opposé à C)

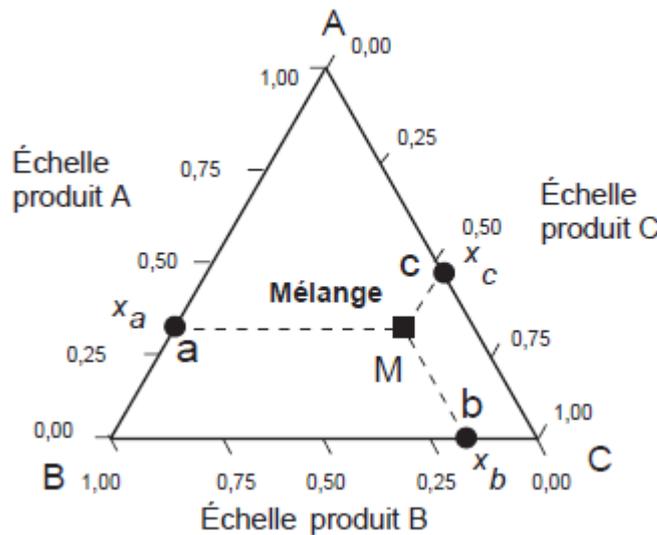


Figure 12: Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral

Les teneurs respectives des trois constituants dans le mélange sont données par les relations :

$$bM = Ba = \text{teneur en A dans le mélange M}$$

$$cM = Cb = \text{teneur en B dans le mélange M}$$

$$aM = Ac = \text{teneur en C dans le mélange M}$$

Les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent le respect de la contrainte fondamentale des mélanges :

$$Ma + Mb + Mc = Ac + Ba + Cb = AB = AC = BC = 1$$

5.9.2.2. Mélanges à quatre constituants

Les quatre produits purs sont aux sommets d'un tétraèdre régulier (Figure 13). Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du tétraèdre. Les mélanges ternaires sont représentés par les faces du tétraèdre qui sont des triangles équilatéraux. Les mélanges quaternaires sont représentés par les points

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

du volume intérieur du tétraèdre. On obtient les compositions d'un mélange en projetant le point représentatif du mélange sur les faces et sur les côtés du tétraèdre.

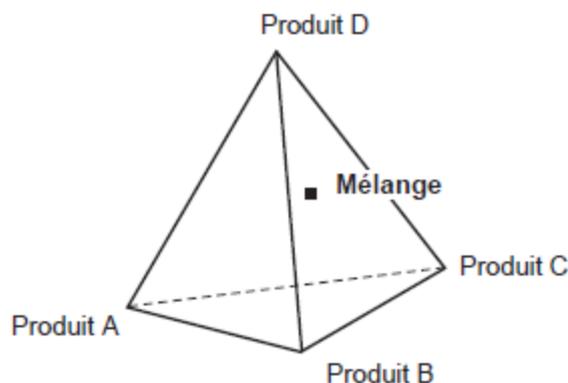


Figure 13: Représentation des mélanges à quatre constituants par un tétraèdre régulier.

Afin de ne pas commettre d'erreur dans la lecture des compositions, on fera attention aux conventions qui ont été adoptées pour graduer les côtés du tétraèdre. Au-delà de quatre facteurs, la représentation géométrique n'est plus possible. On utilise alors uniquement la représentation en tableaux.

5.9.2.3. Plans de mélanges classiques

Les plans de mélanges classiques supposent que les produits purs ont la propriété d'usage recherchée et qu'il n'y a aucune contrainte qui pèse sur eux.

L'usage est de classer les principaux types de plans de mélanges suivant l'emplacement des points représentatifs des compositions. On distingue :

- les plans en réseaux,
- les plans de mélanges centrés,
- les plans de mélanges centrés augmentés.

5.9.2.4. Plans en réseaux

Les plans en réseaux (Simplex lattice design dans la littérature anglo-saxonne) sont les premiers plans de mélanges qui ont été introduits. Ils ont été présentés par Scheffé dans les années 1958-1965. Les points de composition sont régulièrement repartis dans l'espace d'étude. Pour les mélanges à trois constituants, le plus simple des plans de mélanges en réseaux ne contient que les trois produits purs. Les points représentatifs de ces produits sont aux sommets du triangle équilatéral (Figure 14). Les coordonnées de ces points sont 0 et 1.

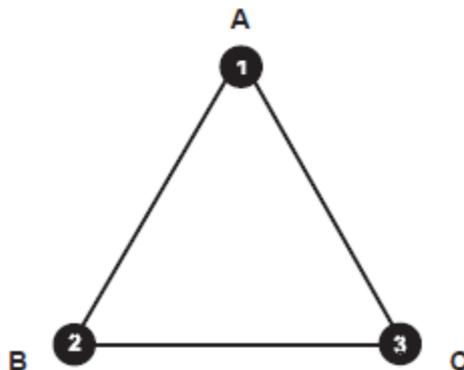


Figure 14: Plan de mélanges ne comportant que les trois produits purs.

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

Le plan qui ne fait intervenir que les produits purs peut être enrichi par les points de composition moyenne, c'est-à-dire par les mélanges contenant 50 % de chacun des produits. Ces points de composition moyenne se situent au milieu des côtés du triangle. Leurs coordonnées sont 0 et 1/2. Les points n° 4, 5 et 6 forment un réseau. La longueur unité des côtés du triangle a été divisée par 2 et les coordonnées de ces points sont égales à 1/2. Si l'on désire un réseau de points plus serré, il faut diviser la longueur des côtés par trois. Le pas de ce nouveau réseau est 1/3. On peut continuer à construire ainsi des réseaux de

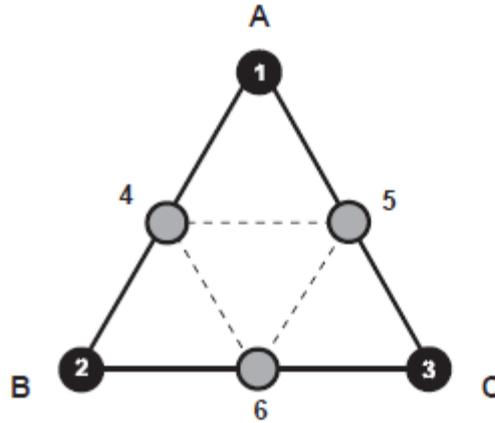


Figure 15: Plan de mélanges en réseaux (Simplex Lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié. Ce plan est noté {3,2}

plus en plus serrés en divisant l'unité par m. Le pas du réseau est de 1/m et les coordonnées des points expérimentaux sont 0, 1/m, 2/m, 3/m jusqu'à m/m = 1.

Pour nommer ces plans on adopte la convention suivante : on utilise deux chiffres, le premier correspond au nombre de constituants du mélange et le second correspondu diviseur utilisé pour établir le pas du réseau. Ces deux chiffres sont séparés par une virgule et mis entre deux accolades. Ici, le plan de la figure 10.8 est un plan {3, 2}, soit 3 constituants et un pas de 1/2. Le plan de la figure 15 est un plan {3, 3}, soit 3 constituants et un pas de 1/3.

Cette notation permet de calculer très rapidement le nombre de compositions à préparer et à étudier connaissant le nombre de constituants du mélange et le nombre m. Pour un plan {q, m}, le nombre total de compositions différentes est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \dots\dots\dots(6)$$

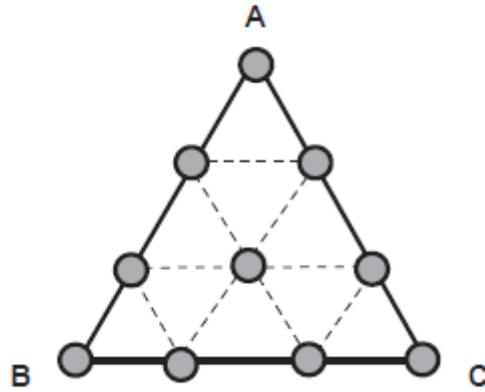


Figure 16: Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges 1/3-2/3 et 1/3-1/3-1/3. Ce plan est noté {3, 3}.

5.9.2.5. Plans de mélanges centrés

Les plans de mélanges centrés (Simplex-centroid-designs dans la littérature anglo-saxonne) se distinguent des plans en réseaux par la présence systématique d'un point central, c'est-à-dire d'une composition contenant autant de chacun des constituants du mélange (Figure 17). Le plan centré permettant d'étudier trois constituants comprend :

- les produits purs,
- les mélanges moitié-moitié de deux produits purs,
- le mélange contenant un tiers de chaque produit pur (point central).

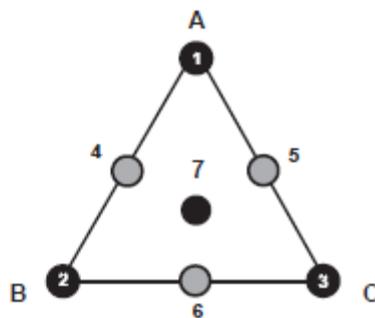


Figure 17: Plan de mélanges centrés (Simplex-centroid design) comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié et le mélange équi-proportionnel des trois produits purs.

Le nombre N de compositions à étudier pour des plans de mélanges centrés à constituants est donné par la formule :

$$N = 2^q - 1$$

Par exemple, dans le plan de mélanges centré à trois constituants, il y a 7 compositions différentes à étudier :

$$N = 2^3 - 1 = 8 - 1 = 7$$

5.9.2.6.Plans de mélanges centrés augmentés

Les plans de mélanges centrés augmentés (Augmented Simplex-centroid-designs dans la littérature anglo-saxonne) sont des plans de mélanges centrés auxquels on ajoute les centres de gravité des simplex unitaires. Par exemple, le plan de mélanges centré pour trois composants comprend quatre simplex unitaires (Figure 18).

Le centre de gravité de l'un des simplex unitaires est déjà occupé (point noir n° 7). Il reste donc à ajouter trois points (points blancs n° 8, 9 et 10) au centre des trois autres simplex unitaires.

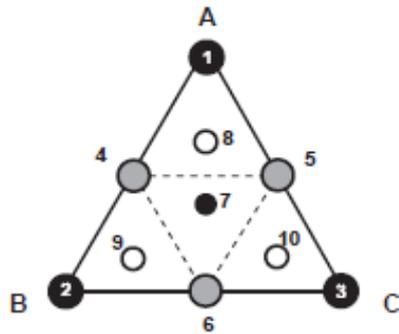


Figure 18:Plan de mélanges centré augmenté (Augmented Simplex-centroid designs) comportant les trois produits purs, les mélanges moitié-moitié, le mélange équiproportionnel des trois produits et les mélanges situés aux centres de gravité des simplex unitaires.

5.9.3.Modèles mathématiques des plans de mélanges

Le modèle mathématique appliqué aux plans de mélanges prend en compte la contrainte fondamentale des mélanges. Les polynômes utilisés présentent des particularités que nous allons indiquer.

5.9.3.1.Modèle du premier degré

On suppose que les variations de la réponse sont proportionnelles aux compositions du mélange. On pourrait adopter, en premier lieu, le même modèle que celui des plans factoriels classiques dont les facteurs sont indépendants. Par exemple, pour un mélange à trois constituants on pourrait écrire en un point donné :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2 + a_3x_3 \dots(7)$$

Mais les compositions x_i ne sont pas indépendantes. Il faut tenir compte de la contrainte fondamentale des mélanges :

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

La relation (7) peut alors s'écrire :

$$y = a_0(x_1 + x_2 + x_3) + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

ou en regroupant les coefficients :

$$y = (a_0 + a_1)x_1 + (a_0 + a_2)x_2 + (a_0 + a_3)x_3$$

Ce modèle ne comporte plus de terme constant. Si l'on change de notation et que l'on pose :

$$b_1 = a_1 + a_0 \qquad b_2 = a_2 + a_0 \qquad b_3 = a_3 + a_0$$

l'ensemble prend alors la forme suivante :

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

Il n'y a pas de terme constant. Cette disparition est la conséquence directe de la contrainte fondamentale des mélanges

5.9.3.2. Modèle du second degré

Le modèle mathématique du second degré comprend les termes du premier degré, les termes rectangles et les termes carrés. Comme précédemment, nous allons partir du modèle mathématique des plans factoriels et nous allons examiner les conséquences de la contrainte fondamentale des mélanges. Pour un mélange à deux constituants, on pourrait écrire sachant qu'il n'y a pas de constante :

On constate que le terme carré est converti en un terme du premier degré et en un terme rectangle. Les termes carrés disparaissent donc de la relation initiale. On obtient un modèle comprenant uniquement des termes du premier degré et des termes rectangles, soit en adaptant les notations :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

Pour un mélange à trois constituants, on a :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

5.9.3.3. Modèle du troisième degré

Le modèle mathématique du troisième degré, particulier aux plans de mélanges, peut s'obtenir à partir d'un polynôme du troisième degré sur lequel on applique la contrainte fondamentale des mélanges. Le modèle, appelé modèle cubique complet, est le suivant :

$$y = bx_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b'_{12}x_1x_2(x_1 - x_2) + b'_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + b'_{23}x_2x_3(x_2 - x_3) + b'_{123}x_1x_2x_3$$

Il est plus courant d'utiliser le modèle simplifié qui ne comprend que les termes du premier degré, les termes rectangles et le produit des trois constituants. Le modèle simplifié, appelé modèle cubique restreint, correspondant à un mélange de trois constituants est le suivant :

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

5.9.4. Conclusion sur les plans de mélange

- On peut simplifier la préparation d'un plan de mélange tout en utilisant une matrice orthogonale.
- Le dépouillement est alors beaucoup plus simple; de plus le dépouillement peut traiter la dispersion des caractéristiques si chaque essai du plan est répété.
- On peut incorporer avec les concentrations 1 ou 2 paramètres procès concourant à l'obtention d'une dispersion minimale des caractéristiques.

5.10. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux 2^{k-q}

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou 2^q fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant.

A la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p coefficients inconnus avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les coefficients de telle manière qu'il y ait n inconnues. On résout donc un système de n équations à n groupes de coefficients. On appelle ces groupes de coefficients, des contrastes ou des alaises et on dit que les coefficients sont alaisés dans les contrastes.

5.10.1. Définition des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté 2^k .

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet possède $1/2 \cdot 2^k$ ou 2^{k-1} essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

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

Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 2^1 .

Un plan 2^{5-2} permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par $2^2 = 4$.

Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par 2^q .

5.10.2. Application au plan factoriel fractionnaire 2^{3-1}

On veut étudier 3 facteurs en ne faisant que 4 essais. On prend la précaution de choisir les 4 essais pour que la matrice soit une matrice X_S orthogonale d'Hadamard. Les 4 points choisis sont disposés comme l'indique la **X** Figure 19

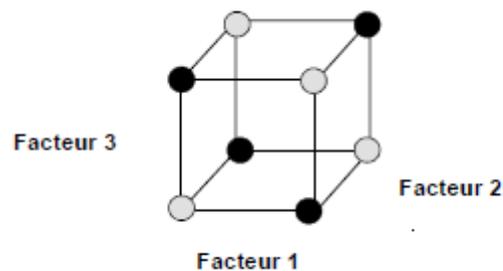


Figure 19: Un plan factoriel complet 2^3 peut être divisé en deux plans factoriels fractionnaires 2^{3-1} , un plan noir et un plan gris.

Le modèle mathématique de la réponse d'un plan factoriel à 3 facteurs comporte 8 coefficients (modèle 1)

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{123} X_1 X_2 X_3$$

Si on effectue 4 essais, on obtient un système de quatre équations à 8 inconnues

$$Y = Xa$$

CHAPITRE 1 : LES PLANS D'EXPERIENCES

On ne sait pas résoudre le système {11}. Comme il n'y a que 4 essais, on ne peut calculer que 4 inconnues. On adopte le modèle (modèle 2) :

$$y = l_0 + l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3$$

$$l_0 = a_0 + a_{123}$$

$$l_1 = a_1 + a_{23}$$

$$l_2 = a_2 + a_{13}$$

$$l_3 = a_3 + a_{12}$$

On sait calculer les contrastes l_i du modèle 2. Mais la difficulté est d'arriver à interpréter ces contrastes pour remonter aux coefficients.

6. Conclusion

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 2 :

ÉTAT DE L'ART

1.Introduction

Ce chapitre décrit les types des sables utilisés pour la fabrication des bétons et une bibliographie concernant l'influence de la nature du sable en utilisant des sables avec différentes morphologies et origines (SO, SC, SD et leurs mélanges binaires et ternaires) sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.

2.Sables

Les sables sont des granulats de dimension maximale « D » n'excédant pas 3mm. On distingue:

- ❖ les sables naturels ou alluvionnaires;
- ❖ les sables des dunes;
- ❖ les sables des carrières.

On peut classer les sables selon trois paramètres dont:

a) La granularité : permet de séparer les sables en trois catégories sont:

- ❖ Sables fins;
- ❖ Sables moyens;
- ❖ Sables grossiers.

b) La propreté et la teneur en fines : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

c) La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit:

- ❖ Sables siliceux;
- ❖ Sables silico-calcaires;
- ❖ Sables calcaires.

Les sables sont des matériaux indispensables pour la fabrication du béton. Trois familles de sables se distinguent :

- ☞ Les sables ronds siliceux, dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.

- ✎ Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir.
- ✎ Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières.

Les granulats peuvent faire varier les prix du béton, il faut tendre à maximiser la proportion des granulats dans le mélange pour en minimiser ainsi le coût. Aussi faut-il veiller également à ce que les granulats soient autant que possible exempt de substances nuisibles, en effet, ces substances peuvent entraver la prise de la pâte de ciment et réduire la résistance et la durabilité des bétons.

2.1 Sable d'oued

Les granulats non concassés (sables roulés) produits généralement à partir d'alluvions siliceuses. L'extraction de ces produits se fait à la pelle mécanique en site terrestre ou par dragage en site aquatique.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile.

- * Le module de finesse de sable ($1.8 \leq M_f < 2.2$) donc le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- * Le module de finesse de sable ($2.2 \leq M_f < 2.8$) donc le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- * Le module de finesse de sable ($2.8 \leq M_f \leq 3.2$) donc le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations.

2.2 Sable concassé

En Algérie, plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulats, pour l'essentiel de nature calcaire. Malheureusement, plus de 20% des sables fabriqués sont impropres à l'utilisation comme sable de construction du fait d'une teneur en fines supérieures à 12% (limite normative actuelle). De même, les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploités.

Le remplacement d'une partie du ciment par les fillers calcaires en provenance des sables de concassage peut améliorer de manière sensible les propriétés mécaniques des bétons en raison des effets physiques et activités chimiques des fillers en provenance de sables concassés. Cette amélioration mènera à la valorisation des sables concassés et la préservation de l'environnement par une optimisation de l'utilisation des carrières.

La présence des additions calcaires provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment et favorise les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, d'autant plus que les particules sont fines [1]. D'après *Cyr et al.* [2], ont noté que l'addition calcaire n'est pas totalement inerte puisqu'elle réagit avec le C_3A et le C_4AF pour former des carbo-aluminates.

L'utilisation du sable concassé influence positivement la résistance aux chlorures ; le coefficient apparent de diffusion des ions chlorures est toujours inférieur pour les mortiers confectionnés avec le sable concassé par rapport à celui avec le sable siliceux [3]. L'utilisation d'un sable de concassage riche en fines permet aussi de corriger la granulométrie du béton. Les mortiers confectionnés avec des sables de concassage ont donnés des résistances mécaniques meilleures que celles obtenues avec les sables siliceux roulés [4]. L'utilisation du sable de concassage diminue le coefficient d'absorption d'eau par capillarité [5]. La valorisation des sables de concassage non seulement dans les bétons courants mais aussi dans les bétons à super plastifiant, les bétons autoplaçants et les bétons à hautes performances. Ont confirmé qu'il était possible d'obtenir de bonnes performances mécaniques pour tous les types des bétons. Les propriétés mesurées à l'état frais et à l'état durci ont permis de montrer que les fillers amélioreraient la plupart des propriétés. Les propriétés mécaniques ont montré qu'il est possible d'obtenir de bonnes performances pour tous les types de bétons étudiés, même ceux réalisés avec les sables ayant un taux de fines élevé [6].

2.2.1. Définition

Le sable est l'élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. Les carrières gênèrent de sable comme un sous-produit.

Ce sable est rarement utilisé dans la confection des mortiers et bétons en raison de leurs taux élevé en fines qui varié de 8 à 30% et provoquant ainsi un problème de stockage au niveau des carrières. Et par conséquent des programmes de recherches ont été menés pour les utilisations des sables de carrières dans

la confection des mortiers et bétons. Les sables de concassage se composent de la fraction fine de granulats provenant du concassage et du criblage de pierres et de roches naturelles. Leurs dimensions se situent entre 0 et 3 mm et sont disponibles dans les carrières.

L'utilisation des sables est déterminée par la dimension des grains et les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques de la roche dont ils proviennent. En règle générale, ils s'utilisent pour des sous-fondations et fondations, dans des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux [7].

2.2.2. Technologie et procès de production des sables

La production de granulats à partir de roches massives est aujourd'hui une technique maîtrisée et éprouvée. Elle permet de proposer sur le marché des gravillons répondant aux exigences de la clientèle. Cette production s'accompagne de celle d'un sable dont les qualités intrinsèques sont particulièrement intéressantes pour l'optimisation des formulations de matériaux liés (bétons ou matériaux bitumineux) et non liés. Ces caractéristiques sont notamment reprises dans une norme d'application pour l'usage en béton hydraulique [8].

2.2.3. Avantages des sables de concassage

Une granulométrie étudiée (la grosseur des grains) : Le contrôle du processus de production permet d'élaborer des sables de concassage quasi uniformément riches sur une étendue granulaire que l'on peut imposer par criblage.

Une morphologie des grains plus adaptée à un meilleur accrochage, les sables de concassage sont plus anguleux que les sables dits ronds, les grains de sable s'imbriquent et s'enchevêtrent mieux offrant ainsi plus de résistance.

2.2.4. Utilisation des sables de concassage

- ❖ En maçonnerie, le sable est utilisé comme granulats mélangés à un liant comme la chaux ou le ciment.
- ❖ Confection des bétons.
- ❖ barrages, digues, canaux, voies ferrées, routes, ...etc.

L'instruction interministérielle[7], a pour objet de définir les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux.

On entend par sable de concassage le produit obtenu à partir de roches massives après les opérations de concassage et de criblage dans une station de production de granulats. Le sable de concassage peut être

utilisé seul dans le béton ou en mélange avec un autre sable. L'ensemble du mélange doit répondre aux spécifications de la présente instruction [7].

2.2.5. Caractéristiques des sables de concassage

Les caractéristiques des sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux doivent satisfaire aux exigences suivantes :

2.2.5.1. Dimension maximale

La dimension D_{max} doit être inférieure ou égale à 3 mm.

2.2.5.2. Teneur en fines

La teneur en fines définie comme le passant à 0.063 mm, doit être :

- ❖ Inférieure ou égale à 18% pour le béton hydraulique de classes inférieures à 20 MPa ;
- ❖ Inférieure ou égale à 15% pour les enrobés bitumineux ;
- ❖ Inférieure ou égale à 15% pour les bétons hydrauliques de classes comprises entre 20 et 35 MPa ;
- ❖ Inférieure ou égale à 12% pour les bétons hydrauliques de classes supérieures à 35 MPa.

2.2.5.3. Module de finesse

Le module de finesse MF doit être compris dans l'intervalle :

- ❖ $2.15 \leq MF \leq 3.15$ pour les bétons hydrauliques de classes supérieures à 20 MPa ;
- ❖ $1.8 \leq MF \leq 3.2$ pour les bétons hydrauliques de classes inférieures à 20 MPa et les enrobés bitumineux.

2.2.5.4. Propreté

La propreté du sable déterminée par la mesure de l'équivalent de sable (ES) doit avoir les valeurs spécifiées ci-dessous :

- ❖ $ES \geq 45$ pour les enrobés bitumineux ;
- ❖ $ES \geq 60$ pour les bétons hydrauliques de classes inférieures ou égales à 35 MPa ;
- ❖ $ES \geq 65$ pour les bétons hydrauliques de classes supérieures à 35 MPa.

Si le ES du sable est inférieur aux valeurs spécifiées, il est recommandé de faire l'essai au bleu de méthylène. La valeur au bleu de méthylène doit être inférieure ou égale à 1.

2.2.6. Influence du taux de substitution en sable concassé sur les propriétés physiques

D'après l'étude de *Ltifi et al.* [9], ont étudié les bétons à base des sables de carrière en 2005. En utilisant trois types différents de sables : un sable siliceux (SS), un sable concassé (SC) et un sable mélange des deux premiers (SM).

Les caractéristiques physiques des sables sont représentées dans le (tableau. 3).

Tableau 3: Propriétés physiques des sables [9]

<i>Sables</i>	<i>Mf</i>	<i>% fines</i>	<i>ES</i>	<i>classe de sables</i>
SS	1.803	01.66	67	Trop fin
SC	2.936	14.19	60	Trop grossier
SM	2.400	12.02	65	Préférentiel

Cette étude des propriétés physiques montre que le sable de concassage est relativement grossier par rapport au sable siliceux (module de finesse $Mf > 2.2$). Cette variation passe de 1.803 pour le SR à 2.936 pour SC. cette variation influe inversement sur l'ouvrabilité du béton.

Les fines correspondent au pourcentage des grains passant au tamis 80 μm [10].

Le tableau qui précède montre que le sable de concassage présente un pourcentage de fines élevé par comparaison à celui du sable roulé mais il reste dans les limites recommandées par la norme [NFX PP 18 540] [11].

2.2.7. Influence du taux de substitution en sable concassé sur l'analyse granulométrique

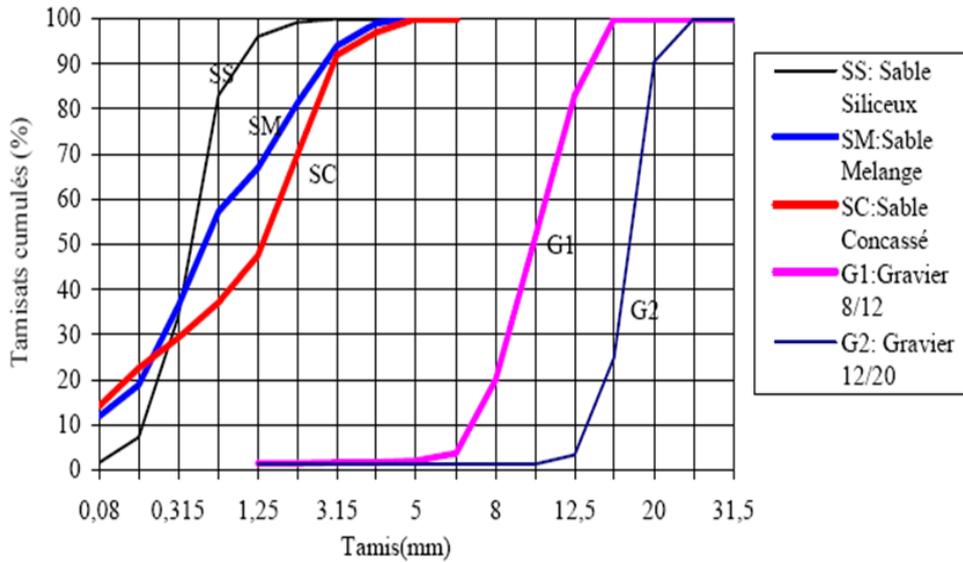


Figure 20: Analyses granulométriques des granulats [9]

L'analyse granulométrique montre bien que le sable de concassage est relativement grossier par rapport au sable siliceux. Le sable mélange présente une allure intermédiaire. Le fait de mélanger le sable roulé et celui de concassé représente une solution intermédiaire jouant le rôle de correcteur de la quantité d'eau de gâchage vue qu'il réduit l'écart entre les deux.

2.2.8. Influence du taux de substitution en sable concassé sur la résistance à la compression

L'intérêt majeur de cette étude est la valorisation du sable de concassage, à travers la connaissance des effets des fillers calcaires sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

Tableau 4: Quantités des matériaux par mètre cube de béton [9]

Dosage en ciment	Type de béton	G1	G2	SS	SC	G/S
350 (kg/m ³)	Béton classique I	--	1206.8	680.7	--	1.77
	Béton classique II	645.2	632.8	615.5	--	2.07
	Béton classique I	--	1026.2	--	867.7	1.18
	Béton classique II	559.1	551.1	--	788.4	1.4
	Béton classique I	--	1083.2	310.9	497.1	1.34
	Béton classique II	574.3	589.1	281.9	450.8	1.58

Variation de la résistance à la compression en fonction de temps pour les différents types de sable (SS, SM, SC) pour le dosage en ciment de 350 kg/m³ [9].

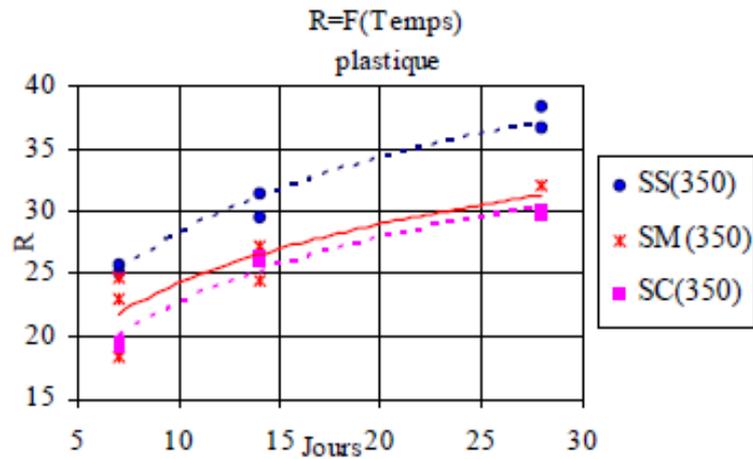


Figure 21: Résistance à la compression en fonction de temps [9]

Les résultats obtenus par *Ltifi et al.* [9], ont montré que les bétons formulés avec le sable de concassage provoquent une augmentation de résistance à la compression de 20%. Le sable de concassage constitue une solution idéale au problème d'approvisionnement à condition qu'il soit corrigé en fines ou combiné avec un sable siliceux.

D'après l'étude de *JoudiImen et al.* [12], ont étudié l'influence des sables de concassage à différents taux de filler (0, 6, 12, 18 et 24 %) sur les performances mécaniques des bétons en 2011. Les valeurs de résistances à la compression obtenues sont représentées en fonction de l'affaissement et du taux de fines sur la figure. II.3 pour les bétons courants et sur la figure 22 pour les bétons à super plastifiant.

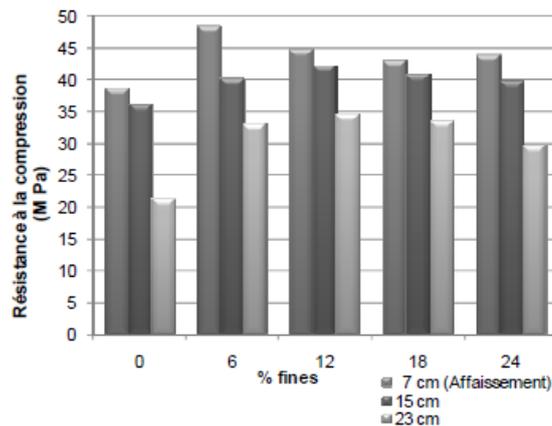


Figure 22: Résistance à la compression des bétons courants [12]

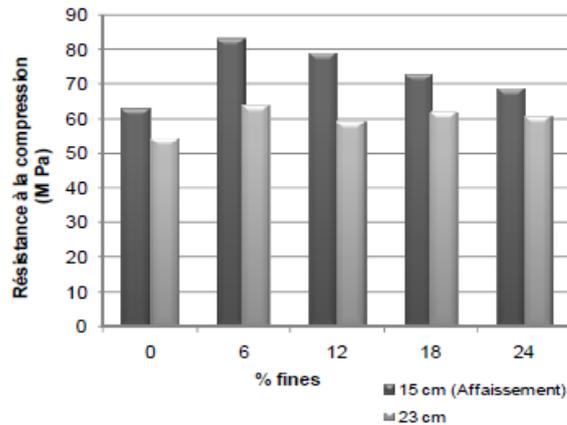


Figure 23: Résistance à la compression des bétons à super plastifiant [12]

D'après *Joudilmenet al.* [12], cette contribution à la valorisation des sables de concassage non seulement dans les bétons courants mais aussi dans les bétons à super plastifiant. Elle a montré qu'il était possible d'obtenir de bonnes performances mécaniques pour tous les types des bétons étudiés, même ceux réalisés avec les sables ayant un taux de fines élevé. Les matériaux calcaires utilisés conduisent donc à de bons bétons, en particulier, si leur squelette granulaire est bien optimisé. L'utilisation des sables de concassage dans la formulation des bétons permet alors de conserver les ressources alluvionnaires disponibles et de diminuer l'impact des exploitations sur l'environnement.

2.3. Sable de dune

2.3.1. Définition

L'utilisation et l'exploitation future de sable de dune forment une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la micro-électronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice, la forme et la nature de ses grains.

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

2.3.2. Mécanismes de formation

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

2.3.3 Types des dunes

Les avant-dunes (fore dune pour les anglophones), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou une avant-dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant-dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières psammophiles.

Les falaises dunaires (dune Cliff pour les anglophones) n'est pas une vraie dune mais un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.

Les dunes perchées, (Cliff-top dune pour les anglophones), qui apparaissent au sommet d'une falaise vive; alimentée en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire.

Les cordons dunaires artificiels, qui sont construits de main d'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradés rectifiées par des engins et fixées par des oyats à Sangatte dans le nord de la France).

2.3.4. Physique des dunes

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert.

Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris.

Les dunes existent sous trois formes [14]:

La barkhane est une dune en forme de croissant, à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels;

La dune parabolique est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation. Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée ;

Les siouf ou sif, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité.

2.3.5. Diverses utilisations

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la

matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires; ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc. Les placers d'ilménite, ou «sables noirs», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane-métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc.

2.3.6. Propriétés

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°. Le sable est utilisé pour faire du béton et comme matière première du verre. Il peut être utilisé pour filtrer les liquides. Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles). Il est aussi utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques. Le sable est également un élément important de l'industrie touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte.

2.3.7. Silice « quartz »

La silice (quartz) est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . La silice pure se présente sous la forme d'un minéral dur et existe sous des formes variées dans la nature :

Principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès), elle représente 27% de la croûte terrestre ;

Fréquente dans les roches métamorphiques ;

Fréquente dans les roches magmatiques : quartz dans les roches magmatiques acides, cristallisé ou amorphe dans les roches volcaniques.

La silice se présente soit sous forme de cristaux non-moléculaires comme dans le quartz, soit sous forme amorphe, comme dans le verre.

2.3.8. Influence du taux de substitution en sable de dune sur les propriétés physiques

D'après H. Azzouz[15] qui a étudié les bétons à base des sables de dune en 2009. Il a utilisé le sable de dune prélevé de deux sites différents et un sable d'oued de la W. Biskra.

Sable de dune de la région de Lichana « SD₁ »

Sable de dune de la région d'El-Hadjeb « SD₂ »

Sable d'oued Djedaï de la région de Lioua « SO »

Les propriétés physiques des sables sont indiquées dans le tableau 15.

Tableau 5:Propriétés physiques [15]

Propriétés physiques	SO	SD ₁	SD ₂
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1480	1330	1285
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2550	2760	2580
Equivalent de sable (ES _p /ES _v)	73/80	75/93	71/89
Module de finesse	2.17	1.36	1.22

2.3.9. Influence du taux de substitution en sable de dune sur l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des deux sables de dune utilisés SD₁ et SD₂ a montré que ceux sont des sables fins en raison du pourcentage élevé des éléments fins (>75%). L'étude des caractéristiques chimiques des sables de dunes utilisés a montrée que ces sables pourraient donner des résistances acceptables grâce à leur propreté et leur composition chimique siliceuses (la nature siliceuse donne souvent de meilleures performances) [15].

2.3.10. Influence du taux de substitution en sable de dune sur la résistance à la compression

D'après [15], les taux des trois sables utilisés dans la composition du béton sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6:Combinaisons des sables pour les bétons avec un dosage en ciment de 350kg/m³

N°	SO	SD ₁	SD ₂
B01	100%	0%	0%
B02	0%	100%	0%
B03	0%	0%	100%
B04	70%	30%	0%
B05	70%	0%	30%
B06	50%	50%	0%
B07	50%	0%	50%

Les résultats obtenus des résistances à la compression à 7 j, 14 j, 28 j, 60 j, 90 j et 180 j sont rapportés dans les figures suivantes :

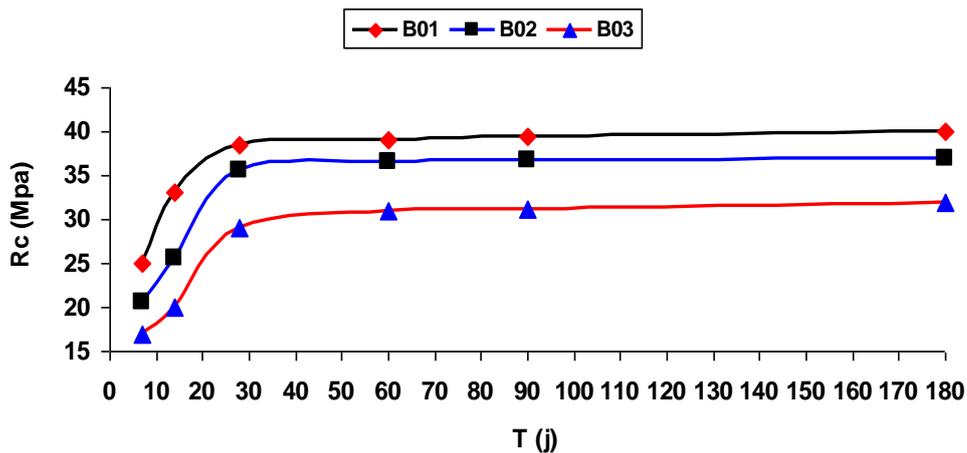


Figure 24: Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable [15]

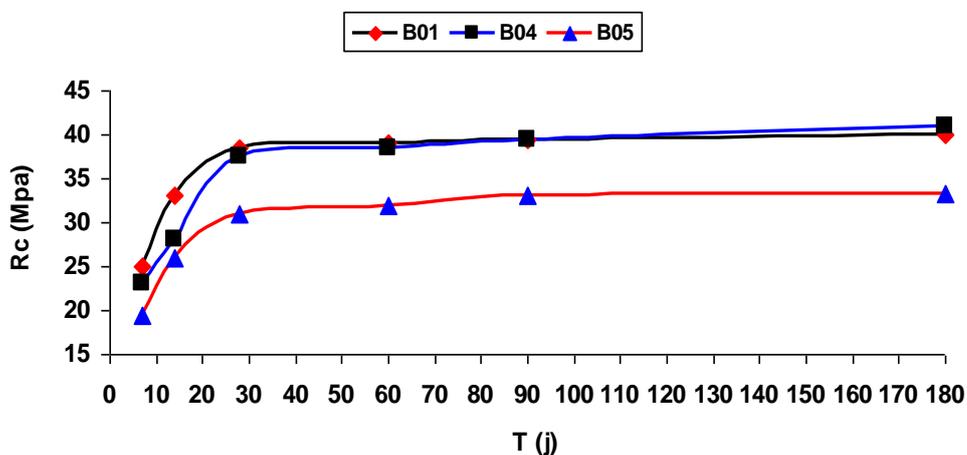


Figure 25: Résistance à la compression des bétons (B01, B04 et B05) en fonction du temps et du type de sable [15]

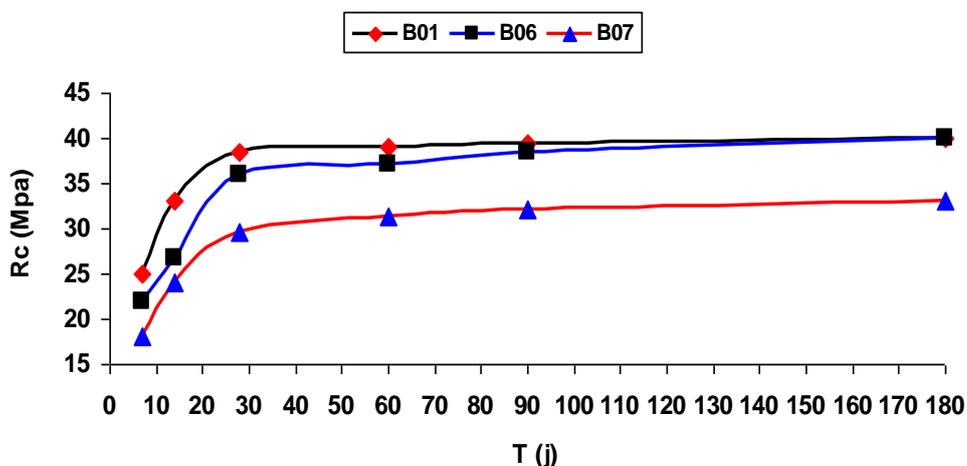


Figure 26: Résistance à la compression des bétons (B01, B06 et B07) en fonction du temps et du type de sable [15]

A partir des graphiques présentant l'évolution de la résistance à la compression des bétons confectionnées avec les trois types de sables, on remarque que : [15].

Toutes les courbes ont la même allure.

Avant 28 jours : augmentation rapide de la résistance à la compression en fonction du temps.

Après 28 jours : faible augmentation de la résistance à la compression en fonction du temps.

Les courbes des bétons où on a introduit le sable de dune donnent des résistances inférieures à celle de la courbe de référence du béton confectionné avec le sable d'oued au même âge.

Les bétons confectionnés à base de (50% SO + 50% SD1), donnent des résistances plus proches à ceux du béton de référence (100% SO), contrairement aux bétons (50% SO + 50% SD2) qui restent loin.

Pour la courbe à (70% SO + 30% SD1), la résistance à jeune âge est presque confondue avec la courbe de référence (100% SO) avec une résistance approximative égale à 95% de celle-ci.

Après 60 jours, la courbe à (70% SO + 30% SD1), coupe celle de (100% SO), et sa résistance devient proche à cette dernière.

Pour les courbes où on a introduit SD2, la résistance reste faible et loin (70% de la résistance) des résultats de la courbe de référence.

3. Conclusion

La plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé. Tous ces facteurs incitent les acteurs du secteur du génie civil à rechercher la valorisation des sables (SD et SC) de substitution (totale ou partielle de sable d'oued (SO)) qui soient aptes à fournir, si possible, des bétons de qualité équivalente aux bétons ordinaires.

D'après l'étude de *Ltifi et al.* [9], ont écrit que les résistances à la compression des différents bétons étudiés sont dans les mêmes fourchettes de résistance (± 10 MPa) ce qui conduit à penser que le béton calcaire ne se distingue pas particulièrement, sur cet aspect, des bétons classiques. Ainsi on peut conclure que ces sables peuvent remplacer positivement le sable siliceux et par conséquent de mettre fin à une surexploitation des gisements alluvionnaires. Les granulats des roches massives concassées n'entrent qu'en très faible proportion dans la fabrication des bétons hydrauliques. En particulier, les calcaires concassés largement utilisés dans les techniques routières sont des granulats disponibles et économiques et il convient d'envisager leur utilisation comme granulats de substitution dans les bétons [10 & 13]. Le sable de concassage est considéré comme rebuts de la fabrication des graviers par les carrières. Des quantités importantes de sable de concassage sont rejetées nuisant à l'environnement local sous l'effet des agents atmosphériques (vents, etc...)[10]. Les propriétés mesurées à l'état frais et durci ont permis de montrer que les fillers amélioreraient la plupart des propriétés. Les propriétés mécaniques ont montré qu'il

Chapitre 02 : Etat de l'art

est possible d'obtenir de bonnes performances pour tous les types de bétons étudiés, même ceux réalisés avec les sables ayant un taux de fines élevé [6].

L'utilisation de sable de dune (SD) dans divers domaines d'emploi du béton, possède des arguments technico-économique contribuant à favoriser son développement. Entre autre facilité le bétonnage qui conduit à une bonne exécution des ouvrages et leurs bons façonnages. Nous avons présenté dans cette étude bibliographique l'intérêt de SD dans la formulation de béton. Malgré l'insuffisance des résultats de différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons à base du SD pourront remplacer les bétons classiques dans certaines applications. En revanche, ce type de béton semble avoir un grand avenir dans certains domaines, les avantages techniques et économiques des bétons en laissent prévoir un développement important pour le futur.

Les recherches antérieures ont montré que la combinaison de plusieurs types de sables permet d'augmenter la compacité du mélange granulaire, et par conséquent de réduire les vides intergranulaires. Par ailleurs, cette combinaison contribue à l'amélioration des propriétés physico-mécaniques des bétons.

C'est dans ce cadre qu'on présente une étude sur la valorisation des sables (SD et SC) dans les bétons hydrauliques, en le substituant totalement ou partiellement au SO en vue de résoudre les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de bâtiment ainsi que les problèmes environnementaux.

CHAPITRE 3 :

IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

3.1 .Introduction

L'emploi judicieux des matériaux utilisés exige la connaissance de leurs diverses propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques pour permettre de faire un choix répondant à leur objectif. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés sur le béton à l'état frais et durci.

3.2. Caractéristiques des matériaux

3.2.1. Ciment Portland Composé

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 de la cimenterie de M'sila. Composé de 80% du clinker, 5% du gypse et 15% du calcaire.

Les caractéristiques physique, chimique, minéralogique et mécanique du ciment sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau 7:Caractéristiques physique, chimique, minéralogique et mécanique du ciment CPJ-CEM II/A 42.5

<i>ESSAI</i>	<i>PHYSIQUES</i>		<i>COMPOSITION</i>	<i>CHIMIQUE (%)</i>
Consistance normale	% H ₂ O	26.60	SiO ₂	17.38
Temps de prise (mn)	Début	162	Al ₂ O ₃	4.69
	Fin	223	Fe ₂ O ₃	2.72
Expansion (mm)	Chaud	0.45	CaO	61.53
	Froid	–	MgO	1.55
Retrait (µm/m)	03 jours	135.75	K ₂ O	0.95
	07 jours	450.25	Na ₂ O	0.20
	28 jours	670.30	SO ₃	2.44
Gonflement (µm/m)	03 jours	0.0	CaO libre	–
	07 jours	0.0	Cl ⁻	–
	28 jours	0.0	Ins	–
Poids spécifique (g/cm³)	3.15		P.F	8.20
Surface spécifique (g/cm²)	3509		% Constituants	Minéraux du clinker
Résistance à la flexion (MPa)	02 jours	3.31	C ₃ S	59

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

	07 jours	7.85	C ₂ S	16
	28 jours	9.00	C ₃ A	09
Résistance à la compression (MPa)	02 jours	13.37	C ₄ AF	10
	07 jours	29.32	CaO	–
	28 jours	42.50	Gypse	05
			Ajout	15 % Calcaire

3.2.2. Eau

L'eau utilisée est l'eau potable (eau du robinet) qui contient peu de sulfate et dont la température est de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, sa qualité est conforme aux prescriptions de la *norme NFP 18-404*.

3.2.3. Sables

Dans notre étude, on a utilisé trois types de sables (sable alluvionnaire d'oued (SO), sable concassé (SC) et un sable de dune (SD)).

- ✓ SO 0/5 mm provient de la région de Djelfa ;
- ✓ SC 0/3 mm provient de la région de Djelfa ;
- ✓ SD 0/0.63 mm provient de la région de Boussaâda.

Les figures III.1 et III.2 rassemblent les résultats des analyses granulométriques ((SO, graviers (3/8 mm) et (8/15 mm)) ; (SC et SD)).

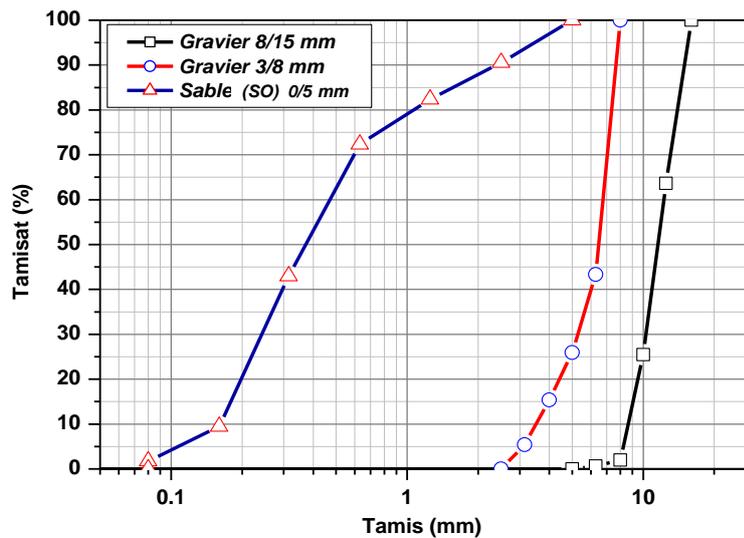


Figure 27.. Courbe granulométrique du sable d'oued et les graviers

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

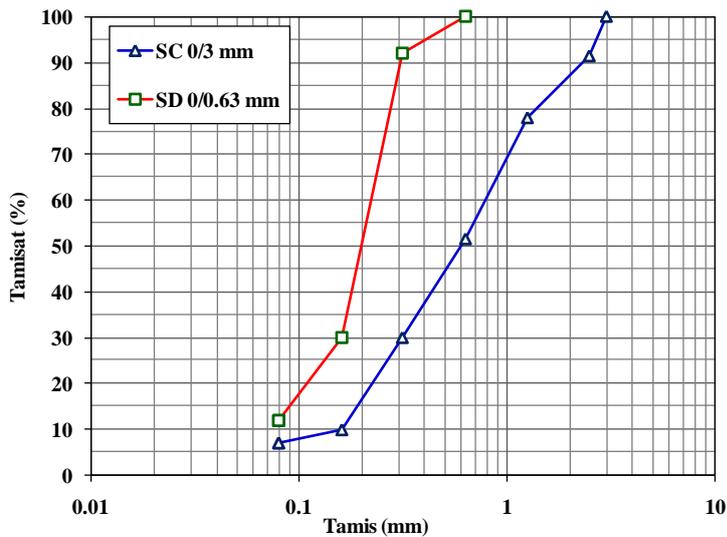


Figure .28 Courbe granulométrique du sable concassé et sable de dune

Propriétés physiques des sables

Les propriétés physiques des sables sont indiquées dans le tableau III.2.

Tableau 8: Propriétés physiques des sables

Sables	Masse volumique apparente (γ) kg/m ³	Masse volumique des grains (absolue) (ρ) kg/m ³	Module de finesse (M_f)	Fines < 80 μ m (%)	Equivalent de sable	
					ES à vue	ES piston
SO	1440	2500	2.21	1.750	81	80
SC	1415	2630	2.39	7.100	77	75
SD	1450	2760	0.78	12.00	80	77

SO : Sable préférentiel convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.

SC : Sable préférentiel convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.

SD : C'est un sable extra-fin ($M_f = 0.78$) ayant une granulométrie serrée ($D_{max} = 0.63$ mm) et contient 12 % de fines.

Les fines correspondent au pourcentage des grains passant au tamis 80 μ m [1]. Le pourcentage de fines des sables reste dans les limites recommandées par la norme NFP18 540 [2]. Cette norme préconise un

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

pourcentage de fines compris entre 8 et 12%. Les pourcentages de fines des différents sables sont inférieurs ou égale à 12%.

L'essai d'équivalent de sable a prouvé que les sables (SO, SC et SD) sont propres à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

3.2.4. Pierre concassée

Dans notre étude, on a utilisé deux types des pierres concassées (3/8 mm et 8/15 mm).

- ✓ G1 : 3/8 mm provient de la région de Djelfa.
- ✓ G2 : 8/15 mm provient de la région de Djelfa.

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure III.1.

Propriétés physiques des graviers

Les propriétés physiques sont reportées dans le tableau III.3.

Tableau 9: Propriétés physiques des graviers

Gravier	Masse volumique apparente (γ) kg/m ³	Masse volumique des grains (absolue) (ρ) kg/m ³
(35% G1 + 65% G2)	1420	2610

Le coefficient de Los Angeles pour le gravier utilisé ($L_A = 23\%$: résistance à la fragmentation aux chocs acceptable) nous pouvons conclure que notre gravier peut être utilisé pour la confection des bétons de qualité.

3.3. METHODES D'ESSAIS

3.3.1. Méthode des plans d'expériences

Dans la formulation de béton, on doit prendre en considération l'assurance d'une bonne combinaison entre les matériaux utilisés et de rechercher le dosage convenable de chacun de ces constituants. Pour bien mener l'étude d'optimisation des mélanges, on a opté pour l'utilisation de nouvelles techniques, telle que l'approche des plans d'expériences (*plan de mélange*) afin d'optimiser des bétons formulés à partir des ressources disponibles localement.

Dans le but de comprendre le rôle joué par les différents constituants, il est nécessaire d'effectuer une étude paramétrique. Généralement, la démarche d'une étude paramétrique classique est basée sur la variation de chaque paramètre séparément afin d'observer son influence sur l'évolution des propriétés

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

étudiées. Donc, cette démarche ne peut pas prendre en considération toutes les interactions possibles entre les effets des constituants et ne permet pas d'établir l'ordre d'importance des paramètres sur les propriétés étudiées.

De ce fait, une démarche expérimentale capable de prendre en considération l'effet de chaque paramètre séparément et en interactions entre plusieurs paramètres sur les propriétés étudiées est vraiment nécessaire, tout en effectuant le minimum nombre possible d'essais aux laboratoires. L'une des méthodes les plus connues est la méthode des plans d'expériences (plan de mélange).

Grâce à une approche statistique, cette dernière permet de conduire un nombre bien déterminé d'essais et d'avoir des résultats capables de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres.

3.3.2. Essais réalisés

3.3.2.1. Maniabilité

L'aptitude du béton frais à bien se mouler dans des coffrages et autour des armatures tout en restant homogène, bref, à bien se mettre en place, est appelée ouvrabilité. Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la maniabilité qui peut se définir comme la facilité de la mise en œuvre du béton. Le choix de l'essai de caractérisation de la maniabilité et de la classe de maniabilité visée est en fonction de sa facilité de mise en œuvre sur chantier et au laboratoire ainsi que sa fiabilité. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams *norme NFP 18-451* constitue la méthode la plus couramment employée pour évaluer la maniabilité du béton car il est très simple à mettre en œuvre, rapide et relativement fiable. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm.

Le béton est introduit dans un moule conique normalisé, légèrement huilé, en trois couches d'égales hauteurs. Chacune d'elles est piquée 25 fois à l'aide d'une tige. Une fois le moule est rempli, nous arasons son bord supérieur, puis démoulons. Le béton ainsi démoulé s'affaisse. On mesure la hauteur d'affaissement qui est fonction de la maniabilité du béton.

3.3.2.2. Confection des éprouvettes et mode de cure

Les éprouvettes préparées dans cette étude sont de formes prismatiques (10×10×40 cm) pour la détermination de la résistance à la flexion à raison de trois éprouvettes par essai. Les 06 demi-éprouvettes

CHAPITRE 3 : Identification des matériaux

ainsi obtenues sont utilisées pour la mesure de la résistance à la compression selon des cubes (10×10×10 cm).

Les moules utilisés ont été lubrifiés, remplis de béton et compacté mécaniquement à l'aide d'une aiguille vibrante plongée dans la masse du béton afin d'avoir un béton bien compact avec moins de vides. Les éprouvettes sont maintenues dans l'environnement du laboratoire. Pour éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, elles sont couvertes par du plastique, jusqu'au jour du démoulage qui aura lieu 24 heures après le coulage du béton. Ensuite les éprouvettes ont été conservées à l'eau jusqu'au jour de l'essai (à 7 et 28 jours).

3.3.2.3. Essais de résistances mécaniques

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression, de flexion ...etc. L'évolution de la résistance a été suivie au cours du temps, en effectuant des essais de flexion et de compression à 7 et 28 jours.

Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de bases utilisés dans l'étude expérimentale. Vu les résultats obtenus, ces matériaux sont satisfaisant aux conditions requises pour être utilisés pour la recherche d'un béton de propriétés rhéologiques et mécaniques *acceptables*.

La méthode des plans d'expériences (*plan de mélange*) est une méthodologie puissante qui permet grâce à une approche statistique, de conduire *un nombre bien déterminé d'essais* et d'avoir des résultats permettant de dévoiler l'effet de chaque paramètre étudié séparément et en interactions avec d'autres paramètres.

Chapitre4 :

Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expériences

1.Introduction

L'emploi judicieux des plans d'expérience exige la connaissance de leurs diverses utilisations, pour permettre de faire un choix répondant à leur objectif. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation des plans de mélange par le traitement des résultats expérimentaux déjà faite, ainsi que les différents résultats extraites de cette méthode. .

2.Résultats expérimentaux

Détails des proportions des mélanges sont donnés dans le tableau 7.

Tableau 10:Détails des proportions des mélanges à 7 jours

Mélange N°	SO	SC	SD	Rf 7 j	Rc 7 j	Aff (Cm)
01	0	0	1.0	3.00	17.30	5
02	0	0.2	0.8	3.10	18.50	5
03	0	0.4	0.6	3.90	22.80	7
04	0	0.6	0.4	4.20	24.50	6
05	0	0.8	0.2	4.00	23.60	5
06	0	1.0	0	3.80	22.70	5
07	0.2	0	0.8	3.20	18.60	5
08	0.2	0.2	0.6	3.70	22.00	6
09	0.2	0.4	0.4	4.20	24.50	5
10	0.2	0.6	0.2	4.50	26.00	5
11	0.2	0.8	0	4.30	25.00	5
12	0.4	0	0.6	4.00	23.90	7
13	0.4	0.2	0.4	4.20	25.00	6
14	0.4	0.4	0.2	4.50	26.00	5
15	0.4	0.6	0	4.60	27.00	5
16	0.6	0	0.4	4.40	25.80	8
17	0.6	0.2	0.2	4.40	25.90	7
18	0.6	0.4	0	4.50	26.00	6
19	0.8	0	0.2	4.10	24.20	8

CHAPITRE 4 : Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expériences

20	0.8	0.2	0	4.20	24.70	7
21	1.0	0	0	4.10	24.00	7

Détails des proportions des mélanges a 28 jours sont donnés dans le tableau 8.

Tableau 11:Détails des proportions des mélanges a 28 jours

Mélange N°	SO	SC	SD	Rf 28 j	Rc 28 j	Aff (Cm)
01	0	0	1.0	3.80	21.00	5
02	0	0.2	0.8	4.00	22.30	5
03	0	0.4	0.6	5.00	27.50	7
04	0	0.6	0.4	5.90	32.70	6
05	0	0.8	0.2	5.70	31.50	5
06	0	1.0	0	5.60	31.00	5
07	0.2	0	0.8	4.00	22.50	5
08	0.2	0.2	0.6	4.80	26.80	6
09	0.2	0.4	0.4	5.60	31.20	5
10	0.2	0.6	0.2	6.30	34.70	5
11	0.2	0.8	0	6.00	33.30	5
12	0.4	0	0.6	5.20	28.80	7
13	0.4	0.2	0.4	5.60	31.20	6
14	0.4	0.4	0.2	5.90	32.50	5
15	0.4	0.6	0	6.50	36.00	5
16	0.6	0	0.4	5.80	32.20	8
17	0.6	0.2	0.2	5.80	32.30	7
18	0.6	0.4	0	5.90	32.50	6
19	0.8	0	0.2	5.40	30.20	8
20	0.8	0.2	0	5.50	30.90	7
21	1.0	0	0	5.40	30.00	7

CHAPITRE 4 : Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expériences

Après le traitement des résultats expérimental par le logiciel JMP7. On a pu formuler le model numérique suivante :

Résistance à la compression:

à 7 jours $R^2 = 0.91$

Le modèle mathématique :

$$R_c \text{ 7 jours} = 23.6904761904762 * :SO + 23.1547619047619 * :SC + 16 * :SD + :SO * (:SC * 11.3392857142857) + :SO * (:SD * 16.4136904761905) + :SC * (:SD * 13.7351190476191)$$

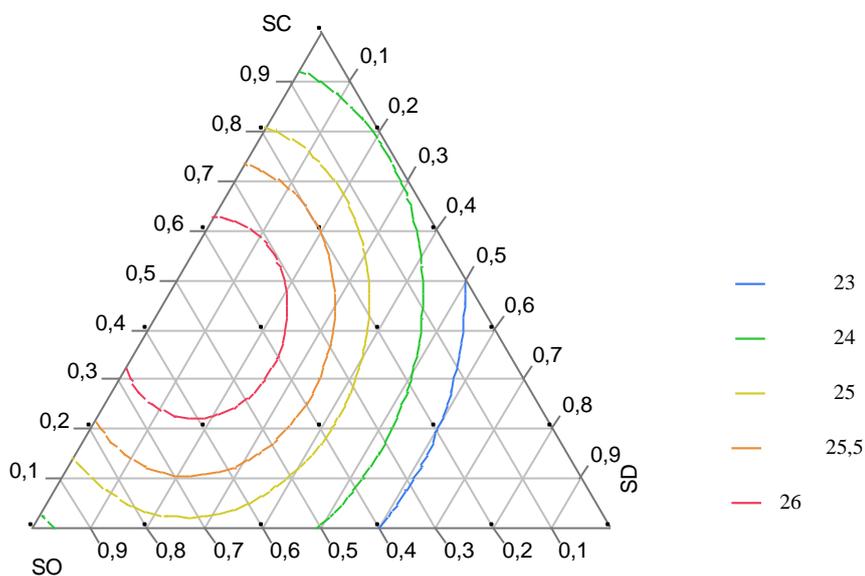


Figure.29: Courbes iso-réponses de la résistance à la compression a 7 jours

à 28 jours $R^2 = 0.89$

Le modèle mathématique :

$$R_c \text{ 28 jours} = 29.4809523809524 * :SO + 32.1238095238095 * :SC + 18.8738095238095 * :SD + :SO * (:SC * 12.202380952381) + :SO * (:SD * 20.9077380952381) + :SC * (:SD * 15.2827380952382)$$

CHAPITRE 4 : Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expériences

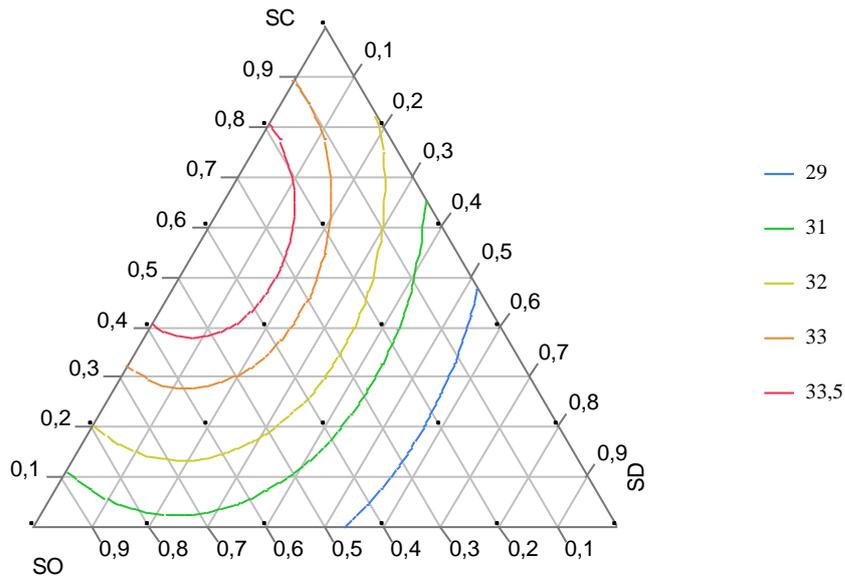


Figure.30.: Courbes iso-réponses de la résistance à la compression a 28 jours

Analyse des résultats :

Résistance à la flexion :

à 7 jours $R^2 = 0.89$

Le modèle mathématique :

$$R f 7 \text{ jours} = 4.03095238095238 * :SO + 3.91190476190476 * :SC + 2.74523809523809 * :SD + :SO * (:SC * 2.20238095238096) + :SO * (:SD * 2.61904761904762) + :SC * (:SD * 2.38095238095239)$$

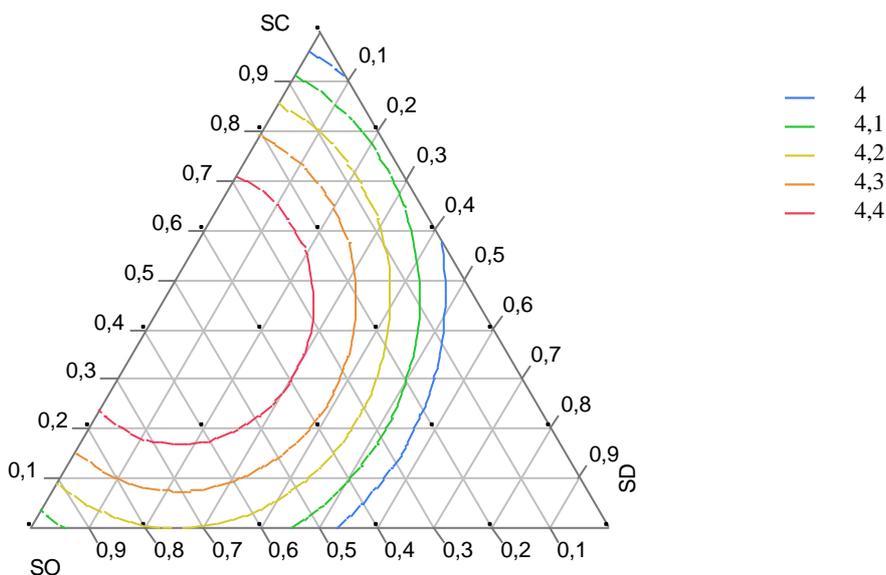


Figure.31. Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion a 7jours

à 28 jours $R^2 = 0.88$

CHAPITRE 4 : Traitement des résultats expérimentaux par les plans d'expériences

Le modèle mathématique :

$$R_f 28 \text{ jours} = 5.28333333333333 * :SO + 5.80714285714286 * :SC + 3.39047619047618 * :SD + :SO * (:SC * 2.26190476190477) + :SO * (:SD * 3.75000000000003) + :SC * (:SD * 2.79761904761906)$$

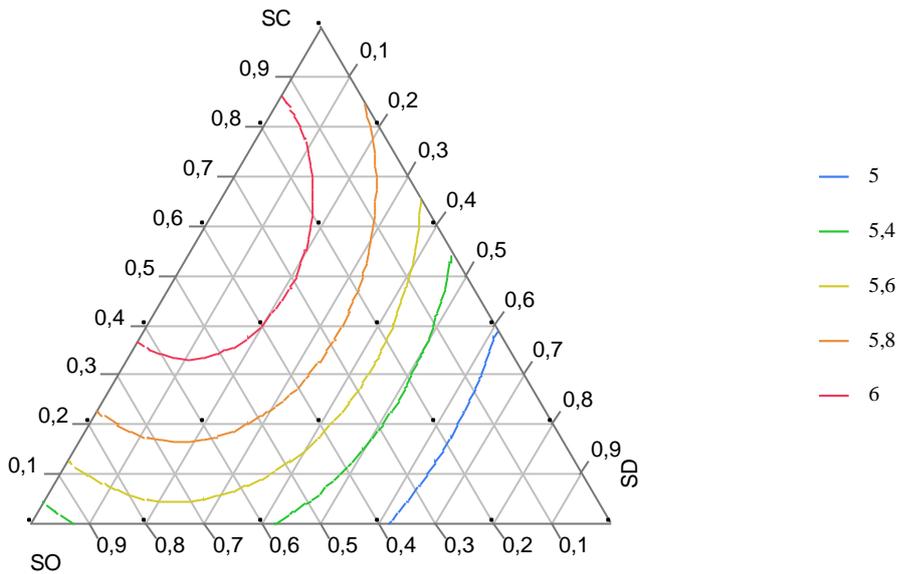


Figure 32: Courbes iso-réponses de la résistance à la flexion a 28jours

Analyse des résultats :

Les modèles mathématiques fournis par le logiciel JMP présente une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux ($R_{2c7} = 0.91$, $R_{2c28} = 0.88$, $R_{2f7} = 0.89$ et $R_{2f28} = 0.88$). L'influence du sable d'oued et le sable de carrière sur la résistance mécanique à 7 et à 28 jours sont assez proches et sont supérieurs à celui du sable des dunes. L'effet de l'interaction entre le sable d'oued et le sable des dunes sur la résistance mécanique est prépondérant par rapport aux autres interactions binaires. Les résistances mécaniques supérieures, chacune d'eux correspond à une fourchette des pourcentages des sables dans un mélange comme il est dans illustré dans les diagrammes ternaires et au tableau ci-dessous:

Tableau 12: L'effet de l'interaction entre le sable d'oued et le sable des dunes sur la résistance mécanique

Sables	R_{c7} (26 Mpa)	R_{c28} (33.5 Mpa)	R_{f7} (4.4 Mpa)	R_{f28} (6 Mpa)
SC	20% - 65%	40% - 80%	15% - 70%	35% - 85 %
SD	0% - 25%	0 % - 20 %	0% - 30%	0% - 20%
SO	30% - 70%	20 % - 60%	25% - 75%	15% - 65%

De ce tableau, on peut conclure les fourchettes optimales suivantes :

Tableau 13: les fourchettes optimales des sables

Sables	SC	SD	SO
Fourchette de pourcentage	40% - 65%	0% - 20%	30% - 60%

Un mélange optimal implique une résistance mécanique élevée. La granulométrie continue et la teneur en fine optimale pour un mélange des sables, ont une contribution significative à obtenir une résistance mécanique élevée à 7 et à 28 jours [r].

Affaissement

Le modèle mathématique : $R^2 = 0.70$

$$\text{Affaissement} = 7.85714285714286 * :SO + 4.88095238095238 * :SC + 4.76190476190477 * :SD + :SO * (:SC * -4.61309523809523) + :SO * (:SD * 2.82738095238092) + :SC * (:SD * 3.57142857142857)$$

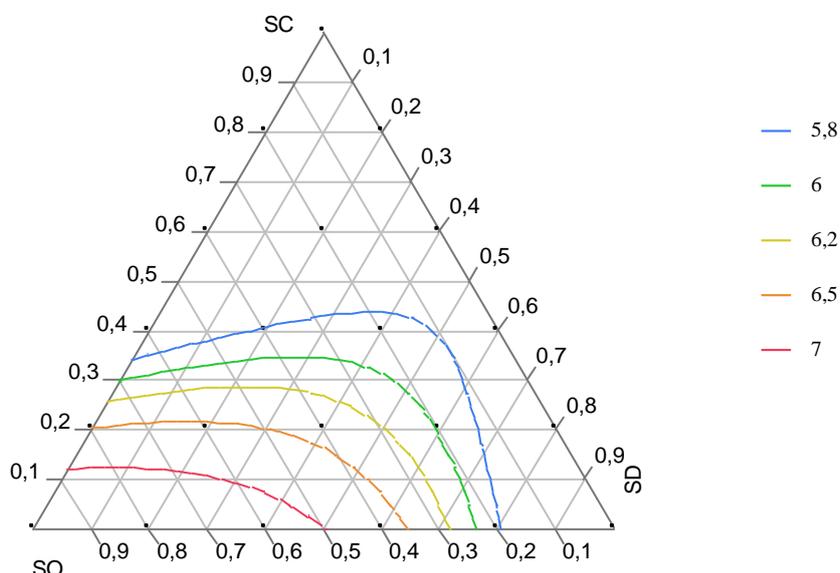


Figure33: Courbes iso-réponses de l'affaissement

Analyse des résultats :

Les résultats numériques de l'affaissement trouvées par la méthode de moindre carré avec criblage à l'aide du logiciel JMP, présentent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux ($R^2 = 0.70$). L'effet de sable d'oued sur la valeur de l'affaissement est plus important que ceux du sable de carrière et du sable des dunes. Les effets du sable de carrière et du sable des dunes sont semblables. A partir du diagramme ternaire ci-dessus on construit le tableau suivant :

Tableau 14: Les effets du sable de carrière et dunes et sable d'oued sur la valeur de l'affaissement

Sables	Affaissement (7 cm)	Affaissement (6.2 cm)	Affaissement (5.8 cm)
SC	0% - 10%	0% - 25%	0% - 35%
SD	0% - 50%	0% - 70%	0% - 80%
SO	50% - 90%	30% - 80%	20% - 70%

Le tableau ci-dessus et les courbes iso réponses, montrent clairement qu'une teneur en fine élevée (SD et SO) va augmenter la plasticité du béton frais aussi bien son maniabilité. La combinaison des fourchettes des pourcentages des trois sables dans un mélange vis-à-vis les résistances mécaniques à 7 et à 28 jours nous a donnée la proposition suivante :

Tableau 15: pourcentages des trois sables dans un mélange

Sables	SC	SD	SO
Pourcentage dans un mélange des sables	40%	20%	45%

Ces pourcentages des sables dans un mélange des sables nous ont permis de faire combiner à la fois la résistance mécanique élevée du béton durci et la facilité de mise en œuvre avec une plasticité et maniabilité moyenne du béton frais.

3. 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 étudiées.

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. Ce travail a été réalisé par l'utilisation des plans d'expériences qui nous ont permis d'obtenir trois modèles, un modèle de résistance à la compression et flexion et d'affaissement. L'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 résistance à la flexion.

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 de jmp afin de faciliter leur exploitation par les utilisateurs.

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GOUPY J. Application des plans d'expériences, Dunod, Paris, 2003.
- [2] ROQUEMORE K. G. «Hybrid Designs for Quadratic Response Surfaces» *Technometrics*, vol. **18**, n°4. (1976). 419-423.
- [3] RECHTSCHAFFNER R. L. «Saturated Fractions of $2n$ and 3 Factorial Designs». *Technometrics*, vol. 9. (1967). 569-575.
- [4] PLACKETT R. L. and BURMAN J. P. «The design of optimum multifactorial experiments». *Biometrika*, n°33. (1946).
- «Introduction aux Plans d'expériences par la méthode Taguchi.» Les Editions d'organisation. Paris.
- [5] GOUPY Jacques «Boolean Experimental Designs». *Analisis* vol 28, n°7. 563-570. (2000).
- [6] GOUPY Jacques. " Introduction aux Plans d'expériences : plans des plans des doehlerte ". Dunod. Paris. 281pages. (2000).ISBN 2 10 004218 1.
- [7] KOSHAL R. S. «Application of the method of maximum likelihood to the improvement of curves fitted by the method of moments» *Journal of Royal Statistic SocA96* 303-313. (1933).
- [8] Plans factoriels complets GOUPY JACQUES • CREIGHTON LEE (2006) ; Introduction aux plans d'expériences, les mélanges, Dunod, Paris, 2001, 2006
- [9] MOZZO Gil «Plan quadratique Gigogne». *Revue de statistique appliquée*, vol. 38 (3), p.23-34. (1990).
- [10] GOUPY Jacques. "Plans d'expériences : les mélanges". Dunod. Paris. 285 pages. (2000). ISBN 2 10 004218 1.
- [11] CARE S., LINDER R., BAROGHEL BOUNY V., DE LARRARD F., ET CHARONNAT Y., Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton - Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33. Février 2002.
- [12] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cement and concrete research* Vol. 36(2), pp. 264-277, 2006.
- [13] Akrouf K., Ltifi M., Ben Ouedou M., 2010, Chloride diffusion in mortars - Effect of the use of limestone sand part I: Migration test. Vol.4, N°2, 105-108. part II: Immersion test, *International Journal of Concrete structures and materials*, 109-112.
- [14] ADDED M., 2005, Impact de la qualité des granulats sur les caractéristiques physicomécaniques des mortiers et des bétons, Thèse FST Faculté des Sciences de Tunis, 175 p.

- [15] RMILI A., 2010, Étude de formulation et de comportement des bétons autoplaçants: Incorporation du sable de concassage et du sable de désert, Thèse ENIT, 226 p.
- [16] IMÈNE JOUDI-BAHRI. Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien. Thèse de Doctorat en cotutelle 2012. 193 p.
- [17] INSTRUCTION, 2007, instruction interministérielle portant sur les spécifications techniques relatives aux sables de concassage pour bétons hydrauliques et enrobés bitumineux, Le Bulletin de l'Habitat, Bulletin d'information du Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme N°2, 26-27.
- [18] P. SOUFFLET, Holcim Granulats (production, qualité et optimisation) w.w.w.ceda-africa.ma/collint.pdf.
- [19] MOUNIR LTIFI, NEJIB BEN JAMAA, NIZAR BEL HADJ ALI, KHAOULA AKROUT., Étude comparative des bétons hydrauliques a base de sable siliceux et sable calcaire de concassage. Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005.1-9.
- [20] AOUICHA BEDDEY, «Etude de sable calcaire de concassage et son utilisation dans le béton hydraulique» Thèse, Faculté de Science de Tunis, 2000.
- [21] GEORGES.DREUX & JEAN FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Edition Eyrolles 1998.
- [22] JOUDI IMEN, LECOMTE ANDRE ET BEN OUEZDOU MONGI. Influence des sables de concassage à différents taux de filler sur les performances mécaniques des bétons. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. INVACO2 : Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, n° : 1o-311, rabat – Maroc / 23-25 novembre 2011.
- [23] R MENSI, « Valorisation des sable de concassage dans les bétons hydrauliques», Annales Maghrébines de l'ingénieur, volume : 12-N°01 avril, 1998.
- [24] CHAVAILLON J., Étude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara Nord Occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Edition du CNRS, Paris 1964, p. 394.
- [25] HOCINE AZZOUZ., (2009), Étude des bétons à base des sables de dune, Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie.
- [26]. Jacques GOUPY et Lee CREIGHTON Dunod "Introduction aux Plans d'expériences". Quatrième édition 293 pages. (2009). ISBN 2 10 049744 8
- [27]. Jacques GOUPY Dunod "Plans d'expériences pour surfaces de réponse". Paris. 409 pages. (1999). ISBN 2 10 003993 8
- [28]. Jacques GOUPY Dunod "Plans d'expériences : les mélanges". Paris. 285 pages. (2000). ISBN 2 10 004218 1

[29]. Jacques GOUPY Dunod "Pratiquer les Plans d'Expériences". Paris. 560 pages. (2005). ISBN 2 10 004217 3

[30]. Jacques GOUPY et Lee CREIGHTON SAS Press-Cary (USA)"Introduction to Design of Experiments". Third edition.448 pages. (2007). ISBN 978 1 59994 422 7