

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



جامعة الجلفة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté au

Domaine : Sciences et Technique
Département : Génie Civil
Filière : Génie Civil
Spécialité : Conception et Calcul des Structures

Réalisé par

DJAROUB Souhila
ZERGOT Souad

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Intitulé

Modélisation Mathématique de l'effet des Ajouts minéraux sur le comportement physico-mécanique des Bétons BHP.

Soutenu le : 02/06/2017
Devant le jury de soutenance composé de :

Mr : ALLOUT Naas	MCA	Univ. Djelfa	Président
Mr : HADJI Tarek	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
Mr : GUETTALA Salim	MCA	Univ. Djelfa	Co-encadreur
Mr : ATTIA Ahmed	MCB	Univ. Djelfa	Examineur

Année Universitaire : 2016-2017



Dédicace

*Avec l'aide et par la grâce du Dieu le tout puissant que
notre travail a vu le jour, je dédie ce mémoire :*

*Aux personnes les plus chères au monde : mes chers parents
Pour leur amour et bonté, et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre
mon objectif, mon marié **Abderrahmen**
Que dieu me les garde.*

*A mes chers frères et mes très chères sœurs;
Que la solidarité fraternelle que nous cultivons depuis toujours ne
s'estompe jamais.*

*A tous mes cousins et cousines,
Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde considération.*

*A mon binôme : **zergot souad**
Pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble,
Que le dieu t'accorde une longévité.*

*A toute ma promotion de master génie civil,
Je vous souhaite la réussite.*

A mes très chères amie et à tous ceux qui me connaissent.

*A tous ceux qui ont de près ou de loin participés à la
réalisation de ce travail.*



Souhila



Dédicace

*Avec l'aide et par la grâce du Dieu le tout puissant que
notre travail a vu le jour, je dédie ce mémoire :*

*Aux personnes les plus chères au monde : mes chers parents
Pour leur amour et bonté, et que sans eux je n'aurai jamais pu atteindre
mon objectif,
Que dieu me les garde.*

*A mes très chère sœur **chérifa**; et mes chers frères.
Que la solidarité fraternelle que nous cultivons depuis toujours ne
s'estompe jamais.*

*A tous mes cousins et cousines,
Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde considération.*

*A mon binôme : **djaroub souhila**
Pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble,
Que le dieu t'accorde une longévité.*

*A toute ma promotion de master génie civil,
Je vous souhaite la réussite.*

A mes très chères amies et à tous ceux qui me connaissent.

*A tous ceux qui ont de près ou de loin participés à la
réalisation de ce travail.*



Souad

REMERCIEMENTS

*NOUS REMERCIONS LE TOUT PUISSANT LE
MAITRE DE NOUS AVOIR DONNE LE SAVOIR
ET LE COURAGE AFIN DE REALISER CE
MODESTE TRAVAIL.*

*NOUS TENONS A TEMOIGNER DE NOTRE
GRATITUDE A
NOS CHERS PARENTS POUR LEURS AIDES
FINACIERE ET MORALE DURANT NOS ETUDES.*

*NOS REMERCIEMENTS VONT AUSSI A TOUS
CEUX QUI
ONT CONTRIBUE A LA REALISATION DE CE
TRAVAIL, EN PARTICULIER A :*

*MONSIEUR "HADJI Tarek" NOTRE
ENCADREUR
POUR NOUS AVOIR SOUTENU ET AVOIR
DIRIGE
L'ELABORATION DE CE TRAVAIL*

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciement

Résumé

sommaire

Listes des Figures

Listes des Tableaux

Introduction Générale.....02

Chapitre I: BHP04

I-1 **Introduction**.....04

I-2 **Historique**.....04

I-3 **Définition des bétons à hautes performances**.....05

I-4 **Propriétés physico-chimiques mécanique des BHP**.....06

I-5 **Propriétés thermique**.....07

I-6 **Caractéristiques**08

I-7 **Différentes classes de bétons à hautes performances**08

I-8 **Les type de BHP**.....09

I-9 **Méthodes de formulation d'un BHP**.....10

I-10 **Les constituants de BHP**10

I-11 **Les avantages des BHP**.....11

I-12 **Les inconvénients des BHP**.....11

I-13 **Domaine d'application**.....12

Chapitre II: Les ajouts minéraux.....14

II-1 **Introduction**.....14

II-2 **Définition**.....14

II-3 **Classification des ajouts minéraux**16

II-3-1 **Principaux ajouts minéraux inertes**.....16

II-3-2 **Principaux ajouts minéraux actifs**.....17

II-4 **Effets des ajouts sur les propriétés des bétons**.....19

II-5 **L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil**.....20

II-6 **Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux**21

II-7 **Conclusion**.....21

Chapitre III: Les plans d'expérience.....23

III-1 **Introduction**.....23

III-2 **Historique**.....23

III-3 **Définition**.....24

III-4 **Terminologie**25

III-5 **Conditions d'application des plans d'expériences**26

III-5-1 **Condition 1**.....27

III-5-2 **Condition 2**27

III-6 **Vocabulaire de base des plans d'expérience**.....27

III-7 Intérêts des plans d'expériences	28
III-8 Avantages des plans d'expériences	28
III-9 Les types de plans d'expériences	29
III-9-1 Plans factoriels complets	29
III-9-2 Plans fractionnaires	30
III-9-3 Plans de mélange	30
III-9-3-1 Différents types de mélanges	30
III-9-3-2 Comparaison des plans factoriels complets et des plans fractionnaires dans les plans de mélange	31
Chapitre 4: Etude de cas	33
IV-1 Introduction	33
IV-2 Méthodologie	33
IV-3 Les différents mélanges binaires	33
IV-3-1 Ciment et laitier	33
IV-3-2 Ciment et fillers calcaires	34
IV-3-3 Ciment et pouzzolane	34
IV-4 Tableau d'expériences	34
IV-5 Résultats et analyses	35
IV-5-1 Les modèles mathématique en variables codes	36
IV-5-2 Résistance à la compression à 7 jours	36
IV-5-3 Résistance à la compression à 28 jours	36
IV-6 Analyse des résultats	36
IV-7 Choix des ajouts par la méthode AHP	38
IV-7-1 Aperçue sur la méthode d'analyse hiérarchique AHP	38
IV-7-2 Application de la méthode AHP dans le cas du choix d'un ajout	38
IV-7-2-1 Matrices de comparaison	39
IV-8 Conclusion	42
Conclusion Générale	44

Listes des Figures

<i>Figure 1 : Le pont de Mila.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 2 : La Grande Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc. 1986).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 3: Différents types d'ajouts cimentaire.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 4: Fillers Calcaires.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5: Schistes calcinés.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6: Le laitier granulé de haut fourneau.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 7: La pouzzolane naturelle ou artificielle.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8: La fumée de silice.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 9: Exemple d'expérience.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 10: Exemple de plans d'expérience.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 11 : la substitution du ciment par le laitier.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 12 : la substitution du ciment par les fillers calcaires.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 13 : la substitution du ciment par la pouzzolane.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 14 : influence des ajouts par rapport au ciment</i>	<i>37</i>
<i>Figure 15 : la structure hiérarchique.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure16 : résumé l'objectif (décision), les critères et les alternatives.....</i>	<i>38</i>

Listes des Tableaux

Tableau 1 : Les différentes classes de BHP.....	8
Tableau 2 : Les classes de résistance des Bétons.....	8
Tableau 3 : les résultats de l'écrasement des BHP à 7 et à 28 jours des différents mélanges.....	35
Tableau 4 : les résultats d'analyse par le logiciel JMP et les coefficients d'influence.....	35
Tableau 5 : Matrice de comparaison Rc7.....	39
Tableau 6 : Matrice de comparaison Rc28.....	39
Tableau 7 : Matrice de comparaison Taux de substitution.....	39
Tableau 8 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport à Rc 7 jours.....	40
Tableau 9 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport à Rc 28 jours.....	40
Tableau 10 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport au taux de substitution.....	40
Tableau 11 : Matrice de comparaison des critères.....	40
Tableau 12 : Matrice de comparaison des critères normalisée et les poids des critères par rapport à l'objectif.....	41

ملخص

تطور الخرسانة عالية الأداء يكون بإضافة عناصر معدنية لتحقيق توازن بين حماية البيئة و كلفة إنتاج الاسمنت . تهدف هذه الدراسة إلى تقييم مدى تأثير الإضافات المعدنية المتوفرة محليا في الجزائر على السلوك الفيزيائي والميكانيكي للخرسانة ذات الأداء العالي. لتكون الخلائط أمثل بين الاسمنت والإضافات المعدنية قمنا باستخدام طريقة تصاميم التجارب لحساب معاملات التأثير لثلاثة أنواع من الإضافات المعدنية على المقاومة الميكانيكية للخرسانة عالية الأداء في 7 أيام وفي 28 يوم. وقمنا باستخدام طريقة التحليل السلمي لترتيب الإضافات المعدنية واعتمدنا في الترتيب على مدى تأثيرها على المقاومة الميكانيكية ونسبة الاسمنت المستبدلة بهذه الإضافات المعدنية.

Résumé

Le développement des bétons à hautes performances (BHP) passe, en général, par l'utilisation des additions minérales. Ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et techniques. L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet des additions minérales disponibles localement sur le comportement physico-mécanique des BHP. Pour bien mener l'étude d'optimisation des mélanges, on a opté pour l'utilisation l'approche des plans d'expériences afin de quantifier l'effet de 3 ajouts minérales sur la résistance mécanique à 7 et à 28 jours des BHP et la classification des 3 ajouts par la méthode d'analyse hiérarchique AHP selon la résistance mécanique des BHP et le taux de substitution du ciment par L'ajout.

Abstract

The development of high-performance concrete (HPC) generally requires the use of mineral additions. This will enable an equilibrium between protection of the environment and economic considerations. The objective of this study is to examine the effect of locally available mineral additions on the physico-mechanical behavior of HPCs. In order to carry out the optimization study of the mixtures, the experimental design approach was chosen to quantify the effect of 3 mineral additions on the mechanical strength Of HPC at 7 and 28 days and the classification of the 3 additions by the hierarchical analysis procedure AHP according to the mechanical strength of the HPC and the rate of substitution of the cement by the addition.

Keywords : The experimental design approach, Optimization, Mix design, Mineral Additions, High Performance Concretes (HPC) and Physico-mechanical Behavior.

Mots Clés : L'approche des plans d'expériences, Optimisation, Plan de mélange, Additions minérales, Bétons à hautes performances (BHP) et Comportement physico-mécanique.

الكلمات المفتاحية: تصميم التجارب, الأمثل, خطة الخليط, الإضافات المعدنية, الخرسانة عالية الأداء والفيزيائية والميكانيكية.

A photograph of a cable-stayed bridge under construction. The bridge features several tall, slender concrete pylons supporting the deck with numerous stay cables. The bridge spans a valley with brown, harvested fields and green forested areas. The sky is overcast. The text 'Introduction' is overlaid in a large, black, serif font with a blue glow effect. Below it, the word 'INTRODUCTION' is repeated in a smaller, semi-transparent, blue, sans-serif font.

Introduction

INTRODUCTION

Introduction générale

L'industrie du béton est une source importante d'émissions de gaz CO₂ lors de la production de ciment. Une des solutions proposées à l'industrie de la construction est de remplacer le ciment par des matières premières secondaires moins polluantes (ex : les Ajouts minéraux telle que les fillers calcaires, fumée de silice...), qui peuvent également améliorer les caractéristiques rhéologiques du liant et accroître la durabilité du béton. De même, l'optimisation des structures vise également à réduire les quantités (en volume) de béton et se traduit alors par le recours aux bétons à hautes performances et aux bétons fibrés à ultra performance (BHP et BFUP).

La plupart des ajouts minéraux ont en commun de contenir une forme de silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du C₂S et du C₃S avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté du même type que celui qui est formé durant l'hydratation du ciment Portland (N F P 18-508).

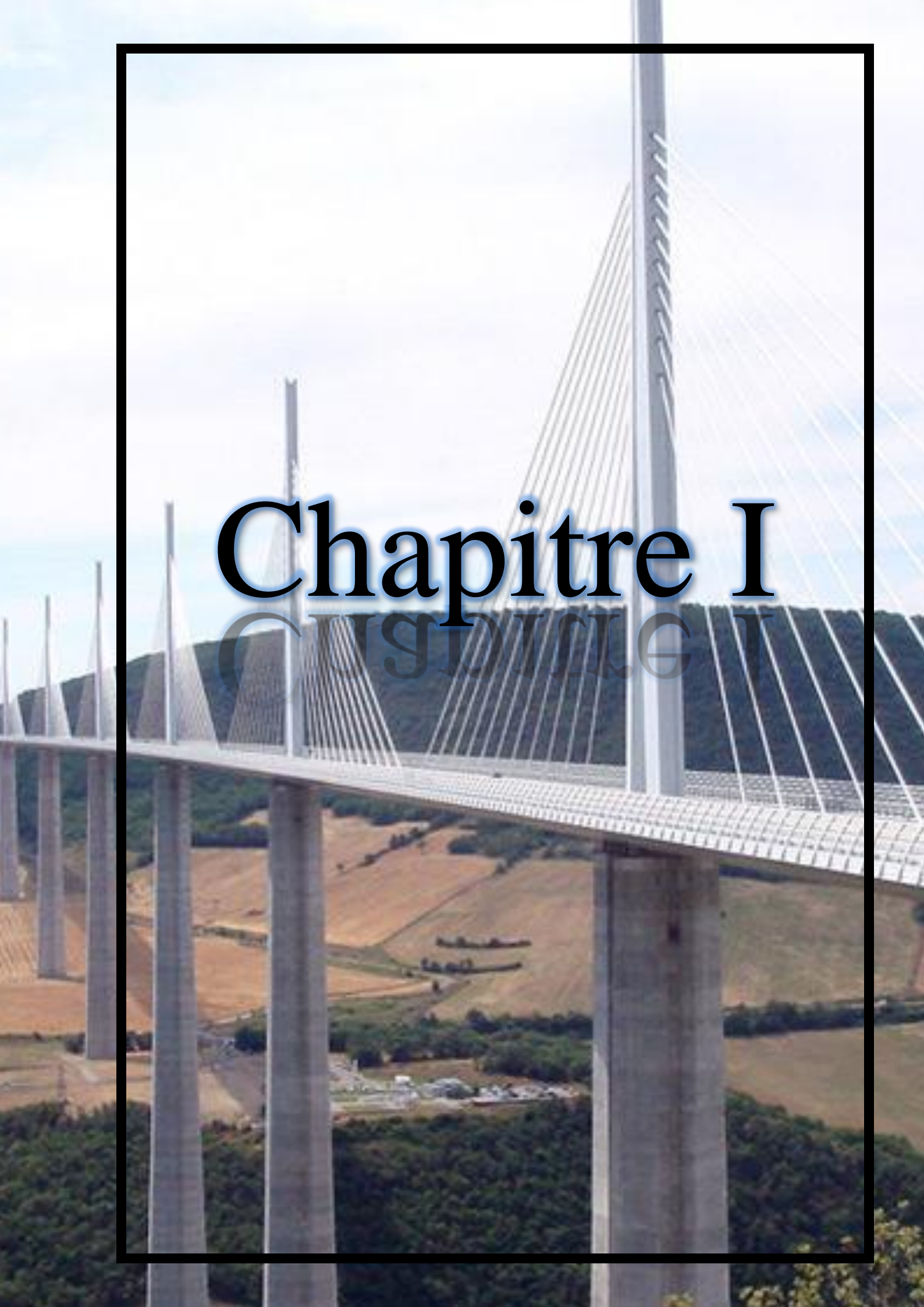
La formulation des Bétons à haute performance avec la substitution d'un pourcentage du ciment par un ajout minérale nécessite un programme expérimental à faire dans un laboratoire, pour avoir l'optimum du pourcentage de la substitution. La méthode des plans d'expériences est une méthode efficace et très utilisable dans ce type de problème (problèmes de mélange). Avec cette méthode, on peut quantifier l'effet de chaque constituant aussi bien l'interaction entre les constituants d'un mélange avec le minimum des essais au laboratoire.

Dans ce mémoire, nous avons fait une modélisation mathématique des résultats expérimentaux de la résistance mécanique à 7 et à 28 jours des Béton BHP Formulés avec trois types d'ajouts minéraux (fillers calcaires, laitier broyé et pouzzolane naturelle broyé) ⁽¹⁾. Nous avons utilisés aussi la méthode d'analyse hiérarchique multicritère AHP pour faire le choix d'un ajout selon la résistance mécanique et le taux de substitution.

Concernant la structure de notre mémoire, nous avons commencés par une introduction générale qui donne une aperçue générale sur la problématique. Cette introduction est suivie par le premier chapitre qui est consacré sur le béton BHP (types, caractéristiques, formulation...). Le deuxième chapitre traite les différents types ajouts minéraux et leurs caractéristiques. Le troisième chapitre représente une vue générale sur la méthode des plans d'expériences. Le quatrième chapitre est une étude de cas ou se trouve les résultats de l'analyse et leur interprétation. Enfin, une conclusion générale qui résume tous ce qui précède dans les quartes chapitres et les conclusions extraites de l'analyse de problématique.

Chapitre I

© USTC 2014



Chapitre I: BHP

1- INTRODUCTION:

L'Algérie est l'un des pays en voie de développement, il adapte le programme de développement durable dans tous les domaines surtout dans le domaine de l'industrie de construction, donc il est nécessaire de fabriquer des bétons durables.

Les développements récents en technologie des ciments et des ajouts cimentaires (fumée de silice, pouzzolane naturelle) et des super plastifiants ont mené à la production du béton à haute résistance (≥ 50 Mpa) [11] et [14].

2- HISTORIQUE:

Les lois du béton liant la résistance à la composition sont énoncées dès la fin du XIX^e siècle avec en particulier l'ingénieur français Féret, mais ne sont pas exploitées immédiatement. Jusqu'à la fin des années quarante, la formulation du béton était d'une grande simplicité.

Dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton, il faut minimiser le pourcentage de vides. M.Duriez précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton qui, mise en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau nécessaire au mouillage de tous les grains, ciment compris, forme un ensemble homogène sans vide.

Avant 1980, les BHP (Bétons à Hautes Performances) ou BHR (Bétons à Hautes Résistances) étaient uniquement produits en laboratoire. Cette situation a beaucoup évolué vers les années quatre vingt, avec l'arrivée des superplastifiants et des fumées de silice. En effet, vers 1970, les restrictions environnementales ont contraint les industries de ferrosilicium à collecter la poussière de leurs cheminées. Comme conséquence, ces fumées se sont retrouvées dans l'industrie du béton.

Dans les années 1980, on découvre le moyen de réduire ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons hautes performances. Vers la fin des années 1980, plusieurs pays ont lancé des projets de recherche spécifiques sur le BHP. Parmi ceux-ci on retrouve les Etats-Unis, la Norvège, le Canada, la France, la Suisse, l'Australie, l'Allemagne, le Japon, la Corée, la Chine et Taiwan.

De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa, les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont.

De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et leur utilisation sur les chantiers commence à se développer. [14]

3- DÉFINITION DES BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES :

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- Une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre;
- Un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ce matériau a acquis ses lettres de noblesse en étant perçu comme un nouveau type de béton. Ce dernier qui ne peut être produit n'importe comment ni par n'importe qui, est très surprenant tant ses performances et ses possibilités d'applications sont vastes. C'est un matériau de haute technologie. La résistance à la compression d'un tel béton peut atteindre des valeurs supérieures à 100 MPa et dans de certains cas 120 MPa à 150 MPa, selon la nature des granulats et son dosage en ciment.

Ils présentent une microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs. Aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue par rapport aux bétons ordinaire.

Le béton à haute performance n'est pas un matériau révolutionnaire, car il contient exactement les mêmes constituants que le béton ordinaire. Les constituants de ce nouveau matériau sont :Les granulats ordinaires quoique de bonne qualité, du ciment Portland ordinaire (ciment Portland à haute résistance initiale), lorsque des résistances élevées au jeune âge sont nécessaires a un dosage important de (450 à 550 kg/m³), et il est constitué aussi par la fumée de silice (généralement de 5 à 15% de la masse totale du liant) , et parfois par d'autres ajouts minéraux comme des cendres volant; ou du laitier de haut fourneau granulé broyé....etc : toujours du super plastifiant, le dosage en varie entre 5 et 15 litres par mètre cube de béton selon la teneur en matières sèches et sa nature ; un tel dosage permet de réduire la quantité d'eau du béton de 45 à 75 kg /m³. Il est essentiel que le béton à haute performance puisse être mis en place dans la structure en utilisant des méthodes usuelles et qu'il soit mûri de manière habituelle même si un bon mûrissement humide est nécessaire.

Généralement le béton à haute performance se différencie à des autres bétons par son très faible rapport eau/ciment : toujours inférieur à 0,3 quelquefois ne dépassant pas 0.25 et occasionnellement 0.20.

Les BHP ont rapidement démontré qu'ils permettaient d'offrir un potentiel de progrès extraordinaire pour la construction de bâtiments et de structures de génie civil. Ils sont désormais valorisés par d'autres performances que la simple résistance mécanique, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures. Ce concept de valorisation des performances du béton autre que la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons modernes (BAP, BFUP, etc.) [14] et [6].

4- PROPRIETES PHYSICO- CHIMIQUES ET MECANIQUES DES BHP:

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité

- **Résistances mécaniques :**

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

- **Module d'élasticité :** Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

- **Retrait :** Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodissociation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250×10^{-6}) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60×10^{-6}). Le retrait d'autodissociation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.

- **Fluage :**

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice)..

- **Imperméabilité :**

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité

- **Résistance aux agents agressifs :** La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).
- **Migration des ions chlorure :** La résistance des BHP à la migration des ions chlorures est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.
- **Tenue aux attaques gel/dégel :** Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.
- **Tenue au feu :**

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'intérêt de l'introduction de fibres de polypropylène (à des dosages de quelques kg/m³) pour réduire de façon efficace le risque d'écaillage des BHP (les fibres en fondant, vers 170 °C, constituent un réseau connecté de canaux rendant le matériau beaucoup plus perméable, ce qui permet l'évacuation de la vapeur).

- **Carbonatation :**

De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel

5- PROPRIETES THERMIQUES:

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, diffusité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.[6].

6- CARACTERISTIQUES:

- ✓ Résistances caractéristiques à 28 jours, mesurées sur éprouvettes cylindriques, supérieures à 50MPa.
- ✓ Consistance S4 (affaissement au cône d'Abrams de 160 à 210 mm).
- ✓ Pompable.
- ✓ Résistances élevées au jeune âge.
- ✓ Compacité optimale (faible rapport E/C).

- ✓ Durabilité exceptionnelle.
- ✓ Faible perméabilité.
- ✓ Forte résistance à l'abrasion.
- ✓ Faible retrait limitant la fissuration.
- ✓ Fluage plus faible que celui d'un béton courant.

7- DIFFÉRENTES CLASSES DE BÉTONS Á HAUTES PERFORMANCES :

On peut diviser les BHP en cinq classes différentes définies chacune par des résistances à la compression qui peuvent être considérées comme des barrières technologiques dans l'état actuel de la technologie des BHP.

Les différentes classes correspondent chacune à une plage de résistance de 25 MPa et ne doivent pas être considérées comme des limites absolues, mais plutôt comme des limites moyennes qui peuvent varier d'un endroit à l'autre [14].

Tableau1 : Les différentes classes de BHP

Résistance à la compression (MPa)	50→75	75→100	100→125	125→150	Supérieure à 150
Classe de BHP	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V

Tableau2 : Les classes de résistance des Bétons

Bétons	Résistance (Mpa)
Béton ordinaire	20 -50
Béton a haute performance	50-100
Béton a très haute performance	100-150
Béton a ultra haute performance (exceptionnel)	≥150

8- LES TYPE DE BHP :

- **Les bétons hautes performances (BHP)**

L'emploi des "super plastifiants/haut réducteur d'eau" permet de réduire l'eau (voir fiche technique de l'adjuvant) du béton à consistance égale entraînant la suppression d'un volume important non mobilisé par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment. Le rapport eau/ciment est ainsi de 0,30 à 0,40 alors qu'il est habituellement de 0,45 à 0,60 pour un béton ordinaire.

La composition d'un béton hautes performances est en général la suivante : 750 à 950 kg/m³ de gravillons, 700 kg/m³ de sable, 350 à 500 kg/m³ de ciment de classe 52.5N ou R et d'une addition type "fumée de silice". L'ajout d'un "super plastifiants/haut réducteur d'eau" à hauteur de 1 à 2 % du poids de ciment permet de réduire le volume d'eau nécessaire à une valeur de 140 à 160 litres/m³

- **Les bétons à très hautes performances(BTHP)**

L'utilisation de particules ultrafines de moins d'un micron de largeur contribue à réduire encore plus la porosité, mais est essentiellement utilisée pour les bétons à très hautes performances (BTHP). Les particules ultrafines utilisées sont la plupart du temps des fumées de silice, contenant plus de 90 % d'oxyde de silicium, sous-produit de l'industrie du ferrosilicium.

Ces fumées de silice ont une double action. Outre le fait de réduire les vides, elles jouent aussi un rôle de catalyseur avec la chaux vive, lié à leur caractère pouzzolanique.

- **Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP)**

Les progrès dans le domaine des adjuvants des méthodes de formulations et de l'utilisation des ultras fines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons : des bétons courants de résistance en compression de 30 MPa, la gamme s'est élargie aux bétons à hautes performances.

Une rupture technologique est intervenue au début des années 1990 avec la mise au point des bétons dont la résistance est de l'ordre de 200MPa en compression et de 40MPa en traction par flexion. Grâce à cette dernière caractéristique, on peut désormais envisager de se passer des armatures passives dans les éléments structurels.

On retrouve dans la famille des BFUP des bétons réalisés suivant 2 concepts différents :

- 1- concept d'optimisation multi échelle de composants et de fibres, qui permet d'obtenir un comportement ductile.
- 2- Concept d'utilisation de granulats à haute résistance mécanique.

Les bétons exceptionnels : de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280 MPa à été obtenu dans un laboratoire avec un E/C= 0.16

9- METHODES DE FORMULATION D'UN BHP:

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

- Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :
 - sélection des constituants en fonction de l'expérience locale.
 - détermination des proportions des constituants.
 - optimisation du squelette granulaire.
- Optimisation du mélange en laboratoire:
 - validation de la compatibilité ciment / adjuvant.
 - ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation.
 - vérification du comportement rhéologique du béton frais.
 - analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants
 - analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en oeuvre (température).
- Validation de la formule en centrale :
 - vérification du comportement rhéologique du béton frais.
 - vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité.
 - vérification des caractéristiques du béton.

10- LES CONSTITUANTS DE BHP :

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes[6].

➤ **Ciments:**

Conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).

➤ **Granulats :**

Conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).

➤ **Additions :**

Conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).

➤ **Adjuvants :**

Plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

11- LES AVANTAGES DES BHP :

L'utilisation du BHP soulève plusieurs avantages [5] :

- ✚ Les bétons hautes performances permettent de réduire les sections des éléments porteurs et ainsi d'augmenter les surfaces exploitables (bureaux, parkings...).
- ✚ L'allègement des ouvrages diminue les quantités de matériaux, ce qui relativise le coût du m³ de béton hautes performances.
- ✚ La facilité et la rapidité de mise en œuvre augmentent la productivité du chantier.
- ✚ La prise et le durcissement plus rapides accélèrent la rotation des coffrages.
- ✚ Le maintien de la rhéologie pendant 1h30 est assuré grâce à l'emploi de super plastifiants.
- ✚ La fluidité importante permet d'assurer un bon remplissage des ferraillements denses.
- ✚ Les bétons hautes performances procurent une meilleure adhérence acier/béton.

12- LES INCONVENIENTS DES BHP :

- ✚ ils nécessitent une étude très fine de la formulation.
- ✚ un contrôle plus strict au niveau de la réalisation.
- ✚ Les mains d'œuvres qualifiées.
- ✚ Le coût est plus élevé de l'ordre de 15 à 20% pour passer de 35MPa à 60 Mpa.

13- DOMAINE D'APPLICATION :

- ❖ Les ouvrages de grandes portées (ponts, Viaduc, etc.)
- ❖ Les immeubles de grande hauteur (IGH) (gratte-ciel)
- ❖ Des pièces préfabriquées très courtes, (voussoirs pour pont)
- ❖ Les ouvrages de génie nucléaire (centrale nucléaire)



Figure 1 : Le pont de Mila



Figure 2 : La Grande Mosquée Hassan II
(Casablanca, Maroc. 1986)

14- CONCLUSION :

Le béton BHP est une Roche artificielle avec hautes performances (Résistance élevé et durabilité améliorée). La formulation des BHP nécessite une optimisation des quantités du superplastifiant et la quantité d'eau de gâchage sans omettre la qualité des granulats. L'évolution de ce type du béton est avec l'ajout de quelques ajouts minéraux pour améliorer ces performances et réduire le cout de production sans ennuyer l'environnement.

A photograph of a cable-stayed bridge under construction. The bridge deck is supported by several tall, slender concrete piers. The bridge spans a valley with brownish fields and green trees. The sky is overcast. The text 'Chapitre II' is overlaid in the center, with a faint, semi-transparent version of the same text below it.

Chapitre II

Chapitre II:LES AJOUTS MINÉRAUX

1- INTRODUCTION:

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires.

2- DÉFINITION:

Les ajouts cimentaires Ce sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluants,ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leur pourcentage dans la masse varie suivant le but de l'addition et le rôle qu'ils peuvent jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts: inertes et actifs.

Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs .La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux.

Il a été prouvé que l'introduction des ajouts minéraux dans la pâte de ciment conduit à la segmentation des larges pores capillaires et offrent un grand nombre de sites de germination pour la précipitation des produits d'hydratation qui accélèrent l'hydratation du ciment et permettent de réduire les dimensions des cristaux de chaux [4].

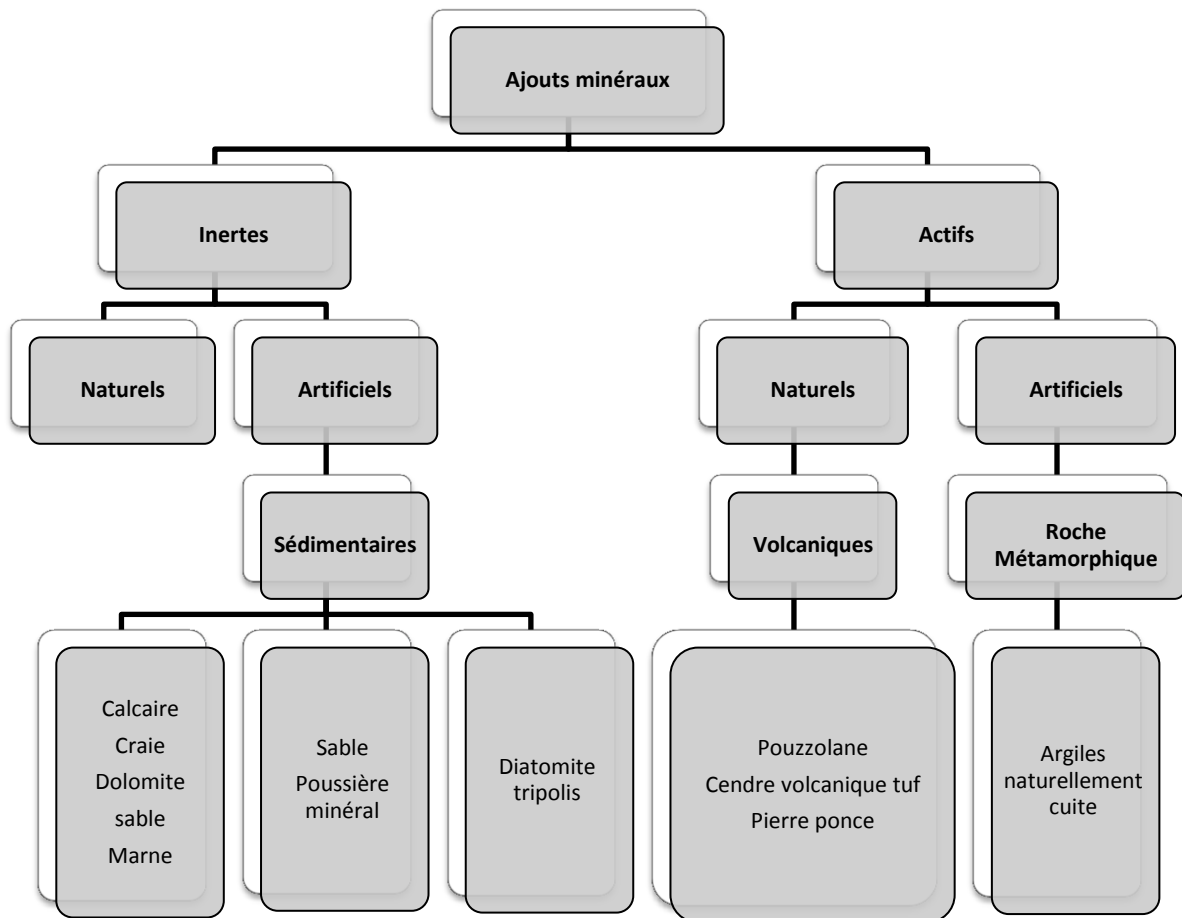


Figure 3: Différents types d'ajouts cimentaire

3- CLASSIFICATION DES AJOUTS MINÉRAUX:

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs .

3-1- PRINCIPAUX AJOUTS MINÉRAUX INERTES:

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland: ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les Schistes calcinés.

- **Fillers Calcaires:**

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns



Figure 4: Fillers Calcaires

- **Schistes calcinés:**

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont thermiquement activés. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières



Figure 5: Schistes calcinés

3-2- PRINCIPAUX AJOUTS MINÉRAUXACTIFS:

- **Le laitier granulé de haut fourneau:**

Le laitier granulé est obtenu par refroidissement rapide de scorie fondue provenant de la fusion du minéral de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment.



Figure 6:Le laitier granulé de haut fourneau

- **La pouzzolane naturelle ou artificielle:**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique des propriétés pouzzolaniques.



Figure 7: La pouzzolane naturelle ou artificielle

- **La fumée de silice**

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.



Figure 8: La fumée de silice

- **Les cendres volantes siliceuses ou calciques**

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentés au charbon pulvérisé [4].

4- EFFETS DES AJOUTS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS:

❖ Amélioration de l'ouvrabilité :

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 %

❖ Chaleur d'hydratation:

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

❖ Durabilité:

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'étrangéité expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C_3A dans le ciment. Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

❖ **Développement des résistances:**

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout. Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H.

❖ **Développement des bétons à haute résistance :**

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales .Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H [4].

5- L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINÉRAUX DANS LE GÉNIE CIVIL:

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages .techniques, économiques et écologiques

- **Intérêt du point de vue technique:**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration.

- **Intérêt du point de vue économique:**

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer

le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland.

- **Intérêt du point de vue environnemental**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂.

6- LES INCONVÉNIENTS D'UTILISATION DES AJOUTS MINÉRAUX:

- Retard de prise
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.
-

7- CONCLUSION :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'il s permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments. Plusieurs méthodes on vue le jour pour optimiser l'effet des ajouts minéraux sur le comportement physico-mécanique comme la méthode des plans d'expériences.

Chapitre III

CUSTOMER



Chapitre III : LES PLANS D'EXPERIENCE

1- INTRODUCTION:

Grace au déploiement de la qualité dans les entreprises et à un accès facilité aux moyens de calcul, les plans d'expériences prennent une place plus importante. Les applications des plans d'expériences permet une recherche expérimentale planifiée appelée (plans d'expériences). Elle va aider l'expérimentateur a structurer sa démarche expérimentale planifiée appelée (plans d'expériences). Elle va aider l'expérimentateur à structurer sa démarche expérimentale de manière différente à confronter et à valider ses propreshypothèses, à mieux comprendre les phénomènes étudiés et à résoudre les problèmes.

2- HISTORIQUE :

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées l'expérimentation. Les premiers scientifiques à s'être posé le problème de l'organisation des essais sont des agronomes. Ils avaient en effet beaucoup de paramètres à 'étudier et n'avaient pas la possibilité de multiplier le nombre d'expériences.

De plus, la durée e des expériences constituait une contrainte supplémentaire forte, qui, pour la première fois en 1925, proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois. Cette méthode fut reprise puis développée par des statisticiens et des mathématiciens qui définirent des tables d'expériences permettant de réduire considérablement le nombre d'expériences `à effectuer sans diminuer la pertinence de la campagne d'essais. Les grandes entreprises se sont ensuite intéressées `à cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité `à la suite des travaux du Docteur Taguchi, Il a fortement contribué à l'expansion de l'utilisation des plans d'expériences en milieu industriel au Japon dans les années 1960. Au cours de ces dernières années, cette méthodologie, du fait de la pertinence des informations apportées, s'est d' développée dans la plupart des secteurs d'activités [1].

3- DEFINITION:

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit 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.

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y, et des variables, xi. Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y=f(x_i)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [13].

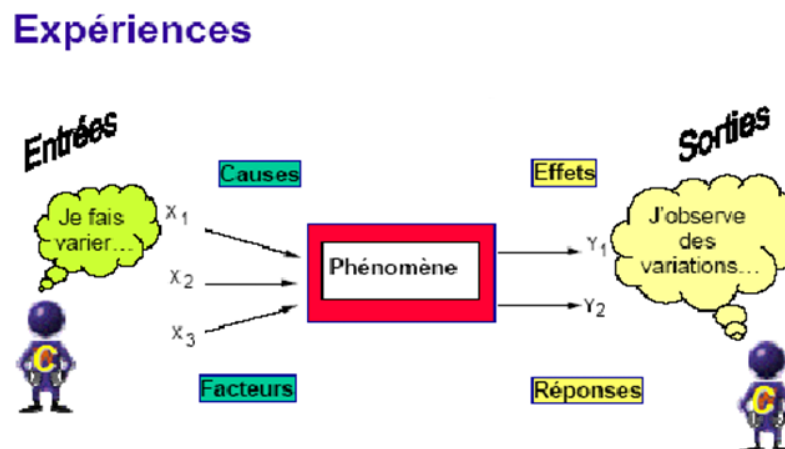


Figure 9: Exemple d'expérience

Plans d'expérience

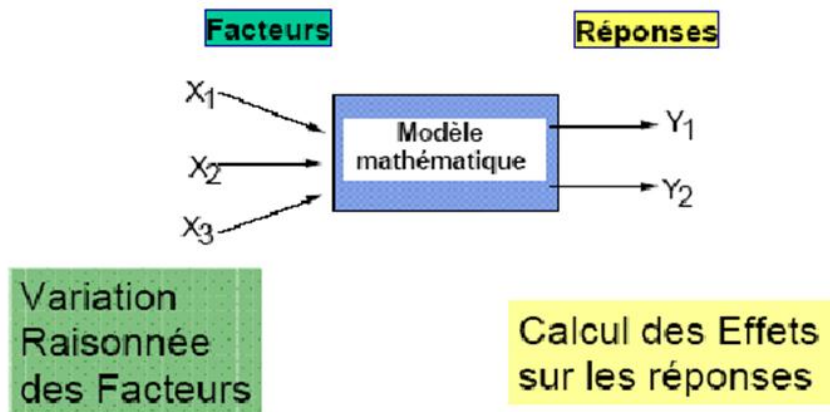


Figure 10: Exemple de plans d'expérience

4- TERMINOLOGIE :

Avant d'entamer l'élaboration du plan d'expérience, la connaissance d'une certaine terminologie qui lui est associée revêt une importance primordiale.

❖ Facteurs

Un facteur est un paramètre que l'on peut varier d'une expérience à une autre, et qui influence le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs entrant en jeu est, couramment, supérieur à celui des réponses. Deux types de facteurs sont distingués :

- Facteur quantitatif : tout facteur mesurable. Sa variation est soit continue, à savoir le dosage en cendres volantes, en CBG ou en fillers de calcaire, soit discontinue dans le cas de classes de ciment par exemple.
- Facteur qualitatif : tout facteur non mesurable tel que la nature de granulats ou leur type.

❖ Niveau des facteurs :

C'est la délimitation du domaine de variation d'un facteur donné. En général, la variation de chaque facteur est délimitée par deux niveaux : supérieur et inférieur.

❖ Domaine expérimental

Le domaine expérimental est schématisé par un polyèdre à k dimensions, où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque côté de ce polyèdre, est défini par les deux niveaux extrêmes caractérisant le facteur correspondant à ce côté.

❖ Réponses

Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.

❖ Effet

L'effet d'un facteur X sur une réponse Y est obtenu en étudiant les variations des valeurs de Y en fonction de celles de X . Si le facteur X a une interaction avec lui-même, on parle d'un effet quadratique. Un effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le coefficient multiplicatif de X dans un modèle mathématique de la réponse. La signification de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques.

❖ Interaction

On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs X et X' si l'effet de X dépend du niveau de X' et inversement. Cette interaction est notée interaction XX' ou interaction $X'X$.

5- CONDITIONS D'APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES :

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat.

Leurs applications au béton s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

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

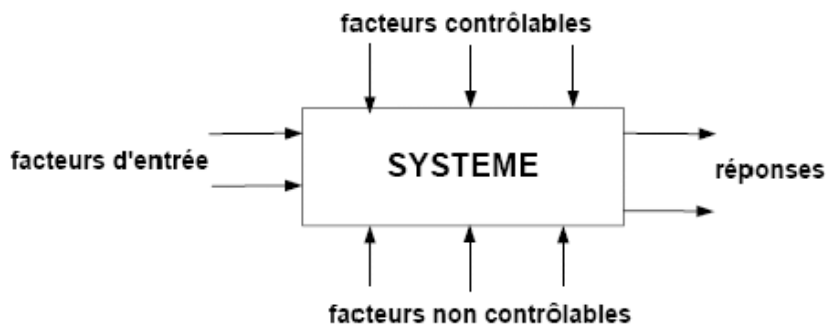
Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées :

- 5- **1-Condition 1** : La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.

- 5- **2- 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(2).

6- VOCABULAIRE DE BASE DES PLANS D'EXPERIENCES:

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 ...)

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

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est le plus souvent mesurable mais elle peut également être qualitative.

Dans ce cas ce peut être par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation bonne, moyenne ou mauvaise sur un produit alimentaire [7].

7- INTERETS DES PLANS D'EXPERIENCES :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche-développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- industries mécaniques et automobiles
- industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure
- prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité.

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

Il faut néanmoins comprendre que les plans d'expériences ne sont pas un outil destiné a priori à la recherche fondamentale car ils ne permettront jamais une explication du phénomène physico-chimique étudié [2].

8- AVANTAGES DES PLANS D'EXPERIENCES :

Les plans d'expériences permettent une diminution considérable du nombre d'essais et une interprétation rapide et sans équivoque. Ils fournissent des résultats faciles à présenter.

- possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs
- détection des interactions éventuelles
- modélisation aisée des résultats
- détermination des résultats avec une bonne précision [10].

9- LES TYPES DE PLANS D'EXPERIENCES :

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 hybride [2].

9- 1- Plans factoriels complets:

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

- **Plan à deux facteurs**
- **Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux**
- **Plans factoriels complets à trois niveaux**
- **PLANS FACTORIELS FRACTIONNAIRES A DEUX NIVEAUX $2k-q$:**

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 $2q$ 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 *aliases* et on dit que les coefficients sont aliasées dans les contrastes.

BUT :

Pour atteindre correctement son but, il est nécessaire que les traitements n'interagissent pas entre eux. Autrement, le plan factoriel perd sa puissance et se retrouve dans l'impossibilité de ne répondre à aucune des deux questions

9- 2- Plans fractionnaires :

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ($N=n^k$), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser. Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'inflation rapide d'un nombre d'essais dans les plans complets.

BUT :

L'objectif des plans fractionnaires va consister à réduire le nombre d'expériences à réaliser par rapport au nombre maximum donné par le plan complet.

Les plans fractionnaires utilisent les matrices des effets des plans complets

9- 3- Plans de mélange :

Les plans de mélange sont des plans d'expériences que l'on utilise, lorsque l'on étudie des produits composés de plusieurs constituants.

La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés.

BUT :

L'objectif est de trouver la loi qui régit une ou plusieurs réponses en fonction de la composition du mélange.

- + Le but d'un plan de mélange est de traduire fidèlement les variations de chaque propriété par une relation
- + Ne nécessitera aucun logiciel spécifique compliqué, Utilisera des matrices orthogonales et donc permettra de minimiser la dispersion des caractéristiques des mélanges obtenus, Permettra de tester également l'influence de facteurs de process.

9- 3- 1-Différents types de mélanges :

Les plans de mélanges permettent le choix des mélanges à tester de façon à pouvoir mieux estimer les coefficients a_i , a_{ij} et a_{ijh} . Ce sont des plans optimaux.

Ces plans sont distingués selon les contraintes auxquelles sont soumises leurs différentes composantes x_i :

- Plan de mélange type I : dans ce plan, on note qu'il n'y a pas de contrainte particulière.
- Plan de mélange de type II : est tel que $X_i \leq l_i$. ses contraintes sont fréquemment rencontrées. Si aucune contrainte n'est signalée sur une composition, il y a toujours la contrainte naturelle $X_i \geq 0$.
- Plan de mélange de type III : est tel que $l_i \leq X_i \leq u_i$. ce sont les plus fréquents et les plus difficiles à utiliser.
- Plan de mélange type IV : où X_i ($i=2...k$) $\ll X_1$ où X_1 est le solvant. C'est un cas très particulier de solutions.

- **PLANS A PLUSIEURS NIVEAUX :**

Les plans à deux niveaux sont très utilisés parce qu'ils sont économiques en nombre d'essais. Mais il n'y a aucune raison de ne pas considérer des plans ayant des facteurs prenant plus de deux niveaux. Il faut donner à chaque facteur le nombre de niveaux nécessaires aux exigences de l'étude. Il existe, là aussi, des plans complets et des plans fractionnaires qui permettent de réduire le nombre des essais malgré l'augmentation du nombre de niveaux.

9-3-2- Comparaison des plans factoriels complets et des plans fractionnaires dans les plans de mélange :

Lorsque vous générez un plan de mélange et variables de procédé "complet", ce plan sera généré à chaque combinaison de niveaux des variables de procédé. Il peut en résulter un nombre d'essais prohibitif car, dans un plan complet, le nombre de points du plan augmente rapidement avec l'accroissement du nombre de variables de procédé.

10- Conclusion :

La méthode des plans d'expériences est une méthode basée sur les notions de la statistique. Elle est destinée à l'expérimentateur pour l'aider à faire des programmes expérimentaux fiables et de minimiser le cout et le temps des essais. Elle a fournis des modèles mathématiques qui simulent bien les résultats expérimentaux. Avec ces modèles mathématiques on peut quantifier l'effet des constituants d'un mélange sur les résultats des essais.

Chapitre IV

CHAPITRE IV



Chapitre IV : ETUDE DE CAS

1- INTRODUCTION:

Dans les chapitre précédent nous avons pris une vue sur les BHP et les Ajouts minéraux et la méthode des plans d'expériences. Dans ce chapitre nous allons appliqués la méthode des plans d'expérience pour modéliser l'effet de quelques ajouts minéraux sur la résistance mécanique à la compression à 7 et à 28 jours d'un béton BHP à l'aide d'un logiciel de calcul statistique JMP.

2- METHODOLOGIE :

a-)Nous avons trouvés dans la littérature [3] des résultats expérimentaux de l'écrasement à 7 et à 28 jours des bétons BHP formuler sur la base des matériaux locaux (Laitier Broyé, pouzzolane naturelle broyé et fillers calcaires). Les ajouts minéraux sont utilisés avec des différents dosages et comme des substituants de ciment avec un taux massique qui ne dépasse pas 40%. Pour cette étude, nous avons choisis un plan de mélange optimal pour chaque mélange binaire. Nous somme contraints de suivre le programme expérimental de l'auteur (nombre des essais ou bien les points expérimentaux, les dosages et les taux de substitution du ciment par l'ajout. La Méthode de l'université de Sherbrooke est utilisée dans la formulation des bétons BHP témoin avec l'ajustement du squelette granulaire par la méthode Dreux Gorisse.

b-)Nous appliquons la méthode d'analyse hiérarchique AHP pour faire choisir l'ajout préféré sur la base de quelques paramètres. Nous prenons comme paramètres le pourcentage massique, les résultats d'écrasement à 7 et à 28 jours.

3- LES DIFFERENTS MELANGES BINAIRES:

3- 1- CIMENT ET LAITIER:

La substitution de 40% du poids de ciment par un mélange binaire de ciment + laitier

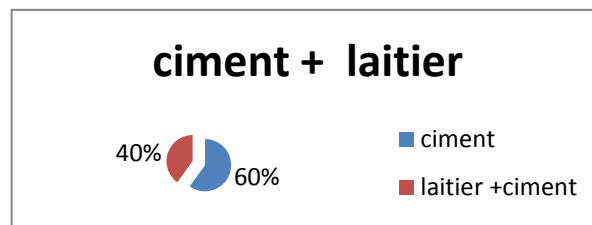


Figure 11 :la substitution du ciment par le laitier

3- 2- CIMENT ET FILLERS CALCAIRES :

La substitution de 10% du poids de ciment par un mélange binaire de ciment + fillers calcaires

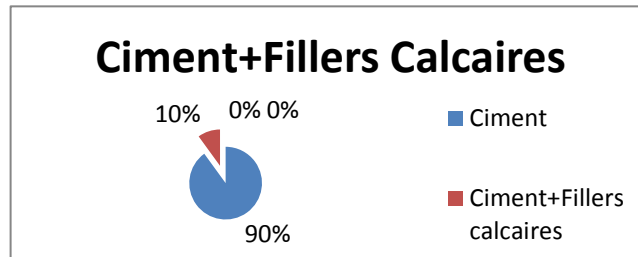


Figure12 : la substitution du ciment par les fillers calcaires

3- 3- CIMENT ET POUZZOLANE:

La substitution de 40% du poids de ciment par un mélange binaire de ciment + Pouzzolane broyé

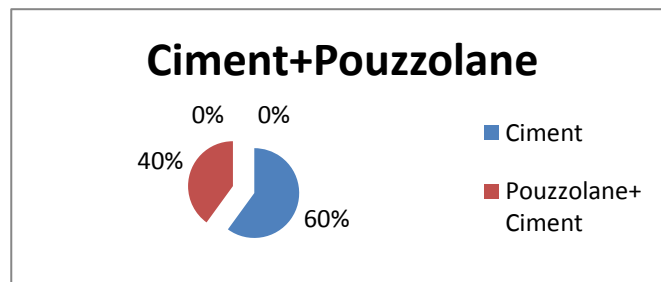


Figure 13 : la substitution du ciment par la pouzzolane

4- TABLEAU D'EXPERIENCES:

Les résultats des essais d'écrasement à 7 et à 28 jours et les différents dosages binaires, sont représentées au tableau suivant :

Tableau 3 : les résultats de l'écrasement des BHP à 7 et à 28 jours des différents mélanges [10]

Ajout Minéral	Taux de substitution	Mélanges (%)		Résultats de l'expérimentation RC 7 jours (mpa)	Résultats de l'expérimentation RC 28 jours (mpa)
		Ciment	Laitier		
Laitier	Jusqu'à 40%	100	0	47.84	66.57
		50	50	44.75	75.48
		25	75	41.38	73.57
		0	100	38.78	68.3
		Ciment	Fillers calcaires		
Fillers calcaires	Jusqu'à 10 %	100	0	47.84	66.57
		75	25	48	65.33
		50	50	49.47	66.68
		25	75	44.23	63.97
		0	100	41.4	58.47
		Ciment	Pouzzolane Naturelle		
Pouzzolane	Jusqu'à 20 %	100	0	47.84	66.57
		75	25	38.19	63.9
		50	50	37.12	58.31
		25	75	33.5	51.91
		0	100	32.82	48.31

5- RESULTATS ET ANALYSES:

Les résultats d'analyse statistique par le logiciel JMP des différents résultats d'écrasement sont résumés au tableau suivant :

Tableau 4 : les résultats d'analyse par le logiciel JMP et les coefficients d'influence

	Corrélation R ²	coefficient	Pas- à - pas	Valeur P	Criblage
Rc 7 jours	0.97	a1 (C)	47.89	0.01	48.31
		a2 (L)	38.62	0.01	39.20
		a12 (C* L)	4.68	0.32	NS
	0.64	a1 (C)	47.7	0.0011	49.52
		a2 (FC)	41.04	0.0014	42.86
		a12 (C*F C)	14.5	0.15	NS
	0.83	a1 (C)	47.04	0.0021	44.84
		a2 (PN)	33.15	0.0044	30.95
		a12 (C*PN)	-17.59	0.1612	NS
Rc 28 jours	1.0	a1 (C)	66.59	0.0033	66.59
		a2 (L)	68.23	0.0027	68.23
		a12 (C* L)	31.7	0.0229	31.7
	0.67	a1 (C)	65.92	0.0005	67.72
		a2 (FC)	58.89	0.0006	60.69
		a12 (C*F C)	14.38	0.1346	NS
	0.98	a1 (C)	67.12	0.0004	67.50
		a2 (PN)	47.72	0.0009	48.1
		a12 (C*PN)	3.05	0.63	NS

FC : Fillers Calcaires

PN : Pouzzolane Naturelle

5- 1- LES MODELES MATHEMATIQUE EN VARIABLES CODES:

5- 2- RESISTANCE A LA COMPRESSION A 7 JOURS:

Ciment* Laitier : $48.31 * \text{Ciment} + 39.20 * \text{Laitier}$

Ciment*Fillers calcaires : $49.52 * \text{Ciment} + 42.86 * \text{Fillers calcaires}$

Ciment*Pouzzolane : $44.84 * \text{Ciment} + 30.95 * \text{Pouzzolane}$

5- 3- RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS:

Ciment* Laitier : $66.59 * \text{Ciment} + 68.23 * \text{Laitier} + 31.7 * \text{Ciment} * \text{Laitier}$

Ciment*Fillers calcaires : $67.72 * \text{Ciment} + 60.69 * \text{Fillers Calcaires}$

Ciment* Pouzzolane : $67.50 * \text{Ciment} + 48.1 * \text{Pouzzolane}$

6- ANALYSE DES RESULTATS:

Lés Béton BHP sont des bétons caractérisés essentiellement par une très forte résistance à la compression à court et long terme (>50 Mpa à 28 jours). Pour atteindre cette résistance il convient d'en réduire la porosité en agissant sur le squelette granulaire (granulométrie) par l'addition de particules ultrafines (fumé de silice, fillers calcaires, sable de dunes broyé, laitier broyé, pouzzolane naturel broyée ...etc) pour remplir les pores et parfois pour améliorer la résistance. L'ajout d'un adjuvant super plastifiant (haut réducteur d'eau) a permis la suppression d'un volume important d'eau non mobilisé par l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment (E/C est de 0.3 à 0.4).

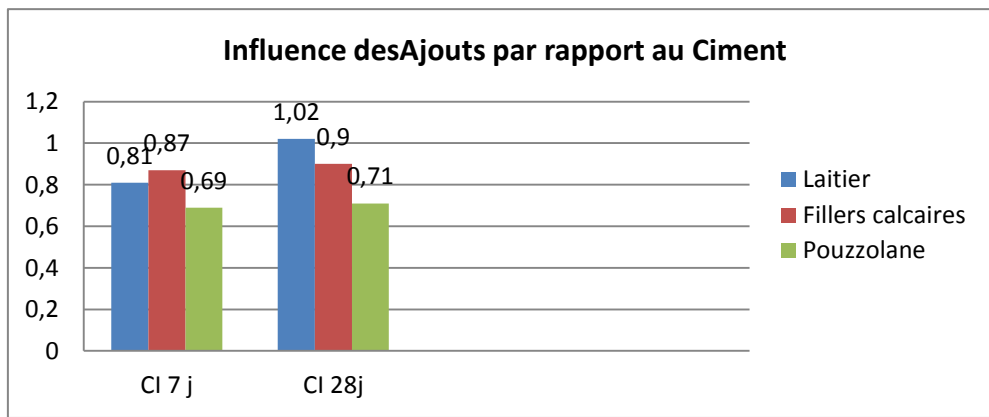


Figure 14 : influence des ajouts par rapport au ciment

Le plan de mélange optimal nous a permis de modéliser l'effet des différents ajouts sur le comportement mécanique d'un BHP. Les coefficients d'influences des ajouts sont trouvés après le criblage et l'élimination des interactions d'ordre 2 qui sont à chaque fois ont une valeur $P > 0.1$ ce qui augmente la probabilité d'être négligé dans la prédiction de la réponse.

La corrélation des modèles de prédiction est bonne comme il est montré au tableau ci-dessus. Nous constatons que l'influence des fillers calcaires sur la résistance des BHP à jeune âge est prépondérante avec un pourcentage massique de 50% du ciment. Nous avons trouvés un coefficient d'influence plus important que ceux du laitier et de pouzzolane. Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal : le silicate tricalcique [10]. L'augmentation du pourcentage plus que 50% pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation [10]. Les fillers calcaires avec des pourcentages $\leq 10\%$ ont un rôle de remplissage des pores et d'améliorer la compacité de la pâte du ciment durcie [10]. Le laitier et la pouzzolane ont des coefficients d'influence moins que celle du fillers calcaires à jeune âge, et ils vont être actifs avec le développement de la portlandite (Ca(OH)_2), résultante de l'hydratation du Clinker [12]. À 28 jours, le coefficient d'influence du laitier est plus important que ceux du filler calcaire et de la pouzzolane. Avec une substitution massique du ciment de 50% le laitier peut donner des bons résultats de résistance à la compression. Le laitier est activé par la chaux libre résultant de l'hydratation du clinker et développe plus de C-S-H ce qui donne la compacité à la pâte de ciment [12]. La réactivité de la pouzzolane avec la portlandite est plus lente que celle de laitier ce qui justifie d'avoir un coefficient d'influence moins important que celui du laitier et du filler. Le filler avec 50% de substitution du ciment présente des résultats assez proches à ceux du béton témoin [10].

7- CHOIS DES AJOUTS PAR LA METHODE AHP :

7-1- APERÇU SUR LA MÉTHODE D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE AHP :

Cette méthode d'aide à la décision repose sur un découpage du processus de décision en une structure hiérarchique et une comparaison par paire des différents critères

Le principe Cette méthode repose sur un découpage du processus de décision en une structure hiérarchique. Cette structure pyramidale se compose toujours au sommet du sujet de décision, puis d'un niveau de critère, puis d'un niveau de sous-critère... et tout en bas des différentes alternatives que nous avons [9].



Figure 15 : la structure hiérarchique

7-2- APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP DANS LE CAS DU CHOIX D'UN AJOUT :

La structure hiérarchique ci-dessous résume l'objectif (décision), les critères et les alternatives :

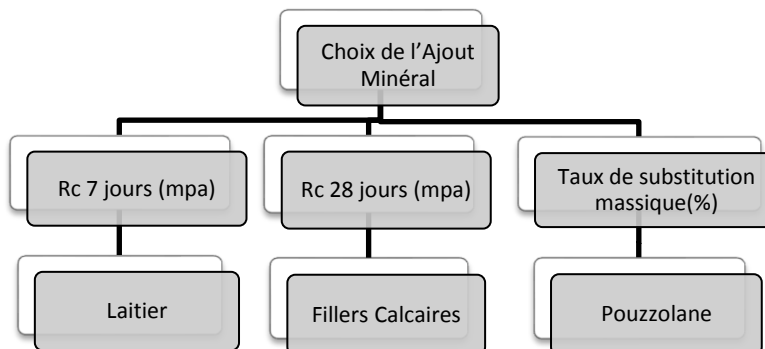


Figure16 : résume l'objectif (décision), les critères et les alternatives

Les scores des critères sont comme suit :

Rc 7 jours : 4

Rc 28 jours : 6

Taux de substitution : 8

Vis-à-vis la résistance à la compression le bon Ajout c'est celui qui donne une résistance à la compression supérieure ou égale à celle du BHP témoin avec un grand taux de substitution du ciment pour des raisons économiques et environnementaux.

7- 2- 1- MATRICES DE COMPARAISON :

a-) Résistance à la compression à 7 jours :

Tableau 5 : Matrice de comparaison Rc7

	Rc7 jours		
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane
Laitier	1.00	0.90	1.17
Fillers C	1.11	1.00	1.30
Pouzzolane	0.85	0.77	1.00

Les valeurs de la matrice de comparaison sont remplies en se basant sur les résultats de la résistance à la compression à 7 jours mentionnées au tableau ci-dessus

Exemple :

Pour la première ligne : $0.9 = 44.75/49.47$, $1.17 = 44.75/38.19$ et $1.0 = 44.75/44.75$

Pour la deuxième ligne : $1.11 = 49.47/44.75$, $1.3 = 49.47/38.19$ et $1.0 = 49.47/49.47$

b-) Résistance à la compression à 28 jours :

Tableau 6 : Matrice de comparaison Rc28

	Rc28 jours		
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane
Laitier	1.00	1.13	1.18
Fillers C	0.88	1.00	1.04
Pouzzolane	0.85	0.96	1.00

c-) Le taux de substitution :

Tableau 7: Matrice de comparaison Taux de substitution

	Taux de substitution		
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane
Laitier	1	4	2
Fillers C	0.25	1	0.5
Pouzzolane	0.5	2	1

d-)La normalisation des matrices de comparaison et l'estimation des poids des paramètres :

Les matrices de la comparaison précédentes seront normalisées. Nous utilisons cette formule :

$$q_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n q_{ij}}{n}$$

D'où :

q_{ij} : sont les termes de la matrice normalisée

a_{ij} : sont les termes de la matrice de comparaison

w_i : les poids des alternatives par rapport à chaque critère

Tableau 8 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport à Rc 7 jours

	Rc7 jours			
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane	Poids Li
Laitier	0.34	0.34	0.34	0.34
Fillers C	0.37	0.37	0.37	0.37
Pouzzolane	0.29	0.29	0.29	0.29

Tableau 9 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport à RC 28 jours

	Rc28 jours			
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane	Poids Ki
Laitier	0.37	0.37	0.37	0.37
Fillers C	0.32	0.32	0.32	0.32
Pouzzolane	0.31	0.31	0.31	0.31

	Taux de substitution			
	Laitier	Fillers C	Pouzzolane	Poids Mi
Laitier	0.57	0.57	0.57	0.57
Fillers C	0.14	0.14	0.14	0.14
Pouzzolane	0.29	0.29	0.29	0.29

Tableau 10 : Matrice de comparaison normalisée et poids des alternatives par rapport au taux de substitution

e-) La matrice de comparaison des critères :

Tableau 11 : Matrice de comparaison des critères

	Critères		
	Rc7 jours	Rc28 jours	substitution
Rc7 jours	1.00	0.67	0.50
Rc28 jours	1.50	1.00	0.75
Substitution	2.00	1.33	1.00

f-) La normalisation de la matrice de comparaison des critères et le poids des critères par rapport à l'objectif :

Tableau 12 : Matrice de comparaison des critères normalisée et les poids des critères par rapport à l'objectif

	Critères			
	Rc7 jours	Rc28 jours	substitution	Poids Wi
Rc7 jours	0.22	0.22	0.22	0.22
Rc28 jours	0.33	0.33	0.33	0.33
substitution	0.44	0.44	0.44	0.44

g-) Estimation des poids des alternatives par rapport à l'objectif :

Les poids des alternatives (laitier, fillers calcaires et pouzzolane) sont estimés par rapport à l'objectif par la formule suivante :

$$W_{Ajout} = W_{Rc7jours} * L_{Ajout} + W_{Rc28jours} * K_{Ajout} + W_{Substitution} * M_{Ajout}$$

D'où :

W_{Ajout} : Poids des alternatives par rapport à l'objectif

$W_{Rc7jours}$: Poids du critère $R_{c7jours}$ par rapport à l'objectif

L_{Ajout} : Poids d'ajout par rapport au critère $R_{c7jours}$

$W_{Rc28jours}$: Poids du critère $R_{c28jours}$ par rapport à l'objectif

K_{Ajout} : Poids d'ajout par rapport au critère $R_{c7jours}$

$W_{substitution}$: Poids du critère Substitution par rapport à l'objectif

M_{Ajout} : Poids d'ajout par rapport au critère Substitution

Les poids des alternatives sont :

Laitier : 0.45

Filler Calcaire : 0.25

Pouzzolane : 0.29

Nous avons trouvés que le laitier a la plus grande valeur de poids donc il est l'Ajout préféré vis-à-vis notre stratégie de choix. Même que le filler calcaire présente des bonnes valeurs de résistance mécanique par rapport au pouzzolane nous remarquons que son poids est inférieur à celui de la pouzzolane à cause sa petit pourcentage de substitution du ciment.

8- CONCLUSION :

La méthode des plans d'expériences est une méthode efficace et simple à utiliser pour quantifier et visualiser l'effet d'un constituant dans mélange. Cette tâche s'avère plus facile avec le logiciel JMP. Nous avons utilisées des résultats d'expérimentation existes déjà dans la littérature (8). A l'aide d'un plan de mélange optimal, nous avons estimés les coefficients d'influence des ajouts (pouzzolane, laitier et fillers calcaires) sur la résistance à la compression à 7 et à 28 jours d'un béton BHP. La méthode d'analyse hiérarchique AHP a été utilisée aussi dans le choix d'un ajout préféré parmi les 3 ajouts ou nous avons basés dans notre critère de choix sur le taux de substitution d'ajout et les résistances à la compression à 7 et à 28 jours.

A photograph of a cable-stayed bridge under construction. The bridge's concrete piers and deck are visible, with numerous stay cables fanning out from tall, slender pylons. The bridge spans a valley with brown, harvested fields and green forested hills in the background under a clear sky. The word "Conclusion" is overlaid in a large, black, serif font with a blue glow effect, and its reflection is visible below it.

Conclusion

Conclusion générale

Un béton BHP est un béton caractérisé essentiellement par une grande résistance à la compression à court et à long terme et qui dépasse généralement 50 Mpa à 28 jours. Cette performance est assurée par la faible porosité de la pâte de ciment durcie, la granulométrie uniforme du squelette granulaire et le bon choix des granulats.

Le faible rapport E/C qui ne dépasse pas dans la plupart des cas 0.35 est avec l'incorporation d'un super plastifiant qui va réduire la quantité d'eau non mobilisée dans l'opération d'hydratation du clinker ce qui réduit le volume des pores dans la pâte du ciment durcie. Les ajouts minéraux avec leurs différentes caractéristiques physico-chimiques ont pour rôle de remplacer une quantité du ciment pour augmenter la compacité de la pâte du ciment durcie. Ils ont un effet physique de remplir les pores interstitiels et un rôle chimique résultant de leur réactivité avec les constituants du clinker pour développer plus des produits d'hydratation et améliorer durabilité du béton. Le pourcentage du ciment substitué par un ajout est différent selon les performances voulues et le type d'ajout et ce qui nous avons vus dans notre étude. Nous avons choisis un plan de mélange optimal pour quantifier l'effet de trois ajouts minéraux (fillers calcaires, laitier broyé et pouzzolane broyé) sur la résistance d'un béton BHP à 7 et à 28 jours. Nous avons trouvés une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux [8] et les modèles mathématiques trouvés. Nous avons constatés que le coefficient d'influence des fillers calcaires par rapport au ciment est prépondérant à jeune âge.

Un taux de substitution massique de 50% du ciment par les fillers calcaires donne une bonne valeur de résistance mécanique grâce à l'effet chimique des fillers qui est de faire accélérer l'hydratation du silicate tri calcique. A 28 jours, l'influence du laitier avec un taux de substitution massique de 50 % par rapport au ciment est plus important que celui de la pouzzolane et des fillers calcaires et c'est la conséquence de l'activation de l'hydratation du laitier avec la portlandite résultante de l'hydratation du clinker ce qui a développer beaucoup de silicate de calcium hydraté et améliorer la compacité de la pâte du ciment durcie. La réactivité du laitier est plus rapide que celle de la pouzzolane. Les fillers calcaires avec un taux de substitution suffisant (de 20% à 50%) du ciment nous donnent presque les mêmes valeurs de résistance mécaniques que celles du béton témoin.

Nous avons utilisées la méthode AHP pour classier les trois Ajouts Minéraux selon la résistance mécanique (à 7 et à 28 jours) et le taux de substitution. Dans notre critère de choix nous avons considérés que le taux de substitution est plus important que les résistances

mécaniques et ça revient au principe d'incorporer des sous produits industrielles dans la formulation des bétons BHP (un bon ajout c'est celui qui remplace une grande quantité du liant et sans minimiser leur performances). Les critères de choix dépendent des performances voulues et du décideur. Nous avons estimés que le laitier est un bon Ajout minérale pour formuler un béton BHP. Ce travail peut être évolue par la modélisation mathématique des résultats expérimentaux de plusieurs performances des mélanges ternaires pour quantifier l'interaction entre les différents Ajouts et de faire augmenter les critères de choix des ajouts minéraux.

Références Bibliographiques

- [1] AYAD M., BARKA Y., Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences, Université de Tlemcen, 2014.
- [2] BCHITOU R., Cours de Master Chimie, Université Mohammed v- Agdal, Maroc.
- [3] BEGHOURA I., TOUATI I., Contribution à la formulation des BHP à base des matériaux locaux, Université de Bordj Bouarerdj, Algérie, 2014.
- [4] BELHOCINE A., NAGOUDI N., Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux, université d'Ouargla, Algérie, 2014.
- [5] BOUALI K., Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de Déchets .Et briques réfractaires, Mémoire de Magister, Université de boumerdesAlgeire, 2014.
- [6] DjoboYankwa J. effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés des ciments géopolymères a base de scories volcaniques, memoire de master, université de yaoundéI, 2013.
- [7] GOUPY J., CREIGHTON L., Introduction aux plans d'expériences, Dunod, 2006.
- [8] GOUPY J., Manuel d'utilisation du logiciel JMP V 9.
- [9] HADJI T., Cours du module vulnérabilité des structures et infra structures, Master I P S, université Ziane Achour, Djelfa, Algérie, 2016.
- [10] HUSSON S., Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciments –fillers, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France, 1991.
- [11] MEZGHICHEB., BEN MESSAOUD S., Formulation des bétons à hautes performances, Revue de génie industriel 6, 4-15 , 2011.
- [12] RAFAI N., Les composants de la matrice cimentaire, Laboratoire d'étude et de recherches sur les matériaux, CBPC N°889, 2008.
- [13] SADO G., SADO M.C., Les plans d'expériences: De l'expérimentation à l'assurance qualité" , AFNOR, 1991.
- [14] ZAITRI R., Effet de l'ajout de calcaire et de sable de dune broyées sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons à hautes performances, Thèse de Doctorat, Université de Laghouat, Algérie, 2016.