

APPLICATION DES PLANS DE MELANGES POUR LA FORMULATION D'UNE PÂTE AUTOPLAÇANTE A BASE DE MATERIAUX LOCAUX

Mebrouki Abdelkader¹, Belas Nadia², Bouhamou Nasr-eddine³
 Université de Mostaganem, Faculté des sciences et sciences de
 l'ingénieur, BP 227 route de Belahcel Mostaganem (27000), Algérie.
 Fax : 045 20 22 07

1. Chargé de cours au département des travaux publics, (Ingénieur d'état E.N.T.P.). Email : kader-mebrouki@univ-mosta.dz
 2. Professeur au département de génie civil.
 3. Chargé de cours au département des travaux publics, (Ingénieur d'état E.N.T.P.).

RESUME

Ce travail a pour but la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux algériens (ciment binaire à base de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, fillers calcaires de la carrière de Kristel d'Oran). Sachant que les propriétés autoplaçantes d'un béton viennent de celles de la pâte élaborée, un béton autoplaçant pourrait être confectionné en passant de l'échelle de la pâte à celle du béton en injectant des granulats (sable et gravier). La méthode simple et pratique, permettant de manipuler une moindre quantité de matériaux, a été utilisée par des chercheurs du L.M.D.C-INSA de Toulouse.

La rhéologie de la pâte est étudiée en fonction des dosages en ciment (à base de pouzzolane), en filler calcaire, en superplastifiant et en eau. La contribution de chacun des constituants, ainsi que leurs interactivités sur les propriétés rhéologiques des pâtes, sont examinés. L'ouvrabilité et la fluidité des pâtes ainsi formées sont déduites des essais de l'étalement au mini-cône et du temps d'écoulement au cône de Marsh respectivement. A partir de ces essais considérés comme préliminaires, un domaine expérimental est déduit, à l'intérieur duquel les mesures sont possibles. Par utilisation de la méthode des plans de mélanges, le nombre d'expériences sera considérablement réduit, le problème sera mis en équations (sous forme de contraintes implicites) puis résolu numériquement, en traitant les données par un logiciel spécialisé. Des critères d'optimisation sont vérifiés en plus des interactivités entre constituants pris deux à deux grâce à des essais faisant intervenir les multiples combinaisons en dosages de ces matériaux. En passant par des courbes des diagrammes ternaires, reliant les réponses étalements et temps d'écoulement des pâtes en fonction des dosages en constituants et en étudiant les fonctions de désirabilités sur chaque réponse, une composition de pâte autoplaçante est déduite.

MOTS-CLES : Valorisation de matériaux locaux, essais préliminaires, propriétés rhéologiques, plans de mélanges, diagrammes ternaires, pâte de ciment autoplaçante, formulation.

1. INTRODUCTION

En partant du principe qu'un béton est composé d'une phase fluide (la pâte) et d'une phase solide (granulats à rapport gravier/sable fixé), les propriétés autoplaçantes du béton proviennent nécessairement de celles de la pâte. Pour cela, les études de formulations se basent essentiellement sur la pâte et ses constituants. La méthode utilisée a obtenu des résultats concluant avec les matériaux du Laboratoire des Matériaux De Construction (L.M.D.C – INSA - UPS) de Toulouse, elle sera appliquée sur les matériaux locaux algériens

pour aboutir simplement à une formulation de pâte autoplaçante. Plusieurs essais de mesures des diamètres d'étalement au mini-cône et des temps d'écoulement au cône de Marsh ont été effectués sur des pâtes confectionnées par la plus grande combinaison de constituants possible, les mélanges non mesurables ou présentant des ségrégations seront rejetés, les autres considérés comme mesures préliminaires serviront comme base de données pour délimiter un domaine expérimental à l'intérieur duquel ces mesures sont possibles. Ce domaine sera exprimé sous forme de contraintes implicites (inéquations) dont la résolution sera effectuée par un logiciel spécialisé pouvant traiter les plans de mélanges appliqués aux pâtes de ciment. La détermination de la matrice d'expériences englobant l'ensemble des proportions volumiques des constituants utilisés a pour objectif de déterminer les coefficients d'un modèle polynomial postulé. Des mesures des diamètres d'étalement et des temps d'écoulement sont alors effectuées, des critères d'optimisation relatifs aux coefficients du modèle et à la matrice d'expériences seront vérifiés. Enfin la représentation ternaire du logiciel NemrodW permet d'analyser différentes coupes 2D et 3D afin de mettre en évidence d'éventuelles interactions pouvant exister entre constituants. La phase finale est la détermination, à l'intérieur du domaine expérimental, d'une pâte de ciment optimale ayant des propriétés autoplaçantes.

2. ELABORATIONS DES PÂTES DE CIMENT

2.1 MATERIAUX

Le principe de choix de ces matériaux est leur disponibilité abondante et leur coût modéré.

Le ciment utilisé est un CPJ- CEMII/A au sens de la norme française NF P 15-301 et de la norme européenne ENV 197-1, contenant moins de 20% de pouzzolane naturelle ajoutée lors du broyage du clinker, les fillers sont de nature calcaires et issues de la carrière de Kristel d'Oran. Le tableau 1 donne les spécifications physiques de ces deux poudres.

Tableau 1 : caractéristiques physiques du ciment et du filler calcaire

	Masse volumique	Surface spécifique	Diamètre moyen D50
Ciment	3150 kg/m ³	3400 cm ² /g	18,5 μm
Filler Calcaire	2800 kg/m ³	2880 cm ² /g	21, 2μm

Le Superplastifiant utilisé est le Viscocrete 20 HE, c'est un produit non chloré à base de copolymère acrylique sous forme liquide, contenant 40% d'extrait sec, de densité 1,085 et de pH valant 4,5.

Comme il a été montré dans plusieurs études [1] [2], il est possible d'élaborer des bétons autoplaçants sans l'utilisation d'un agent de viscosité, et afin de rester dans le contexte de la valorisation des matériaux locaux, il a été choisi de ne pas utiliser ce type d'adjuvant.

Etant donné l'importance de l'influence du dosage en eau sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau de gâchage en tenant compte

de celles contenues dans les granulats (sous forme d'humidité). Le cas échéant, on tiendra aussi compte de celle contenue dans les adjuvants.

2.2 MATERIEL

Pour les essais sur pâtes de ciment relatifs à la détermination d'une formulation de pâte autoplaçante, un mini-cône inspiré du cône d'Abrams et dont les dimensions lui sont proportionnelles [3], [4] et [5] a été utilisé (figure1), il servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque métallique horizontale en fonction des paramètres de composition (rapports eau/ciment, filler/ciment, superplastifiant, etc...), ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement, la même procédure est respectée pour tous les mélanges. On trouve généralement une certaine corrélation de l'essai avec le seuil de cisaillement ou encore avec la viscosité apparente à faible gradient de vitesse [4]. Les principaux avantages de cet essai sont la facilité de sa mise en œuvre puisqu'il nécessite peu de préparation et une faible quantité de matériaux (volume inférieur à 40ml). Les essais sont reproductibles et souvent utilisés en Amérique du Nord par exemple pour la détermination du point de saturation en superplastifiant d'un mélange cimentaire [4].

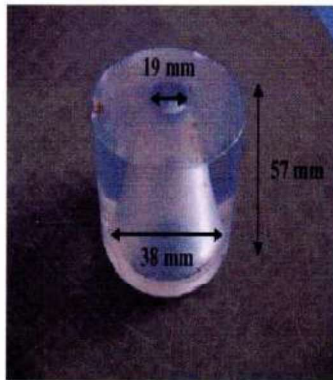


Figure 1: Mini-cône pour la mesure de l'étalement (Photo [6])

Pour la consistance de la pâte de ciment, un cône de Marsh (figure 2) est utilisé pour mesurer les temps d'écoulement d'un volume référentiel de pâtes de différentes compositions. Il s'agit donc de mesurer le temps d'écoulement de la pâte de ciment à travers le cône s'écoulant sous gravité pour remplir un volume de référence donné.

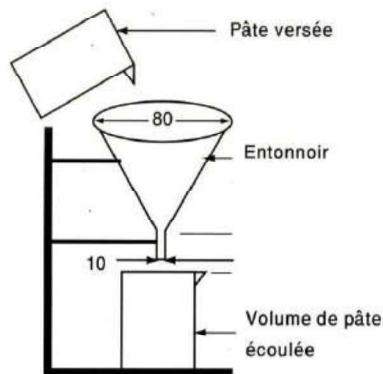


Figure 2: Cône de Marsh

2.3 COMPOSITIONS DES PATES DE CIMENT

Le tableau 2 donne les compositions des différentes pâtes sur lesquelles des mesures d'étalement et des temps d'écoulement ont été effectués. Les compositions ci-dessous, aussi larges qu'elles soient, tiennent compte des variations possibles pouvant contribuer aux confections des pâtes.

La quantité du liant (ciment + filler) est maintenue constante, le dosage maximum en superplastifiant de 3% est préconisé par le fabricant.

2.4 PREPARATION DES PATES

Le respect de l'ordre dans la procédure expérimentale et la rapidité d'exécution sont deux paramètres à respecter par l'expérimentateur, compte tenu de la durée de la période dormante de la pâte qui avoisine une heure, durant laquelle les paramètres rhéologiques demeurent inchangés. Le tableau ci-dessous montre la procédure suivie pour la préparation de toutes les pâtes étudiées, la durée totale nécessaire pour un mélange ne dépasse pas la demi-heure.

2.5 DEMARCHE EXPERIMENTALE

Des pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre les constituants de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). En commençant du mélange fluide (E+Sp), la pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler (C+F).

Tableau 2 : compositions des pâtes étudiées

Ciment %	100, 95, 90, 85, 80, 75, 70 et 60
Filler calcaire en substitution au ciment %	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 et 40
Eau / Liant (E/L) %	0,22, 0,24, 0,30 et 0,40
Superplastifiant (Sp) %	0, 0,5, 1, 1,2, 1,3, 1,5, 2 et 3

Le but de ces mélanges est d'obtenir un intervalle de valeurs correspondants aux proportions des matériaux à l'intérieur duquel les réponses sont mesurables. Il s'agit de l'aspect visuel précédent les mesures des diamètres d'étalements au mini-cône et des temps d'écoulement au cône de Marsh.

La figure 3 donne les étapes de l'approche expérimentale utilisée pour la confection des pâtes de ciment. Pour un paramètre fixé, les autres paramètres varient selon le tableau 2.

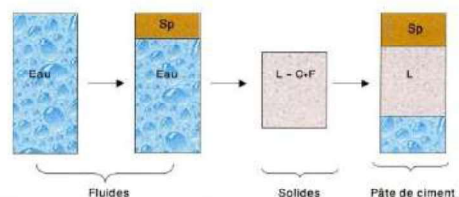


Figure 3 : Approche expérimentale paramétrique

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats retenus tiennent compte des écarts types calculés pour un mélange de pâte choisi et répété trois fois dans les mêmes conditions expérimentales (échéance, dosage, température et manipulation). L'écart type sera considéré le même pour tous les mélanges.

3.1 CONSISTANCE: ASPECT VISUEL

L'aspect visuel est une étape préliminaire mais importante, elle permet de vérifier visuellement la validité du mélange. Le mélange de pâte peut être sec ou très ferme (figure 4-a) avec une quantité d'eau insuffisante et une quantité de filler incorporée importante (E/L = 0.22 et F=30%). Dans la figure 4-b, la pâte est formée mais plastique, ne pouvant pas s'écouler. Pour la figure 4-c, contrairement à la précédente, la pâte peut s'écouler mais présente une couche blanchâtre synonyme de ségrégation entre la phase solide et la phase liquide formant la pâte. Dans la figure 4-d, la pâte étant bien formée mais la ségrégation a été remarquée lors de la mesure du diamètre d'étalement: des bulles apparaissent à la surface de la galette. La figure 4-e montre une galette bien formée et homogène, retenue pour les mesures des diamètres d'étalement et du temps d'écoulement. La même procédure sera suivie durant l'expérimentation, seules les mélanges ne présentant aucune anomalie sont retenus pour les mesures.

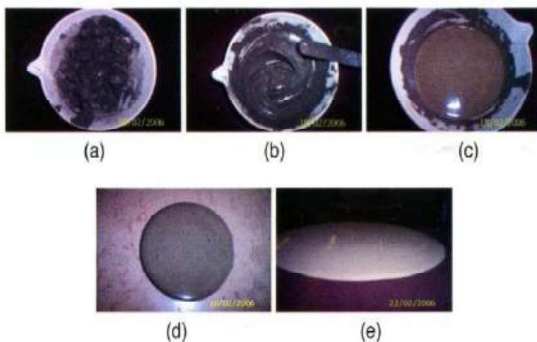


Figure 4: Aspects visuels des pâtes élaborées

3.2 PLAN DE MELANGES POUR LES PATES DE CEMENTS

3.2.1 DOMAINE EXPERIMENTAL

Plusieurs mélanges de consistances normales (acceptables) ont servi pour les mesures rhéologiques et ont contribué à la délimitation d'un domaine expérimental à l'intérieur duquel ces mesures donnent des résultats désirés. Il s'agit d'un diamètre d'étalement compris dans l'intervalle [14,4 – 16 mm] conformément à ce qu'a été trouvé dans la littérature [6] et à un écoulement sans rupture du volume de la pâte caractéristique de bonne fluidité. L'analyse paramétrique effectuée permet de comprendre le rôle joué par chaque paramètre de constitution sur les suspensions fluides et sur la pâte confectionnée. Toutefois, un paramètre important a été mis en évidence, c'est la concentration volumique en solides définie par le rapport du volume des solides sur le volume total (particules solides provenant du ciment, du filler et du superplastifiant sous forme d'extrait sec). L'utilisation de la méthode des plans de mélanges contribue à donner le maximum d'informations sur les constituants, leurs influences pris séparément et sur leurs éventuelles interactions. Elle permet de réduire considérablement le nombre d'expériences, de planifier et de faciliter l'étude. L'objectif est d'obtenir des mélanges possédant des réponses optimales, ou répondant à certaines exigences fixées dès le départ [7]. La réponse recherchée dépend des proportions «volumiques» des constituants utilisés. Ainsi, pour un plan de mélange à 4 facteurs (C, F, E et Sp) pris en proportions volumiques, leur somme est égale à l'unité, ce qui veut dire qu'il sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est

contraint par la relation suivante:

$$C + F + E + Sp = 1 \quad (1)$$

En considérant un mélange complet, tenant compte de la précision désirée de la réponse et du nombre d'expériences admis, le choix d'un modèle mathématique converge vers un polynôme de degré 2, reliant la réponse Y (Y1 pour le diamètre d'étalement ou Y2 pour le temps d'écoulement) aux proportions des constituants, qui s'écrit sous la forme suivante:

$$Y = \sum_{i=1}^k \beta_i \times X_i + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ij} \times X_i \times X_j \quad (2)$$

Les coefficients β_i et β_{ij} sont à déterminer et différents pour chaque réponse.

Les paramètres X_i et X_j correspondent aux proportions volumiques des constituants.

$$Y = \beta_1 C + \beta_2 F + \beta_3 E + \beta_4 Sp + \beta_{1,2} C \cdot F + \beta_{1,3} C \cdot E + \dots + \beta_{3,4} E \cdot Sp \quad (3)$$

Sous forme matricielle, l'équation (2) s'écrit:

$$[Y] = [X] [\beta] + [\varepsilon] \quad (4)$$

[X] étant la matrice d'expérience, [β] est le vecteur colonne des coefficients du modèle et [ε] le vecteur colonne des erreurs expérimentales.

Les essais préliminaires ont permis de définir le domaine expérimental par les contraintes inférieures et supérieures suivantes:

$$\begin{aligned} 10\% \leq F \leq 20\% \\ 1\% \leq Sp \leq 1.5\% \\ 0.24\% \leq E/L \leq 0.3\% \\ 0.57\% \leq \Gamma \leq 0.59\% \end{aligned}$$

Avec Γ la concentration volumique en solides

La transformations de ces contraintes relationnelles en équations arithmétiques donne les relations (6) définies dans ce qui suit:

$\begin{aligned} C + F + E + Sp &= 1 \\ -0,1125 C + F &\geq 0 \\ 0,2250 C - F &\geq 0 \\ -0,0290 C - 0,0258 F + Sp &\geq 0 \\ 0,0435 C + 0,0387 F - Sp &\geq 0 \\ 0,43 C + 0,43 F - 0,17 Sp - 0,57 E &\geq 0 \\ -0,41C - 0,41F + 0,19 Sp + 0,59 E &\geq 0 \end{aligned} \quad (6)$
--

Le tableau 4 donne les solutions calculées par excès et par défaut illustrées sous forme de contraintes supérieures et de contraintes inférieures respectivement.

Tableau 4: Contraintes implicites

	C	F	Sp	E
Contraintes supérieures implicites	0,551	0,13	0,014	0,345
Contraintes inférieures implicites	0,490	0,112	0,011	0,295

Pour un plan de mélanges à 4 facteurs, le domaine d'étude constitué est un espace à 4 dimensions. Les points de calcul du modèle et de détermination de la matrice d'expériences forment un hyper polyèdre. Ces points sont situés sur les sommets, aux milieux des arêtes, aux milieux des faces et au centre de gravité.

Compte tenu de la complexité de résolution du problème, une résolution classique est quasiment impossible, nombreux sont les logiciels de traitement de plan de mélanges, parmi eux «NemrodW», développé par la société LPRAI pour la conception et l'analyse de plans d'expériences [6].

3.2.2 LA MATRICE D'EXPERIENCES

La détermination de la matrice d'expérience passe par l'analyse par l'algorithme d'échange généré par le logiciel, qui est une procédure appliquée à un nombre variant de $N=10$ (nombre de coefficients du polynôme) jusqu'à $N=N_{max}$ correspondant aux critères d'optimisation:

- Critère D : optimisation de la qualité de l'information.
- Critère A : optimisation de la qualité des coefficients du modèle.
- Critère G : optimisation de la qualité de prévision du modèle.

Une fois déterminée, la matrice de base a pour objectif la détermination des coefficients du modèle polynomial postulé qui sont différents pour chaque réponse.

Le tableau ci-dessous donne les informations nécessaires à la construction de la matrice d'expériences, générées par le logiciel NemrodW.

Le tableau 6 résume les principales caractéristiques du problème étudié.

Tableau 6: Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude de Mélanges
Nombre de variables	4
Nombre d'expériences	35
Nombre de coefficients	10
Nombre de réponses	2

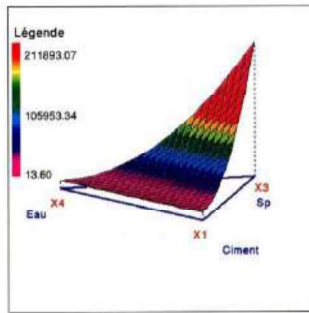
Tableau 7: Proportions volumiques de la matrice d'expériences

N° Exp	Ciment	Filler	Sp	Eau
1	0.5073	0.0571	0.0162	0.4195
2	0.4607	0.1037	0.0160	0.4196
3	0.5048	0.0568	0.0242	0.4143
4	0.4585	0.1032	0.0239	0.4144
5	0.5251	0.0591	0.0168	0.3991
6	0.4769	0.1073	0.0166	0.3992
7	0.5225	0.0588	0.0250	0.3937
8	0.4746	0.1068	0.0248	0.3939
9	0.4840	0.0804	0.0161	0.4195
10	0.5060	0.0569	0.0202	0.4169
11	0.5162	0.0581	0.0165	0.4093
12	0.4596	0.1034	0.0200	0.4170

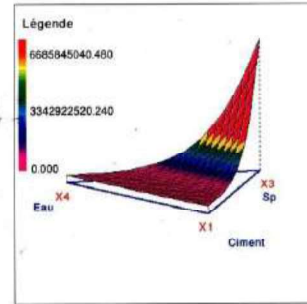
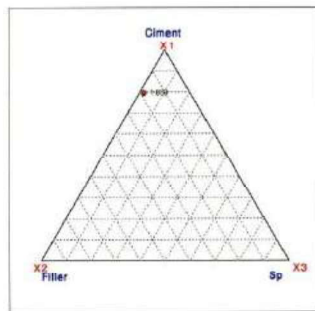
13	0.4688	0.1055	0.0163	0.4094
14	0.4816	0.0800	0.0240	0.4143
15	0.5136	0.0578	0.0246	0.4040
16	0.4665	0.1050	0.0244	0.4041
17	0.5010	0.0832	0.0167	0.3991
18	0.5238	0.0589	0.0209	0.3964
19	0.4757	0.1070	0.0207	0.3965
20	0.4985	0.0828	0.0249	0.3938
21	0.5149	0.0579	0.0205	0.4066
22	0.4677	0.1052	0.0203	0.4068
23	0.4925	0.0818	0.0164	0.4093
24	0.4901	0.0814	0.0245	0.4041
25	0.4828	0.0802	0.0201	0.4169
26	0.4998	0.0830	0.0208	0.3965
27	0.4913	0.0816	0.0204	0.4067
28	0.4993	0.0693	0.0183	0.4131
29	0.4760	0.0926	0.0182	0.4131
30	0.4980	0.0692	0.0223	0.4105
31	0.4749	0.0924	0.0222	0.4106
32	0.5082	0.0703	0.0186	0.4029
33	0.4841	0.0944	0.0185	0.4029
34	0.5069	0.0702	0.0227	0.4002
35	0.4829	0.0942	0.0226	0.4003

Le tableau 7 donne les proportions volumiques des constituants à utiliser dans la préparation des pâtes de ciment. Ces valeurs sont générées par le logiciel et sont pris à l'intérieur du domaine expérimental, elles constituent la matrice d'expériences.

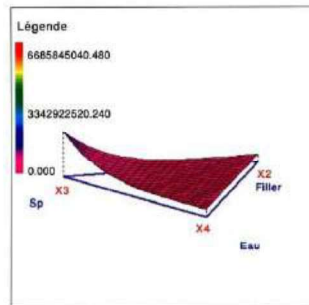
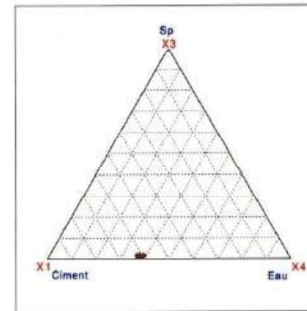
Tenant compte de ces valeurs, les essais seront réalisés et les réponses mesurées, en vue de les réinjecter au logiciel pour définir à nouveau les valeurs optimales des proportions de ciment, filler, superplastifiant et eau. La figure 5 donne des diagrammes ternaires, dans l'espace (1ère ligne) et dans le plan (2ème ligne) illustrant l'influence de chaque paramètre de constituant sur le mélange pâte. En effet, en fixant un paramètre et en faisant varier les trois autres, leur somme devant être égale à l'unité. En fixant la paramètre «eau» à 0.305 par exemple, et en faisant varier les proportions volumiques des autres composant, le paramètre «Sp» est prépondérant: les réponses sont plus sensibles aux variations de ce paramètre qu'à celles du «ciment» ou du «filler», il y aurait des interactions entre «Sp» et «ciment», suite à l'emplacement du domaine d'influence qui est plus proche du ciment que du filler (figure 5, en haut à gauche). Le même travail a été effectué sur la réponse écoulement.



Variation de la réponse - Etalement dans le plan : Ciment, Filler, Sp; COMPOSANT FIXE : Eau = 0.30500



Variation de la réponse - Etalement dans le plan : Sp, Eau, Ciment. COMPOSANT FIXE: Filler = 0.11200



Variation de la réponse - Etalement dans le plan : Filler, Sp, Eau. COMPOSANT FIXE : Ciment = 0.51100

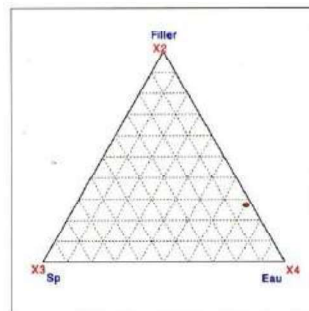


Figure 5 : Diagrammes ternaires pour la réponse étalement

3.2.3 REPONSES EXPERIMENTALES

Tous les mélanges ont été réalisés selon les dosages des constituants définis dans la matrice d'expériences. Les réponses expérimentales obtenues sont injectées dans le logiciel NemrodW. Une fois les coefficients du polynôme déterminés, le résultat de n'importe quelle expérience appartenant au domaine expérimental peut être connu. Quelques résultats caractéristiques des réponses sont illustrés à travers les figures 6-a et 6-b. En effet, de ces résultats, le diamètre d'étalement devrait osciller entre 14 et 17 cm alors que le temps d'écoulement correspondant à l'écoulement de 150 ml de pâte serait voisin de 14 secondes.

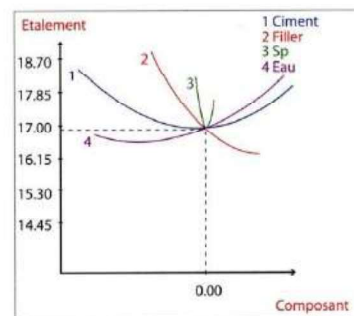


Figure 6-a: Influence des constituants sur la réponse Etalement

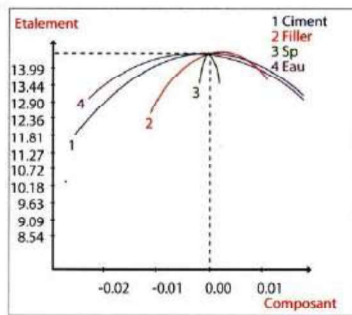


Figure 6-b: Influence des constituants sur la réponse Ecoulement

Les caractéristiques statistiques de ces deux réponses sont données dans le tableau 8.

Tableau 8: Caractéristiques des réponses

Réponse	Moyenne	Ecart -Type	Minimum	Maximum	Centre
Etalement (cm)	18.377	2.275	13.600	23.000	18.300
Ecoulement (s)	12.217	2.444	8.000	18.000	13.000

3.3 PATE OPTIMALE

L'application d'un logiciel de traitement des plans de mélanges a permis d'optimiser simultanément deux réponses, c'est une procédure purement numérique consistant à chercher mathématiquement une combinaison de paramètres (formulation) pour laquelle les réponses désirées sont soit des valeurs optimales, soit appartenant à un intervalle de valeurs optimales; c'est le cas d'une optimisation multicritères qui se base sur des fonctions de désirabilité. Le logiciel utilisé fait appel à ces fonctions: pour chaque réponse, un profil de courbe de la fonction de désirabilité est choisi (figure 7), la désirabilité est nulle pour une réponse non convenable et est maximale lorsque la réponse donnée est très satisfaisante, elle prend des valeurs intermédiaires pour des réponses plus au moins satisfaisantes. La désirabilité globale exigée D_g (pâte) pour la pâte optimale recherchée est fonction des désirabilités élémentaires d (étalement) et d (écoulement) respectivement exigées pour l'étalement et le temps découlement, elle est définie par la relation (7) ci-dessous:

$$D_g (\text{pâte}) = \sqrt{d(\text{étalement}) \times d(\text{écoulement})} \quad (7)$$

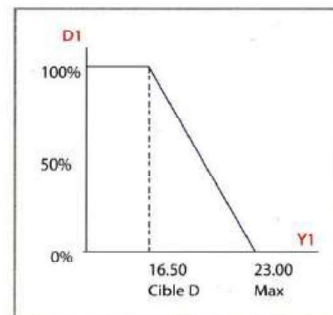
La figure 7 montre les graphes des fonctions de désirabilité choisies pour les réponses Y_1 (étalement) et Y_2 (temps d'écoulement), ces graphes sont de type unilatéral droit (ils peuvent être de types unilatéral gauche ou bilatéral). En partant de ce choix, le tableau 9 donne les caractéristiques des fonctions de désirabilité élémentaires et de la fonction de désirabilité globale définies par la relation (7). En tenant donc compte des critères de désirabilités relatifs à l'homogénéité et à la fluidité de la pâte, après traitement par logiciel, la formulation de la pâte optimale a été déterminée. Le tableau 10 donne les valeurs de constituants de cette pâte.

Tableau 9 : Caractéristiques des fonctions de désirabilité

Réponse	Valeur	d_i %	Poids	d_i min %	d_i max %
Etalement	17.15	100.00	1	65.11	100.00
Ecoulement	13.75	100.00	1	42.28	100.00
Désirabilité (D_g)		100.00		52.47	100.00

Tableau 10 : Composition de la pâte optimale

Composant	Proportion volumique	Dosage (g/l)
Ciment	0.538	1694.7
Filler	0.116	324.8
Sp	0.014	15.19
Eau	0.332	3320



CONCLUSION

A l'issue de cette étude visant à formuler une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux, une pâte optimale est déterminée et qui, additionnée à des granulats donnera un béton avec des propriétés autoplaçantes.

Une étude par plan de mélanges appliquée aux pâtes de ciment a permis de définir un domaine expérimental dans lequel tous les mélanges présentent des caractéristiques mesurables, le nombre d'expériences a été considérablement réduit, comparé aux méthodes de formulation traditionnelles

Une matrice d'expériences répondant aux critères d'optimisation (critères D, A et G) a été élaborée en vue de déterminer les coefficients (relatifs à chaque réponse) du modèle postulé.

Le logiciel NemrodW a servi au tracé des diagrammes ternaires qui ont montré l'existence d'interactions entre les constituants pris deux à deux.

Une désirabilité globale de 100 % donc très satisfaisante a permis de

définir une formulation de pâte autoplaçante à l'intérieur du domaine expérimental. Par association d'un squelette granulaire formé de sable et de graviers (à rapport G/S fixé) et par ajout de la quantité d'eau nécessaire, un béton de caractéristiques autoplaçantes pourrait être obtenu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Youjun Xie, Baoju Liu, Jian Yin, Shiqiong Zhou "Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash". Cement and concrete research 32 (2002) 477 – 480.
- [2] : T. Naadia, M. Mouret, F. Kharchi, « Effet de la taille sur le comportement rhéologique des bétons. Application aux BAP ». 1ère Colloque international sur la technologie et la durabilité des bétons CITDUB1, USTHB, Alger 2004.
- [3] : Kantro DL., «Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test», Cement, Concrete and Aggregates, 2, 2, pp. 95-102, 1980.
- [4] : Cyr Martin, « Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires », thèse de Doctorat ès-sciences appliquées, spécialité génie civil, Cotutelle de l'INSA de l'Université Paul Sabatier et de l'Université de Sherbrooke. Canada, 1999.
- [5] : N. Roussel, C. Stefani, R. Leroy, « From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests », Cement and Concrete Research, N° 35, pp 817-822, 2005.
- [6] : M. El-Barrak, «Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais». Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, Paul Sabatier. INSA-LMDC, juillet 2005.
- [7]: D. Mathieu, R. Phan-Tan-Luu, M. Sergent. «Méthodologie de la recherche expérimentale». LPRAI Marseille, 2000.