



## Contribution à la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux

**MEBROUKI Abdelkader<sup>\*</sup>, BELAS Nadia, BOUHAMOU Nasr-eddine**

<sup>1</sup> *Université de Mostaganem, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, BP 227 route de Belahcel Mostaganem (27000), Algérie. Fax : +213 45 33 38 47*

---

\* Correspondance, courriel : [kader-mebrouki@univ-mosta.dz](mailto:kader-mebrouki@univ-mosta.dz), [mebroukiaek@yahoo.fr](mailto:mebroukiaek@yahoo.fr)

### Résumé

Ce travail a pour but la formulation d'une pâte autoplaçante de ciment à base de matériaux locaux algériens (ciment binaire à base d'une pouzzolane naturelle algérienne et fillers calcaires de carrière). Plusieurs pâtes ont été confectionnées à partir du ciment, des fillers calcaires (substituant un taux croissant du ciment), du superplastifiant et de l'eau. L'ouvrabilité et la fluidité des pâtes 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 a été mis en équations (sous forme de contraintes implicites) puis résolu numériquement. 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-clés :** *Formulation, propriétés rhéologiques, plans de mélanges, diagrammes ternaires, pâte de ciment autoplaçante.*

## Abstract

### CONTRIBUTION TO THE FORMULATION OF A SELF-COMPACTING PASTE TO BASIS TO LOCAL MATERIALS

The purpose of this work is the formulation of a self-compacting paste containing Algerian local materials (binary cement containing an Algerian natural pozzolana and career limestone fillers). Several pastes were prepared from cement, limestone fillers (substituent a rate growing of cement), superplasticizer and water. Workability and fluidity of the formed pastes are deduced from mini-slump Marsh cone tests respectively. From these tests considered as preliminaries, an experimental field is deduced; inside of it measurements were possible. Using experimental plans method, the number of experiments was considerably reduced; the problem was put in equation form (implicit constraints) then solved numerically. Optimization Criterion have been checked in addition to the interactivities between components, utilizing the multiple combinations in proportioning of these materials. Ternary diagrams, connecting the answers 'spreading out' and 'flow time' of the pastes studying the desirability functions: a composition of self-compacting paste autoplaçante is deduced.

**Keywords :** *Formulation, rheological properties, Experimental plans, ternary diagrams, self-compacting cement paste*

## 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. Les mesures rhéologiques effectuées sur pâtes peuvent servir de base pour la prédiction des propriétés rhéologiques des bétons [1]. La méthode utilisée a obtenu des résultats concluant avec les matériaux du Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Construction (L.M.D.C — INSA - UPS) de Toulouse (France), elle sera appliquée sur les matériaux locaux algériens pour aboutir à une formulation de pâte autoplaçante, par utilisation de matériels simples à la portée des laboratoires à moyens modestes. 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 effectuées. 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 des deux réponses 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. Matériaux et méthode

### 2.1. Matériaux

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. 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 <sup>3</sup>	3400 cm <sup>2</sup> /g	18,5 μm
Filler Calcaire	2800 kg/m <sup>3</sup>	2880 cm <sup>2</sup> /g	21, 2 μm

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.

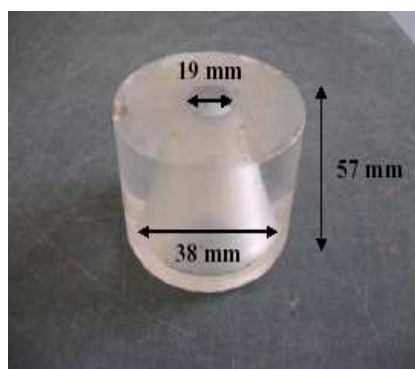
Comme a été montré dans plusieurs études [2,3], il est possible d'élaborer des bétons autoplaçants sans l'utilisation d'un agent de viscosité, et afin de rester dans le contexte

de la valorisation des matériaux locaux, il a été choisi de ne pas utiliser ce type d'adjuvant.

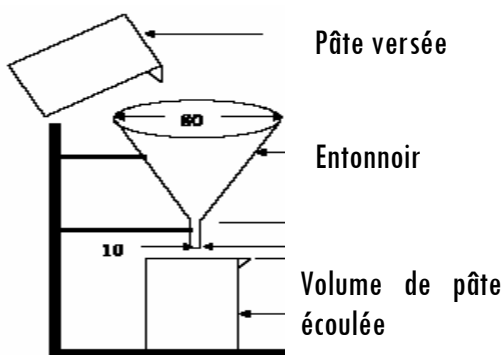
Etant donné l'importance de l'influence du dosage en eau sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants, il est nécessaire d'estimer la quantité d'eau de gâchage en tenant compte de celle contenue dans le superplastifiant (sous forme de solvant de l'extrait sec).

## 2.2. Matériel

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 [4-6] a été utilisé (*Figure 1*), il servira essentiellement à la détermination des diamètres d'étalement sur une plaque métallique horizontale en fonction des paramètres de composition (rapport eau/ciment, taux de substitution du ciment par le filler et superplastifiant), ces diamètres sont mesurés après 1 minute d'étalement, la même procédure est respectée pour tous les mélanges. Il y a généralement une certaine corrélation de l'essai avec le seuil de cisaillement ou encore avec la viscosité apparente à faible gradient de vitesse [1,5]. 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), le faible volume manipulé implique une moindre complexité de l'expérience et une durée réduite [6]. 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 [5].



**Figure 1:** Mini-cône pour la mesure de l'étalement



**Figure 2:** Cône de Marsh

Pour la détermination de 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 (150 mL dans cette étude).

### 2. 3. Compositions des pâtes 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. Ces compositions, aussi larges qu'elles soient, tiennent compte des variations possibles pouvant contribuer aux confections des pâtes.

**Tableau 2 :** *Compositions des pâtes étudiées*

Ciment %	100	95	90	85	80	75	70	60
Filler calcaire en substitution au ciment %	0	5	10	15	20	25	30	40
Eau / Liant (E/L) %	0.22 - 0.24 - 0.30 - 0.40							
Superplastifiant (Sp) %	0 - 0.5 - 1 - 1.2 - 1.3 - 1.5 - 2 - 3							

Pour maintenir la quantité du liant (ciment + filler) constante en augmentant le taux de filler substitué le dosage en ciment est réduit, ce qui diminuerait le coût des matériaux utilisés pour la confection des pâtes de ciment [7]. Le dosage maximum en superplastifiant de 3% est préconisé par le fabriquant.

### 2.4. Préparation des pâtes

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 durant laquelle les paramètres rhéologiques demeurent inchangés. Le **Tableau 3** 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.

**Tableau 3 : Procédure expérimentale de préparation d'un mélange de pâte type**

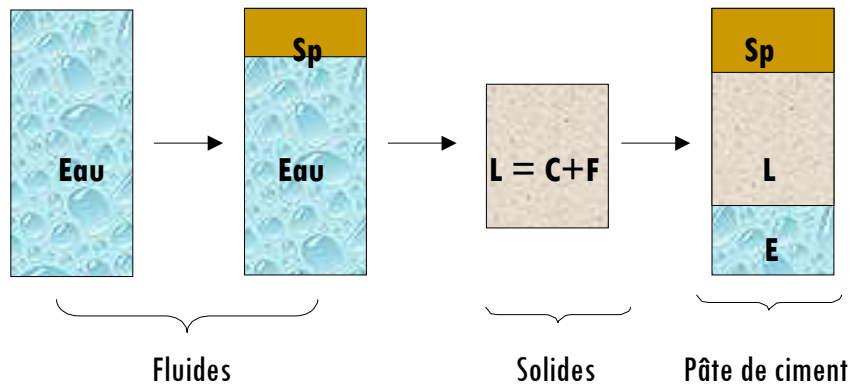
Étape	Instant	Durée totale approximative	Grandeurs mesurées	Résultat
Préparation des matériaux et pesage	-	10 min	Masses de matériaux	Dosage des constituants
Malaxage des matériaux	-	5 min	-	-
Aspect visuel à la truelle	-	Pendant le malaxage	-	Aspect de la pâte
Mesure au mini-cône	$t_0$ fin de malaxage	2 min	Etalement	Etalement (cm)
Aspect visuel au tube en verre	$t_0$	5 min en parallèle avec la précédente	-	Consistance / sédimentation
Mesure au cône de Marsh	$t_0 + 2$ min	1 min	Temps d'écoulement	Temps (s)

## 2.5. Démarche expérimentale

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).

Le but de ces mélanges est d'obtenir un intervalle de valeurs correspondant 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**

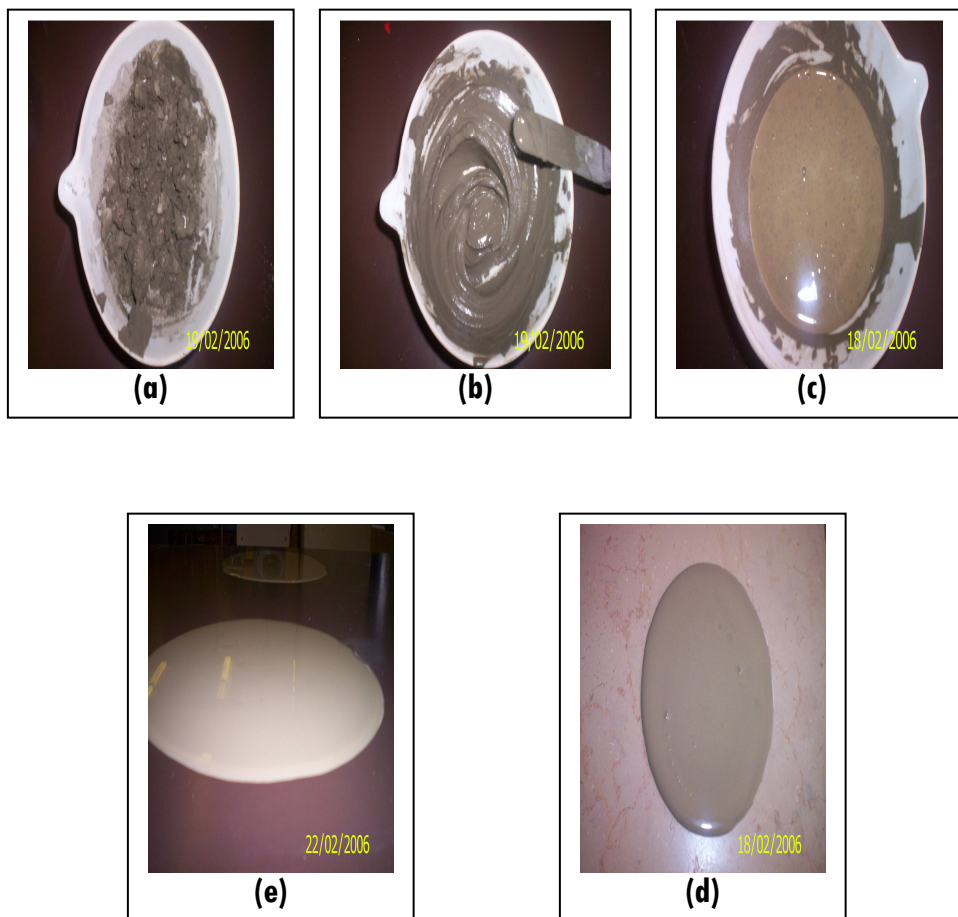
### 3. Résultats et discussion

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).

#### 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 4a**) avec une quantité d'eau insuffisante et une quantité de filler substituée importante (rapport Eau/Liant = 0.22 et F=30%), les fillers calcaires ont un effet physique dépendant des paramètres de composition, en particulier du rapport Eau/Liant [8]. Dans la **Figure 4b**, la pâte est formée mais plastique, ne pouvant pas s'écouler. Pour la **photo 4c**, 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 4d**, 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 4e** 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, seuls les mélanges ne présentant aucune anomalie sont retenus pour les mesures.



**Figure 4 :** *Aspects visuels des pâtes élaborées*

### 3.2. Plan de mélanges pour les pâtes de ciments

#### 3.2.1. Domaine expérimental

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 [9] et à un écoulement sans rupture du volume de la pâte caractéristique de bonne fluidité. L'analyse paramétrique effectuée a permis 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 ( $\Gamma$ ) 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 [10]. 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'ils sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est contraint par la relation suivante:

$$C + F + E + Sp = 1 \tag{1}$$

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:

$$Y = \sum_{i=1}^k \beta_i \times X_i + \sum_{i < j}^k \sum_{j}^k \beta_{ij} \times X_i \times X_j \tag{2}$$

Les coefficients  $\beta_i$  et  $\beta_{ij}$  sont à déterminer et différents pour chaque réponse. Les paramètres  $X_i$  et  $X_j$  correspondent aux proportions volumiques des constituants.

$$Y = \beta_1.C + \beta_2.F + \beta_3.E + \beta_4.Sp + \beta_{12}.C.F + \beta_{13}.C.E + \beta_{23}.F.E + \beta_{14}.C.Sp + \beta_{24}.F.Sp + \beta_{34}.F.Sp \tag{3}$$

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

$$[Y] = [X] [\beta] + [\epsilon] \tag{4}$$

[X] étant la matrice d'expérience, [ $\beta$ ] est le vecteur colonne des coefficients du modèle et [ $\epsilon$ ] le vecteur colonne des erreurs expérimentales.

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

$$\left. \begin{array}{l} 10\% \leq F \leq 20\% \\ 1\% \leq Sp \leq 1.5\% \\ 0.24\% \leq E/L \leq 0.3\% \\ 0.57\% \leq \Gamma \leq 0.59\% \end{array} \right\} (5)$$

Avec  $\Gamma$  la concentration volumique en solides

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

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

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	0,5510	0,130	0,014	0,345
Contraintes inférieures implicites	0,4896	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 tenue de la complexité de résolution du problème, une résolution classique serait 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.

### 3.2.2. La matrice d'expériences

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 des coefficients du polynôme) jusqu'à  $N=N_{max}$  correspondant aux critères d'optimisation suivants :

- 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 5** donne les informations nécessaires à la construction de la matrice d'expériences, générées par le logiciel de traitement.

**Tableau 5** : *Points de construction de la matrice d'expériences*

Nombre de points	Existants	Sélectionnés
Nombre de sommets	8	8
Nombre d'arêtes	12	12
Nombre de faces de dimension 2	6	6
Centre de Gravité	1	1
Points tests internes	8	8
Total	35	

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

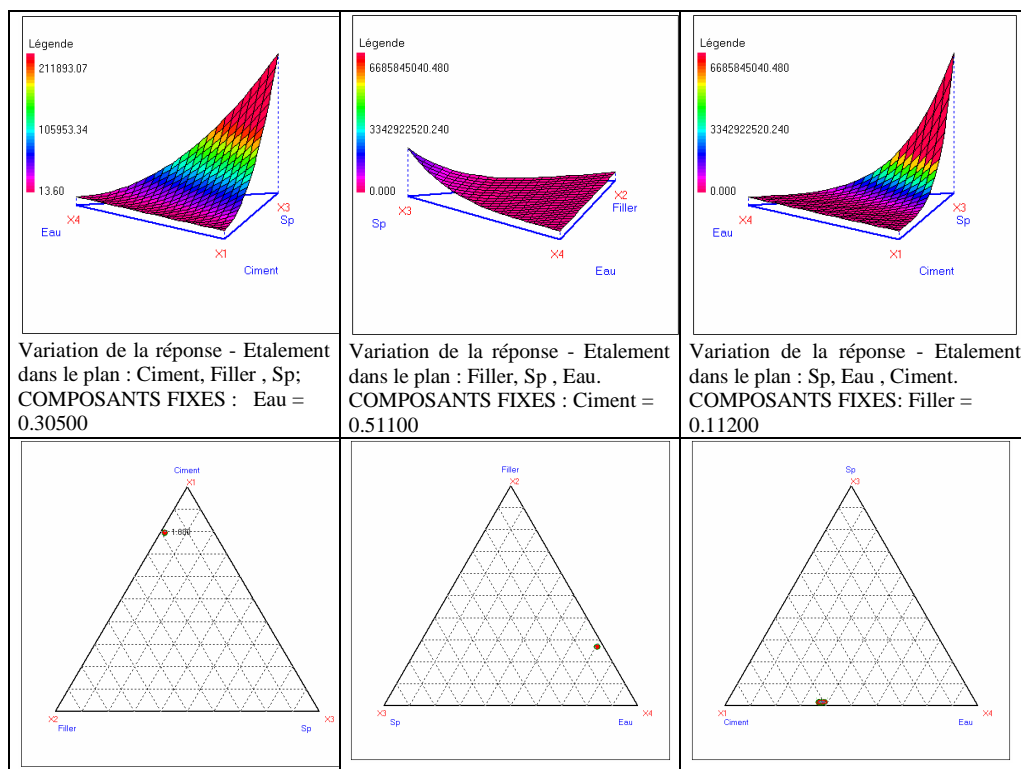
Le **Tableau 7** donne les proportions volumiques des constituants à utiliser dans la préparation des pâtes de ciment. Ces valeurs sont générées par le logiciel et sont pris à l'intérieur du domaine expérimental, elles constituent la matrice d'expériences.

**Tableau 7 : Proportions volumiques de la matrice d'expériences**

N° Exp	Ciment	Filler	Sp	Eau
1	0.5110	0.1300	0.0140	0.3450
2	0.5510	0.1120	0.0110	0.3260
3	0.5510	0.1120	0.0140	0.3230
4	0.5510	0.1300	0.0110	0.3080
5	0.5510	0.1300	0.0140	0.3050
6	0.5320	0.1120	0.0110	0.3450
7	0.5290	0.1120	0.0140	0.3450
8	0.5140	0.1300	0.0110	0.3450
9	0.5310	0.1300	0.0140	0.3250
10	0.5200	0.1210	0.0140	0.3450
11	0.5125	0.1300	0.0125	0.3450
12	0.5510	0.1120	0.0125	0.3245
13	0.5510	0.1210	0.0110	0.3170
14	0.5415	0.1120	0.0110	0.3355
15	0.5510	0.1210	0.0140	0.3140
16	0.5400	0.1120	0.0140	0.3340
17	0.5510	0.1300	0.0125	0.3065
18	0.5325	0.1300	0.0110	0.3265
19	0.5305	0.1120	0.0125	0.3450

20	0.5230	0.1210	0.0110	0.3450
21	0.5407	0.1120	0.0125	0.3347
22	0.5370	0.1210	0.0110	0.3310
23	0.5510	0.1210	0.0125	0.3155
24	0.5317	0.1300	0.0125	0.3257
25	0.5355	0.1210	0.0140	0.3295
26	0.5215	0.1210	0.0125	0.3450
27	0.5363	0.1210	0.0125	0.3302
28	0.5236	0.1255	0.0133	0.3376
29	0.5436	0.1165	0.0118	0.3281
30	0.5436	0.1165	0.0133	0.3266
31	0.5436	0.1255	0.0118	0.3191
32	0.5436	0.1255	0.0133	0.3176
33	0.5341	0.1165	0.0118	0.3376
34	0.5326	0.1165	0.0133	0.3376
35	0.5251	0.1255	0.0118	0.3376

Tenant compte de ces valeurs qui représentent des proportions volumiques des constituants, les mélanges ont été 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 (1<sup>ère</sup> ligne) et dans le plan (2<sup>ème</sup> ligne) illustrant l'influence de chaque paramètre de constituant sur le mélange pâte.



**Figure 5 : Diagrammes ternaires pour la réponse étalement**

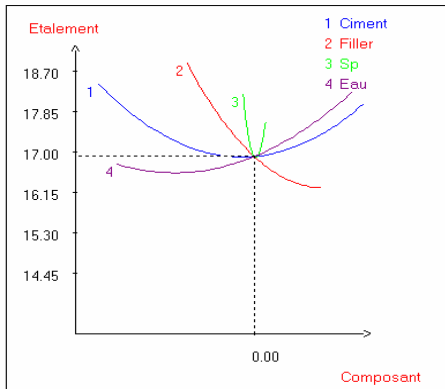
En effet, en fixant un paramètre et en faisant varier les trois autres, leur somme devrait être égale à l'unité. En fixant la paramètre "eau" à 0.305 par exemple, et en faisant varier les proportions volumiques des autres composant, le paramètre "Sp" est prépondérant: les réponses sont plus sensibles 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**, colonnes de gauche), l'ajout des fillers aurait une nette influence sur l'ouvrabilité des mélanges [11]. Le même raisonnement est valable pour la réponse écoulement.

### 3.2.3. Réponses expérimentales

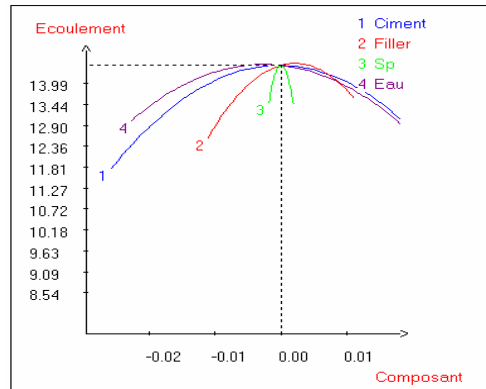
Tous les mélanges ont été réalisés selon les dosages des constituants définis dans la matrice d'expériences. Les réponses expérimentales obtenues ont été utilisés pour le

calcul des coefficients du polynôme, le résultat de n'importe quelle expérience appartenant au domaine expérimental peut être alors connu.

Quelques résultats caractéristiques des réponses sont illustrés à travers la **Figure 6a** et la **Figure 6b**.



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



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

En effet, de ces résultats, le diamètre d'étalement devrait osciller entre 14 et 17 cm, puisque au-delà de 14.15 cm que les variations des diamètres sont dus aux effets simultanés des quatre constituants, alors que le temps d'écoulement voisin de 14s correspondant à l'écoulement de 150 ml de pâte serait est la valeur à partir de laquelle la pâte est fluide. Schober et Mader (2006) [12] ont montré que l'écoulement de la pâte augmenterait d'une façon linéaire en fonction de l'augmentation du dosage en superplastifiant.

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

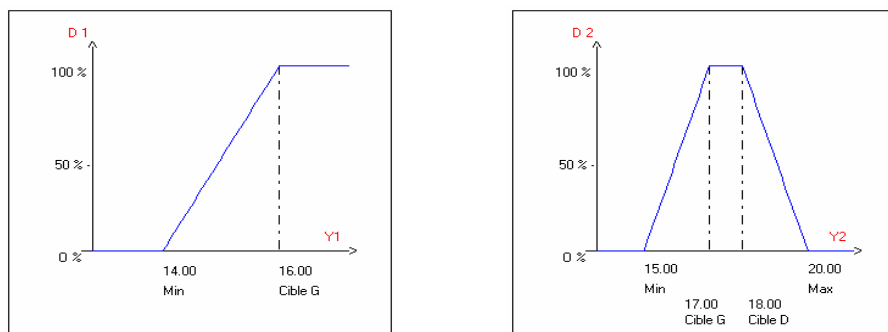
**Tableau 8 :** Caractéristiques des réponses

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 Pâte optimale

L'application d'un logiciel de traitement des plans de mélanges a permis d'optimiser simultanément les 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**).



**Figure 7** : Graphes des fonctions de désirabilités

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 d'écoulement, elle est définie par la relation (7) ci-dessous:

$$(Dg_{\text{pâte}}) = \sqrt{(d_{\text{étalement}}) \times (d_{\text{écoulement}})} \quad (7)$$

La **Figure 7** montre les graphes des fonctions de désirabilité choisies pour les réponses Y1 (étalement) et Y2 (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.

**Tableau 9** : Caractéristiques des fonctions de désirabilité

Réponse	Valeur	Di %	Poids	Di min %	di max %
Etalement	17.15	100.00	1	65.11	100.00
Ecoulement	13.75	100.00	1	42.28	100.00
Désirabilité (Dg)		100.00		52.47	100.00



Le **Tableau 10** donne les valeurs de constituants de cette pâte. La méthode utilisée a été validée par l'utilisation des matériaux locaux algériens, elle pourrait générer des résultats valables par utilisation d'un autre ensemble de matériaux de mêmes caractéristiques [13].

**Tableau 10 : Composition de la pâte optimale**

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

#### 4. Conclusion

A l'issue de cette étude, il a été montré que l'utilisation de simple matériel tel que le mini-cône et le cône de Marsh a permis de formuler une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux, une pâte optimale est déterminée et qui, additionnée à des granulats donnerait 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 ; comparée aux méthodes de formulation traditionnelles, le nombre d'expériences a été considérablement réduit.

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.

### Références

- [1] - F. FERARIS CHIARA, H. O. KARTHIK and H. RUSELL “The influence of mineral admixtures on the Rheology of cement paste and concrete”. *Cement and Concrete Research* (CCR), volume 32 issue 2: 245- 255 ( 2001)
- [2] - X.YOUJUN, L.BAOJU, Y. JIAN, and Z. SHIQIONG, “Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash”. *Cement and Concrete Research*(CCR), N° 32, 477 – 480 (2002)
- [3] - T. NAADIA, M. MOURET and F. KHARCHI, “ Effet de la taille sur le comportement rhéologique des bétons. Application aux BAP ”. 1<sup>er</sup> Colloque international sur la technologie et la durabilité des bétons CITDUB1 pp 25-33, 2004 USTHB, Alger, Algérie.
- [4] - DL. KANTRO, “Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test ”. *Cement, Concrete and Aggregates*, 2, 2: 95-102 (1980)
- [5] - M. CYR, “ 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)
- [6] - N. ROUSSEL, C. STEFANI and R. LEROY, “ From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests ”. *Cement and oncrete Research* (CCR), N° 35 : 817-822 (2005)
- [7] - M. A. AHMADI, O. ALIDOUST, I. SADRINEJAD and M. NAYERI, “ Development of Mechanical Properties of Self Compacting Concrete Contain Rice Husk Ash ”, Proceedings of world academy of science, engineering and technology, volume 2 (2007)
- [8] - A. YAHIA, , M. TANIMURA and Y. SHIMOYAMA, “ Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio ”. *Cement and Concrete Research*(CCR), N° 35 : 532-539 (2005)
- [9] - El-Barrak, M. 2005. “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. LMDC-INSA-UPS, Toulouse, France .
- [10] - Bui, V.K., Akkaya Y. and Shah S.P. 2002. Rheological model for self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 99 : 549-559.
- [11] - M. SAHMARAN, C. HERU ARI and I. OZGUR YAMAN, “ The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars ” *Cement and Concrete Composites*(CCC), N° 28: 432-440 (2006)

- [12] - I. SCHOBBER and U. MADER, "Selecting *the Optimum HRWR for SCC*". *ACI SPECIAL PUBLICATIONS*, N° 235 : 283-290 (2006)
- [13] - M. SONEBI, "Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plan". *Cement and Concrete Research (CCR)*, N° 34 : 1199-1208 (2005)

**SYMBOLES UTILISES:**

C : Ciment. F : Filler calcaire. Sp : Superplastifiant. E : Eau.

$\Gamma$  : Concentration volumique en solide dans la pâte. C'est le rapport du volume des solides sur le volume total.

Dg (pâte) : Désirabilité globale relative à la pâte de ciment.

d(étal) et D1: Désirabilité de la réponse étalement.

d(écoul) et D2: Désirabilité de la réponse écoulement.