



UNIVERSITÉ DES  
MASCAREIGNES  
SAVOIR, C'EST POUVOIR

Journées de Recherche des ISTs et leurs partenaires internationaux - 2 et 3 décembre 2020, Antsiranana  
« *L'innovation et le développement durable : perspectives, enjeux et défis sociétaux* »

## **Article 10 : Optimisation par plan de mélange de la formulation des matériaux de construction en génie civil "Cas du béton hydraulique"**

**A. N. Raobimandranto<sup>1</sup>, J. L. Rakotomalala<sup>1</sup>, G. Escadillas<sup>2</sup>, V. Razafinjato<sup>3</sup>,  
R. Ramanarivo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecole du Génie Civil, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Madagascar

<sup>[2]</sup> LMDC Toulouse, France

<sup>[3]</sup> Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar

Correspondant : navelanirina@gmail.com

### **Résumé**

Ce travail consiste à l'application de la méthode de formulation par plan de mélange pour un matériau de construction. Le béton a été choisi pour l'expérience étant donné que ce type de matériau est le plus utilisé dans la construction du génie civil. De plus, l'objectif de cette recherche est surtout la valorisation des matériaux locaux.

La combinaison de ces composants a été initialement inspirée de la formulation par les méthodes classiques et les recommandations données par les fabricants du ciment. En s'y référant, des contraintes ont été définies et qui par la suite ont permis de déduire le domaine expérimental. Plusieurs résultats de mélange possibles ont été trouvés à partir desquels des applications et des essais ont été réalisés. Des variations des résultats sont obtenues par lesquelles un mélange optimal est ressorti, répondant aux deux exigences à atteindre, la maniabilité et la résistance du béton à 28 jours d'âge.

L'importance de la méthode par plan de mélanges réside dans la réduction considérable du nombre d'expériences, évitant le tâtonnement des ratios des constituants et permettant ainsi un énorme gain de temps.

**Mots clés** : Plans de mélange, diagrammes ternaires, formulation de béton, Plan d'expériences, interaction des constituants

## 1. INTRODUCTION

Les constructions dans le domaine du Génie Civil, hormis la maîtrise de la mise en œuvre des études techniques, reposent essentiellement sur le bon choix de divers matériaux dont la plupart est issue de mélange de deux ou plusieurs constituants. Or, ce mélange requiert un art et une maîtrise de chaque élément constitutif afin d'obtenir de ou des matériau(x) de meilleure qualité répondant aux différentes exigences et/ou contraintes dans l'exécution des travaux et ce pour assurer non seulement la sécurité et la durabilité de l'ouvrage mais également une économie de temps et de coût. Le respect de l'environnement est également mis en jeu et à respecter au mieux. Un résultat fiable est la conséquence d'une longue recherche et plusieurs essais amenant à une formulation optimale.

Dès lors, cette recherche vise à répondre à cette attente de formulation optimale et simultanément à la réduction du nombre d'expériences. Plusieurs méthodes sont disponibles pour y aboutir mais le choix a été tourné vers l'expérimentation par plan de mélange, une branche spécifique de plan d'expérience. L'utilisation de cette technique, dont l'origine était sortie de l'industrie agroalimentaire, s'est vue élargie et adoptée dans plusieurs domaines expérimentaux. La base de calcul est pointue et se repose sur un modèle mathématique, permettant ainsi d'avoir des résultats précis.

Avec les avancés et les recherches techniques réalisées, les techniciens dans le secteur du génie civil ont un large choix quant à l'utilisation des matériaux selon le besoin du projet à réaliser. Le constat s'avère également que le béton reste dans la majorité des cas un élément constitutif clé et indispensable dans la construction tant sur les bâtiments que dans les ouvrages d'art quel que soit leur taille, leur dimension ou leur importance. Récemment, ce type de matériau a été intégré dans le processus de réhabilitation et/ou d'entretien des réseaux routiers à Madagascar, qui commence à prendre son ampleur aujourd'hui, et ce en appliquant le béton compacté au rouleau « **BCR** » issu de la recherche faite par un chercheur Malagasy [1], [2].

L'homogénéité d'un mélange du béton réside essentiellement dans la bonne proportion de ses constituants. Plusieurs formulations ont été trouvées par plusieurs chercheurs selon les résultats attendus et les besoins d'utilisations. Par la méthode par plan de mélange, plusieurs étapes ont été suivies en commençant par la définition des composantes, la délimitation du domaine expérimental (contraintes supérieures et inférieures), et à partir de cela la mise en équation du problème et la résolution numériquement auxquelles des matrices de mélange ont été sorties. Ces dernières ont été utilisées pour l'expérimentation afin d'aboutir à un mélange optimal.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1. Matériels et Matériaux

#### 2.1.1. Matériels

Pour les essais relatifs à la détermination d'une formulation du béton, une analyse granulométrie s'avère utile pour pouvoir déterminer l'étalement des grains composant le mélange. Pour se faire, une série de Tamis va être utilisée. L'ouvrabilité est mesurée par l'essai d'affaissement classique au cône d'Abrams selon la norme EN 12350-2. Et en dernier lieu qui n'est pas la moindre, la résistance du béton obtenue doit être connue à chaque formulation issue de la variation de chaque constituant. Le test d'écrasement des échantillons cylindriques (16x32cm) confectionnés selon la norme EN 12390-2 et conditionnés dans l'eau à 20°C, par une presse à béton, permet de connaître cette résistance à « j » jours d'âge.

#### 2.1.2. Matériaux

Le choix des matériaux réside non seulement sur les caractéristiques mais aussi sur leurs disponibilités abondantes et leurs coûts.

Pour l'élaboration du mélange, Trois matériaux bien distincts sont utiles :

- Les agrégats composés de graviers et de sable ;
- Le ciment comme liant hydraulique ;
- L'eau.

##### 2.1.2.1. Agrégats

###### Granulats :

Le granulat utilisé est issu de la carrière Antsobolo Ambatomaro concassé manuellement. Deux catégories de grave ont été descellées sur le site selon le diamètre :

- le granulat 5/15 ;
- le granulat 15/25.

###### Sable :

Le sable mis en œuvre pour la recherche provient de la rivière d'Ikopa sur la partie d'Ambohimambola.

Le tableau 1 ci-après donne les différentes caractéristiques des agrégats.

**Tableau 1 :** Caractéristiques physiques des agrégats

	Masse volumique Absolue [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique Apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Diamètre minimal [mm]	Diamètre maximal [mm]
Sable	2650	1500	0.08	5
Gravillon 5/15	2600	1450	5	≤15
Gravillon 15/25	2600	1400	> 15	≤ 25

### 2.1.2.2. Liant « Ciment »

Le liant hydraulique utilisé est le ciment CEM I 42.5N dont les compositions chimiques et minéralogiques sont données dans le tableau 2.

**Tableau 2 :** Compositions chimiques du ciment CEM I 42.5N

Compositions chimiques minéralogiques (%)								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
19.80	6.08	3.58	61.56	2.48	0.18	0.32	2.54	0.06
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>4</sub> AF		C <sub>3</sub> AF		
45.65		22.33		10.38		10.88		

## 2.2. Méthode par Plan de mélange pour le béton ordinaire

### 2.2.1. Domaine expérimentale

Actuellement, plusieurs domaines expérimentaux utilisent la méthode par plan de mélange.

Les plans de mélange contribuent à la connaissance des informations sur les constituants, leurs influences prises séparément et sur leurs interactions éventuelles. Cette méthode permet de réduire considérablement le nombre d'expériences à faire et de faciliter l'étude dans l'objectif d'atteindre des mélanges possédant des réponses optimales répondant à des exigences imposées.

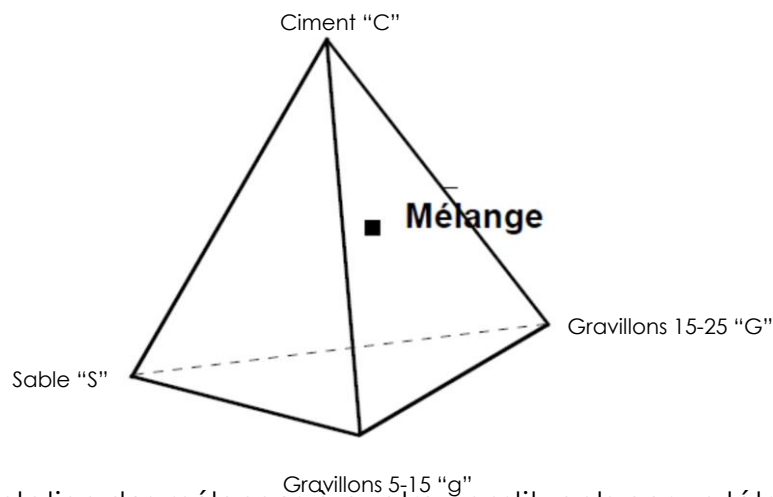
La réponse dépend des proportions « volumiques » des constituants utilisés. De ce fait, pour un béton ordinaire, le plan de mélange est constitué, à la base, de quatre facteurs, le **S**able - le **G**ravillon - le **C**iment - l'**E**au, qui vont être pris en proportions volumiques. Ainsi, leur somme est prise égale à l'unité c'est-à-dire, ils sont dépendants les uns des autres.

Le domaine expérimental est contraint par la relation :

$$\mathbf{S} + \mathbf{G} + \mathbf{C} + \mathbf{E} = \mathbf{1} \quad (1)$$

Pour un plan de mélange à 4 constituants, le domaine d'étude obtenu est un espace à 3 dimensions. Les points du modèle et la détermination des points de la matrice

d'expériences forment un tétraèdre régulier. Ces points se trouvent aux milieux des arêtes, aux milieux des faces, sur les sommets et au centre de gravité du tétraèdre.



**Figure 1** : Représentation des mélanges à quatre Constituants par un tétraèdre régulier  
Généralement, la quantité de l'Eau est fixée par le rapport C/E qui est fonction de la résistance moyenne à atteindre à 28 jours [3]. Cette relation est exprimée par :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cj}}{G \sigma_{c28}} + G \quad (2)$$

Ainsi, les composants pris en compte dans le plan de mélange sont le Ciment, le Sable, le Gravillon qui se classe sous deux catégories, le gravillon 5-15 - le Gravillon 15-25, et noté respectivement « **C - S - g - G** ».

$$S + g + G + C = 1 \quad (3)$$

En considérant un mélange complet, le choix d'un modèle mathématique converge vers un polynôme de degré 2, reliant la proportion des constituants à la réponse Y. [4]

$$Y = \sum_{i=j}^k b_i X_i + \sum_{i<j}^k \sum_{i<j}^k b_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

Les paramètres  $X_i$  et  $X_j$  correspondent aux proportions volumiques des constituants. Les coefficients  $b_i$  et  $b_j$  sont à déterminer et différents pour chaque réponse.

En appliquant les constituants de base du béton, l'équation (4) se transforme comme suit :

$$Y = b_1 \cdot S + b_2 \cdot g + b_3 \cdot G + b_4 \cdot C + b_{12} \cdot S \cdot g + b_{13} \cdot S \cdot G + b_{14} \cdot S \cdot C + b_{23} \cdot g \cdot G + b_{24} \cdot g \cdot C + b_{34} \cdot G \cdot C \quad (5)$$

Et devient sous forme matricielle :

$$[Y] = [X] \cdot [b] \quad (6)$$

[Y] : la matrice des réponses ;

[X] : la matrice d'expériences ;

[b] : le vecteur de colonne des coefficients du modèle.

Les mélanges sont aussi caractérisés par des contraintes inférieures, supérieures ou relationnelles.

Pour cette expérience, le dosage du béton à 350kg a été choisi comme référence du fait que ce type de béton est couramment utilisé pour la construction des ouvrages à Madagascar.

Le tableau 4 récapitule la proportion des constituants pour 1m<sup>3</sup> de béton dosé à 350kg dans la pratique. Ce tableau est également tiré à partir du tableau 3 donnant la formulation recommandée par les fabricants du ciment.

### 2.2.2. Compositions du béton « Formulation Indicatif »

La composition du béton est donnée par le tableau 3. Ces compositions sont issues de la formulation indicative donnée par chaque fabricant de ciment laquelle est généralement adoptée par les entreprises.

**Tableau 3 :** Composition du béton pour un sac de ciment selon le dosage et la résistance

Fabricant	Type de Ciment	Dosage [kg/m <sup>3</sup> ]	Ciment [kg]	Sable [L]	Gravillons [L]	Eau [L]	Résistance à 28 jours [MPa]
Fabricant 1	CEM I 42.5N	300	50	120	140	30	20 à 25
		350	50	70	100	25	25 à 30
		400	50	40	50	10 à 20	30 à 35
Fabricant 2	CEM I 42.5N	300	50	150	165	25	20 à 25
		350	50	60	75	30	25 à 30
		400	50	52.5	60	10 à 30	30 à 35

**Tableau 4 :** Composition pour un m<sup>3</sup> de Béton dosé à 350kg

Matériaux	Fabricant 1		Fabricant 2		Valeur Minimale	Valeur Maximale
	Quantité [L]	Proportion en %	Quantité [L]	Proportion en %		
Sable	420	34%	420	40%	0,34	0,40
Gravillons 5-15	280	23%	210	20%	0,20	0,23
Gravillons 15-25	420	34%	315	30%	0,30	0,34
Ciment	111,46	9%	111,46	11%	0,09	0,11

Le tableau 4 permet non seulement de définir le domaine expérimental mais également d'établir des contraintes relationnelles.

$$0.34 \leq S \leq 0.40$$

$$\begin{aligned}
0.20 &\leq g \leq 0.23 \\
0.30 &\leq G \leq 0.34 \\
0.09 &\leq C \leq 0.11
\end{aligned}
\tag{7}$$

A part ces contraintes inférieures et supérieures, il faut vérifier l'existence de la compatibilité des contraintes afin d'obtenir un domaine expérimental cohérent.

$$R_d = \sum_i d_i - 1 \quad R_a = 1 - \sum_i a_i \quad R_i = d_i - a_i \tag{8}$$

$a_i$  : contrainte inférieure

$d_i$  : contrainte supérieure

$$R_d = (0.40 + 0.23 + 0.34 + 0.11) - 1 = 0.07 \quad ; \quad R_a = 1 - (0.34 + 0.20 + 0.30 + 0.09) = 0.07$$

$$R_1 = 0.40 - 0.34 = 0.06$$

$$R_2 = 0.23 - 0.20 = 0.03$$

$$R_3 = 0.34 - 0.30 = 0.04$$

$$R_4 = 0.11 - 0.09 = 0.02$$

Si toutes les  $R_i \leq R_a$ , les contraintes supérieures sont compatibles, et si les  $R_i \leq R_d$ , les contraintes inférieures sont compatibles. Dans ce cas, il faut les remplacer par des contraintes implicites inférieures et supérieures.

$$d_i^* = a_i + R_a \quad a_i^* = d_i - R_d \tag{9}$$

Les valeurs de  $R_i$  sont inférieures aux valeurs de  $R_a$  et  $R_d$ , donc ils existent des compatibilités des contraintes.

L'expression (7) reste valable et donne le domaine expérimental cohérent suivant :

$$0.34 \leq S \leq 0.40$$

$$0.20 \leq g \leq 0.23$$

$$0.30 \leq G \leq 0.34$$

$$0.09 \leq C \leq 0.11$$

A partir de cette expression, les contraintes implicites obtenues sont récapitulées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Contraintes implicites

Constituants	Contraintes inférieures implicites	Contraintes supérieures implicites
Sables	0.34	0.40
Gravillons 5-15	0.20	0.23
Gravillons 15-25	0.30	0.34
Ciment	0.09	0.11

### 3. RESULTATS

La résolution d'un tel problème complexe par des méthodes classiques est quasiment impossible. Le recours à l'utilisation des logiciels est très recommandé. Nombreux sont les logiciels de traitement de plan des mélanges, mais le « Nemrodow » est un des logiciels qui peut donner des résultats fiables et facile à interpréter.

### 3.1. Matrice d'expérience

Le logiciel génère automatiquement la matrice d'expérience qui passe par l'analyse algorithmique d'échange. Ce procédé applique la variation des nombres des coefficients du polynôme jusqu'à un nombre maximal correspondant aux critères d'optimisation.

Les informations nécessaires à la construction de la matrice sont récapitulées dans le tableau 6 suivant.

**Tableau 6** : Points de construction de la matrice d'expérience

Nombre de points	Existants	Sélectionnés
Nombre de sommets	11	11
Nombres d'arêtes (milieux)	17	17
Nombre de faces de dimension 2	8	8
Centre de Gravité	1	1
Points tests internes	11	11
<b>Total</b>	<b>48</b>	

L'étendue du problème est donnée par le tableau 7.

**Tableau 7** : Caractéristiques du problème

Objectif de l'étude	Etude de Mélanges
Nombre de variables	4
Nombre d'expériences	48
Nombre de coefficients	10
Nombre de réponses	2

Une fois que tous les paramètres sont introduits dans le logiciel, le programme donne la matrice d'expérience, des proportions volumiques des constituants utiles à la préparation du mélange. Ces valeurs sont prises à l'intérieur du domaine expérimental.

**Tableau 8** : Echantillon de Proportion volumique de la matrice d'expériences [Unité : m<sup>3</sup>]



N° de mélange	Sable	Gravillon 5-15	Gravillon 15-25	Ciment
Mélange N°1	0,375	0,215	0,300	0,110
Mélange N°2	0,400	0,205	0,305	0,090
Mélange N°3	0,360	0,200	0,340	0,100
Mélange N°4	0,400	0,205	0,300	0,095
Mélange N°5	0,350	0,210	0,340	0,100
Mélange N°6	0,350	0,200	0,340	0,110

L'influence de chaque constituant sur le mélange dans le plan et dans l'espace est illustrée par les diagramme 1, diagramme 2, diagramme 3 et diagramme 4.

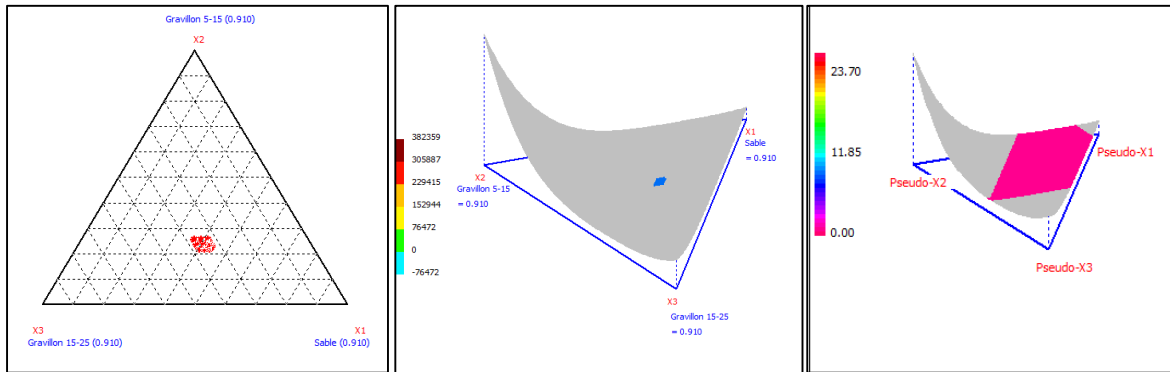


Diagramme.1. : Diagrammes ternaires, Variation de la fonction de variance - dans le plan : Sable, Gravillon 5-15, Gravillon 15-25 ; COMPOSANTS FIXES : - Ciment = 0.0900

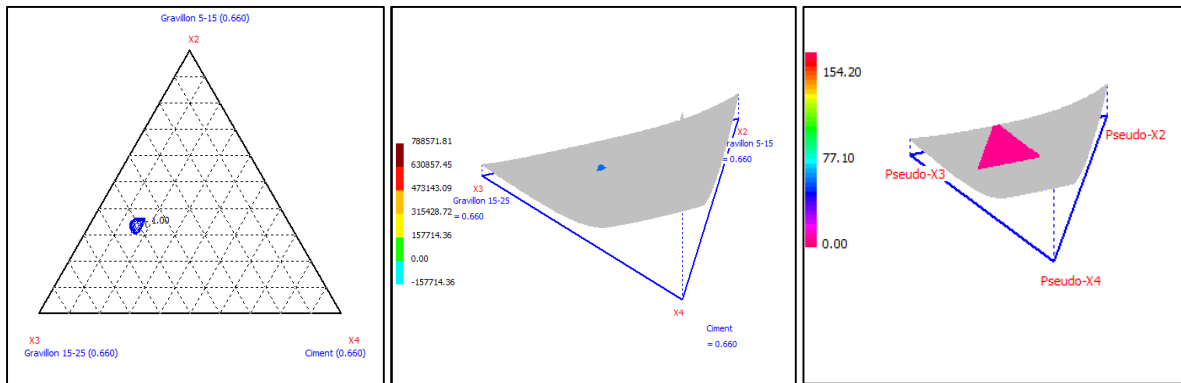


Diagramme.2. Diagrammes ternaires, Variation de la fonction de variance - dans le plan : Gravillon 5-15, Gravillon 15-25, Ciment ; COMPOSANTS FIXES : - Sable = 0.3400

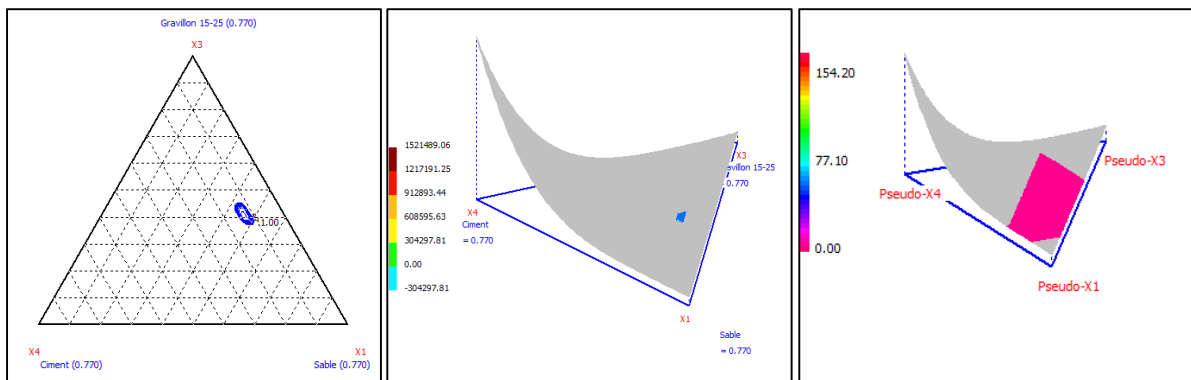


Diagramme.3. Diagrammes ternaires, Variation de la fonction de variance - dans le plan : Gravillon 15-25, Ciment, Sable ; COMPOSANTS FIXES : - Gravillon 5-15 = 0.33

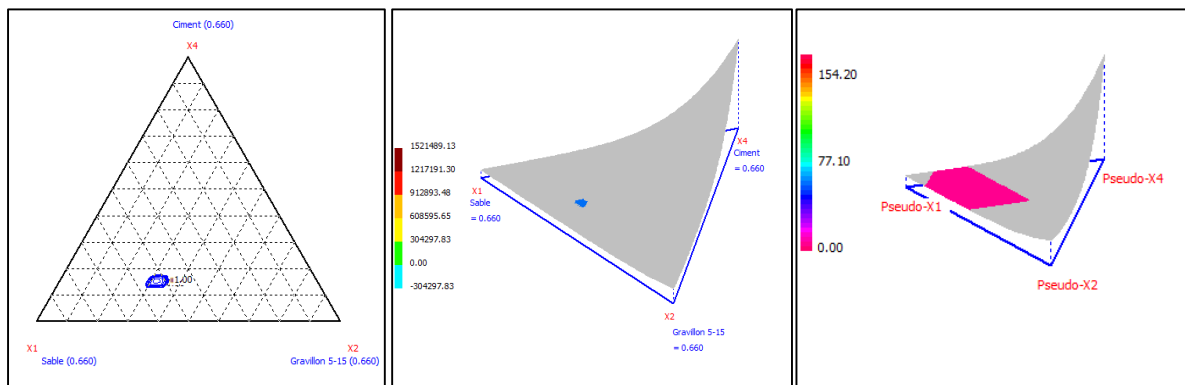


Diagramme.4. Diagrammes ternaires, Variation de la fonction de variance - dans le plan : Ciment, Sable, Gravillon 5-15 ; COMPOSANTS FIXES : - Gravillon 15-25 = 0.34

En fixant un des paramètres des composants et en laissant varier les autres, la somme d'un mélange est toujours égale à l'unité. Ce qui implique qu'il y a des interactions entre les différents composants du mélange.

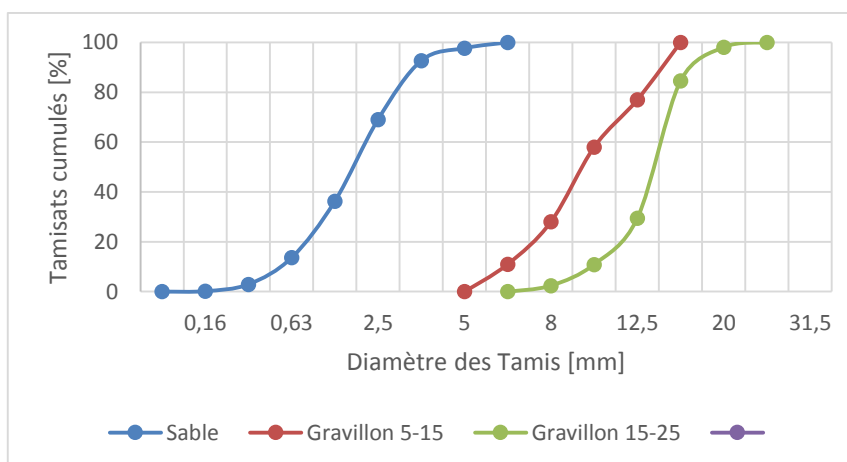
Pour la suite de l'expérience, ces 6 mélanges vont être réalisés et des réponses vont être mesurées. Ceci dans le but de savoir si chaque mélange répond aux critères recherchés qui sont la maniabilité et la résistance.

### 3.2. Résultats des expériences

#### 3.2.1. Analyse granulométrique

La compacité optimum du mélange dépend principalement de l'étalement des grains du sable et de la granularité des gravillons. L'analyse granulométrique permet de déterminer cette répartition.

La courbe 1 ci-dessous donne le résultat de l'analyse granulométrique d'un échantillon pris dans un chantier en cours.



**Courbe 1** : Courbe granulométrique

D'après la courbe 1, l'étalement des grains de sable est à répartition normale vue que la majorité des grains se situe entre 0.315mm et 4mm.

La granulométrie du gravillon 5/15 est à granulométrie continue. Par contre, celui du gravillon 15/25 est à granulométrie discontinue.

A partir de cette analyse, la répartition de chaque constituant aura des valeurs limites « minimum et maximum ».

### 3.2.1.1. Résultats issus de la méthode traditionnelle

Partant de cette composition du béton du Tableau 3, la combinaison des constituants ne donne qu'une seule possibilité de mélange. Toutefois, les résultats obtenus ne sont pas toujours très concluants, ceux qui obligent les expérimentateurs de changer certaines valeurs des composants conduisant ainsi aux tâtonnements.



**Photo 1** : Mélange liquide et mal proportionné      **Photo 2** : Béton cassé

### 3.2.1.2. Résultats issus de la méthode par plan de mélange

Les 6 mélanges ont été réalisés selon les proportions définies dans la matrice d'expériences.

La quantité d'eau à ajouter aux mélanges a été calculée à partir du rapport Eau – Ciment.

Des mesures d'affaissement de chaque mélange, « slump test », ont été effectuées dans le but de savoir sa plasticité et sa maniabilité. Des essais d'écrasement à 28 jours ont été réalisés pour définir la résistance à la compression de chaque mélange.

Le tableau 10 donne les proportions ainsi que les résultats de ces expériences.

**Tableau 9** : Proportion volumique de la matrice d'expériences et résultats des essais

N° de mélange	Sable [m <sup>3</sup> ]	Gravillon 5-15 [m <sup>3</sup> ]	Gravillon 15-25 [m <sup>3</sup> ]	Ciment [m <sup>3</sup> ]	Eau [l]	Affaissement [cm]	Résistance à 28 jours [MPa]
---------------	-------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------	---------	-------------------	-----------------------------

Mélange N°1	0,375	0,215	0,300	0,110	170	7	30,1
Mélange N°2	0,400	0,205	0,305	0,090	139	5	17,5
Mélange N°3	0,360	0,200	0,340	0,100	154	6,7	20,5
Mélange N°4	0,400	0,205	0,300	0,095	147	6	18,7
Mélange N°5	0,350	0,210	0,340	0,100	154	6,5	20,7
Mélange N°6	0,350	0,200	0,340	0,110	170	8	29,1

#### 4. DISCUSSIONS

De ces résultats, la résistance de chaque mélange est comprise entre les valeurs prédéfinis dans le tableau 3 par le fournisseur pour un ciment de classe 42.5N. Les valeurs de l'affaissement issues du « **slump test** » varient également de 5 à 8cm, des valeurs qui montrent que les mélanges sont très maniables correspondant à la norme EN 12350-2, sauf pour le mélange N°2 qui est trop ferme.

A l'issue de ces réponses expérimentales, l'expérience N°1 donne le mélange optimal répondant aux deux réponses voulues, mélange maniable et résistance maximum à 28 jours d'âge.

Ainsi la composition du mélange optimal pour un gâché de bétonnière c'est-à-dire pour un sac de 50kg de ciment est donné par le tableau 11.

**Tableau 10** : Composition du mélange optimal pour un sac de ciment CEM I 42.5N

Composant	Proportion volumique [L]	Pondéral Absolue [kg]
Sable	54,285	143,85
Gravillon 5-15	31,123	80,92
Gravillon 15-25	43,428	112,91
Ciment	15,924	50,00
Eau	24,590	24,59

**En se referant aux formulations proposées par le fournisseur pour un beton dosé à 350kg, et par gachage de 50kg de ciment, la quantité de chaque matériau a nettement diminué avec la méthode par plan de melange. Notamment, pour le sable, 70l a 54,285l soit une diminution de 22% ; pour les gravillons, de 100l passe a 74,551l soit une baisse de 25%.**

## **5. CONCLUSION**

A l'issue de cette expérimentation, la formulation par plan de mélange du béton ordinaire a permis de définir un domaine expérimental dans lequel des plans d'expériences ont été obtenus et ont donnés des plans de mélanges présentant chacun des caractéristiques mesurables.

L'utilisation du logiciel Nemrodow a facilité la résolution des problèmes posés et a permis de constater qu'une interaction entre les constituants existe.

Cette méthode de formulation, comparée aux autres méthodes traditionnelles ou classiques, a réduit considérablement le nombre d'expériences, laquelle implique un gain de temps et surtout un gain sur les matériaux.

Cette étude a montré également que la variation de la quantité de chaque constituant donne des résultats très intéressants répondant aux critères imposés.

D'après les résultats obtenus, une diminution de la quantité de chaque constituant a été détectée par rapport à la formulation de mélange proposé par le fabricant du ciment. Les tests d'écrasement des mélanges ont révélé une variation de la résistance à la compression en fonction du ratio de chaque constituant. Ce dernier résultat est très important pour un ingénieur de structure et économiste de la construction étant donné que l'hypothèse de calcul pour une ossature dépend de ce résultat. Subséquemment, une économie et des impacts positifs sur l'environnement pourraient se faire pour un projet.

La suite de cette expérience est son application sur la formulation du béton fibré ou même du béton fibré autoplaçant.

## **Références**

[1] J. L. Rakotomalala, G. Escadeillas, G. Ranaivoniarivo, Chantier expérimental de Béton Compacté au Rouleau à Sabotsy-Namehana, IST-T , LMDC Toulouse, ESPA

[2] J. L. Rakotomalala, G. Escadeillas, G. Ranaivoniarivo, Opportunité de l'utilisation de béton compacté au rouleau à Madagascar : une solution optimale de revêtement et d'assise de chaussée, IST-T , LMDC Toulouse, ESPA

[3] G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles 8ème Edition, 1998

[4] J. Goupy, Les plans d'expériences, Revue MODULAD, 2006