



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
ECOLE DOCTORALE
INGENIERIE ET GEOSCIENCES



**EQUIPE D'ACCUEIL DOCTORALE : Géoscience,
Technologie des poudres, Matériaux Emergents et
Innovants, Matériaux Durable et Habitat Economique**

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université d'Antananarivo
OPTION : GENIE DES MATERIAUX

**FORMULATIONS ET MODÉLISATIONS MATHÉMATIQUES DES
COMPORTEMENTS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE
COMPACTE PAR DES PLANS D'EXPÉRIENCES**

Présentée et soutenue publiquement par

Monsieur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain

Le 16 octobre 2020

Devant les membres du Jury composé de :

Président	:	Mr RANDRIANJA Roger, Professeur titulaire
Directeur de Thèse	:	Mr RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Professeur titulaire
Rapporteur interne	:	Mr RAJAONARISON Eddie Franck, Professeur
Rapporteur externe	:	Mr RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Professeur
Examineur	:	Mr RAZAFINJATO Victor, Professeur titulaire

Dédicace

Avec l'aide de Tout-Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédise :

- ❖ *À mes trois amours de ma vie : « Kanto, Misaina et Andraina » ; je voudrais partager ce succès avec eux.*
- ❖ *À mes chers parents sur qui j'ai pu compter d'affection et de bénédictions durant toute ma vie.*

REMERCIEMENTS

Cette thèse est née d'une collaboration entre le laboratoire national des travaux publics et du Bâtiment, le laboratoire du Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques, le laboratoire du central à béton de la Société de Construction des Bâtiments Tanà sud et le laboratoire de Chimie minérale de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

La réalisation de ce travail n'aurait été possible aussi sans l'aide précieuse de nombreuses personnes à qui j'adresse mes vifs et sincères remerciements.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement :

- ❖ **Le professeur titulaire, RANDRIANJA Roger, Directeur de l'Ecole Doctorale Ingenierie et Géoscience**, qui m'a fait le grand honneur de présider la soutenance de ce mémoire.
- ❖ **Le professeur titulaire RAZAFINJATO Victor**, Enseignant-chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), qui a accepté avec aimabilité d'examiner cette thèse.

Je suis très reconnaissant envers mon directeur de thèse :

- ❖ **Le professeur titulaire RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely**, Enseignant-Chercheur au sein de la mention Science et Ingénierie des Matériaux (SIM) de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo . Je le remercie pour sa grande sympathie manifestée lors de nos rencontres aux congrès du béton fluide et qui n'a cessé de me soutenir tout au long de ma carrière.

J'exprime ma gratitude envers nos rapporteurs:

- ❖ **Le professeur RAJAONARISON Eddie Franck**, Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur de Antsirabe Vakinankaratra (IES-AV), notre rapporteur interne de cette thèse, qui m'a conseillé et soutenu. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

- ❖ **Le professeur RANDRIANA NAMBININA Richard Fortuné**, Enseignant-Chercheur et Chef de la Mention Génie de Procédé Chimique et Industriel (GPCI) de l'ESPA, pour avoir aimablement accepté de faire partie des membres de Jury de cette thèse en tant que rapporteur externe.

Je remercie également les responsables et tout le personnel :

- ❖ de laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiment
- ❖ de laboratoire du centrale à béton SCB Tanà sud
- ❖ de laboratoire Centre Nationale de Recherches Industrielles et Technologiques,

Je ne saurais oublier

- ❖ Tous mes collègues :
 - d' Enseignants du Mention Science de matériaux et métallurgies, de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
 - d'Enseignants du Mention Génie Civil de l'institut d'Enseignants Supérieure de Antsirabe Vakinankaratra.
 - D' Enseignants de la Mention Génie Civil des Universités Privés
- ❖ Les Sociétés COMPAGNIE MADECASSE et BATPRO pour la procuration des superplastifiants.

Et enfin, je remercie

- ❖ Toutes les familles, tous nos collègues et amis; à tous ce qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci à tous

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE I : APPROCHES THÉORIQUES SUR LES BÉTONS FLUIDES

Chapitre I : Généralités sur les bétons fluides

Chapitre II : Provenance des matériaux pour la formulation des bétons fluides

PARTIE II : APPROCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES BÉTONS FLUIDES

Chapitre III : Méthodes de formulation des bétons

Chapitre IV : Essais de caractérisation des bétons

Chapitre V : Caractéristiques des matières premières

Chapitre VI : Formulations des bétons fluides à haute compacité par la méthode des volumes absolus

PARTIE III : MODÉLISATION DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACITÉ PAR DES PLANS D'EXPÉRIENCES

Chapitre VII : Généralités sur les plans d'expériences

Chapitre VIII : Applications des plans d'expériences sur les bétons fluides

PARTIE IV : APPROCHES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

Chapitre IX : Études et analyse des prix unitaires des bétons

Chapitre X : Environnement et bétons fluides

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES WEBOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Types de ciment selon sa nature et sa proportion des constituants 12

Tableau 2 : Type et classe des ciments de la société HOLCIM Madagascar 12

Tableau 3 : Dosage des bétons correspond à Q350 pour un sac de ciment de HOLCIM Madagascar 13

Tableau 4 : Dosage des bétons correspond à Q400 pour un sac-ciment de HOLCIM Madagascar 13

Tableau 5 : Dosages de chaque constituant du béton Q350 dans un mètre cube selon la norme TBM 14

Tableau 6 : Prix de vente des ciments de la société HOLCIM Madagascar 14

Tableau 7: Classification des granulats par grosseur 14

Tableau 8: Séries de tamis normalisé pour le sable 15

Tableau 9 : Prix de vente des gravillons de fabrication artisanale de la carrière Vontovorona 18

Tableau 10 : Prix de vente hors taxe des granulats produits par la société SCB 18

Tableau 11 : Prix de la dolomie proposé par PROCHIMAD en 2018 21

Tableau 12 : Types et utilisations des différents Adjuvants 23

Tableau 13: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône d'Abrams ou au test d'ouvrabilité C.E.S. 28

Tableau 14 : Diamètre maximal du granulat en fonction du ferrailage et de l'enrobage 28

Tableau 15 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G 29

Tableau 16 : Corrections en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats 31

Tableau 17 : Valeurs du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats 32

Tableau 18 : Valeurs de coefficient de compacité δ 33

Tableau 19 : Dosage en eau et en air suivant la consistance 39

Tableau 20 : Coefficient multiplicateur en fonction de D 40

Tableau 21 : Valeurs estimées de K_c 40

Tableau 22 : Valeurs estimées de F_{CE} 40

Tableau 23 : Coordonnées de la courbe de référence 41

Tableau 24: Dosage en ciment et dimensions maximales D des granulats	43
Tableau 25:Caractéristiques physiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N	57
Tableau 26: Resistance en compression du ciment Manda CEM IIA 42,5 N	57
Tableau 27:Compositions chimiques moyennes des constituants minéralogiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N en % massiques.	58
Tableau 28: Compositions chimiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N en % massiques.	58
Tableau 29: Valeurs requises du ciment Manda CEM II /A 42,5N	60
Tableau 30 : Tableau des classes granulaires avec charge abrasive	69
Tableau 31:Résultats des caractéristiques physiques et mécaniques des nos granulats	75
Tableau 32 : Analyse granulométrique du sable Sr_1 en pourcentage des refus cumulés et passants cumulés.	75
Tableau 33 : Modules de finesse des sables de rivière et de carrière	76
Tableau 34 : Les modules des éléments correspondent à 10%, à 30% et à 60% des passants cumulés des sables	78
Tableau 35 : Diamètres des éléments correspond à 10%, à 30 et à 60% des passants cumulés des sables	79
Tableau 36 : Valeurs des C_u et de C_c des sables	79
Tableau 37 :Résultats d'analyse granulométrique de nos gravillons en pourcentage des refus et des passants cumulés	79
Tableau 38: Valeurs de CA et de CV de nos gravillons	80
Tableau 39 : Caractéristiques physiques de filler cipolin (F_C)	81
Tableau 40: Composition chimique élémentaire du cipolin	81
Tableau 41: Caractéristiques physiques de filler dolomie (F_D)	82
Tableau 42: Composition chimique de filler dolomie (F_D)	82
Tableau 43 : Caractéristiques de l'eau de JIRAMA	82
Tableau 44: Caractéristiques du superplastifiant Sika $\text{\textcircled{R}}viscocrete\text{\textcircled{R}}tempo12$	83
Tableau 45:Condition d'application du superplastifiant Sika $\text{\textcircled{R}}viscocrete\text{\textcircled{R}}tempo12$	83
Tableau 46: Caractéristiques du superplastifiant Rhéobuild 561	84
Tableau 47: Condition d'application du superplastifiant Rhéobuild 561	84

Tableau 48 :Composition du BO ₁ selon la méthode de Dreux Gorisse	89
Tableau 49: Affaissement du béton ordinaire BO1	89
Tableau 50: Résistance en compression du BO ₁	89
Tableau 51: Paramètres de dosage des bétons fluides pour l'étude préliminaire	92
Tableau 52: Composition préliminaire du BFL ₁	92
Tableau 53: Résultat sur l'essai de la résistance en compression lors de l'étude préliminaire	93
Tableau 54: Paramètres des dosages du BFL ₁	93
Tableau 55: Compositions du BFL ₁ en faisant varier le pourcentage de fine de cipolin par rapport au ciment	94
Tableau 56: Valeurs d'affaissement des 6 essais effectués	94
Tableau 57 : Résultats de mesure de retrait des BFL ₁	96
Tableau 58: Résultat sur la mesure de la porosité et de la compacité des 6 essais effectués	96
Tableau 59: Valeurs des résistances en compression des 6 essais effectués	97
Tableau 60 : Compostion pour un mètre cube de BO ₂	101
Tableau 61: Résultats d'affaissement et des résistances en compression du BO ₂ par la méthode de DREUX GORRISSE	101
Tableau 62 : Dosage du béton classique selon la norme TBM	102
Tableau 63 : composition pour un mètre cube de BO ₃ selon la norme TBM	102
Tableau 64 : Résultats d'affaissement et des résistances en compression du BO3 par la formule de TBM	102
Tableau 65:Formule du béton fluide BFL ₂ dans un mètre cube	105
Tableau 66:Résultas d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL ₂ .	105
Tableau 67:Résultats des résistances en compression du BFL ₂ .	105
Tableau 68: Formule du béton fluide BFL ₃ dans un mètre cube	106
Tableau 69: Résultas d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL ₃ .	106
Tableau 70:Résultats des résistances en compression et de la densité du BFL ₃	106
Tableau 71:Formule du BFL ₄ en utilisant le filler cipolin et le rhéobuild 561.	107
Tableau 72:Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL ₄ .	107

Tableau 73: Résultats des résistances en compression et de la densité de BFL ₄ .	107
Tableau 74: Formule du BFL ₅ en utilisant le filler dolomie et le rhéobuild 561.	107
Tableau 75: Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL ₅ .	108
Tableau 76: Résultats des résistances en compression et de la densité du BFL ₅ .	108
Tableau 77 : Récapitulation des résultats d'affaissement, des compacités et des résistances en compressions des BFL et des BO	108
Tableau 78 : Exemple des facteurs codés (-1) et (1)	118
Tableau 79 : Calcul des coefficients A_0, A_1, A_2, A_3 de trois facteurs à deux niveaux dans le cas des matrices de Hardman.	124
Tableau 80 : Matrice d'expérience pour les plans d'expérience à deux niveaux et à 2 facteurs	127
Tableau 81 : Rappel sur la formule de BFL ₁	134
Tableau 82 : Rappel sur les formules des BFL ₂ , BFL ₃ , BFL ₄ , BFL ₅	134
Tableau 83 : Récapitulations des résultats sur les essais des bétons fluides	134
Tableau 84 : Paramètres de niveau des facteurs	135
Tableau 85 : Formules des bétons fluides par des plans d'expériences	137
Tableau 86 : Résistances en compression à 7 jours des bétons fluides formulés à partir des plans d'expériences	138
Tableau 87: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i, A_{ij} et A_{ijk} du modèle préliminaire de Rc07	149
Tableau 88: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i, A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc07 retenu	152
Tableau 89: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de Rc07	153
Tableau 90: Analyse de variance du nouveau modèle de Rc07	153
Tableau 91: Ajustements et diagnostics pour les observations aberrantes du modèle de Rc07 retenu	154
Tableau 92 : Résistances en compression à 28 jours des bétons fluides formulés à partir des plans d'expérience	162
Tableau 93: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i, A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc28 des bétons fluides	164
Tableau 94: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i, A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc28 retenu	165

Tableau 95: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de Rc28	166
Tableau 96: Analyse de variance du nouveau modèle de Rc28	166
Tableau 97 : Test à l'affaissement ou Slump-Test des bétons fluides formulés à partir des plans d'expérience	173
Tableau 98: Tableau donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides	174
Tableau 99 : Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST retenu	175
Tableau 100: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de ST	176
Tableau 101: Analyse de variance du nouveau modèle de ST	176
Tableau 102: Retraits des BFL formulés à partir des plans d'expérience	183
Tableau 103: Coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides	184
Tableau 104: Coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides	185
Tableau 105: Tableau donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides	185
Tableau 106 :Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de R retenu	187
Tableau 107: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de retrait R des bétons fluides	187
Tableau 108: Analyse de variance du nouveau modèle des retraits R des bétons fluides	187
Tableau 109: Compacités des BFL formulés à partir des plans d'expériences	194
Tableau 110: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de $C[\%]$ des bétons fluides	195
Tableau 111: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de compacité $C[\%]$ retenu	196
Tableau 112: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de compacité $C[\%]$	197
Tableau 113: Analyse de variance du nouveau modèle de compacité $C[\%]$.	197
Tableau 114 : Détails de calcul de coefficient de déboursé K_1	207
Tableau 115: Calcul du prix pour confectionner 1m^3 de BO_1 (Q400)	208

Tableau 116: Calcul du prix pour confectionner 1m ³ de BO ₂ (Q350)	209
Tableau 117: Calcul du prix pour confectionner 1m ³ de BO ₃ (Q350)	210
Tableau 118: Calcul du prix pour confectionner 1m ³ de BFL ₁ (Q400)	211
Tableau 119: Calcul du prix pour confectionner 1m ³ de BFL ₂ (Q350)	212
Tableau 120: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BFL₆ (Q350)	213
Tableau 121 : Calcul du prix pour confectionner 1m ³ de BFL ₁₉ (Q400)	214
Tableau 122: Récapitulation des PU des bétons	215
Tableau 123 : Tableau de PARETO sur les prix unitaires des bétons	217

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différence de composition de BO et d'un BFL	4
Figure 2: Mécanisme d'action du superplastifiant type acrylique	5
Figure 3 : Abaque permettant de déterminer C en fonction de l'affaissement et du rapport C/E.....	30
Figure 4 : Exemple de tracé de courbe de référence et de détermination des proportions des granulats	34
Figure 5: Présentation de l'essai d'équivalent de sable	64
Figure 6 : Courbes d'analyse granulométrique des sables Sr_1 , Sr_2 et Sc	76
Figure 7 : Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sr_1	77
Figure 8: Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sc	77
Figure 9: Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sr_2	78
Figure 10 : Courbe granulométrique de gravillon g1 (5/12,5)	80
Figure 11: Courbe granulométrique des granulats et courbe de référence – Détermination des pourcentages volumiques des granulats de BO_1	88
Figure 12: Valeurs d'affaissement des BFL en fonction de la proportion de fines d'ajout de filler cipolin.....	95
Figure 13: Résistances en compression des BFL en fonction du Temps.....	97
Figure 14: Détermination des pourcentages volumiques des granulats du BO_2	100
Figure 15 : Affaissements des BO et des BFL	109
Figure 16: Compacités des BFL.....	109
Figure 17: Evolution des résistances en compression des BO et des BFL.	110
Figure 18 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. BoukliHacene, 2010].....	115
Figure 19: vocabulaire de base des plans d'expériences	117
Figure 20 : Effet de facteurs à étudier	120
Figure 21: Exemple de matrice des effets	121
Figure 22 : Surface des réponses	125
Figure 23 : Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental	126
Figure 24 : Représentation de niveaux du facteur dans un plan factoriel complet	126
Figure 25 : Triangle de Feret, 1892.....	130
Figure 26: Matrice des effets	136
Figure 27: Matrice des effets avec ses interactions	137
Figure 28 : Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de Rc_{07} pour un risque $\alpha = 0,1$	155
Figure 29 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc_{07}	155
Figure 30: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de Rc_{07}	156
Figure 31: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de Rc_{07}	157

Figure 32: Iso-réponses de Rc07 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1$ et $r_{Sp} = 1$)	158
Figure 33: Iso-réponses de Rc07 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1$)	158
Figure 34: Iso-réponses de Rc07 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1,5$)	159
Figure 35: Optimisation des réponses Rc07	161
Figure 36: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de Rc28 pour un risque $\alpha = 0,1$	167
Figure 37 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc28	168
Figure 38: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de Rc28	169
Figure 39: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de Rc28	169
Figure 40: Iso-réponses de Rc28 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1$ et $r_{Sp} = 1$)	170
Figure 41: Iso-réponses de Rc28 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1$)	170
Figure 42: Iso-réponses de Rc28 en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1,5$)	171
Figure 43: Optimisation des réponses Rc28	172
Figure 44 : Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de ST pour un risque $\alpha = 0,1$	177
Figure 45 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de ST	178
Figure 46 : Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de ST	178
Figure 47: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de ST	179
Figure 48: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1$ et $r_{Sp} = 1$)	180
Figure 49: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1$)	180
Figure 50: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1,5$)	181
Figure 51: Optimisation des réponses ST	182
Figure 52: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de R pour un risque $\alpha = 0,1$	189
Figure 53 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de retrait $R[\%]$	189
Figure 54 : Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de retrait R	190
Figure 55: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de retrait R	190
Figure 56: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1$ et $r_{Sp} = 1$)	191
Figure 57: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1$)	192

Figure 58: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1,5$)	192
Figure 59: Optimisation des réponses R.....	193
Figure 60: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de compacité $C[\%]$ pour un risque $\alpha = 0,1$	198
Figure 61 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de compacité $C[\%]$	199
Figure 62: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de compacité $C[\%]$	199
Figure 63: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de compacité $C[\%]$	200
Figure 64: Iso-réponses de $C[\%]$ en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1$ et $rSp = 1$)	201
Figure 65: Iso-réponses de compacité $C[\%]$ en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1$).....	201
Figure 66: Iso-réponses de $C[\%]$ en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1$ et $rSp = 1,5$)	202
Figure 67: Optimisation des réponses compacité $C[\%]$	203
Figure 68: Prises de décision	216
Figure 69 :Répartition des zones A, B et C des prix unitaires des bétons.....	218

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Carrière de la société SCB	16
Photo 2 : Sable sur la pente de la digue à Ambatofotsy	17
Photo 3: Tamisage de gravillon sur un tamis de 12,5 mm	17
Photo 4: Tamisage de gravillon sur un tamis de 5 mm.....	18
Photo 5 : Test à l'affaissement au cône d'Abrams du BO	48
Photo 6 : Moules cylindriques en acier rempli du BFL	53
Photo 7 : Bac rempli d'eau contenant des éprouvettes cylindriques 16 *32 cm .	53
Photo 8 : Essai de compression des éprouvettes cylindriques du BFL.....	55
Photo 9:Machine pour essai MDE	69
Photo 10: Série des tamis.....	71

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Fiche technique du ciment CEM II/A 42,5n Holcim.....	A
Annexe 2 : Carrière PK 18 RN4 de la société SCB S.A Madagascar	B
Annexe 3 :Site de prélèvement de cipolin.....	C
Annexe 4: Fiche technique de la dolomie D40 de Prochimad	D
Annexe 5: Fiche technique du superplastifiant viscocrète tempo12.....	E
Annexe 6 : Fiche technique de superplastifiant rhéobuild 561	G
Annexe 7: Description des normes relatives au béton	I
Annexe 8 : Prix unitaires des bétons fluides	J
Annexe 9:Table de distribution de STUDENT	AA
Annexe 10:Table de FISHER Snedcor	BB
Annexe 11: Extraits de la série des prix 1962 donnant les temps unitaires des Ouvriers, des matériels et outillages à Madagascar.....	30

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFGC	Association Française de Génie Civil
ANOVA	Analysis Of Variance
BA	Béton armé
BAP	Béton AutoPlaçant
BFL	Béton Fluide
BFLHC	Béton Fluide à Haute Compacité
BHP	Béton à Haute Performance
BO	Béton Ordinaire
BP	Béton Precontraint
BTHP	Béton à Très Haute Performance
CES	Centre d'Essais des Structures
CNRIT	Centre Nationale de Recherches Industrielles et Technologiques
CML	Carré Moyen associé à la Liaison
CMR	Carée Moyen associé à des résidus
CPC	Cahier Prescription Commune
CPJ	Ciment Portland avec Ajout
CPA	Ciment Portland Artificiel
DTU	Document Technique Unifié
GEMRE	Groupe d'étude de la méthodologie de reconnaissance et des essais
JIRAMA:	Jiro sy Rano Malagasy
LNTPB :	Laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiments
NSN	Non significatif
PK	Point kilométrique
RN	Route Nationale
Réf	Référence

SCB	Société de Construction et des Bâtiments
SCER	Somme des carrés des écarts due à des résidus
SCEL	Somme des carrés des écarts due à la liaison
SN	Significatif
STCE	Somme totale des carrés des écarts
TS	Test de signification

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

C	Dosage en ciment pour 1 m ³ de béton
C	<i>Compacité</i>
LA	Coefficient de Los Angeles
C.V	Coefficient volumétrique
C.A	Coefficient d'Applatissement
D _{max}	Diamètre maximal des granulats
d _{Sp1}	Densité du superplastifiant Sika viscocrète tempo 12
d _{Sp2}	Densité du superplastifiant Rhéobuild 561
E	Dosage en eau pour 1m ³ de béton
ES	Équivalent du sable
F _C	Filler cipolin
F _D	Filler dolomie
F	Fillers (mélange de F _{CP} et de F _D)
FI	Coefficient d'aplatissement
g ₁	Gravillon de classe 5/12,5 de la carrière artisanale de Vontovorona
g ₂	Gravillon de classe 5/15 de la carrière PK18 RN4 du SCB
G	Gravillon de classe 5/25 de la carrière PK18 RN4 du SCB
MA	Module d'alumine
MDE	Micro-Deval en présence d'eau
MC	Module de chaux
Mf	Module de finesse
Mf _{Sc}	Module de finesse de sable de carrière

Mf_{Sr}	Module de finesse de sable de rivière
MS	Module de silice
P	<i>Porosité</i>
R	Retrait du béton
R_c	Résistance en Compression
Sc	Sable de carrière
Sp_1	Superplastifiant sika viscocrete tempo 12
Sp_2	Superplastifiant rhéobuild 561
Sp	Superplastifiant (mélange de Sp_1 et de Sp_2)
Sr_1	Sable de rivière de gisement d'Ikopa Anosizato Est
Sr_2	Sable de rivière de gisement de la rivière Sisaony Ambatofotsy
Sc	Sable de carrière du SCB
ST	Slump-Test ou test à l'affaissement
V_a	Volume d'air
$V_{p\grave{a}te}$	Volume absolu de la pâte du béton
V_t	Volume total
V_{vide}	Volume du vide
W	Teneur en eau
δ	Coefficient de compacité
Φ	Vide
ρ	Masse volumique apparente
σ	Masse volumique absolue

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les bétons fluides ont été développés depuis une vingtaine d'années. Ils sont encore actuellement classés comme de nouvelles gammes de bétons, car une attention grandissante est portée à leurs formulations.

La spécificité des bétons fluides par rapport aux bétons traditionnels réside par le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans une zone très ferraillée ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessible.

La formulation habituelle des bétons consiste à faire varier les paramètres du mélange et mesurer ses effets sur les comportements du béton à l'état frais et à l'état durci.

Cette démarche est très longue et résulte des renseignements un peu plus limités sur les bétons. Pour cela, un modèle expérimental a été envisagé pour donner des informations très précises sur les bétons fluides. Ce modèle est basé sur les plans d'expériences dont le but est de les modéliser mathématiquement afin d'évaluer l'influence de ses paramètres et ses interactions. C'est dans cet esprit que nous avons opté pour le thème de notre recherche : « **Formulations et modélisations mathématiques des comportements des bétons fluides à haute compacité par des plans d'expériences** ».

Dans le cadre de cette étude, des différentes formulations sont adoptées dans le but de pouvoir comparer notamment la fluidité, la durabilité, les performances mécaniques ainsi que les prix de revient des bétons.

Le principal objectif de ce travail est de formuler, ensuite de modéliser les bétons fluides à haute compacité en suivant les plans d'expériences. Dans ce cas, nous avons essayé d'adopter des nouvelles formules et des hypothèses au niveau des résistances en compression, des affaissements avec des matières premières qui vont spécifier ces bétons.

L'étude comprend quatre parties :

- Une première partie, qui est consacrée à une étude théorique sur les bétons fluides. Des généralités, de la provenance et des natures des matériaux sont présentés.
- Une deuxième partie qui est les études techniques. Elle concerne les formulations des bétons fluides à haute compacité. Nous comparons dans cette partie les résistances mécaniques, la fluidité des bétons fluides à haute compacité.
- Une troisième partie, qui traite la modélisation des bétons fluides par des plans d'expériences. Des généralités et des modèles mathématiques sur les résultats de formulations sont alors exposés. Grâce au logiciel minitab 19.2, nous pouvons analyser l'influence des facteurs et interactions dans les modèles obtenus.
- Ensuite, une quatrième partie qui parle des études économiques et environnementales.

Et enfin, nous terminons ces travaux par une conclusion qui met en lumière les fruits de notre recherche.

PARTIE I: APPROCHES THÉORIQUES SUR LES BÉTONS FLUIDES

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS FLUIDES

I. PROPRIÉTÉ DES BÉTONS FLUIDES [1]

Les bétons fluides (BFL) sont des bétons capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et en place (absence de ségrégation statique).

La mise en place sous le seul effet de la gravité nécessite une grande fluidité du mélange, mais il est aussi indispensable que le béton fluide conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité. Le béton doit être assez fluide pour remplir les coffrages sans apport de vibrations sous l'effet de son propre poids.

Les bétons fluides y compris les bétons autoplaçants (bétons très fluides) sont formulés différemment du béton classique, car il s'agit de concilier deux propriétés contradictoires: la fluidité et la stabilité. En général, les bétons fluides possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires (BO), ainsi que le volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons (figure 1). Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la formulation choisie.

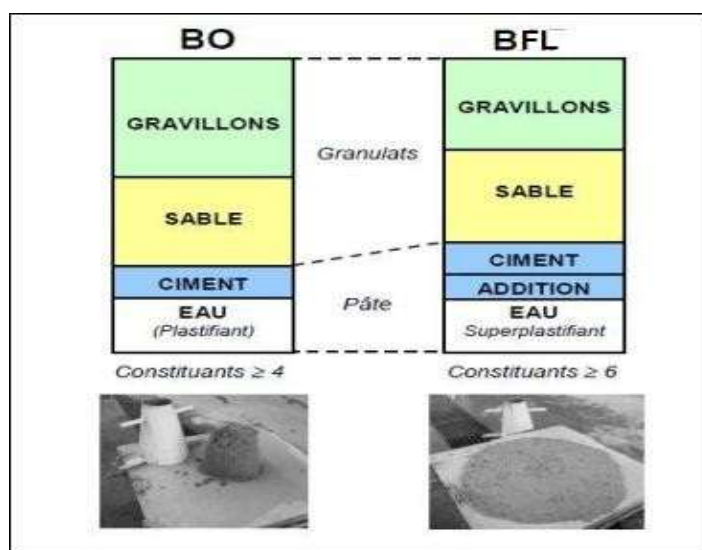


Figure 1 : Différence de composition de BO et d'un BFL

II. INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS A L'ÉTAT FRAIS DU BÉTON FLUIDE [1][2][3]

1. Influence des superplastifiants

L'apparition des bétons fluides, des bétons autoplaçants (BAP), et des bétons à haute performance (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et particulièrement celui des super-plastifiants.

L'action principale des super-plastifiants est de de-floculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électrostatiques présentes à la surface des grains et/ ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les flocs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton. Il est donc possible de mettre en œuvre des bétons fluides, avec des rapports E/C faibles.

Le superplastifiant interagit avec les particules du mortier (ciment et additions) en s'absorbant à leurs surfaces comme indique la figure 2.

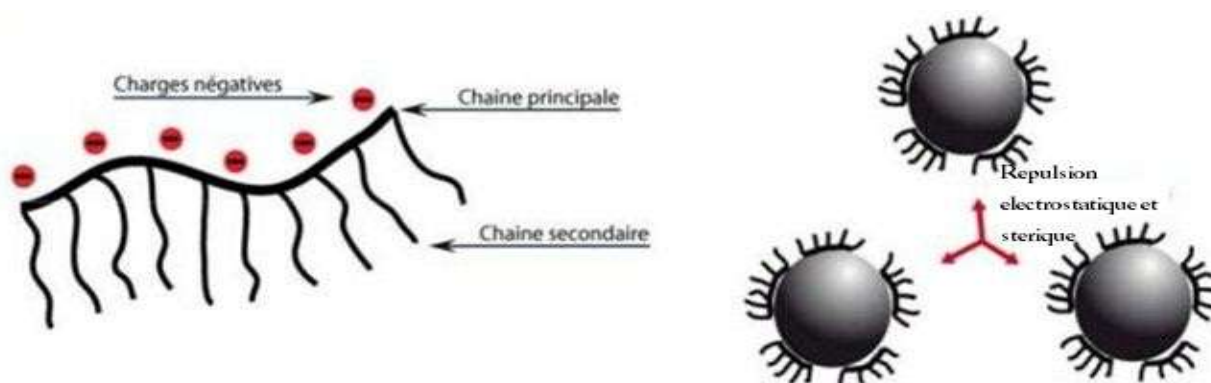


Figure 2: Mécanisme d'action du superplastifiant type acrylique

2. Influence des fines d'ajout

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégations et de ressuage, les BFL contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels.

La quantité de pâte joue un rôle important dans la fluidité, car l'ajout des fines réduit les interactions entre les plus gros grains. Il est donc nécessaire dans le cas des bétons fluides de remplacer une partie du ciment par des additions minérales.

Différentes additions sont citées dans la littérature : Calcaire, Cendres volantes, Laitiers de haut fourneau, Schistes calcinés, Fumée de silice, Fillers.

- **Calcaires (L)**

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux d'un ciment composé. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.

- **Laitier granulé de haut fourneau(S)**

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

- **Cendres volantes (V ou W)**

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue: Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques; Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.

- **Schistes calcinés (T)**

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.

- **Fumée de silice (D)**

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (ordre de 0,1 μm). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.

- **Fillers (F)**

Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

3. Influence de volume de pâte élevé [4][5]

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage du béton. C'est pourquoi les BFL contiennent un volume de pâte (ciment +additions +adjuvants+eau + air) important, typiquement de 330 à 400 L /m³ dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres. Le volume de pâte dans un béton fluide représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel, il est de 20 à 35% et qu'un superplastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

4. Influence de volume de gravillons [5]

Il est possible d'utiliser un gravillon concassé ou roulé pour la formulation du béton fluide.

Comme les gravillons sont à l'origine de blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter leur volume. D'un autre côté, la présence des gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et les résistances souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport G/S de l'ordre de 1 pour les bétons fluides.

III. MISE EN OEUVRE DES BÉTONS FLUIDES [6][7]

La principale différence, entre un béton fluide et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un béton fluide est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place.

Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale. En termes de mise en œuvre, les bétons fluides offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration.

Les caractéristiques du béton fluide autorisent des cheminements horizontaux importants (10 m maximum d'après l'AFGC). Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage).

Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des bétons fluides nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages.

Il est important de limiter leur hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage.

Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de l'intervalle 5-25°C, des dispositions particulières sont à prendre.

Une attention particulière doit être portée à la cure des bétons fluides, c'est-à-dire à la protection de mise en œuvre pour éviter l'évaporation, et particulièrement dans le cas d'applications horizontales. Le faible ressuage des bétons fluides les rend en effet plus sensibles au retrait plastique. D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre.

IV. QUELQUES OUVRAGES RÉALISÉS AVEC DES BÉTONS FLUIDES A MADAGASCAR [8]

La tour Orange à Ankorondrano a été réalisée avec du béton fluide pour faciliter sa mise en œuvre, compte tenu de la hauteur du bâtiment qui est de trente étages et en plus, dans un souci d'avoir la meilleure qualité de parement possible, aussi bien que de la résistance à la compression optimale, conformément au cahier des charges. Cet ouvrage a été réalisé par la société COLAS Madagascar.

Comme la Société de Construction du Bâtiment (SCB), la société COLAS dispose d'une centrale de « béton prêt à l'emploi » qui est exploitée pour leurs chantiers respectifs, aussi bien que pour la vente aux particuliers et aux Petites et Moyennes Entreprises (PME).

Les constituants dudit béton fluide sont sensiblement identiques au BAP parce qu'en plus de sa composition (eau+ciment+granulats+fines), on utilise d'adjuvant tel que le superplastifiant.

Ladite société utilise aussi du béton très fluide pour les fondations sur pieux dans le but de faciliter la mise en œuvre, d'avoir une rapidité d'exécution et afin d'obtenir la résistance à la compression prescrite dans le cahier des charges de l'ouvrage à réaliser. Tel était le cas des pieux pour la fondation du pipeline d'Ambatovy.

D'après la SCB, elle a déjà réalisé des ouvrages avec du béton fluide ou béton très fluide depuis quelques années. Ce sont surtout les entreprises chinoises qui recommandent ces types de bétons (exemple : les pieux de fondation du nouveau Bâtiment de l'INSCAE sis au 67 ha et autres).

De ce fait, beaucoup de Bâtiment et d'ouvrage sont déjà réalisés avec des bétons fluides et très fluides, qui ont à peu près la même formulation que le BAP, mais seulement, les grandes entreprises les utilisent suivant la demande des maîtres d'œuvre ou des architectes, sans pour autant maîtriser la formulation conformément à la norme requise du BAP.

Chapitre II : PROVENANCE DES MATÉRIAUX POUR LA FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES

I. GÉNÉRALITÉS [8]

Les trois composants de base d'un béton sont : l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance mécanique. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes et chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

Le ciment Portland est un mélange composé, suivant le cas, de clinker, de gypse, finement broyé et d'ajouts éventuels. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. La finesse est souvent caractérisée par sa surface massique ou surface de Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse ; elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C suivis d'une trempe de mélange d'environ 80 % de calcaire (CaCO_3) et 20 % d'argile. L'argile est composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'autres phases qui sont présentées à faible proportion telle que l'oxyde de fer (Fe_2O_3), le magnésium (MgO), l'oxyde de potassium (K_2O), l'oxyde de sodium (Na_2O). Ces oxydes sont présents dans le clinker sous forme de cristaux de silicate tricalcique C_3S (Ca_3SiO_5) dénommé alite), de silicate bicalcique C_2S et d'autres phases mineures. Le C_2S , le C_3A et le C_4AF représentent respectivement 15 à 30 %, 5 à 10 % et 5 à 15 % du clinker classique.

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau est constituée de molécules polaires de H_2O .

Ces particules exercent les unes et les autres des forces d'attraction de type Van der Waals qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologiques. L'eau étant un milieu diélectrique, elle modifie les forces intergranulaires et son action n'est pas négligeable pour les grains très fins (ciment et les fines).

Les superplastifiants sont des adjuvants à haut pouvoir de réduction d'eau. Ils ont pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. À titre indicatif, les superplastifiants permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35 % tout en gardant une même maniabilité.

Dans le béton, la pâte qui est le mélange de ciment et d'eau et éventuellement avec des ajouts, présente à l'intérieur du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. C'est l'élément actif du béton et elle représente environ 30 % du volume du béton. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans cette pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte due au retrait.

Les choix des matériaux pour bétons dépendent :

- De la règle de l'art dans la construction du point de vue technique.
- De l'exigence du Maître d'ouvrage du point de vue esthétique.
- Et enfin, du coût du projet du point de vue économique.

Les matériaux pour la réalisation des travaux en béton doivent satisfaire aux normes fixées par la présence de spécification particulière.

Les matériaux à mettre en œuvre devront conduire à la résistance requise ; ils seront conformes aux spécifications du Cahier de Prescription Commune (CPC) à la Norme de Recueil des Prescriptions Techniques applicables aux Travaux de Bâtiment à Madagascar (TBM) complétés le cas échéant par les prescriptions des Normes Françaises (NF) et le Document Technique Unifié (DTU).

Les matériaux pourront être également acceptés s'il correspond à d'autres normes couramment admises.

II. CEMENTS [9][10]

Plusieurs normes sont utilisées, pour la normalisation des ciments. À Madagascar, les normes en vigueur et utilisées par les laboratoires de contrôle sont celles publiées par l'AFNOR.

La norme de référence des ciments courants est la norme européenne EN 197-1 publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1, est subdivisée en trois rubriques :

- Une première partie descriptive qui définit les constituants du ciment et délimite les différents types de ciments ;
- Une deuxième partie qui fixe les classes de résistance, les spécifications mécaniques et physico-chimiques ;
- Une troisième partie consacrée aux critères de conformité, les procédures de leur vérification et les seuils de garantie.

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants (tableau1) suivant :

Tableau 1 : Types de ciment selon sa nature et sa proportion des constituants

TYPES	DÉSIGNATIONS
Ciment Portland	CEM I
Ciments Portland Composés	CEM II/A, CEM II/B
Ciments de Haut Fourneau	CEM III/A, CEM III/B, CEM III/C
Ciments Pouzzolaniques	CEM IV/A ou CEM IV/B
Ciments composés	CEM V/A ou CEMV/B

Source : Norme NF EN 197-1 en 1981

Dans toute l'expérience, le ciment Manda CEM II/A 42,5 N de classe 42,5 provenant de la société HOLCIM Madagascar est utilisé. Il est vendu dans toutes les quincailleries dans un sac de 50 Kg. Sa densité relative est de 3,1.

La société HOLCIM Madagascar offre une gamme des produits des ciments, LOVA, ORIMBATO, MANDA, respectueuse des normes en vigueur, au profit des consommateurs. Ladite société possède deux usines de production des ciments à Madagascar comme indique le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Type et classe des ciments de la société HOLCIM Madagascar

USINES	TOAMASINA	IBITY ANTSIRABE
LOVA	CEM IVB -V 22,5 N	CEM II/A -P 22,5
ORIMBATO	CEM IV/A -V 32,5 N	CEM II/A -P 32,5
MANDA	CEM IV/A—V 42.5 N	-

Source : HOLCIM Madagascar 2016

Selon la société HOLCIM Madagascar, le ciment LOVA signifie « Héritage », est recommandé pour les constructions des travaux de maçonnerie et des bétons pour le bâtiment R+1.

Le ciment ORIMBATO, signifie « Fondations » est recommandé pour les constructions des bétons des bâtiments R+1, R+2, R+3 et R+4. On différencie les ciments ORIMBATO produits par les deux usines par sa désignation : ils ont la même classe, mais le ciment ORIMBATO CEM IV/A de l'usine de Toamasina est utilisé dans les travaux de construction en milieu agressif (bord de Mer).

Le ciment MANDA signifie « Forteresses » il est recommandé pour les ouvrages d'Art (Pont ...) et pour les bétons fortement sollicités.

Les dosages de chaque constituant des bétons Q350 et Q400 sont indiqués sur le sac de ciment, selon les tableaux 3 et 4 suivants :

Tableau 3 : Dosage des bétons correspond à Q350 pour un sac de ciment de HOLCIM Madagascar

DOSAGE	Type de ciment	Ciment [kg]	Gravillon [l]	Sable [l]	Eau [l]
Q350	LOVA	50	100	70	25
	ORIMBATO	50	100	70	25
	MANDA	50	100	70	25

Source : HOLCIM Madagascar 2016

Ces dosages élaborés par la société HOLCIM correspondent au dosage de 350 Kg/m³ (350 Kg de ciment par m³ de béton).

Tableau 4 : Dosage des bétons correspond à Q400 pour un sac-ciment de HOLCIM Madagascar

DOSAGE	Type de ciment	Ciment [kg]	Gravillon [l]	Sable [l]	Eau [l]
Q400	LOVA	50	90	60	25
	ORIMBATO	50	90	60	25
	MANDA	50	90	60	25

Source : HOLCIM Madagascar 2016

Ces dosages élaborés par la société HOLCIM correspondent au dosage de 400 Kg/m³ (400 Kg de ciment par m³ de béton) de ciment.

Selon la norme et la règle de construction de TBM, les dosages d'un mètre cube de béton Q350 sont le suivant (Tableau 5) :

Tableau 5 : Dosages de chaque constituant du béton Q350 dans un mètre cube selon la norme TBM

TYPE DE BÉTON	Ciment [Kg]	Gravillon [m ³]	Sable [m ³]	Eau [L]
Q350	350	0,800	0,400	170

Source : Norme recueillie par le TBM 2016

Les prix de vente des ciments conseillés par la société HOLCIM Madagascar sont représentés par le tableau 6 suivant :

Tableau 6 : Prix de vente des ciments de la société HOLCIM Madagascar

NOMS DES CEMENTS	PRIX D'UN SAC DE 50 Kg [Ar]
LOVA	22 000
ORIMBATO	28 500
MANDA	32 000

Source : HOLCIM Madagascar 2018

III. GRANULATS [11][12]

Les granulats sont des fragments de roche, d'une taille inférieure à 125 mm, ils constituent le squelette du béton. Selon les formulations retenues, ils forment de 70 à 90 % en masse d'un mètre cube de béton. Ils peuvent provenir du carrière ou extraits du lit de rivières.

Le granulat est caractérisé par sa granularité. Cette granularité est déterminée par analyse granulométrique. De là, on déduit sa classe granulaire en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée par la dénomination d/D, des dimensions exprimées en millimètre.

On peut classer les granulats par ses dimensions selon le tableau 7 suivant

Tableau 7: Classification des granulats par grosseur

GRANULATS		DIAMÈTRES DES PASSOIRES [mm]	MAILLE DES TAMIS [mm]
Fines ou Fillers		-	< 0,08
Sables	Fins	-	0,08 à 0,315
	Moyens	-	0,315 à 1,25
	Gros	-	1,25 à 5
Gravillons	Petits	5 à 10	-
	Moyens	10 à 16	-
	Gros	16 à 25	-
Pierres cassées	Petits	25 à 40	-
	Moyens	40 à 63	-
	Gros	63 à 100	-
Moellons ou galets		> 100	-

1. Les sables

Les sables comprennent tous les éléments refusés au tamis de 80 μm et passant à travers le tamis de 5 mm.

Les sables sont subdivisés en ;

- Sables fins, dont les diamètres des grains variant de 80 μm à 316 μm .
- Sables moyens, dont les diamètres des grains variant de 316 μm à 1,25 mm ;
- Sables gros, dont les diamètres des grains variant de 1,25 mm à 5 mm.

Le tableau 8 suivant montre les modules et la série des tamis normalisés, utilisés pour faire l'analyse granulométrique des sables :

Tableau 8: Séries de tamis normalisé pour le sable

Diamètre des Tamis [mm]	Module AFNOR
0,080	20
0,160	23
0,250	25
0,315	26
0,500	28
0,630	29
1	31
1,250	32
2	34
2,500	35
3,150	36
5	38

Source : Norme AFNOR

Le module d'un tamis est calculé par la relation suivante :

$$\text{Module} = 31 + 10 \log D \quad (1)$$

Avec D, le diamètre de tamis exprimé en [mm]

Pour ces études, nous avons choisi deux types de sable :

1.1. Sable de carrière

Les sables de carrière utilisés proviennent de la carrière de la société SCB du groupe RAJABALI qui se trouve sur la route nationale 4 (RN4) du point kilométrique 18 (PK 18) sis à Anosiala – District d’Ambohidratrimo.

La société produite de sable de carrière 0/5, qui leur est utile pour l’approvisionnement de leur centrale à « béton prêt à l’emploi » d’Antananarivo-Sud.

Les bétons fabriqués par ladite centrale sont destinés pour leurs chantiers de construction à Antananarivo et ses environs et surtout mis en vente au public.

La photo 1 suivante montre la carrière de la société SCB.



Photo 1: Carrière de la société SCB

1.2. Sable de rivière

Pour les sables de rivière, nous avons utilisé deux types des sables de rivière, l’un vient de la rivière d’Ikopa prélevé à Anosizato, près de l’hôtel Silver Star. L’autre provient de la rivière Sisaony à l’entrée du pont d’Ambatofotsy en direction vers Ampitatafika. Nous avons choisi les sables plus propres et le plus gros.

La photo 2 montre l’extraction artisanale des sables de la rivière Sisaony d’Ambatofotsy.



Photo 2 : Sable sur la pente de la digue à Ambatofotsy

2. Les gravillons

Nous avons utilisé, les gravillons concassés provenant de la carrière artisanale de Vontovorona et de la carrière à ciel ouvert exploité par la société SCB (PK18 RN4). Ces gravillons ont une forme plus ou concave. Ils sont issus d'un concassage d'une roche granitique.

Les gravillons produits par la carrière de la société SCB sont les suivants :

- Gravillons 3/8
- Gravillons 4/10
- Gravillons 8/15
- Gravillons 5/15
- Gravillons 15/25

Par contre, les gravillons exploités artisanalement de la carrière Vontovorona n'ont pas des dimensions précis. Ces gravillons sont alors tamisés sur un tamis de maille 12,5 mm puis sur un tamis de 5 mm, ce qui permet d'obtenir le gravillon de classe granulaire 5/12, 5 comme l'indique les photos 3 et 4 suivantes.



Photo 3: Tamisage de gravillon sur un tamis de 12,5 mm



Photo 4: Tamisage de gravillon sur un tamis de 5 mm

Sur la carrière artisanale, les prix de gravillons sont donnés par le tableau 9 suivant

Tableau 9 : Prix de vente des gravillons de fabrication artisanale de la carrière Vontovorona

Gravillons	Unité	PVHT [Ar]
Gravillons 5/15	m ³	80000
Gravillons 15/25	m ³	70000

Source : Enquête sur Terrain 2018

La société SCB vend des granulats pour béton dont les prix hors taxe sont indiqués dans le tableau 10 ci-après.

Tableau 10 : Prix de vente hors taxe des granulats produits par la société SCB

Granulats	Unité	PVHT [Ar]
Sable de carrière 0/5	m ³	55 000
Gravillons 3/8	m ³	70 000
Gravillons 4/10	m ³	65 000
Gravillons 8/15	m ³	65 000
Gravillons 5/15	m ³	65 000
Gravillons 15/25	m ³	80 000

Source : Société SCB 2018

IV. FILLERS [13]

Les fillers signifient « remplissage », également appelé fines d'addition sont un granulat fin de 0 à 125 µm. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des mortiers et bétons (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

Les additions doivent être conformes aux diverses normes en vigueur. On distingue :

- Cendres volantes silico-alumineuses,

- Laitiers de haut fourneau,
- Fillers calcaires,
- Fillers siliceux,
- Éventuellement ultrafines (fumées de silice) ;

Dans nos études, nous avons choisi deux types des fillers calcaires. Ce sont les fines de roche de cipolin broyé et la dolomie micronisée.

1. Filler cipolin [13]

Les cipolins sont des roches, riche en calcaire, utilisés dans la fabrication de chaux et comme ajout dans l'industrie du ciment et de béton.

Le cipolin broyé est utilisé comme filler calcaire dans la formulation de béton. L'utilisation de ce filler calcaire permet d'améliorer la résistance mécanique de béton, car d'une part elle permet d'améliorer la densité de la matrice du béton en général et plus spécifiquement de la zone de transition pâte - granulats.

D'autre part, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation.

1.1. Propriétés des cipolins

1.1.1. Caractéristiques mécaniques

Il est important de connaître les caractéristiques mécaniques des cipolins.

Les cipolins ont une résistance à la compression environ de 50 à 60 MPa.

1.1.2. Constituants chimiques

Les cipolins sont constitués d'au moins 70 % de calcite, et d'autres minéraux comme la dolomite, l'aragonite, la silice, la sidérite et l'argile, qui influent sur sa couleur.

En général, les cipolins ont une couleur blanche. Ils peuvent se présente comme des teintes de jaune, gris ou brun.

1.2. Quelques gisements de cipolin à Madagascar

1.2.1. Gisement de cipolin dans la région d'Ambatondrazaka

Dans cette région, les cipolins sont utilisés pour la préparation de chaux et pour l'empierrement des routes.

Il s'agit de bancs lenticulaires, de dimensions réduites, encaissés dans une série de gneiss migmatitiques à intercalations d'amphibolites et de proxénètes.

Le gisement d'Ambatondrazaka se divise comme suit :

- Ambato ($x = 607,8$; $y = 917,1$), se trouve à 1 km au sud de la voie ferrée (3 Km à l'ouest d'Ambatondrazaka) a des réserves exploitables de 255 000 m³. Le pendage est de 30 à 40° NE.
- Antsahamarova ($x = 613,8$; $y = 917,8$), situé à 2 km au sud-est d'Ambatondrazaka. Ce gisement est constitué d'un banc de cipolin de 25 m de puissance sur 400 m de long, à pendage de 30-40°. Les réserves exploitables atteignent 300000 m³. Les conditions d'exploitation sont médiocres.
- Anosibe, situé entre la voie ferrée et le gîte d'Ambato. Ce gisement est formé de 4 bancs de cipolins de 4 m d'épaisseur, s'allongeant sur 500 m. Les réserves exploitables à vue sont de 100000 m³
- Ambohiboatava ($x = 605,20$; $y = 920,1$) ; il s'agit d'un banc de cipolin de 20 m de puissance sur 200 m d'allongement visible, à pendage 45°. Les réserves exploitables n'atteignent que quelques milliers de m³.

Au point de vue qualitatif, la composition chimique des cipolins dans la région d'Ambatondrazaka ne les rend pas utilisables pour les charges ou les usages chimiques. Leur seule utilisation est celle qui se pratique actuellement, c'est-à-dire les fours à chaux et l'empierrement.

1.2.2. Gisement des cipolins dans la région Vakinakaratra

- Ibity ($x = 457,700$; $y = 671,900$), à 26 km au sud d'Antsirabe, accessible par route, renferme les plus importantes occurrences de cipolin calcaire, non dolomitique, de la région centrale. Ces cipolins forment des horizons épais, encaissés dans des micaschistes, suivant une direction NW-SE.
- « Carrière Ibity », se trouve dans la partie sud-est. Les cipolins présentent 150 à 280 m de largeur dans cette carrière. Le pendage est de 45° 80° Sud.
- Ibity centre, situé dans la partie centrale. Ce secteur renferme des lentilles de pegmatites.

- Collines des Aloès, situés dans la partie nord-ouest. Les cipolins forment ici plusieurs bancs à structure complexe, avec de nombreuses enclaves de quartzite, de granite et de pegmatite. La partie nord, au mur, devient nettement dolomitique.

2. Filler dolomie

À Madagascar, deux sociétés importantes qui travaillent en parallèle, exploitent et traitent la dolomie et différentes autres substances. Il s'agit de PROCHIMAD et SOMADEx.

Elles ont quasi-monopole sur le marché intérieur, n'ayant pas d'autres concurrents à Madagascar et travaillant sur des produits trop pondéreux pour être importées à des prix concurrentiels.

La société PROCHIMAD exploite une carrière de dolomie à Antsirabe et possède une usine près d'Antananarivo destiné à la micronisation et la mise en sacs. Sa capacité est de 7000 T/an, mais sa production reste en deçà de ce chiffre. Actuellement, elle n'exploite pas et vend toute sa production sur Madagascar.

Les produits proposés sont des produits bruts, aucune transformation n'étant effectuée par la société. Ses principaux clients utilisent la dolomie dans la fabrication d'enduits et de peintures.

Les prix proposés sont donnés par le tableau 11 suivant :

Tableau 11 : Prix de la dolomie proposé par PROCHIMAD en 2018

TYPES	Prix d'un sac de 50 Kg en [Ar]	Soit le prix par tonne en [Ar]
DOLOMIE 40 μ	21 000	250 000
DOLOMIE 20 μ	23 000	255 000
DOLOMIE 10 μ	25 000	350 000

Source : Société PROCHIMAD – 2018

V. ADJUVANTS [3]

Les adjuvants sont des produits liquides ou pulvérulents qui s'additionnent en faible quantité au mélange de ciment, de sable et de gravier et d'eau pour optimiser sélectivement les caractéristiques du béton confectionné.

Dans la formulation de béton, elles permettent en l'occurrence de réduire la quantité de l'eau de gâchage et d'améliorer l'étanchéité du béton en lui conservant une bonne ouvrabilité. Les adjuvants influencent la prise et le durcissement du ciment.

1. Types des adjuvants

La norme NBN EN 934-2 décrit les différents types d'adjuvants pour le béton. Pour les revêtements, on distingue :

1.1. Les Plastifiants

Les plastifiants sont à base de ligno-sulfates, d'acides organiques, de sulfonates de mélamine, de sulfonates de naphthalène ou de dérivés de mélamines ou de naphthalène.

Elles sont utilisées pour obtenir une ouvrabilité suffisante : elles ont pour rôle de diminuer la teneur en eau tout en conservant une ouvrabilité déterminée. Cette diminution, jusqu'à 10 l/m³ de béton, permet un meilleur compactage, une résistance plus élevée et une durabilité accrue.

1.2. Super-plastifiants

Elles peuvent être aussi utilisées pour augmenter fortement l'ouvrabilité du béton frais en gardant la même teneur en eau ; ils rendent le béton frais liquide et donc facile à mettre en œuvre avec des moyens de compactage limités.

Les super-plastifiants les plus utilisés sont ceux à base de dérivés de naphthalène ou de mélamines, ainsi que de polyacrylates et de polycarboxylates.

Les super-plastifiants offrent aussi la possibilité de diminuer de manière drastique le facteur E/C du béton tout en conservant une ouvrabilité normale ; la résistance du béton s'en trouve rapidement accrue.

1.3. Entraîneurs d'air

Les entraîneurs d'air ont pour objectif d'introduire dans le béton de petites bulles d'air stables qui se répartissent de manière homogène dans la masse et restent présentes après le durcissement du béton.

L'entraîneur d'air permet d'ajouter une quantité supplémentaire d'air dans le béton et de le répartir de manière uniforme. Cela augmente la résistance du béton aux cycles de gel-dégel et à l'action des sels de déverglaçage.

La présence d'un entraîneur d'air augmente l'ouvrabilité du béton. Par contre, la résistance mécanique du béton diminue à mesure que la teneur en air augmente ; pour certaines compositions, il s'est avéré que le béton pouvait perdre jusqu'à 5 MPa de résistance à la compression pour chaque pour cent d'air supplémentaire.

Avant d'utiliser un entraîneur d'air, il est donc recommandé de réaliser une étude préalable pour s'assurer de l'efficacité de cet adjuvant dans les conditions d'utilisation réelles.

1.4. Retardateurs et accélérateurs de prise

Les retardateurs et les accélérateurs de prise sont parfois utilisés dans des conditions particulières :

- Par temps très chaud, un retardateur de prise peut être ajouté au béton pour en prolonger l'ouvrabilité ;
- Par temps froid, par contre, un accélérateur de prise peut épaissir le béton ; la chaleur d'hydratation qui se libère plus rapidement aidera à protéger le béton frais en train d'acquies sa résistance contre le gel léger.

Le tableau 12 suivant représente les différents types d'adjuvants avec leurs utilisations.

Tableau 12 : Types et utilisations des différents Adjuvants

ADJUVANTS	UTILISATIONS
Superplastifiants	Nécessité d'une bonne ouvrabilité
	Préfabrication
	Bétons à hautes performances
Plastifiants	Transports pneumatiques du béton
	Béton coulé sous l'eau
	Béton maigre : blancs, blocs
	Béton routier
	Sable manquant de fines
	Béton très ferrailé
	Injection (coulis et mortiers)
Accélérateurs	Décoffrage rapide
	Temps froid – préfabrication
	Travaux d'étanchement, cachetage
	Réparation rapide- piste d'aérodrome - route – scellement

ADJUVANTS	UTILISATIONS
Retardateurs	Temps chaud
	Injection à grande profondeur (élévation de température)
	Voile d'étanchéité
	Transport de béton sur une longue Distance
	Reprise de bétonnage – confection de béton avec granulats apparents (parement lavé)
	Parois moulées dans les sols
Entraîneurs d'air	Coulage en continu
	Route, barrage, ponts, travaux
	Ouvrage exposé à l'action des eaux agressives
	Bétons extrudés

Les adjuvants sont incorporés au malaxage du béton dans un maximum de 5 % du poids du ciment. Ils améliorent les qualités du béton à l'état frais ou durci pour faciliter sa mise en œuvre et ses meilleures résistances.

Nous utilisons les adjuvants produits par la compagnie MADECASSE et la société BATPRO.

2. Adjuvants produits par la compagnie MADECASSE

La compagnie MADECASSE distribue des produits SIKA pour bétons et Mortiers.

Le produit Sika est l'un des principaux fabricants de matériaux pour l'industrie de la construction (étanchéité, collage, additifs, adjuvant béton, isolation).

La compagnie MADECASSE vend les produits suivants :

- SIKA PRISE PC2 : c'est un accélérateur de prise et de durcissement du béton, distribué dans un Fut de 250 Kg ou en vrac de 0,5 L à 2L pour les essais au laboratoire.
- SIKAVISCOFLOW - 21 : un super-plastifiant, haut réducteur d'eau multifonction à performances élevées pour bétons et Mortiers.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12, un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent, vendu dans un fut de 250 Kg.

- SIKALATEX, une résine pour l'adhérence et l'imperméabilisation des mortiers ; utiliser pour la réalisation et l'accrochage des enduits et des chapes en ciment
- SUPER SIKALITE, un adjuvant qui rend les mortiers ou les bétons étanches
- PLASTIMENT BV 40, c'est un plastifiant, réducteur d'eau pour béton qui a pour rôle d'améliorer sa résistance mécanique et facilite sa mise en œuvre.

Parmi, ces types d'adjuvant distribué par la compagnie MADECASSE, nous avons choisi, la SIKA VISCOCRETE TEMPO 12, qui a pour rôle d'améliorer la maniabilité et la résistance mécanique du béton.

3. Adjuvants produits par la société BATPRO

Quant à la société BATPRO, elle distribue les adjuvants suivants :

- Rhéobuild 561, un super-plastifiant, haut réducteur d'eau ;
- Le Pozzolith 555, un accélérateur de prise ;
- Le Rhéomac, un hydrofuge.

Dans nos études, nous avons choisi, le Rhéobuild 561, un super-plastifiant, dont l'objectif est de comparer les adjuvants distribués par les deux sociétés.

PARTIE II : APPROCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES BÉTONS FLUIDES

Chapitre III : MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS

I. FORMULATION DES BÉTONS ORDINAIRES PAR LA MÉTHODE DREUX GORISSE [2][3][4]

Cette méthode est une des plus utilisées pour la fabrication du béton. Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés.

Dans la suite, nous allons détailler la démarche.

1. Données de base

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux.

1.1. Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferraillé.

Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferraillées : distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage.

1.2. Ouvrabilité désirée

Elle est en fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massifs ou plus ou moins ferraillé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc...

Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône d'Abrams comme l'indique le tableau 13 suivant

Tableau 13: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône d'Abrams ou au test d'ouvrabilité C.E.S.

PLASTICITÉ	SERRAGE]	AFFAISSEMENT ST en [cm]	NOMBRE DE CHOCS TEST C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	<10

1.3. Diamètre maximal des granulats (D_{\max})

Le diamètre maximal des granulats (D_{\max}) est choisi suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir. Le tableau 14 suivant montre les règles à suivre, en général. Ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis que pour une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuées de 20 % environ.

Tableau 14 : Diamètre maximal du granulat en fonction du ferrailage et de l'enrobage

CARACTÉRISTIQUES DE LA PIÈCE A BÉTON	DIMENSION « D » DES GRANULATS	
e – espacement entre armatures horizontales	$D \leq e$	$D \leq 0,9 e$
c — couverture entre armatures et coffrages	$D \leq 0,8 c$	$D \leq 0,7 c$
r — rayon moyen des mailles de ferrailage	$D \leq 1,85 r$	$D \leq 1,65 r$
r » – rayon moyen du moule (volume à remplir de béton par rapport à la surface totale des parois et armatures)	$D \leq 1,2 r$ »	$D \leq r$ »
hm — épaisseur minimale	$D \leq 0,2 hm$	

2. Dosage en ciment

Le ciment doit être de classe supérieure ou égale à 42,5 selon les hypothèses de la théorie de Dreux. Sinon, on devra utiliser un surdosage, pour les classes 32,5 N et 32,5 R.

Dans tous les cas, c'est la classe vraie du ciment qui influe sur la résistance du béton et donc sur le dosage en ciment.

Nous commencerons par évaluer approximativement le rapport Ciment/Eau (C/E) en fonction de la résistance moyenne désirée R_{C28} .

$$R_{C28} = G \times F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (2)$$

R_C : résistance moyenne en compression désirée à 28 jours en MPa

F_{CE} : classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

G : coefficient granulaire

C : dosage en ciment (en Kg/m^3)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en L/m^3)

Le tableau 15 suivant renseigne sur les valeurs approximatives du coefficient granulaire G en fonction de diamètres D_{\max}

Tableau 15 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

QUALITÉS DES GRANULATS	DIAMÈTRES D DES GRANULATS		
	Fins ($D_{\max} < 16 \text{ mm}$)	Moyens ($25 \text{ mm} \leq D_{\max} \leq 40 \text{ mm}$)	Gros ($D_{\max} > 63 \text{ mm}$)
Excellent	0,55	0,50	0,65
Bonne [courante]	0,45	0,50	0,55
Moyenne	0,35	0,40	0,45

Nous pouvons fixer approximativement le dosage en ciment à l'aide de l'abaque de la figure 3 suivante, en fonction de la valeur de l'affaissement correspondant à l'ouvrabilité désirée et de la valeur du rapport C/E trouvée.

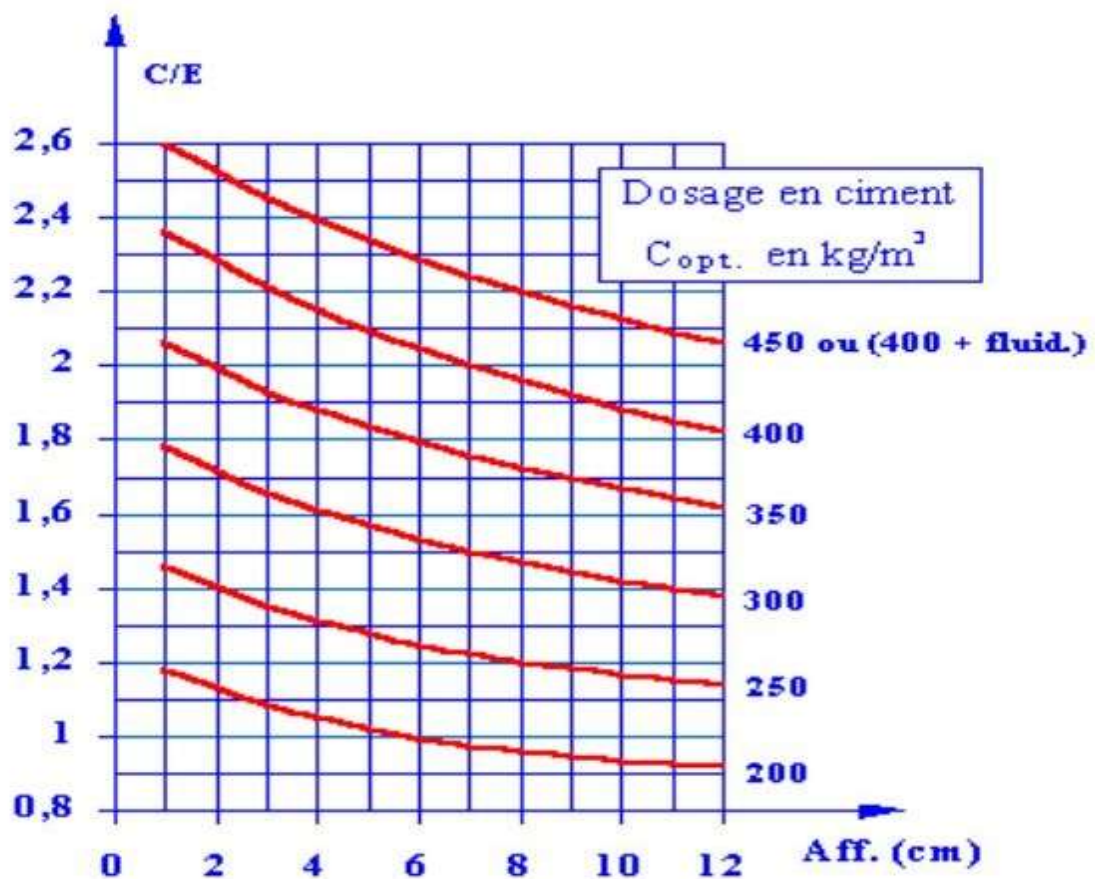


Figure 3 : Abaque permettant de déterminer C en fonction de l'affaissement et du rapport C/E

2.1. Dosage en eau

Connaissant les valeurs de C et du rapport C/E, on peut en déduire celle, approximatives de E.

Les données précédentes sont applicables aux bétons dont le diamètre maximal des granulats est d'environ $D_{\max} = 25$ mm [diamètre le plus courant].

Si l'on a $D_{\max} < 25$ mm, la surface spécifique des granulats augmente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice-versa.

La correction sur le dosage en eau correspond à $D_{\max} = 25$ mm peut être approximativement évalué d'après les valeurs du tableau 16 suivant en fonction de D_{\max} .

Tableau 16 : Corrections en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats

Diamètre maximal D_{\max} en [mm]	5	10	16	25	40	63	100
Corrections sur le dosage en eau en [%]	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Le dosage en eau réel est donc obtenu par la relation suivante :

$$\text{Dosage en eau réel} = \text{Dosage en eau (d'après l'abaque)} + \text{Corrections en eau} - \text{Eau d'apport des granulats}$$

2.2. Tracé de la courbe granulaire de référence

Il est important de tracer les courbes granulométriques de chaque granulat dans un même graphique de type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats).

Sur ce graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence OAB.

- Point O, origine [20 ; 0 %]
- point B à l'ordonnée 100 % correspond au diamètre D_{\max} du plus gros granulat [mod (D_{\max}); 100 %]
- point de brisure A à pour coordonnées :

$$\text{- en abscisse : si } D_{\max} \leq 25 \text{ mm ; } X = \frac{D_{\max}}{2} \quad (3)$$

Si $D_{\max} > 25 \text{ mm}$; X est situé au milieu du segment limité par le module 38 ($d = 5 \text{ mm}$) et le module correspond à D_{\max}

- en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p \quad (4)$$

Avec :

K, le terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés)

K_s , terme correcteur qui dépend du module de finesse du sable.

Les valeurs de K sont données dans le tableau 17

Tableau 17 : Valeurs du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats

VIBRATION		FAIBLE		NORMALE		PUISSANTE	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+ fluifif	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera effectuée de façon à relever le point A, ce qui correspond à augmenter le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6M_f - 15$ (5)

Si le béton est précisé « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton courant.

On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = +5$ à $+10$ environ, selon le degré de plasticité désiré.

2.3. Coefficient de compacité (δ)

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matériaux solides (ciment et granulats) réellement contenus dans un mètre cube de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de δ dans le tableau 18.

Tableau 18 : Valeurs de coefficient de compacité δ

CONSISTANCE	COMPACTAGE (SERRAGE)	COEFFICIENT DE COMPACITÉ						
		D_{max}						
		5	10	16	25	40	63	100
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,819	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,829	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0,01 ;
- sable et gravier concassé = - 0,03
- pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de δ qui correspondent ici à des granulats denses ordinaires.

2.4. Dosage des granulats

Les proportions, en volume absolu, des différents granulats (% G_i) sont déterminées en utilisant la notion de lignes de partage : 95 % de passant du premier granulats à 5 % du suivant, et ainsi de suite ; les proportions sont données par les intersections des lignes de partage avec la courbe de référence.

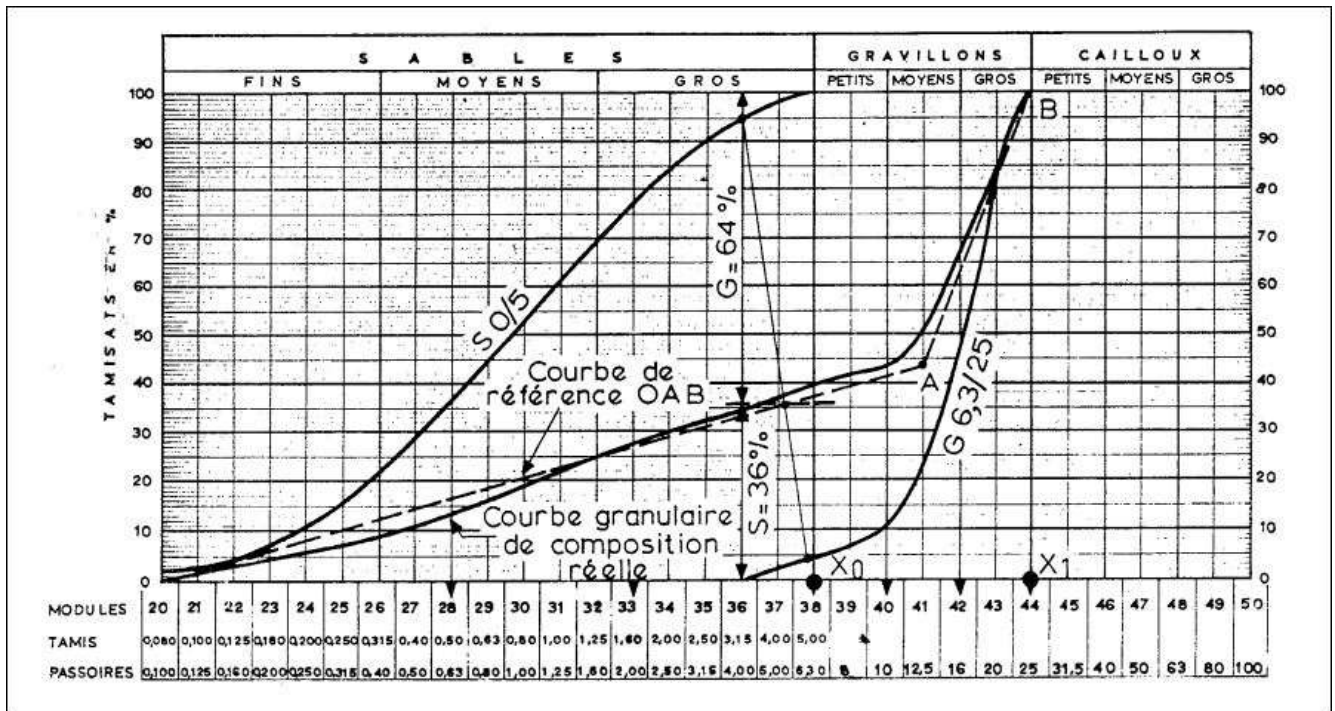


Figure 4 : Exemple de tracé de courbe de référence et de détermination des proportions des granulats

Pour le dosage des granulats secs en Kg, la relation utilisée est la suivante.

$$\text{Dosage de granulat « i » en [Kg]} = V_{gi} \times (\%G_i) \times \sigma_i = (\%G_i) \times \sigma_i \left(1000\delta - \frac{C}{\sigma_c} \right)$$

$$\text{Dosage de granulat "i" en [Kg]} = (\%G_i) \times \sigma_i \left(1000\delta - \frac{C}{\sigma_c} \right) \quad (6)$$

Avec :

σ_i est la masse volumique absolue de chacun des granulats ;

V_{gi} , le volume absolu de chaque granulat défini par $V_{gi} = V_g \cdot \%G$;

$\%G$, la proportion en volume absolu du granulat i ;

V_g , le volume absolu des granulats obtenu par la relation $V_g = \left(1000\delta - \frac{C}{\sigma_c} \right)$,

$\frac{C}{\sigma_c}$ le volume absolu du ciment (C dosage en ciment en Kg et σ_c est la masse spécifique du ciment en Kg/l).

La valeur 1000 est le volume total absolu des grains solides en litres et δ , la compacité.

II. FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE BARON — OLIVIER [12]

1. Objectifs

Il s'agit de déterminer une composition de béton répondant à des caractéristiques précises de résistance et d'ouvrabilité à partir des principes énoncés par Monsieur BARON.

1.1. Origine de la méthode

La méthode est due à monsieur BARON, à partir des études expérimentales qu'il a réalisées dans les années 1970-80 et qui ont été optimisées par la suite en utilisant les directives de la norme NF P 18-305, remplacée par la Norme Européenne EN 206-1. Cette méthode est développée dans un livre coécrit par messieurs BARON et OLLIVIER « Les BÉTONS, Bases et données pour leurs formulations » éditées chez Eyrolles.

Les expériences ont confirmé les travaux réalisés par BOLOMEY et FAURY dont certaines formules ont été retenues en ce qui concerne les dosages en liant et en eau. Pour les dosages en granulats, ce sont, en partie, les travaux de DREUX qui ont été retenus.

L'ensemble est complété par des résultats expérimentaux qui rendent la méthode aussi abordable que la méthode DREUX sans avoir les inconvénients de sa limitation aux seuls bétons courants.

1.2. Principe

Le problème du dosage optimal d'un béton n'est pas unique : il y a en fait deux problèmes qui peuvent être traités indépendamment l'un de l'autre :

- La définition de la pâte liante,
- La définition du squelette granulaire.

1.2.1. Pâte liante

On démarre la formulation à partir de 2 hypothèses principales qui sont la résistance cible et la quantité optimale d'eau efficace.

La résistance cible R_c est obtenue à partir de la résistance de calcul du béton R_{c28} nécessitée par l'ouvrage à construire. En tenant compte de la classe de résistance vraie F_{CE} du ciment et de la nature des granulats, on utilise la formule de BOLOMEY pour définir le rapport C/E.

L'eau efficace optimale est définie de manière simple et provisoire en fonction de la consistance cible du béton par un tableau créé par BARON en tenant compte d'un certain nombre de corrections relatives à la dimension D du gravier utilisé (dimension du plus petit tamis qui laisse passer la totalité des composants du béton) et à la température de coulage du béton.

À partir de ces valeurs, on peut donc déterminer le dosage en ciment. Les corrections sont apportées à partir d'une gâchée d'essai.

1.2.2. Squelette granulaire

Le squelette granulaire retenu par BARON est très proche de celui obtenu par DREUX, avec cependant une approche et une définition plus simple. Cette méthode a été retenue non pas pour son fondement scientifique, mais parce que ses résultats ont donné satisfaction au cours des 25 dernières années.

1.3. Hypothèses de travail

Les hypothèses de départ sont les suivantes : la consistance du béton, son milieu d'utilisation et sa résistance escomptée, la qualité et la nature des granulats, leur granulométrie et leur masse volumique, la nature et la classe de résistance du ciment utilisé.

1.3.1. Hypothèses sur le béton

- La nature de l'utilisation du béton (béton non armé, BA ou BP) ;
- Le milieu de l'utilisation doit être précisé parmi les sites répertoriés dans la norme EN 206-1. ;
- La résistance nécessaire pour l'ouvrage à réaliser ;
- La consistance du béton est en fait déterminée par l'affaissement requis au cône d'Abrams ;
- On précisera de plus si le béton est utilisé à la pompe ou non.

1.3.2. Hypothèses sur les granulats

- On doit connaître leur nature physique : s'ils sont concassés ou bien roulés.
- On doit connaître leurs caractéristiques physiques : courbe granulaire, masse volumique absolue.
- On complètera éventuellement cette connaissance par le coefficient d'absorption et le coefficient de propreté superficielle (indispensable pour la formulation avancée : B.H.P.).

1.3.3. Hypothèses sur le ciment

- On doit connaître le type de ciment utilisé ;
- Il est nécessaire de connaître la classe de résistance vraie du ciment, notée F_{CE} .

1.3.4. Abaques et tableaux

Il est enfin indispensable d'avoir à disposition les tableaux reproduits en annexe afin de pouvoir les consulter en suivant le mode opératoire.

Il est enfin indispensable d'avoir à disposition les tableaux reproduits en annexe afin de pouvoir les consulter en suivant le mode opératoire.

1.4. Mode opératoire (formulation de base)

Nous allons nous contenter d'étudier la formulation de base. La formulation avancée permettant de calculer des BHP et BTHP.

1.4.1. La pâte liante

- Déterminer la résistance cible R_c
- Déterminer la quantité optimale d'eau efficace E , en appliquant si nécessaire les corrections ;
- Déterminer la quantité optimale d'air occlus V_a en appliquant si nécessaire les corrections ;
- Déterminer le coefficient granulaire de BOLOMEY : K_c ;
- Déterminer le coefficient K_v : $K_v = \frac{E}{E + V_a} \quad (7)$;
- Calculer le rapport C/E par la formule de BOLOMEY ;
- Déterminer le dosage en ciment : C_1 ;

Cette valeur est comparée au dosage C_2 prévu au CCTP (s'il existe) et au dosage minimum C_3 imposée par la norme EN 206-1.

La valeur retenue C est la valeur maximale : $C = \max [C_1 ; C_2 ; C_3]$ (8)

1.4.2. Le squelette granulaire

➤ À partir des courbes granulométriques, déterminer la courbe optimale définie par trois points :

- Point O origine de la courbe $X_O = 0,063 \text{ mm}$; $Y_O = 0 \%$
- Point B extrémité de la courbe $X_B = D$; $Y_B = 100 \%$
- Point de brisure A : $X_A = D/2$; $Y_A = 50 - \sqrt{D} + K$ (9)

Où K prend l'une de ces valeurs :

- 0 % bétons non armés et granulats roulés ;
 - 3 % si les granulats sont concassés ;
 - 5 % pour de bétons armés où le ferrailage $< 80 \text{ Kg/m}^3$;
 - 10 % bétons pompables ou BA avec ferrailage $> 80 \text{ Kg/m}^3$.
- Déterminer les pourcentages de sable et de gravier de la manière suivante :
- Soit un sable d_1/d_2 et un gravier d_3/d_4 , on définit graphiquement la droite de partage des deux matériaux en reliant : le point $Y_s = 95 \%$ de la courbe du sable d_1/d_2 au point $Y_G = 5 \%$ de la courbe du gravier d_3/d_4 .
 - On lit l'ordonnée du point d'intersection de la droite de partage et de la courbe optimale sur l'axe des tamisât. On obtient :
 - Dans la partie inférieure, le pourcentage de sable d_1/d_2 : $S \%$
 - Dans la partie supérieure, le pourcentage de gravier d_3/d_4 : $G \%$

1.4.3. Composition du béton :

- Calculer le volume absolu de la pâte liante : $V_C + V_E + V_a$
- Calculer le volume absolu des granulats secs : $V_{\text{granulats}} = 1000 - (V_C + V_E + V_a)$ (10)
- Calculer le volume absolu de chaque granulat :
 - $V_{\text{absolu sable}} = V_{\text{granulats}} \times S \%$ (11)
 - $V_{\text{absolu gravier}} = V_{\text{granulats}} \times G \%$ (12)
- En déduire la masse de chaque granulat :
 - $M_{\text{sable}} = \rho_{\text{vol}} \text{absolu sable} \times V_{\text{absolu sable}}$ (13)
 - $M_{\text{gravier}} = \rho_{\text{vol. absolu gravier}} \times V_{\text{absolu gravier}}$ (14)

- Récapituler l'ensemble dans un tableau et calculer la masse d'un m³ de béton en place.

1.5. Résultats

Comme pour toutes les autres compositions, le résultat obtenu doit être vérifié par une gâchée d'essai afin d'améliorer le dosage en eau et de contrôler la masse volumique du béton.

2. Données et formules de base

2.1. Détermination de D :

Le diamètre maximal adopté est défini sur la courbe granulométrique du plus gros granulat (NF P 18 541) :

- Tamis D' : Passant $\geq 99 \%$ ($D' = 1,58 D$)
- Tamis D : $80 - 85 \% \leq \text{Passant} < 99 \%$

2.2. Détermination de la résistance visée R_c :

Elle est fonction de la résistance désirée :

- Si on ne dispose pas d'information sur la fabrication :
 $R_c = R_{ck} + 5 \text{ MPa si } R_{ck} \leq 25 \text{ MPa (15) ;}$
 $R_c = R_{ck} + 6 \text{ MPa si } R_{ck} > 25 \text{ MPa (16) ;}$
- Si le matériel de fabrication est régulé :
 $R_c = R_{ck} + 3 \text{ MPa si } R_{ck} \leq 25 \text{ MPa (17) ;}$
 $R_c = R_{ck} + 4 \text{ MPa si } R_{ck} > 25 \text{ MPa (18) ;}$

2.3. Dosage en eau et volume d'air

Tableau 19 : Dosage en eau et en air suivant la consistance

Consistance	ST [cm]	Eau (E) [L/m ³]	Air (a) [L/m ³]
Ferme	0 — 4	160	25
Plastique	5 — 9	190	20
Très plastique	10 — 15	210	15

Si on emploie des granulats de concassage, ces valeurs sont majorées de 10 à 15 %.

Si D est différent de 20 mm, il faut corriger E et ST par les coefficients multiplicateurs (tableau 20).

Tableau 20 : Coefficient multiplicateur en fonction de D

D [mm]	4	8	16	20	25	40	80
Coefficient multiplicateur	1,25	1,18	1,05	1	0,95	0,87	0,78

2.4. Relation de Bolomey

$$R_c = K_c \cdot F_{CE} \cdot \left(K_v \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (19)$$

$$\text{Avec } K_v = \frac{E}{E + a}$$

$$\text{D'où } R_c = K_c \cdot F_{CE} \cdot \left(\frac{C}{E + a} - 0,5 \right) \quad (20)$$

- Coefficient granulaire K_c . Les valeurs estimées sont :

Tableau 21 : Valeurs estimées de K_c

Valeurs estimées de K_c			
Nature des granulats	D (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux, légèrement altérés	0,45	0,50	0,55
Siliceux, roulés	0,50	0,55	0,60
Calcaires, durs	0,55	0,60	0,65

- Classe vraie du ciment

Tableau 22 : Valeurs estimées de F_{CE}

Valeurs estimées de F_{CE}			
Classe de résistance	32,5	42,5	52,5
F_{CE} (MPa)	45	55	65

2.5. Dosage optimal des fines

Dans la méthode avancée de Baron, il est préconisé d'utiliser des fines d'ajout et des adjuvants (généralement plastifiants et superplastifiants).

Les fines du béton sont constituées par le ciment et les fillers de diamètre au moins équivalent à celui du ciment.

Détermination du volume des fines V_F :

$$V_F = \frac{C}{\gamma_C} + \frac{F}{\gamma_F} \quad (21)$$

Avec C dosage en ciment (Kg/m³) de masse spécifique γ_C ;

F dosage des fillers (Kg/m³) de masse spécifique γ_F .

2.6. Courbe de référence

Tableau 23 : Coordonnées de la courbe de référence

Point	Abscisse (tamis) d [mm]	Ordonnée (passant cumulé) [%]
O	0,063 (mod 19)	0
A	D /2	50 - \sqrt{D} + termes correctifs
B	D	100

Termes correctifs de Y_A :

- Majoration de 3 % pour granulats concassés ;
- Majoration de 5 % pour les bétons armés où le ferrailage est $\leq 80 \text{ Kg/m}^3$;
- Majoration de 10 % pour un ferrailage $> 80 \text{ Kg/m}^3$ ou pour un béton pompable.

III. FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE BOLOMEY [2]

Le principe de cette méthode est de déterminer une courbe optimale du mélange d'éléments secs ; de chercher les pourcentages de ces constituants qui permettent de faire un mélange sec dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe optimale et d'en déduire la composition d'un mètre cube de béton.

La courbe optimale est déterminée à partir de la relation suivante

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (22)$$

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

d : ouverture d'un tamis en mm

D : diamètre du plus gros grain en mm.

A : varie de 8 à 16, elle représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. Sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

La méthode de BOLOMEY ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 Kg/m³; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

IV. FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE FAURY [2] [9]

La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est théoriquement une droite.

Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites.

L'abscisse X du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $\frac{D}{2}$ et son ordonnée Y est calculée par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{r}{D} - 0,75} \quad (23)$$

A : se choisit dans un tableau de valeurs variant de 22 à 38.

B : varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

r : rayon moyen du moule.

L'axe des ordonnées est gradué linéairement et l'axe des abscisses en échelle proportionnelle est utilisé $\sqrt[5]{D}$ pour le traçage de la courbe de référence de Faury.

V. FORMULATIONS DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE D'ABRAMS [9]

La méthode d'Abrams est basée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans le mélange soient, en principe, réduits au minimum.

Le tableau 24 suivant montre le dosage en ciment et les dimensions maximales D des granulats utilisées par ces méthodes.

Tableau 24: Dosage en ciment et dimensions maximales D des granulats

DOSAGE EN CIMENT [kg/ m3]	DIMENSION MAXIMALE D DES GRANULATS [mm]						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,400	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

Le diamètre maximal D est référé par le tableau ci-dessus et le dosage en ciment est, défini par le M_f optimal ;

Les teneurs en sable %S et en gravier %G qu'on doit introduire sont déterminées par

les relations suivantes : $\%S = \frac{M_{f_2} - M_f}{M_{f_2} - M_f}$ (24) et $\%G = \frac{M_f - M_{f_1}}{M_{f_2} - M_f}$ (25)

M_{f_1} et M_{f_2} sont les modules de finesse respectifs du sable et d'un gravier de diamètre maximal D_{\max} .

VI. FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE VALETTE [9]

C'est une méthode essentiellement expérimentale, mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préliminaires.

Dans les cas les plus courants, on partira en général de deux granulats : un sable 0/5 et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable.

Nous calculons d'abord le dosage de sable et ciment, devant donner en principe le mortier plein à minimum de ciment.

Ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment. Nous ajoutons ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier.

C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur sur la « convenance » du béton ; il doit donc être un praticien connaisseur en la matière. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment).

Pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe a priori dans certains cas, ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein mouillé de sable.

VII. FOMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES ABSOLUS [14]

La méthode des volumes absolus est une méthode de préformulation adaptée au béton. Elle permet de déterminer la composition de mélanges dont le volume total est précisé en amont. Ses qualités lui confèrent un caractère à la fois précis et aléatoire, c'est la plus adaptée pour un travail de recherche.

Sachant qu'un mélange de béton est composé habituellement d'eau, de ciment, de sable et de gravillon. Cette méthode inclut le volume de l'air emprisonné dans le mélange. Elle permet de varier chaque volume (V_x) de ces composants sans pour autant changer le volume total.

$$V_{ciment} + V_{eau} + V_{Sable} + V_{gravillon} + V_{vide} = V_{total} \quad (26)$$

Si les composants sont exprimés en masse, la relation devient :

$$\frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_E}{\rho_E} + \frac{m_S}{\rho_S} + \frac{m_G}{\rho_G} + V_{vide} = V_{total} \quad (27)$$

Avec ρ_C , la masse volumique absolue du ciment ;

ρ_E , la masse volumique absolue d'eau qui est égale à 1000Kg/m³ ;

ρ_S , la masse volumique absolue de sable ;

ρ_G , la masse volumique absolue de gravillon.

L'Humidité que peut contenir les granulats peut être prise en compte en la retranchant et la rajouter au volume de l'eau, les masses volumiques absolues des matériaux humides seront remplacées par les masses volumiques absolues sèches.

Cette opération peut être négligée lorsqu'il s'agit de petites gâchées et dont les composants sont préparés par pesée selon Adam M. Neville, 1992.

L'ajout d'autres composants supplémentaire est introduit dans l'équation comme c'est le cas des autres composants comme les fillers et les adjuvants, le principe est que le volume reste constant.

Le seul inconvénient que peut altérer la précision de cette méthode réside dans l'évaluation du volume de l'air occlus que va contenir le mélange après.

VIII. FORMULATIONS ET MODÉLISATIONS DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [15]

L'approche classique consiste à varier un seul paramètre du mélange et mesurer son effet sur le comportement du béton en maintenant tous les autres paramètres constants. Cette méthode est longue et les interactions entre les paramètres du mélange ne peuvent pas être évaluées.

L'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs paramètres (facteurs) à la fois, ce qui va nous permettre d'évaluer leurs influences ainsi que leurs interactions sur les caractéristiques des bétons. Parmi ces facteurs, on peut citer : le dosage en ciment, le dosage en additions, le dosage en eau, le rapport E/C, le rapport Additions / Ciment, le dosage en adjuvant, le rapport G/S ...

IX. CONCLUSION PARTIELLE

Bien que, pour l'usage courant, toute formulation de béton répond plus ou moins au besoin, il existe des proportions des constituants qui offrent de meilleures caractéristiques aux bétons.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour la mise au point de méthodes de formulation d'une part, et pour optimiser l'utilisation des constituants d'autre part afin de trouver un compromis entre des propriétés parfois contradictoires : ouvrabilité qui contrôle la mise en place du béton et résistance mécanique qui conditionne la capacité portante de l'ouvrage. À partir de ce chapitre, nous avons remarqué qu'il est nécessaire d'attacher une importance particulière à l'influence de chaque paramètre afin d'aboutir à une formulation optimale et d'atteindre au mieux les caractéristiques recherchées.

Dans ce cas, nous allons utiliser les méthodes de formulations suivantes :

- Méthode de DREUX GORISSE, pour la formulation des bétons ordinaires témoins ;
- Méthode des volumes absolus, en considérant le volume d'air dans le béton ; puisque nous envisagerons de formuler un béton fluide à haute compacité ;
- Méthode des plans d'expériences en donnant une information complète et précises sur les bétons fluides.

Chapitre IV : ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BÉTONS

Les essais de caractérisation des bétons en générale comportent quatre parties bien distinctes :

- L'essai de consistance ;
- L'essai de retrait ;
- L'essai de porosité et de compacité ;
- L'essai des résistances en compression et en traction.

I. ESSAI DE CONSISTANCE [8]

La consistance est déterminée, en général par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams. C'est l'essai le plus couramment utilisé, car il est très simple à mettre en œuvre. Il s'agit de mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids comme indique la photo 5. Plus l'affaissement sera grand, plus le béton sera réputé fluide. Toutefois les résultats obtenus ne sont pas très fiables pour les bétons très fermes et/ou très fluides.

1. Matériel utilisé

- Moule, sans fond, de forme tronconique, aux dimensions inférieures suivantes (en millimètres) :
 - Diamètre du cercle de la base supérieure $100 \pm 0,5$ mm ;
 - Diamètre du cercle de la base inférieure $200 \pm 0,5$ mm ;
 - Hauteur 300 ± 1 mm.

Il est construit de manière à être indéformable. Il doit être muni de :

- Poignées de préhension aux $2/3$ de la hauteur ;
- Dispositif de fixation pour les pieds de l'opérateur, permettant de l'assujettir sur la surface d'appui ;
- Portique de mesure, avec règle graduée ;
- Tige de piquage, acier doux, de diamètre 16 mm avec extrémité hémisphérique ;
- Surface d'appui de l'ensemble ;
- Éventuellement, entonnoir pour introduire le béton.

2. Mode opératoire

- Humidifier la surface d'appui et y assujettir le moule dont la paroi intérieure, bien propre, aura été légèrement huilée ;
- Au moyen d'une pelle creuse, introduire le béton dans le moule en trois couches, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du cône. Cette introduction doit commencer une à deux minutes, au maximum, après prélèvement et homogénéisation du béton destiné à l'essai ;
- Piquer chaque couche 25 fois, avec la tige de piquage, en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du béton et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu ;
- A la dernière couche, au cours du compactage, ajouter le béton nécessaire pour que le moule soit juste rempli à ras bords ;
- Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Éviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton ;
- Démouler immédiatement en soulevant le moule avec précaution, lentement, à la verticale et sans secousses ;
- Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement, en mesurant le point le plus haut du béton affaissé ;
- Pour obtenir une meilleure appréciation de l'affaissement, procéder à trois prises successives et réaliser sur chaque prise une détermination au demi-centimètre. Retenir pour résultat la moyenne arithmétique des lectures, arrondie au centimètre.



Photo 5 : Test à l'affaissement au cône d'Abrams du BO

II. ESSAI DE RETRAIT [15]

Le retrait est la diminution de longueur d'un élément de béton.

Nous nous attacherons sur le retrait hydraulique. Ce retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de béton.

Ce retrait est mesuré avec un pied à coulins.

Le retrait est calculé à partir de la relation suivante :

$$R[\%] = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1} \times 100 \quad (28)$$

h_1 est la hauteur du moule rempli du béton frais

h_2 , la hauteur du béton durci sortie du moule.

III. ESSAI DE POROSITÉ ET DE COMPACITÉ [2]

La porosité et la compacité sont liées directement à la résistance en compression : plus la porosité est élevée, plus la résistance en compression du béton est faible, et inversement.

La porosité est calculée par la

$$P\% = \frac{V_{vide}}{V_t} \times 100 \quad (29)$$

relation

La compacité et la porosité sont liées par la relation: $P = 1 - C$ (30)

• Matériels

- Balance de précision
- Échantillon du béton
- Chiffon jaune

• Description de l'essai

- Prélever l'échantillon du béton très sec durci (mettre à l'étuve pour éliminer toutes les formes de l'eau) ;
- Peser le béton, soit m_0 ;

- Plonger le béton dans de l'eau froide pendant 48 h pour bien remplir les pores de l'eau ;
- Après 48 h, sortir de l'eau le béton et essuyer par le chiffon jaune son extrémité. Pesez-le ensuite. Soit m_1 ;
- Calculer le volume de l'eau contenue dans les pores du béton à partir de la relation : $V_{\text{eau}} = V_{\text{vide}} = (m_0 - m_1)\rho_e$ (le volume de vide est égale au volume de l'eau contenu dans les pores). Ce volume est exprimé en cm^3 quand m_0 et m_1 sont en g ;
- Calculer la porosité et en déduire la compacité du béton à partir de la relation (14) et (15).

IV. ESSAI DE RÉSISTANCES [16][17]

Ces essais, effectués sur des éprouvettes, ont pour objet de déterminer les diverses caractéristiques mécaniques du béton.

Ces essais s'appliquent aux bétons hydrauliques à usage courant, utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Les essais le plus utilisés sont :

1. L'essai de compression simple

1.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à presser une éprouvette de forme bien déterminée (cylindrique ou cubique) entre les deux plateaux d'une presse, avec une vitesse de chargement constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

1.2. Spécifications

1.2.1. Éprouvettes

Les éprouvettes peuvent être cylindriques ou cubiques d'élancement égal à 2 qui est le plus classique, mais on peut utiliser des éprouvettes d'élancement 1.

En se référant à la norme, nous confectionnons des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm (élancement 2).

Les éprouvettes sont obtenues dans les moules indéformables et étanches qui sont généralement en acier, en matière plastique ou en carton.

1.2.2. Confection et conservation des éprouvettes [1]

1.2.2.1. Préparation de la gâchée

- **Béton ordinaire**

La préparation du béton ordinaire pour réaliser des essais à l'état frais et à l'état durci doit suivre une certaine méthodologie.

Avant tout, il faut déterminer les proportions de chaque constituant avant de passer aux essais à travers le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindriques ou prismatiques nécessaire pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage ;
- Réunir tous les matériels nécessaires pour effectuer les essais ;
- Vérifier que les matériels ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement à l'étuve ;
- Peser les matériaux secs (gravillons, sable, ciment), les introduire sur le lieu de malaxage et préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée ;
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation à l'état frais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.

- **Béton fluide**

La préparation du béton fluide demande plus d'attention et de précision que celle d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, il faut suivre le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules cylindriques ou prismatiques nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage ;
- Réunir tous les matériels nécessaires pour effectuer les essais ;

- Vérifier que les matériels ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve ;
- Préparez la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée et le superplastifiant est ajouté à la première moitié de l'eau de gâchage ;
- Peser les matériaux secs (gravillons, sable, ciment, fumées de silice) et les introduire sur le lieu de malaxage ;
- Au cours du malaxage, ajouter progressivement la première moitié de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant) ;
- Ajouter la deuxième moitié d'eau graduellement ;
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation à l'état frais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.

[1]

1.2.3. Moulage et serrage

- **Béton ordinaire (BO)**

- Remplir les éprouvettes en deux couches et les vibrer ;
- Le serrage doit être suffisamment consistant pour parvenir à la résistance caractéristique souhaitée ;
- Bien araser la partie supérieure du moule avant d'entreposer le moule rempli de béton.

- **Béton Fluide (BFL)**

- Remplir les éprouvettes en deux couches sans vibration (piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage) ;
- Une fois dans le moule le BFL se met en place sous l'effet de son poids ;
- Araser la partie supérieure du moule afin d'avoir une surface lisse avant d'entreposer le moule rempli de béton.

Nous pouvons voir la photo 6, les moules cylindriques 16x32 [cm] remplis de Bétons fluides.



Photo 6 : Moules cylindriques en acier rempli du BFL

1.2.3.1. Conservation des éprouvettes [1]

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BFL, les éprouvettes sont conservées dans une pièce à température ambiante, et démoulée après 24h.

Une fois démoulés, pour assurer un bon mûrissement du béton, et pour garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment, les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau à une température de 20°C comme l'indique la photo 7 ci-dessous,



Photo 7 : Bac rempli d'eau contenant des éprouvettes cylindriques 16 *32 cm

1.2.4. Machine d'écrasement

La machine d'écrasement est une presse de force appropriée qui doit être contrôlée, dont les plateaux, ou contre-plateaux doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celle des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

1.3. Opérations préparatoires

1.3.1. Précautions contre la dessiccation

Il conviendra d'éviter la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles seront retirées du milieu dans lequel elles auront été conservées pour être transférées à la salle d'essai. L'influence d'une dessiccation est d'autant plus sensible que l'éprouvette est petite et surtout si elle a été conservée dans l'eau.

1.3.2. Détermination du poids volumique de l'éprouvette

L'éprouvette étant essuyé ou nettoyée, la pesée avec une erreur relative inférieure à 0,001. Éventuellement, son poids volumique est obtenu par la division de son poids par le volume correspondant.

1.4. Conduite de l'essai

- Nettoyer les faces de chargement des plateaux ou contre-plateaux, ainsi que celles de l'éprouvette surfacée ;
- Placer l'éprouvette, face de l'arasement vers le haut ;
- La centrer par l'emploi d'un gabarit de centrage s'appuyant sur l'éprouvette elle-même, et non sur le produit de surfaçage.
- Veiller à ce que le contact entre plateaux et éprouvette soit uniforme
- Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La vitesse de chargement doit être constante pendant la durée de l'essai et égale à 0,5 MPa par seconde avec une tolérance de 0,2 MPa par seconde, correspond à un accroissement de force de $10 \pm 4 \text{ KN} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une éprouvette de format 16 x 32 cm.
- Retenir pour charge de rupture la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.
- La résistance correspondante R_c , en MPa à 0,5 MPa près, est donnée par la relation (31).

$$R_C = \frac{F}{S} \quad (31)$$

F : La charge maximale en kil Newton (MN)

S : La section de l'éprouvette en centimètre carré (cm²). Nos éprouvettes ont une dimension 16 * 32 cm, d'où $S = 200,96 \text{ cm}^2 = 200,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

La photo 8 suivante montre l'essai de compression du BFL



Photo 8 : Essai de compression des éprouvettes cylindriques du BFL

2. L'essai de traction [10]

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par R_{c28} .

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élancement 4, reposant sur deux appuis:

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges).

La mesure de la résistance à la traction s'effectue par essai de traction par flexion sur l'éprouvette 4*4*16, à partir de la machine à traction du laboratoire.

Chapitre V : CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES

INTRODUCTION

Pour entrer à l'étude ; nous utilisons, les matériaux suivant :

- Le ciment Manda CEM II/A 42,5N de la société Holcim Madagascar;
- Trois types de gravillons de classe 5/12,5 (g_1) de la carrière artisanale de Vontovorona, des gravillons de classe 5/15 (g_2) et de classe 5/25 (G) provenant de la carrière PK18 RN4 de la société SCB;
- Trois types de sable : sables de carrière Sc provenant aussi de la carrière PK18 RN4 de la société SCB , sables de rivière Sr_1 (gisement de l'lkopa Anosizato Est) et Sr_2 (provenant de la rivière Sisaony);
- Deux types des fillers : le filler cipolin (c) et le filler dolomie (F_D);
- L'eau de JIRAMA;
- Deux superplastifiants : le SIKA Viscocrète Tempo 12 (Sp_1) ,distribué par la compagnie MADECASSE et le Rhéobuild 561(Sp_2) provenant de la société BATPRO.

Le but de l'utilisation de ces superplastifiants est de connaître le plus compatible avec nos matériaux, surtout le ciment, en se référant aux résultats d'affaissement et à ceux des essais de compression du béton durci.

Mais avant tout, nous avons formulé un béton témoin (béton ordinaire) sans ajout des fines et d'adjuvant pour pouvoir comparer la résistance en compression de ce béton à ceux des bétons fluides.

Avant d'entamer les études de formulation et de modélisation proprement dites, nous donnons d'abord les caractéristiques des matières premières, puis nous exposons les essais de caractérisation des bétons.

Il est à noter que les matières premières que nous utiliserons lors de nos expériences sont disponibles sur le marché national de Madagascar.

I. CARACTÉRISTIQUES DU CIMENT CEM II/A 42,5 N [10]

Dans toutes nos expériences, le ciment Manda CEM II/A 42,5 N provenant de la société HOLCIM Madagascar est utilisé. Il est vendu dans toutes les quincailleries dans un sac de 50 Kg.

Comme sa dénomination l'indique, c'est un ciment composé aux cendres volantes de nature siliceuse.

1. Caractéristiques physiques

Le tableau 25 suivant montre les caractéristiques physiques du ciment CEM II/A 42,5N de la société Holcim.

Tableau 25:Caractéristiques physiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N

PARAMÈTRES PHYSIQUES	CARACTÉRISTIQUES
Forme	poudre
Couleur	grise
Odeur	inodore
Densité apparente	1
Densité absolue	3,1
SSB [cm ² /g]	3400
Début de prise [mn]	169

Source : Société HOLCIM Madagascar 2011

2. Caractéristiques mécaniques

La résistance en compression du mortier normal du ciment CEM II / A42,5 est donnée dans le tableau 26 suivant.

Tableau 26: Resistance en compression du ciment Manda CEM IIA 42,5 N

RÉSISTANCES EN COMPRESSION DE MORTIER NORMALE	VALEURS en [MPa]
Rc2	19,80
Rc7	31,95
Rc28	54

Source : Société HOLCIM Madagascar 2011

La classe vraie du ciment CEM II/A 42,5 est de 54 MPa, il appartient bien à la classe de résistance 42,5 (comprise entre 42,5 et 62,5).

3. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

3.1. Composition minéralogique

Le ciment Manda CEM II/A-V est un ciment portland composé aux cendres volantes siliceuses. Sa composition minéralogique est en pourcentage massique :

- Clinker : 86%
- Cendres volantes : 10%
- Gypse : 4%

Les compositions chimiques moyennes de ces composants sont données dans le tableau 27 :

Tableau 27: Compositions chimiques moyennes des constituants minéralogiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N en % massiques.

COMPOSITION	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	PF	RI	CaO _L
CLINKER	62	19,4	6,01	3,54	2,37	3,48	3,48	1,46	1,41
CENDRES VOLANTES	7,5	55,8	23,70	3,2	4,1	4,2	4,2	-	-
GYPSE	30	12	3,2	-	8,1	42,1	4,1	-	-

Source : Société Holcim Madagascar 2011

3.2. Composition chimique élémentaire

La composition chimique du ciment Manda CEM II/A 42,5N est présentée par le tableau 28 suivant.

Tableau 28: Compositions chimiques du ciment Manda CEM II/A 42,5N en % massiques.

COMPOSITION	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO _T	MgO	SO ₃	PaF	RI
TENEUR en [%]	22,74	7,67	3,37	55,27	2,77	2,15	3,57	14,63

Source : Société Holcim Madagascar 2011

3.3. Modules

Ce sont des valeurs requises pour un ciment

– Module d'Alumine MA

Ce module d'Alumine est calculé par les relations suivantes :

- En général

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (32)$$

- Pour un ciment composé

$$MA = \frac{Al_2O_3^*}{Fe_2O_3^*} \quad (33)$$

$$Al_2O_3^* = Al_2O_3(ciment) - Al_2O_3(gypse) - Al_2O_3(cendres) \quad (34)$$

$$Fe_2O_3^* = Fe_2O_3(ciment) - Al_2O_3(gypse) - Al_2O_3(cendres) \quad (35)$$

– Module de Silice MS

- En général

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (36)$$

- Pour un ciment composé

$$MS = \frac{SiO_2^*}{Al_2O_3^* + Fe_2O_3^*} \quad (37)$$

$$SiO_2^* = SiO_2(ciment) - SiO_2(gypse) - SiO_2(cendre) \quad (38)$$

– Module de Chaux MC

- En général

$$MS = \frac{CaO}{CaO_{sat}} \times 100 = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3} \quad (39)$$

- Pour un ciment composé

$$MS = \frac{CaO_{combinée}}{2,8SiO_2^{**} + 1,65Al_2O_3^* + 0,35Fe_2O_3^*} \quad (40)$$

Avec :

$$CaO_{\text{combinée}} = CaO(\text{ciment}) - CaO(\text{gypse}) - CaO(\text{cendres}) - CaO_L \quad (19)$$

$$SiO_2^{**} = SiO_2^* - RI \quad (20)$$

Le tableau 29 renseigne sur les valeurs requises du ciment CEM II/A42,5N Holcim.

Tableau 29: Valeurs requises du ciment Manda CEM II /A 42,5N

VALEURS REQUISES	MA	MS	MC
VALEURS	1,70	1,85	92,55

– L'Hydraulicité (i)

L'Hydraulicité permet d'évaluer le caractère hydraulique d'un liant. Elle est définie par l'indice d'hydraulicité (i).

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad (41)$$

Le ciment Manda CEM II /A 42,5N de la société Holcim Madagascar a une hydraulicité $i = 0,58$. C'est un liant à caractère basique marquée.

II. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS [1][10]

1. Méthode de caractérisation

1.1. Détermination des caractéristiques physiques et mécaniques

1.1.1. Détermination de lateneur en eau (%W)

La détermination de la teneur en eau adsorbée permet de rectifier le dosage en eau de gâchage c'est-à-dire que si les échantillons contiennent une importante eau adsorbée, on doit réduire le dosage en eau en fonction de cette eau déjà apportée par les matières premières.

La teneur en eau est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\%W = 100 \left(\frac{m - m^*}{m^*} \right) \quad (42)$$

Avec m_0 , la masse de l'échantillon avant le séchage

m^* , la masse de l'échantillon sec sorti de l'étuve

1.1.2. Détermination de la masse volumique apparente (ρ)

La masse volumique apparente désigne la masse de matériau par unité de volume, les vides entre les éléments inclus. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (43).$$

Avec :

m_s , la masse de matériau

V , le volume du récipient contenant le matériau ($V = V_s + V_{\text{vide}}$) (44)

- **Matériels**

- Balance de précision
- Étuve
- Récipient métallique
- Règle métallique à araser

- **Description des essais**

- Sécher les échantillons dans l'étuve ;
- Peser le récipient à vide puis tarer la balance (remettre à zéro) ;
- Peser ensuite une quantité d'eau jusqu'au remplissage du récipient pour déterminer le volume V de ce récipient (dans ce cas le volume d'eau V_e dans le récipient est égale au volume du récipient V) ;
- Noter la masse d'eau m_e contenu dans le récipient ;
- Calculer le volume du récipient à partir de la formule suivante

$$V = V_e = \frac{m_e}{\rho_e} \quad (45)$$

ρ_e , masse volumique de l'eau ($\rho_e = 1 \text{ g/ml}$)

- Après la connaissance du volume V du récipient, verser l'échantillon dans ce récipient de façon à avoir des couches successives et sans tassement jusqu'à ce qu'il y ait débordement (utiliser les mains comme entonnoir naturel) ;

- Araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va-et-vient ;
- Remettre le récipient rempli d'échantillon sur la balance et noter soit m_s .
- Calculer la masse volumique apparente de l'échantillon à partir de la relation (43).

1.1.3. Détermination des masses volumiques absolues (σ)

La masse volumique absolue est le poids d'une quantité de matériau tel que le volume réellement occupé par la matière solide est rapporté à un volume égal à l'unité. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{P_s}{V_s} \quad (46).$$

1.1.3.1. Masses volumiques absolues des sables

- **Matériels**

- Pycnomètre ;
- Balance électronique de précision ;
- Pissette ;
- Échantillons de sable

- **Description des essais**

Détermination de volume exacte V_0 du pycnomètre jusqu'à son remplissage

- peser la masse vide m_0 du pycnomètre ;
- Remplir le pycnomètre d'eau (utiliser la pissette) et peser ensuite. Soit m_1 cette masse. $P_1 = P_0 + V_0$ (47)
- Calculer le volume $V_0 = P_1 - P_0$ (48)

Après trois essais, la moyenne arithmétique de V_0 est de 534 ml. Le volume de 1/3 du pycnomètre est donc $V_{0(1/3)} = 178$ ml .

Détermination de la masse volumique absolue

- Verser 178 ml ($V_{0(1/3)}$) d'eau dans le pycnomètre de volume V_0 , déterminé précédemment et peser. Soit P_2 cette masse. $P_2 = P_0 + \frac{V_0}{3}$ (49)
- Verser une masse m_s du sable dans ce pycnomètre contenant d'eau jusqu'à sa tierce de volume et le peser. On note m_3 cette masse.

$$P_3 = P_2 + P_s \Rightarrow P_s = P_3 - P_2 \quad (50)$$

- Remplir de l'eau le pycnomètre contenant de sable jusqu'au volume V_0 et peser. On note m_4 cette $P_4 = P_0 + P_s + \frac{V_0}{3} + V'$ (51)

V' est le volume d'eau versé jusqu'au remplissage de pycnomètre

$$V' = V_0 - V_s - \frac{V_0}{3} \quad (52)$$

- Déterminer les relations qui relient ces équations pour calculer la masse volumique absolue.
 - (52) dans (51), $P_4 = P_0 + V_0 - V_s + P_s$ (53)
 - (47) dans (53), $P_4 = P_1 - V_s + P_s$ (54)
 - (46) dans (54),

$$P_4 = P_1 - \frac{P_s}{\sigma} + P_s \Leftrightarrow P_s(1 - \frac{1}{\sigma}) = P_4 - P_1 \Leftrightarrow \sigma = \frac{P_3 - P_2}{(P_3 + P_1) - (P_4 + P_2)} \quad (55).$$

- Calculer la masse volumique absolue des sables à partir de la relation (55)

1.1.3.2. Masse volumique absolue des gravillons

La méthode de l'éprouvette graduée est utilisée pour déterminer la masse volumique absolue de gravillon.

• Matériels

- Éprouvette graduée de 1000 ml;
- Balance électronique de précision.

• Matériau

- Échantillons de gravillons représentatifs préalablement séchés par étuvage.
- **Description des essais**
 - Peser 300g de gravillon. Soit M cette masse ;
 - Verser 500 ml d'eau dans l'éprouvette soit V_1 ;
 - Verser l'échantillon de gravillon M dans l'éprouvette et noter la variation de volume soit V_2 ;
 - Calculer le volume de gravillon par la relation $V_s = V_2 - V_1$;
 - Calculer la masse volumique de gravillon à partir de la relation (55).

1.1.4. Détermination de l'équivalent de sable

L'essai d'équivalence de sable indiqué par la figure 5 est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition du béton et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction. La mesure est effectuée sur la fraction de granulat passant au tamis de 5 mm à une teneur en humidité inférieure à 2 % et à la température 23 °C.

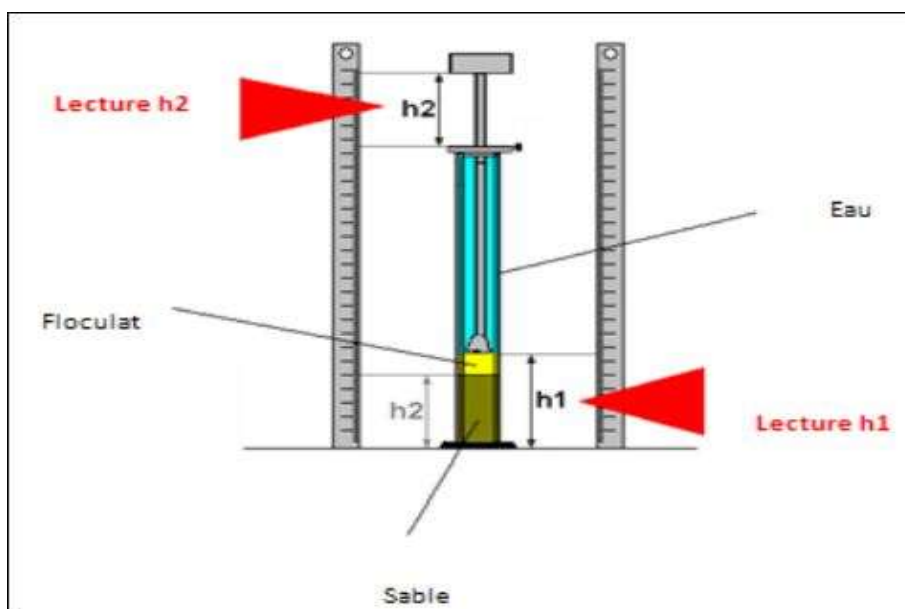


Figure 5: Présentation de l'essai d'équivalent de sable

- **Matériels**

- Tamis ;
- Entonnoir ;
- Éprouvette graduée ;
- Règle graduée ;
- Piston ;
- Machine à agitateur ;
- Balance électronique de précision.

- **Description de l'essai**

- Préparer 5 litres de solution lavante en diluant une dose de solution lavante concentrée de 125 cm³ dans 5 litres d'eau déminéralisée ;
- Tamiser le sable à tester de façon à séparer les éléments sableux les plus grossiers des particules fines (fraction 0/2), puis en prélever 120 g ;
- Remplir une éprouvette avec la solution lavante jusqu'au premier trait de jauge ;
- Verser le 120 g de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir ;
- Laisser l'éprouvette au repos pendant 10 minutes ;
- Boucher l'éprouvette à l'aide des bouchons et les agiter ;
- Remplir l'éprouvette jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et les parois intérieures afin de récupérer toutes les impuretés et le sable au fond des tubes ;
- Laisser reposer chaque éprouvette pendant 20 minutes en tenant compte des décalages de temps dus aux manipulations ;
- Mettre en place le piston pour séparer le floculant de l'eau ;
- Lire les valeurs de h_1 et h_2 à l'aide du réglet gradué ;
- Calculer ES par la relation suivante :

$$ES(\%) = 100 \times \frac{h_2}{h_1} \quad (56)$$

h_2 : sable propre + élément fin.

h_1 : sable propre seulement.

Spécifications

- $ES < 60$, sable argileux (risque de retrait ou de gonflement)
- $60 \leq ES < 70$, sable légèrement argileux (admissible pour le béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait)
- $70 \leq ES < 80$, sable propre à faible pourcentage de fines argileuses (convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité)
- $ES > 80$, sable très propre.

1.1.5. Essai Los Angeles sur gravillon

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproque des éléments de gravillon. Ce mode opératoire s'applique aux gravillons utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets et aux frottements réciproques de la machine Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisi parmi six granularités types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre. Le poids de la charge des boulets varie en fonction du type de granularité.

Si M est le matériau soumis à l'essai ; m , le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai ; et m' , la masse des éléments supérieurs à 1,6 mm ; la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :

$$LA = 100 \times \frac{m}{M} = 100 \times \frac{M - m'}{M} \quad (57)$$

Spécifications :

- $LA < 15$: Très bon à bon ;
- $15 < LA < 30$: Bon à moyen ;
- $30 < LA < 45$: Moyen à faible ;
- $LA > 45$: Médiocre et non recommandés

- **Matériels utilisés**

- Machine Los Angeles du LNTPB ;
- Boules ;
- Tamis d'ouverture de 1,6 mm ;
- Balance électronique de précision.

- **Description de l'essai**

- Effectuer l'essai sur le gravillon, ayant une granularité conforme à l'une des six classes granulaires types ;
Dans notre cas on prend la classe granulaire 6,3 /10 mm;
- Laver et sécher à l'étuve à 105°C le gravillon et peser une masse de 5000g ;
- Mettre en place l'échantillon de gravillon dans la machine ainsi que la charge des boules relatives à la classe granulaire choisie;
- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation;
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn;
- Enlever le gravillon après l'essai et le recueillir dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes ;
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm;
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant;
- Peser ce refus une fois séché. On note m' cette masse. Exprimer le coefficient de Los Angeles à partir de la relation (57) ci-dessus.

1.1.6. Essai d'usure micro – deval sur gravillon [18][19][20]

- **But et principe de l'essai**

L'essai d'usure Micro-Deval a pour but de définir la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisée en particulier dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. L'essai consiste à mesurer la résistance à l'usure par frottement, entre les granulats et une charge abrasive dans des conditions bien définies.

La prise d'essai constituée par des granulats de l'une des classes granulaires suivantes : 4 – 6,3 – 10, ou 10 – 14 mm, est placée avec une charge constituée de billes d'acier de 10mm de diamètre qui entraîne une usure par le frottement des granulats et des billes, et la formation d'une certaine quantité d'éléments fins de dimension inférieure à 1,6mm.

Le pourcentage en poids de ces éléments fins produits au cours de l'essai représente le coefficient d'usure Micro-Deval. Cette quantité, sans dimension, est appelée, suivant la méthode employée :

- Coefficient Micro-Deval à sec (MDS)
- Coefficient Micro-Deval en présence d'eau (MDE)

• Appareillages

Un appareillage Micro-Deval indiqué par la photo 9, qui est un broyeur à billes comportant un à quatre cylindres d'essai en acier fermé par un couvercle étanche. Ces cylindres sont entraînés en rotation pendant deux heures de rotations à 12 000tr (chaque cylindre permet d'effectuer un essai).

Un moteur de 1KW entraînant l'arbre permet aux cylindres d'acquies une Machine Micro-Deval une vitesse régulière de 100tr par minute.

- La charge abrasive est constituée par des billes sphériques de 10mm de diamètre
- Un jeu de tamis à mailles carrées de 1,6 / 4 / 6,3 / 10 / 14 mm
- Une balance capable de peser 5 000 g à 2 g près
- Une étuve permettant le séchage à 105°C
- Des bancs
- Un dispositif de lavage
- Des récipients de séchage



Photo 9: Machine pour essai MDE

- **Matériau soumis à l'essai**

L'échantillon reçu au laboratoire en blocs brut ou en granulats devra avoir une masse d'au moins de 2000g. Pour effectuer un essai à sec ou en présence d'eau, l'échantillon sera tamisé suivant la classe granulaire choisie, lavé et séché à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

En fonction de la classe granulaire choisie, la charge abrasive est fixée comme ci-après (tableau 30) :

Tableau 30 : Tableau des classes granulaires avec charge abrasive

CLASSE GRANULAIRE en [mm]	CHARGE ABRASIVE en [g]
4,0 – 6,0	2000
6,3 – 10,0	4000 ± 5
10,0 – 14,0	5000

Source : GEMRE

- **Mode opératoire**

- Introduire dans le cylindre d'essai la charge abrasive fixée conformément aux indications du tableau précédent, puis les 500g de

matériau préparé. Si l'essai doit être effectué en présence d'eau, ajouter 2,50 litres \pm 0,05 litre d'eau ;

- Fermer le couvercle et poser les deux cylindres sur les deux barres parallèles et faire fonctionner l'appareil pendant 2h soit 12 000trs ;
- Recueillir le granulats et la charge abrasive dans un bac. Le contenu du bac sera tamisé sous l'eau sur le tamis à mailles carrées de 1,6mm et les billes seront retirées à l'aide d'un aimant ;
- Porter le refus à 1,6mm à l'étuve pour séchage à 105°C jusqu'à masse constante, le peser, soit m' sa masse ;
- Exprimer le résultat par la relation suivante :

$$MD = 100 \times \frac{m}{500} \quad (58)$$

Avec, m est la masse sèche de la fraction de matériaux passant après essai au tamis de 1,6mm,

L'essai Micro-Deval présente l'avantage de s'effectuer sur des classes granulaires effectivement réalisées par les installations de concassage ce qui permet de suivre l'évolution de la résistance en fonction de la granularité.

L'essai devra être effectué sur l'échantillon tel qu'il sort des installations de traitement.

Lorsque l'échantillon reçu au laboratoire est en bloc brut, la classe granulaire est choisie en fonction de l'utilisation prévue.

Les granulats sont sensibles à l'eau. L'usure des roches en présence d'eau est souvent plus importante qu'à sec, surtout si elles contiennent des minéraux tendres.

1.2. Détermination des caractéristiques géométriques [21][22]

1.2.1. Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique par tamisage consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulats.

Les relations suivantes sont utilisées :

$$\% \text{ Refus} = \frac{\text{Refuscumulé}}{\Sigma \text{Refuscumulé}} * 100 \quad (59)$$

$$\% \text{ Passant} = 100 - \% \text{ Refus} \quad (60)$$

L'essai consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Ce fractionnement se fait à partir d'une série de tamis comme l'indique la photo 10.

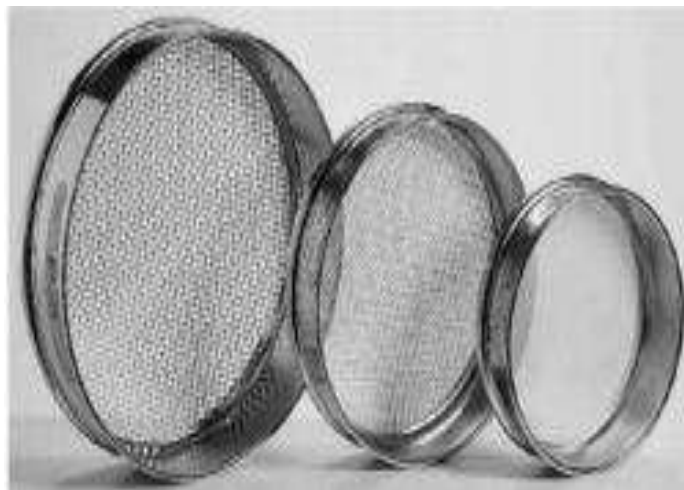


Photo 10: Série des tamis

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale des matériaux et les pourcentages obtenus sont exploités sous forme graphique.

- **Matériels**

- Balance électronique ;
- Série de tamis normalisés.

- **Matériau**

- Sable de carrière et sable de rivière
- Gravillons de concassage

• Description des essais

- Prélever trois échantillons à différents endroits (en haut ; au milieu ; au fond) ;
- Introduire les échantillons dans l'étuve à 105 °C jusqu'à ce qu'on ait une masse constante ;
- Disposer les tamis tels que celui qui a la plus grande ouverture soit placé au plus haut et les disposer par ordre décroissant d'ouverture (ne pas oublier le fond pour récupérer les fines) ;
- Verser l'échantillon de masse m_0 de l'échantillon par le haut de la série de tamis ;
- Disposer un couvercle en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau ;
- Vibrer la série de tamis par la main ou par une machine vibrante pendant 15mn ;
- Peser le refus du tamis ayant la plus grosse taille et le noter ;
- Peser les refus des tamis de toute la colonne dans l'ordre de tailles de grains décroissantes ;
- Les masses des différents refus de tamis cumulés sont rapportées à la masse totale de l'échantillon ;
- Calculer ensuite le pourcentage des refus cumulés ainsi obtenus à partir de la relation (59) ;
- Déduire le pourcentage des passants cumulés à partir de la relation (60) ;
- Tracer la courbe granulométrique.

1.2.2. Module de finesse pour le sable (Mf)

Cette caractéristique est déduite de l'analyse granulométrique du granulat. Elle est spécialement très utilisée pour caractériser la finesse d'un sable : plus le module de finesse est faible, plus le granulat est fin et inversement. Autrement dit, elle est utilisée dans la méthode de mélange des granulats (règle de mélange d'Abrams sur le module de finesse).

Sa valeur est donnée par la relation :

$$Mf = \frac{1}{100} (\text{somme des refus sur les tamis de module: } 20; 23; 26; 32; 35; 38; 41; 44)$$

(61)

Le module de finesse permet de compléter la définition granulaire, il permet de définir par un seul nombre la grosseur et la finesse du sable. Ce module est en général compris entre 0,6 et 4,0, du plus fin au plus grossier. Il ne s'applique pas au sable dont la dimension des plus gros grains (D_{\max}) est inférieure ou égale à 1mm.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable :

- Un module de finesse faible correspond à un sable fin ;
- Un module de finesse élevé correspond à un sable grossier.

Le Module de finesse peut être représenté géométriquement ; il correspond approximativement à la valeur de la surface comprise entre la courbe granulométrique, la parallèle à l'axe des ordonnées passant par le tamis d'ouverture 0,16 mm et la parallèle à l'axe des abscisses, passant au point 100% des passants cumulés.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse $M_f = 2,2$ à $2,8$

1.2.3. Coefficients de Hazen (coefficient d'uniformité) et coefficient de courbure

- Coefficient d'uniformité ou Hazen : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$
- Coefficient de courbure : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$

D_{10} , D_{30} et D_{60} représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, à 30% et à 60% de passant cumulé.

D'après Caquot et Kérisel :

- Pour $C_u < 2$, la granulométrie est dite uniforme ;
- Pour $C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée

Le coefficient d'uniformité caractérise la répartition en taille des éléments de la granulométrie des granulats.

Nous parlerons de granulométrie uniforme, si les grains sont à peu près tous de la même taille et de granulométrie étalée si toutes les tailles de grains sont représentées.

1.2.4. Coefficients d'aplatissement (CA) et coefficients volumétriques (CV [1])

Le principe de la méthode pour déterminer le coefficient d'aplatissement consiste à effectuer deux tamisages successifs :

- Un tamisage sur tamis qui permet de classer l'échantillon en différentes classes granulaires d/D (avec $D = 1,25 d$) ;
- Un tamisage des différentes classes granulaires d/D , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement $D/2$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondantes, exprimées en pourcentage.

Une série de grilles est constituée par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré.

Pour chacune des grilles, les fentes doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- Il doit y avoir plus de 10% de la longueur totale des fentes dont l'écartement diffère de 0,25 mm de l'écartement nominal ;
- En aucun point des fentes, la longueur de fente ne doit s'écarter de 0,5 mm de la dimension nominale.

2. Résultats

2.1. Résultats sur les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats

Les résultats sur les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont donnés dans le tableau 31

Tableau 31: Résultats des caractéristiques physiques et mécaniques des nos granulats

GRANULATS	W [%]	ρ [T/m ³]	σ [T/m ³]	ES[%]	LA	MDE
Sr ₁	4	1,436	2,578	76	-	-
Sr ₂	5,7	1,463	2,627	78	-	-
Sc	1,2	1,505	2,654	62	-	-
g ₁	1	1,580	2,618	-	30	21
g ₂	0	1,509	2,613	-	25	21
G	0	1,497	2,608	-	25	21

Avec W : Teneur en eau, ρ : masse volumique apparente, σ : masse volumique absolue, L.A : Coefficient de Los Angeles, MDE : Micro-Deval en présence d'eau, E.S : Equivalente de sable,

2.2. Résultats de l'analyse granulométrique des sables

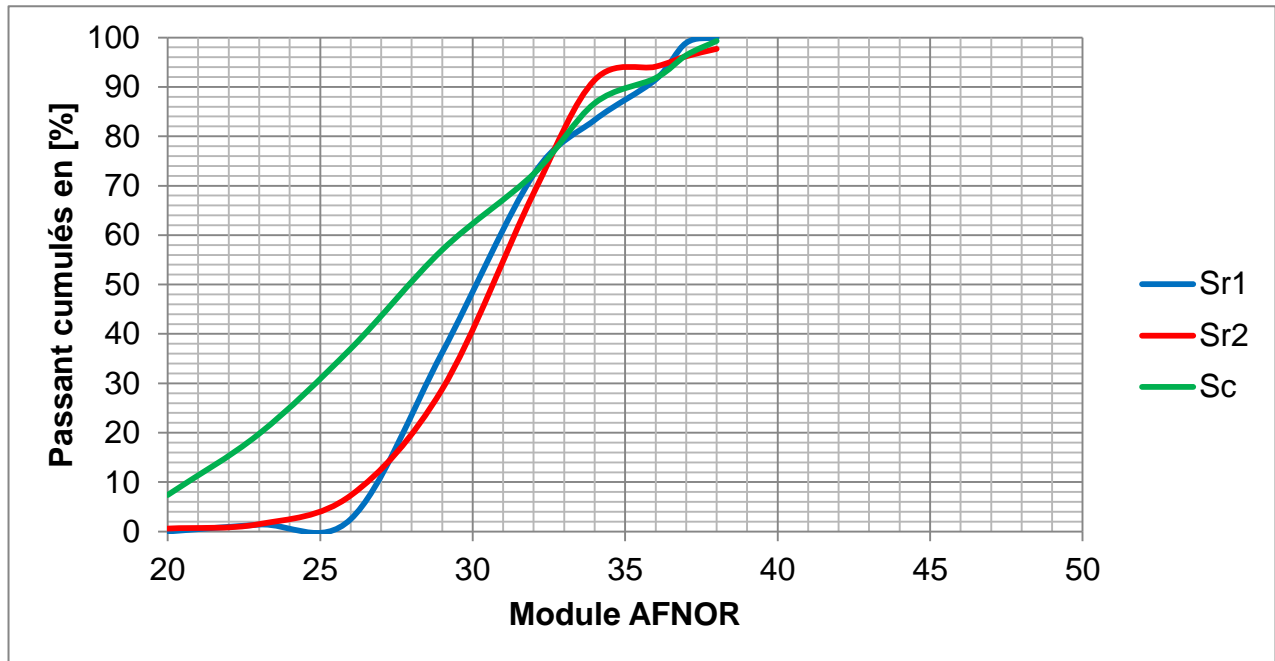
Les résultats d'analyse granulométrique des sables Sr₁, Sr₂ et Sc sont donnés dans le tableau 32 suivant :

Tableau 32 : Analyse granulométrique du sable Sr₁ en pourcentage des refus cumulés et passants cumulés.

MODULE	D _{Tamis} [mm]	Sr ₁		Sr ₂		Sc	
		% R _{cumulés}	% P _{cumulés}	% R _{cumulés}	% P _{cumulés}	% R _{cumulés}	% P _{cumulés}
38	5	0	100	2,3	97,7	0,7	99,3
37	4	1,1	98,9	3,8	96,2	3,6	96,4
36	3,15	8,5	91,5	5,9	94,1	8,2	91,8
35	2,5	16,7	83,3	8,6	91,4	13,3	86,7
32	1,25	27,7	72,3	31,5	68,5	27,6	72,4
29	0,63	63,8	36,2	71,2	28,8	43	57
26	0,315	97,5	2,5	92,7	7,3	63	37
23	0,16	98,6	1,4	98,5	1,5	80,2	19,8
20	0,08	100	0	99,4	0,6	92,6	7,4

Ce qui donne les courbes granulométriques de la figure 6

Figure 6 : Courbes d'analyse granulométrique des sables Sr_1 , Sr_2 et Sc



2.3. Résultats sur les modules de finesse des sables

Les modules de finesse de sable de carrière Sc et des sables de rivière Sr_1 et Sr_2 sont calculés à partir de la relation (61).

Notons $Mfsr_1$, le module de finesse de sable de rivière provenant d'IKOPA ; $Mfsc_2$, le module de finesse de sable de carrière et $Mfsr_2$, le module de finesse de sable de rivière provenant de la rivière SISAONY

Les résultats sont exprimés par le tableau 33 suivant

Tableau 33 : Modules de finesse des sables de rivière et de carrière

Sables	Module de finesse Mfi
Sr_1	2,9
Sr_2	3,1
Sc	2,3

2.4. Résultats sur les coefficients Cu et Cc des sables

Le module de finesse de sable de rivière Sr_2 nous montre que le sable de rivière est un sable, un peu grossier, par contre le sable de carrière Sc présente des éléments fins. Le sable de rivière Sr_1 est un sable moyen.

Les modules des éléments passants correspondent au calcul du coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure sont déterminés par la méthode graphique suivante :

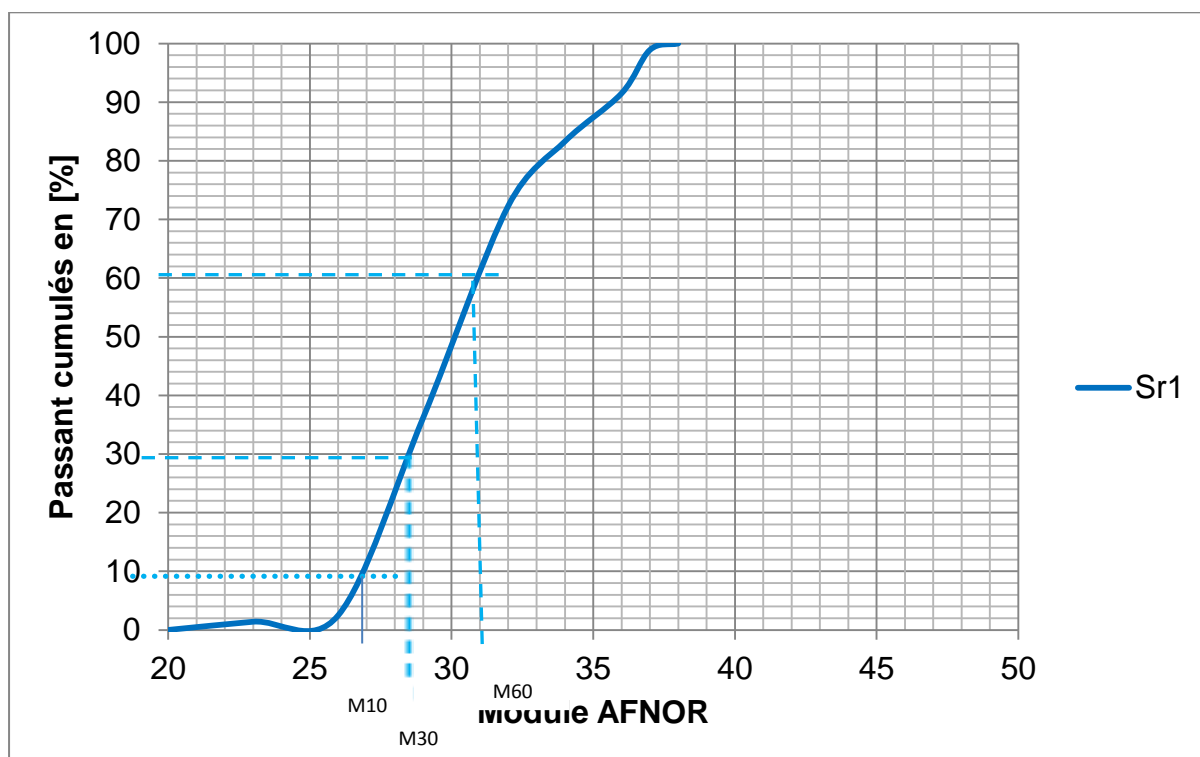


Figure 7 : Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sr₁

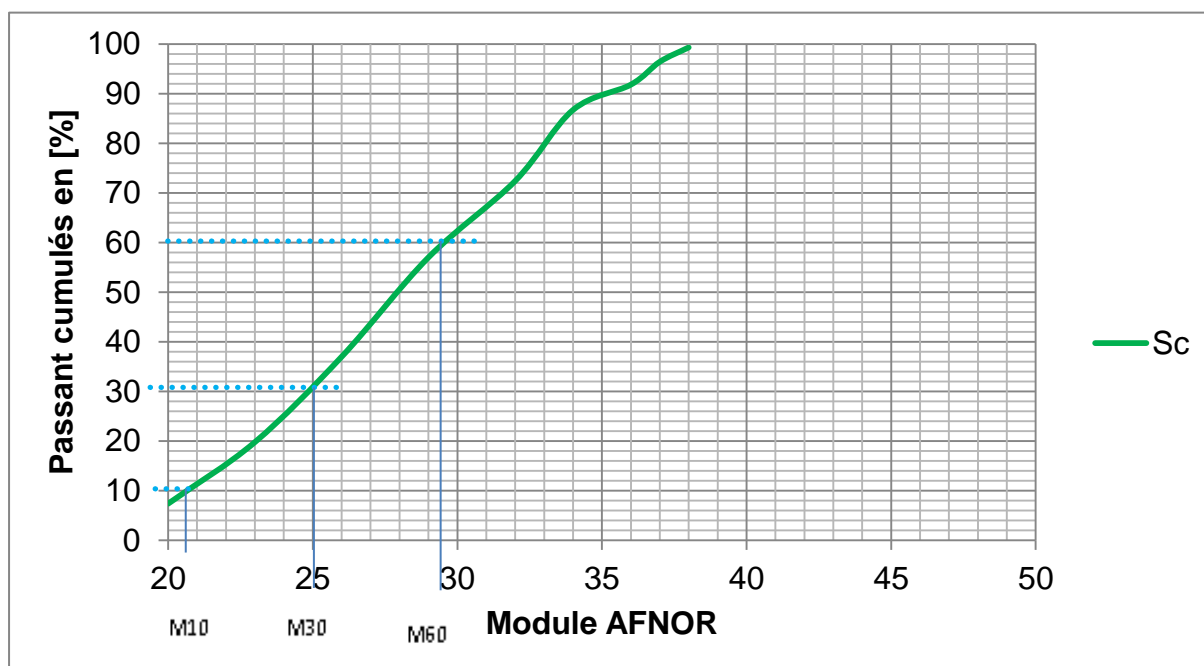


Figure 8: Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sc

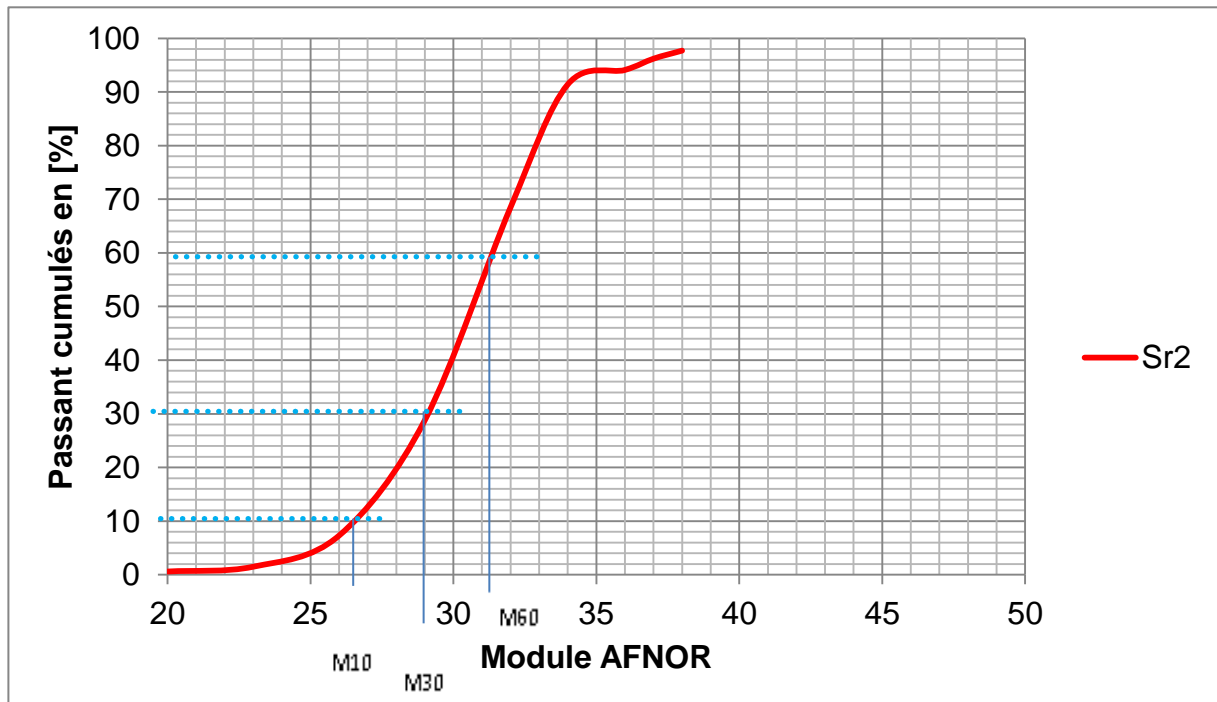


Figure 9: Détermination de M10, M30 et M60 de sable Sr₂

M10, M30 et M60 sont respectivement les modules des éléments correspond à 10%, à 30% et à 60% des passants cumulés, donnés par le tableau 30 suivant.

Tableau 34 : Les modules des éléments correspondent à 10%, à 30% et à 60% des passants cumulés des sables

SABLES	M10	M30	M60
Sr ₁	26,9	28,6	31
Sc	20,6	25	29,5
Sr ₂	26,5	29	31,2

Nous calculons, le diamètre des éléments correspond i% des passants cumulés par :

$$M_i = 31 + 10 \cdot \log D_i$$

$$10 \cdot \log D_i = M_i - 31$$

$$\log D_i = \frac{M_i - 31}{10}$$

$$D_i = 10^{\left(\frac{M_i - 31}{10}\right)} \quad (62)$$

Les résultats sont représentés par les tableaux 35 et 36 suivants

Tableau 35 : Diamètres des éléments correspond à 10%, à 30 et à 60% des passants cumulés des sables

SABLES	D10	D30	D60
Sr ₁	0,39	0,58	1
Sc	0,09	0,25	0,71
Sr ₂	0,35	0,63	1,05

Tableau 36 : Valeurs des Cu et de Cc des sables

SABLES	Cu	Cc
Sr1	2,6	0,9
Sc	7,9	1,0
Sr2	3,0	1,1

Nous en déduisons que nos sables sont tous étalés (Cu>2).

2.5. Résultats de l'analyse granulométrique des gravillons

L'analyse granulométrique de gravillon g₁ (5/12,5) est présentée dans le tableau 37.

Tableau 37 : Résultats d'analyse granulométrique de nos gravillons en pourcentage des refus et des passants cumulés

MODULE AFNOR	D _{Tamisé} [mm]	GRAVILLON g ₁ (5/12,5)		GRAVILLON G (5/25)		GRAVILLON g ₂ (5/15)	
		% R _{cumulés}	% P cumulés	% R _{cumulés}	% P cumulés	% R _{cumulés}	% P cumulés
45	25	-	-	2,9	97,1	0	100
44	20	-	-	41,8	58,2	0	100
43	16	-	-	76,3	23,7	0,4	99,6
42	12,5	0	100	95,1	4,9	8,1	91,9
41	10	18,06	81,94	99,2	0,8	24,8	75,2
40	8	60,07	39,93	99,6	0,4	49,6	50,4
39	6,3	92,11	7,89	99,6	0,4	70,7	29,3
38	5	100	0	-	-	83,8	16,2
37	4	-	-	-	-	92,1	7,9
36	3,15	-	-	-	-	100	0

Nous pouvons représenter par la figure 10 suivante ces résultats

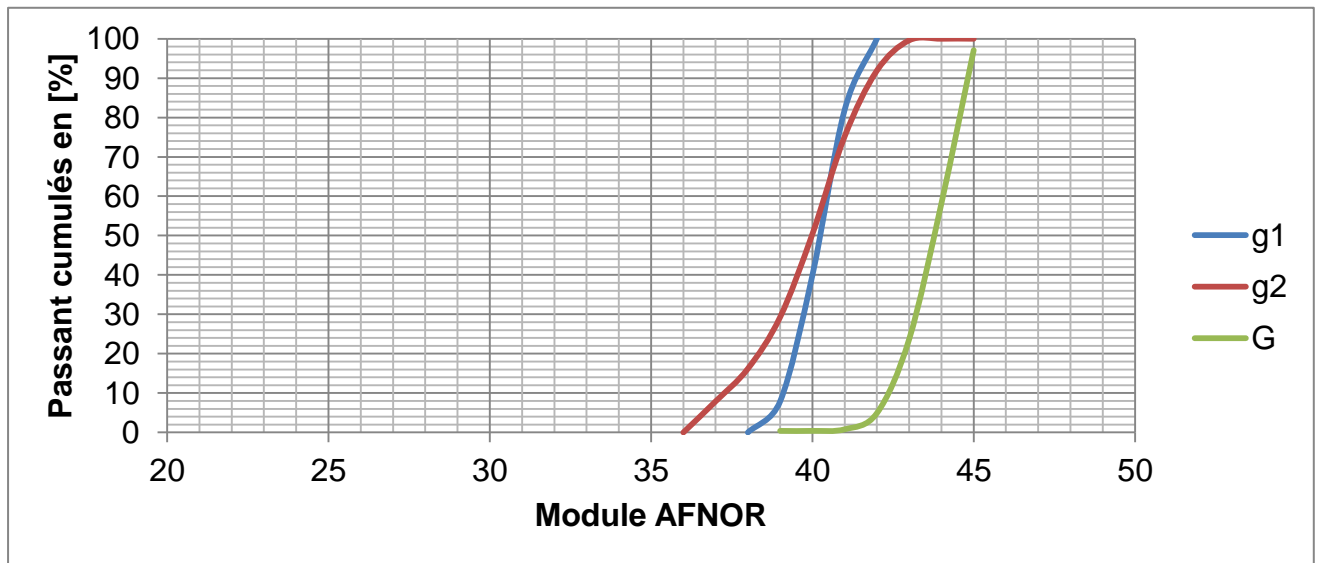


Figure 10 : Courbe granulométrique de gravillon g1 (5/12,5)

2.6. Résultats sur le coefficient d'Aplatissement CA et le coefficient volumétrique CV

Les valeurs de CA et de CV de nos gravillons sont données dans le tableau 38

Tableau 38: Valeurs de CA et de CV de nos gravillons

g ₁		G		g ₂	
CA	CV	CA	CV	CA	CV
13	0,19	25	0,20	16	0,19

III. LES FILLERS

1. Filler cipolin (F_c)

Nous avons choisi, la roche cipolin blanc de la carrière HOLCIM à IBITY. Le cipolin doit être broyé finement par le broyeur à boulets pendant trois jours en continu afin d'obtenir une grande finesse. Le broyeur utilisé est le broyeur à boulets de laboratoire CNRIT. Ce broyeur permet d'avoir des fines de cipolin de diamètre inférieur à 50 µm.

Le filler cipolin utilisé comme ajout dans le béton est obtenu par tamisage sur un tamis d'ouverture de 50 µm.

Nous nous intéressons donc sur la partie la plus fine.

Les caractéristiques physiques de cipolin sont données dans le tableau 39.

Tableau 39 : Caractéristiques physiques de filler cipolin (F_C)

PARAMÈTRES PHYSIQUES	CARACTÉRISTIQUES
Couleur	Blanc
Densité apparente	1,231
Densité absolue	2,846
SSB [cm ² /g]	3500

Nous avons effectué aussi la détermination de la composition chimique du cipolin, qui est donnée dans le tableau 40.

Tableau 40: Composition chimique élémentaire du cipolin

COMPOSITION CHIMIQUE DU CIPOLIN								
SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO[%]	MgO[%]	Na ₂ O[%]	K ₂ O[%]	SO ₃ [%]	P.F[%]
10,75	0,1	0,69	50,38	0,53	0,2	0,13	0,11	35,23

La pureté du cipolin (titre en CaCO₃) est de 91,4%.

2. Filler dolomie (F_D) [14]

Les dolomies sont des roches sédimentaires d'origine externe ou des roches exogènes. Elles se présentent sous forme de couches ou en strates de haute puissance. Ce sont des roches d'origine chimique et biochimique due à la précipitation du sel dissous. Elles appartiennent au groupe des roches calcaires. Elles ont pour formule chimique globale CaCO₃MgCO₃.

La dolomie est classée géologiquement parmi les roches détritiques et des roches d'origine hydrothermale (précipitation des eaux marines). Théoriquement une roche ne doit être dénommée dolomie (en sens strict) que si sa teneur en dolomite (CaMg(CO₃)₂) dépasse 90%.

Nous utiliserons la dolomie déjà pulvérisée produite par la société PROCHIMAD provenant de la carrière d'Ihenikenina. Elle est commercialisée sous forme de sac de 50 kg et est désignée « Dolomie D40 ». ($D \leq 40 \mu\text{m}$).

Les caractéristiques physiques et chimiques de filler dolomie sont présentées dans les tableaux 41 et 42 suivants :

Tableau 41: Caractéristiques physiques de filler dolomie (F_D)

PARAMÈTRES PHYSIQUES	CARACTÉRISTIQUES
Couleur	Blanche
Densité apparente	1,201
Densité absolue	2,721

Tableau 42: Composition chimique de filler dolomie (F_D)

COMPOSITION CHIMIQUE DE LA DOLOMIE				
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
15,6	0,2	1,6	30,8	22,6

IV. L'EAU DE GÂCHAGE [4]

L'eau du robinet de la JIRAMA est utilisée pour le gâchage du béton. L'eau doit être exempte des matières organiques, car ces dernières diminuent la résistance mécanique du béton. Les caractéristiques de l'eau de JIRAMA sont données par le tableau 43 suivant.

Tableau 43 : Caractéristiques de l'eau de JIRAMA

CARACTÉRISTIQUES	VALEURS
Insolubles	0
Matières dissoutes [mg/l]	0,0004
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0,0028
Sulfates en SO ₃	0
Sulfites en S [%]	0
Sucres [%]	0
P ₂ O ₃ [%]	0
NO ₃ [%]	0
Zinc [%]	0
Acidité en pH	7,20
Acidité humis	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/l]	3,55
Ions soufre [%]	0

Source : JIRAMA

V. LES ADJUVANTS

1. La Sika®viscocrete®tempo12

Le Sika®ViscoCrete®Tempo 12 est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chlorée à base de copolymère acrylique,

utilisée pour la fabrication de bétons fluides ou autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés. Ce produit améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Le produit nous a été fourni par la société MADECASSE qui est le distributeur agréé des produits Sika à Madagascar.

Les caractéristiques et les conditions d'application de ce superplastifiant sont exposées dans les tableaux 44 et 45 ci-après.

Tableau 44: Caractéristiques du superplastifiant Sika ®viscocrete®tempo12

PARAMÈTRES PHYSIQUES	CARACTÉRISTIQUES
Aspect	Liquide brun clair
Densité	$1,06 \pm 0,01$
pH	6 ± 1
Teneur en Na ₂ O eq-	$\leq 1\%$
Extrait sec	$30,2 \pm 1,3 \%$
Teneur en ion Cl-	$\leq 0,1 \%$

Source : Société MADECASSE 2011

**Tableau 45:Condition d'application du superplastifiant Sika
®viscocrete®tempo12**

CONDITIONS D'APPLICATION	DOSAGE
Plage d'utilisation usuelle	0,4 à 1,5% d'extrait sec du poids du ciment
Plage d'utilisation recommandée	0,2 à 3% du poids du ciment selon la fluidité et les performances recherchées

Source : Société MADECASSE 2011

2. Le rhéobuild561

Le rhéobuild 561 est aussi un superplastifiant réducteur d'eau. Il est composé de polymères synthétiques spécialement formulés pour conférer au béton des propriétés rhéoplastiques.

Un béton rhéoplastique est un béton fluide présentant à l'essai au cône d'Abrams un affaissement d'au moins 20 cm ; il s'écoule facilement sans ségrégation et son rapport eau/ciment est la même que celui d'un béton sec de 2,5 cm d'affaissement sans adjuvant.

Le rhéobuild 561 améliore considérablement les propriétés du béton frais et du béton durci.

Grâce au Rhéobuild 561, le béton rhéoplastique reste maniable pendant environ 3 heures à 20°C et pendant 1 heure à 40°C. La durée exacte du maintien de la maniabilité dépend non seulement de la température, mais aussi du type de ciment utilisé, de la nature des granulats et du mode de transport. Pour ce qui concerne la cure de béton, il est recommandé de prévoir des méthodes appropriées, surtout dans le pays à climat sec.

Le superplastifiant Rhéobuild 561 nous a été fourni par la société BATPRO qui est le distributeur agréé des produits BASF à Madagascar.

Les caractéristiques et les conditions d'application de Rhéobuild 561 sont exposées dans les tableaux 46 et 47.

Tableau 46: Caractéristiques du superplastifiant Rhéobuild 561

PARAMÈTRES PHYSIQUES	CARACTÉRISTIQUES
Aspect	Liquide brun
Densité	1,17 ± 0,03
pH	8,5 ± 1,5
Teneur en Na₂O eq-	≤ 1%
Teneur en ion Cl-	≤ 0,1 %
Point de congélation	-5°C

Source : Société BATPRO 2011

Tableau 47: Condition d'application du superplastifiant Rhéobuild 561

CONDITIONS D'APPLICATION	DOSAGE
Plage d'utilisation usuelle	0,4 à 1,5% d'extrait sec du poids du ciment (soit 0,34 L à 1,28 L pour 100 Kg de ciment)
Recommandations	En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement. Proscrire l'agitation par air comprimé.

Source : Société BATPRO 2011

VI. CONCLUSION PARTIELLE

Les gravillons concassés g₂ (5/15) et G (5/25) sont issus d'un concassage d'une roche granitique ayant un coefficient de Los Angeles LA = 25 en classe granulaire

10/25. Ils sont respectivement de la classe 0,19 et 0,20 (coefficient volumétrique). Les formes sont donc tolérables. Le gravillon provenant de la carrière artisanale de Vontovorona g_1 (5/12,5) a un coefficient de Los Angeles $LA = 30$, moins dure par rapport aux gravillons de la carrière SCB.

Les sables de rivière Sr_1 et Sr_2 utilisés ont respectivement un module de finesse égale à 2,9 et 3,1. Ces sont des sables grossiers.

Quant au sable de carrière Sr , son module de finesse est de 2,3 ; un peu fin par rapport aux sables de rivière. Ce sont des sables à granulométrie étalée ($Cu > 2$), tolérable dans la formulation.

Concernant le ciment CEM II/A - 42,5 ; ce ciment est à prise et durcissement normaux. Et l'eau de gâchage et les adjuvants que nous utilisons sont acceptables pour formuler un béton fluide à forte résistance.

Chapitre VI : FORMULATIONS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACITÉ PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES ABSOLUS

L'utilisation de la méthode des volumes absolus a pour objectif de déterminer les paramètres nécessaires pour la formulation des bétons fluides. Dans ce chapitre, nous avons formulé cinq bétons fluides à haute compacité.

Nous avons tout d'abord formulé des bétons témoins (bétons ordinaires) sans ajout des fines et des adjuvants pour pouvoir les comparer aux bétons fluides que nous avons formulés après. C'est pour montrer qu'un béton fluide aura une ouvrabilité plus aisée, une résistance mécanique plus élevée et une meilleure durabilité que le béton ordinaire.

Essayons tout d'abord d'utiliser le gravillon g_1 provenant de la carrière artisanale de Vontovorona et le sable Sr_1 du gisement d'Ikopa Anosizato Est pour formuler un béton ordinaire, noté BO_1 ; nous obtenons ainsi les résultats correspondants.

Essayons ensuite de combiner les gravillons g_2 et le sable Sr_2 , le sable Sc et le gravillon G , le tout sans adjuvant. Le but est de connaître les granulats qui conviennent bien à la formulation des bétons fluides.

On désigne alors:

$$BO_1 = Sr_1 + g_1 + E + C$$

$$BO_2 = Sr_2 + g_2 + Sc + E + C$$

$BO_3 = Sr_2 + g_2 + Sc + E + C$ (Dosage de chaque constituant selon la norme TBM).

I. FORMULATION DE BÉTON ORDINAIRE BO_1 A PAR LA METHODE DREUX GORISSE

Pour avoir un bon béton qui résiste bien à la compression, nous fixons le dosage de ciment à 400 kg / m^3 . C'est un dosage un peu plus élevé théoriquement.

D'après la lecture de l'abaque (figure 3, page 30), pour un béton plastique d'affaissement $Aff = 12 \text{ cm}$ et de dosage en ciment fixé à $C = 400 \text{ kg/m}^3$, nous avons trouvé le rapport $C/E = 1,8$; ou $E/C = 0,55$; ce qui donne un dosage en eau $E = 220 \text{ L}$.

a) Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO₁

Nous pouvons alors estimer la résistance à 28 jours en MPa du béton ordinaire par la relation (2), vue dans l'étude bibliographique.

$$R_c = G \times F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

La classe vraie du CEMII/A 42,5N est de 54 MPa et les granulats sont de qualité moyenne donc $G = 0,35$.

$$R_{c28} = 0,35 \times 54 \times (1,8 - 0,5)$$

$$R_{c28} = 25 \text{ MPa}$$

La résistance en compression de béton ordinaire envisageable est de 25 MPa. C'est un béton témoin.

b) Calcul de dosage des granulats (pour 1 m³ de béton)

1.1. Détermination des proportions des granulats à partir de la courbe de référence

Le diamètre maximal des granulats est $D_{\max} = 12,5\text{mm}$.

D'après les relations (3) et (4) dans la page 31, le point de brisure **A** a pour cordonnée :

$$\begin{cases} x = \frac{D_{\max}}{2} \\ y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p \end{cases}$$

La valeur de K est obtenue par la lecture du tableau 17, page 32 précédente.

Dans notre cas, $K = 0$ (vibration normale et dosage du ciment $C = 400 \text{ Kg/m}^3$).

De plus, le béton n'est pas pompable donc $K_p = 0$

K_s est déterminé par :

$$K_s = 6Mf_{sr1} - 15 = 6 \times 2,9 - 15 = 2,4$$

Le point de brisure a pour coordonnée A [39 ; 48,86%]

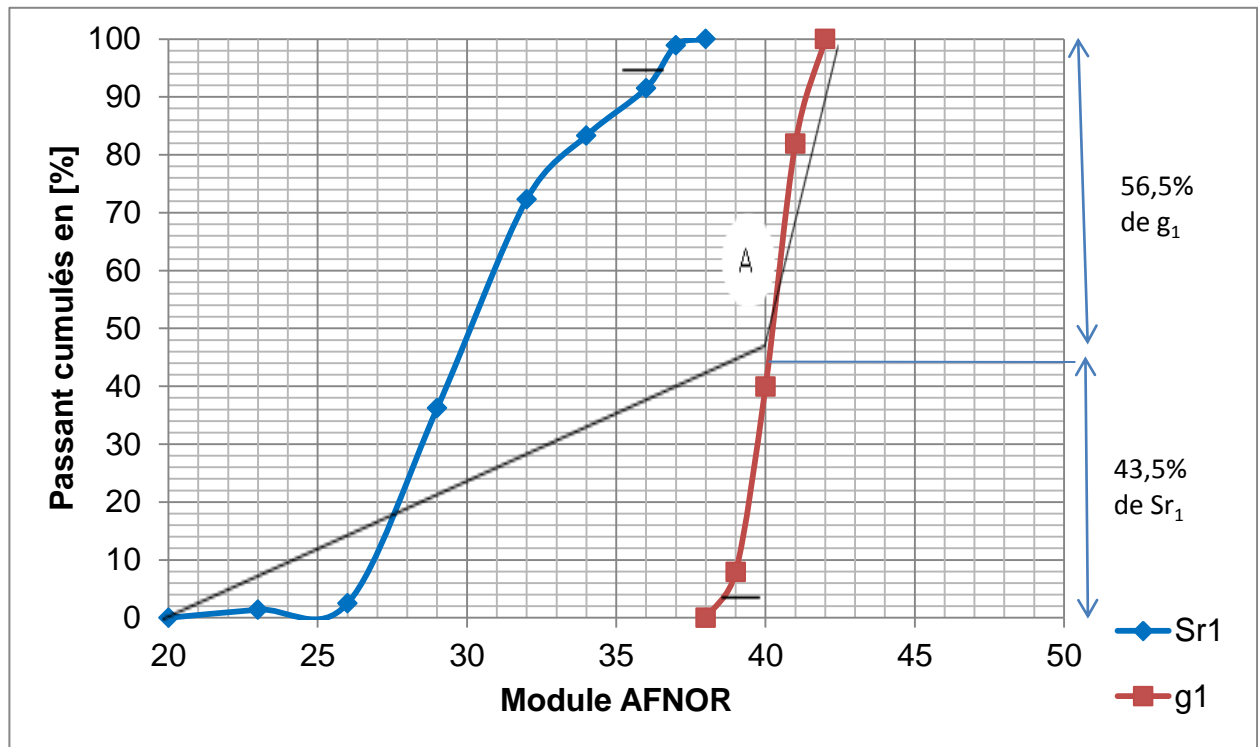


Figure 11: Courbe granulométrique des granulats et courbe de référence – Détermination des pourcentages volumiques des granulats de BO₁

D'après la méthode de Dreux Gorisse, on déduit d'après cette courbe que notre béton ordinaire est composé de 43,5% de sable Sr₁ et de 56,5% de gravillon g₁ (5 / 12,5).

1.2. Calcul de dosage en Sr₁ et en g₁

Nous utilisons la vibration normale pour formuler le BO₁. D'après la lecture du tableau 18, dans la page 33 précédente, nous avons la valeur de la compacité $\delta = 0,800$ (D_{\max} proche de 10 mm avec une vibration normale).

Nous calculons alors le dosage de chaque granulat à partir de la relation (6)

$$\text{Dosage de granulat "i" en [Kg]} = (\%G_i) \times \sigma_i \left(1000\delta - \frac{c}{\sigma_c} \right)$$

Les dosages de chaque constituant du BO₁ sont donc donnés dans le tableau 48

Tableau 48 :Composition du BO₁ selon la méthode de Dreux Gorisse

DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT en [Kg/m ³]	
Ciment (C)	400
Eau (E)	220
Sable (Sr1)	752
Gravillon (g1)	992

c) Résultats et interprétation

Les résultats à l'état frais et à l'état durci du BO₁ sont montrés dans les tableaux 49 et 50.

Tableau 49: Affaissement du béton ordinaire BO1

TEST A L'ÉTAT FRAIS	VALEUR en [cm]
Affaissement	12,3

Tableau 50: Résistance en compression du BO₁

TEST A L'ÉTAT DURCI	VALEURS[MPa]
Rc 7	16,4
Rc14	21,6
Rc28	23,2

Nous n'atteignons même pas la résistance à la compression théorique de 25 MPa; bien que le dosage en ciment soit élevé. De nombreux paramètres peuvent être attribués au fait que le diamètre du gravillon utilisé est très petit, et son coefficient de Los Angeles est relativement faible comparé aux gravillons provenant de la carrière du SCB. Le dosage en eau est également de 220 litres par mètre cube (un dosage en eau élevé).

Dans le cas du test d'affaissement, nous avons pu atteindre exactement la valeur de 12 cm.

II. FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES BFL₁ (BFL₁= C+g₁+Sr₁+Sp₁ +Fc)

Il n'y a pas de méthodes précises pour formuler un béton fluide, mais on peut se référer aux recommandations provisoires de l'AFGC pour déterminer les dosages de chaque constituant de notre BFL₁.

Les gammes de valeurs généralement employées dans 1 m^3 de béton sont issues de ces recommandations et présentées ci-dessous:

- Un rapport Gravillon / Sable (G/S) égal à 1 ;
- Un rapport Eau /Ciment (E/C) relativement faible ;
- Un dosage en ciment plutôt élevé;
- Un diamètre maximal réduit ;
- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;
- Un pourcentage déterminé en ajouts (ici le Filler cipolin broyé) ;
- Utilisation d'adjuvant superplastifiant ;
- Air occlus de l'ordre de 5% ;

Notons, le béton fluide 1 par $BFL_1 = g_1 + Sr_1 + C + E + Sp_1 + Fc$.

Pour le BFL_1 , nous gardons la valeur E/C à 0,55, G/S à 1 et $D_{\max} = 12,5 \text{ mm}$ pour assurer une bonne lubrification. Par contre, on varie le dosage en superplastifiant Sp_1 selon les indications de la fiche technique ainsi que le rapport Filler Cipolin /Ciment (Fc/C).

1. Dosage en Ciment

Le ciment Manda de classe 42,5 est utilisé, son dosage est fixé à $C = 400 \text{ kg/m}^3$ de béton.

2. Dosage en Eau

Pour pouvoir comparer notre béton fluide à haute compacité BFLHC au béton ordinaire, on garde la valeur de $E/C = 0,55$ déterminé précédemment à partir de la lecture de l'abaque de la figure 3. Nous cherchons dans ce cas la formulation du BFL_1 .

Le dosage en eau est alors calculé à partir des valeurs $E/C = 0,55$ et de $C = 400 \text{ Kg/m}^3$. Le dosage en eau est donc aussi fixé à 220 L/m^3 .

3. Dosage en fines de cipolin

Le dosage en fines joue un rôle important dans la résistance mécanique du béton. Elle est obtenue à partir du rapport F_C/C . On le fait varier jusqu'à l'obtention d'une résistance en compression optimale.

4. Dosage en superplastifiant Sp_1

Le dosage en superplastifiant viscocrète tempo 12 est tâtonné de 1 à 2% du poids de ciment.

5. Dosages en sable et en gravillon

Les dosages en sable et en gravillon ne sont trouvés qu'après le dosage des autres constituants. Ils ont la même valeur, car on fixe le rapport G/S à , soit $Sr_1 = g_1$.

Les quantités de ciment, d'eau, de superplastifiant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable et du gravillon de manière à obtenir un mètre cube de béton, ce qui donne la relation suivante :

$$V_{Sr1} + V_{g1} + V_E + V_C + V_{Sp1} + V_a + V_{FC} = 1000 \text{ L (1m}^3\text{) du béton (63)}$$

Le volume d'air V_a du béton est environ de 5 % (recommandations AFGC),

donc $V_a = 50 \text{ L}$

On connaît que $V_i = \frac{m_i}{\sigma_i}$ donc l'équation (63) devient

$$\frac{Sr1}{\sigma(Sr1)} + \frac{Sr1}{\sigma(g1)} + \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{Sp1}{\sigma(Sp1)} + \frac{F_C}{\sigma(F_C)} + V_a = 1000$$

Or le volume des pâtes de béton est

$$V_{pates} = \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{Sp1}{\sigma(Sp1)} + \frac{F_C}{\sigma(F_C)} + V_a \quad (64) \quad \text{en [L/m}^3\text{]}$$

Donc

$$S \left(\frac{1}{\sigma(Sr1)} + \frac{1}{\sigma(g1)} \right) = 1000 - V_{pates}$$

Le dosage en sable et en gravillon est déterminé par

$$Sr1 = g1 = \frac{1000 - V_{pates}}{\left(\frac{1}{\sigma(Sr1)} + \frac{1}{\sigma(g1)} \right)} \quad (65)$$

6. Études préliminaires

Pour l'étude préliminaire, nous avons pris les paramètres de dosage indiqué dans le tableau 51 suivant.

Tableau 51: Paramètres de dosage des bétons fluides pour l'étude préliminaire

S _p /C en [%]	1,25	1,5	1,75	2
E/C	0,55	0,55	0,55	0,55
g1/Sr1	1	1	1	1
F _c /C	0,25	0,25	0,25	0,25

Ce qui nous donne les dosages de chaque constituant, présentés dans le tableau 52 suivant.

Tableau 52: Composition préliminaire du BFL₁

DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT en [Kg/m ³]				
C	400	400	400	400
E	220	220	220	220
Sr1	729	728	726	725
g1	729	728	726	725
F _c	100	100	100	100
Sp1	5	6	7	8

6.1. Résultats et interprétations

Cette étude préliminaire ne donne pas des résultats satisfaisants, mais le but est de déterminer le dosage en saturation de superplastifiant avec nos matériaux.

- Résultats sur l'essai d'affaissement au cône d'Abrams**

Nous avons remarqué que les gros granulats se trouvaient au milieu d'une matière fluide s'écoulant autour de cet amas (le mélange n'est pas resté « homogène »).

- Résultats sur l'essai de la résistance en compression

Tableau 53: Résultat sur l'essai de la résistance en compression lors de l'étude préliminaire

RÉSISTANCE EN COMPRESSION	Sp1 /C			
	1,25%	1,5%	1,75%	2%
Rc ₇ [MPa]	10	8,14	11,32	9
Rc ₂₈ [MPa]	12	10,26	12,38	10,12

6.2. Conclusion

Nous pouvons en conclure que pour un béton fluide BFL₁, les résultats sont mauvais ; ils ne sont pas aussi conformes à la norme pour un béton fluide.

Pour remédier à cela, on garde la valeur de 1,75% du ciment pour le superplastifiant et on fait varier la valeur de F_C/C de 0,25 à 0,75. Ceci a pour but de déterminer le dosage en filler cipolin F_C. De plus, on fixe le diamètre des fins passants à 50 µm pour que les réactions se passent bien.

7. Détermination d'une valeur optimum du BFL₁ en faisant varier le rapport F_C/C

L'augmentation des fines de cipolin par rapport au ciment entraîne des changements de dosage de chaque constituant du béton (pour avoir un mètre cube de béton).

7.1. Dosages des chaque constituant du BFL₁

Les paramètres de dosage sont donnés dans le tableau 54 suivant

Tableau 54: Paramètres des dosages du BFL₁

ESSAIS	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai5	Essai6
S _{p1} /C en [%]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
E/C	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
g ₁ /Sr ₁	1	1	1	1	1	1
F _C /C	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75

Les paramètres des dosages du BFL₁ dans le tableau 54 précédent nous donnent les dosages de chaque constituant suivant :

Tableau 55: Compositions du BFL₁ en faisant varier le pourcentage de fine de cipolin par rapport au ciment

DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT DANS 1m ³						
ESSAIS	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai5	Essai6
C [Kg]	400	400	400	400	400	400
E [L]	220	220	220	220	220	220
Sr ₁ [Kg]	726	708	690	672	653	635
g ₁ [Kg]	726	708	690	672	653	635
F _c [Kg]	100	140	180	220	260	300
Sp[L]	7	7	7	7	7	7

7.2. Résultats et interprétation

Après différents essais successifs, nous obtenons les moyennes des résultats sur les essais d'affaissement au cône d'Abrams, et sur l'essai de la résistance en compression.

7.2.1. Résultats sur les essais d'affaissement au cône d'Abrams

Les valeurs d'affaissement sont données dans le tableau 56 suivant.

Tableau 56: Valeurs d'affaissement des 6 essais effectués

ESSAIS	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai5	Essai6
F _c /C	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
ST[cm]	20	20	19	18	14	12

Nous pouvons présenter ces valeurs d'affaissement par une figure (figure 13)

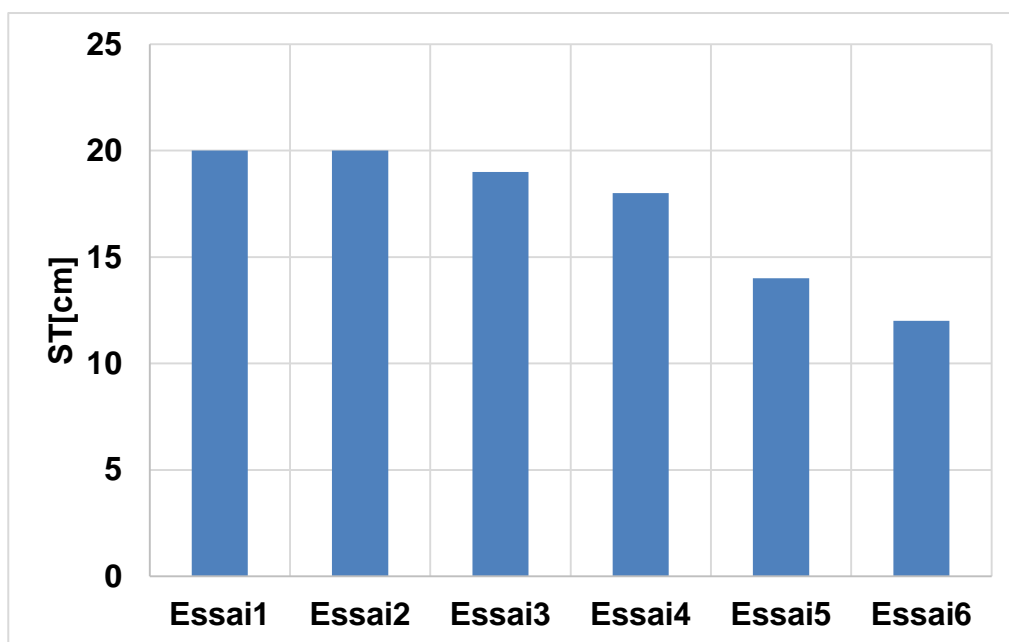


Figure 12: Valeurs d'affaissement des BFL en fonction de la proportion de fines d'ajout de filler cipolin

Interprétation

Lors du malaxage de chaque échantillon, on observe que le mélange est visqueux et les gros grains sont entraînés vers la périphérie avec l'ensemble du béton.

Le point cible pour un béton fluide de type S4 qui est conforme à la norme NF EN 206-1, est la valeur d'affaissement de 18 cm de l'essai 4. Cette valeur est obtenue par le dosage de superplastifiant 1,75% de ciment et de fines de cipolin 55% par rapport au ciment. Lors d'affaissement de cet essai 4, on observe que le mélange est un peu plus visqueux.

Pour L'essai 1, essai 2, et essai 3 ; les valeurs de l'affaissement sont respectivement 20, 20 et 19. Les bétons obtenus à partir de ces essais sont des bétons très fluides. Ils sont classés comme des bétons de type S5 selon la norme NF EN 206-1.

Nous pouvons obtenir aussi des bétons très plastiques à partir de l'essai 5 et 6 qui ont des valeurs d'affaissement respectives 14 cm et 12 cm. Selon toujours la norme NF EN 206-1, ce sont des bétons de type S3.

- **Résultats sur les essais de mesure de retrait du béton**

Le tableau 57 suivant présente les résultats sur la mesure de retrait des BFL₁.

Tableau 57 : Résultats de mesure de retrait des BFL₁

ESSAIS	$\Delta h = h_1 - h_2$ [mm]	R[%]
Essai 1	0,8	1,33
Essai 2	0,29	0,48
Essai 3	0,1	0,16
Essai 4	0,1	0,17
Essai 5	0,08	0,13
Essai 6	0,08	0,13

Les valeurs de retrait des bétons sont très faibles. Nous avons donc formulé des bétons de faibles retraits. Ceci est expliqué par le faible de taux de vides dans nos bétons.

7.2.2. Résultats sur les essais de mesure de porosité et de compacité

Les résultats de ces essais sont indiqués dans le tableau 58 suivant.

Tableau 58: Résultat sur la mesure de la porosité et de la compacité des 6 essais effectués

ESSAIS	$V_{vide} = M_0 - M_1$ [cm ³]	V [cm ³]	POROSITÉ $P[\%] = \frac{V_{vide}}{V} \times 100$	COMPACITÉ $C[\%] = 1 - P[\%]$
Essai 1	27,87	169,56	16,43	83,57
Essai 2	8,61	169,56	5,08	94,92
Essai 3	5,15	169,56	4,81	95,19
Essai 4	7,36	169,56	4,34	95,66
Essai 5	6	169,56	3,54	96,46
Essai 6	5	169,56	2,95	97,05

Interprétation

D'après la mesure de la porosité, on remarque qu'aucune bulle d'air n'est pas trouvée lors de l'immersion de chaque éprouvette dans l'eau sauf pour le béton obtenu à partir de l'essai 1.

Le béton obtenu à partir de l'essai 1 a une faible compacité de valeur 83,57% par rapport aux autres essais. Quant à l'essai 2, l'essai 3, l'essai 4, l'essai 5, l'essai 6 ; les valeurs de compacité varient de 95 à 97%.

Ces bétons sont donc qualifiés comme des bétons à haute compacité.

- **Résultats sur l'essai de la résistance en compression**

Les résultats sont présentés dans le tableau 59 et dans la figure 13 suivant

Tableau 59: Valeurs des résistances en compression des 6 essais effectués

RÉSISTANCE EN COMPRESSION	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai 5	Essai6
Rc 7 [MPa]	11,3	15,62	18,95	20,98	21,55	25,37
Rc 14 [MPa]	11,9	19,59	23	32,20	31,49	30
Rc 28 [MPa]	12,38	22,3	30	35,75	36,1	40

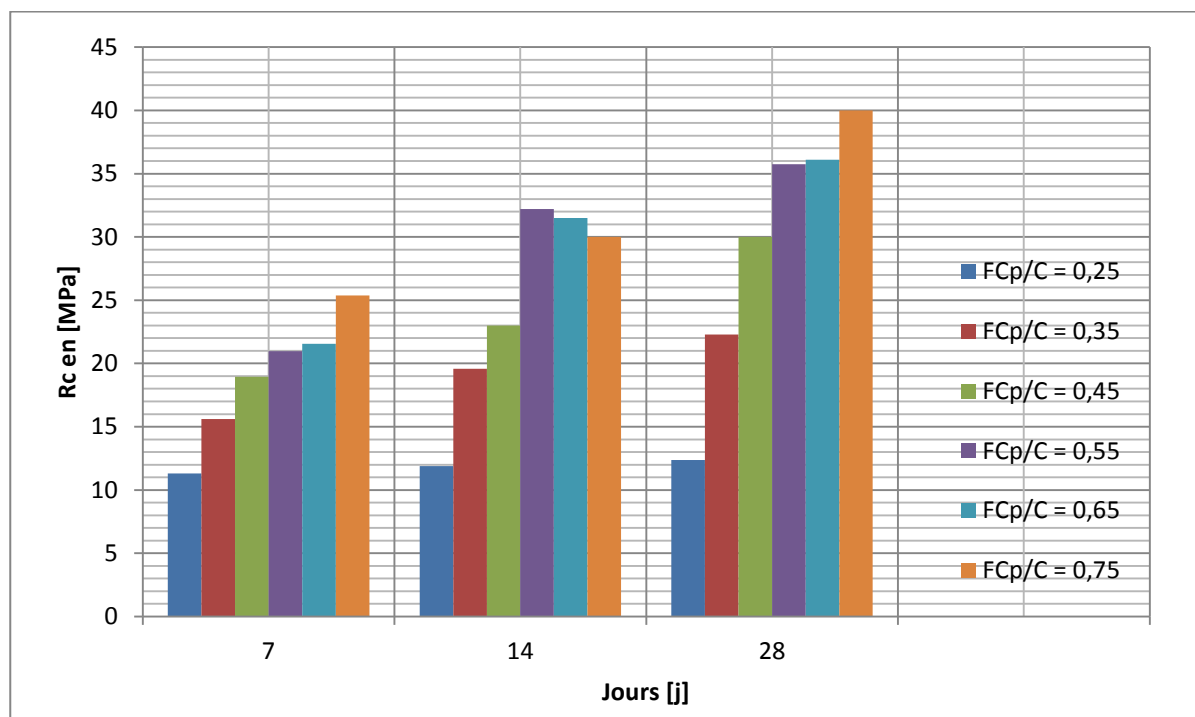


Figure 13: Resistances en compression des BFL en fonction du Temps

Interprétation

Toutes les valeurs de la résistance en compression de nos bétons fluides préparés à partir de la recommandation de l'AFGC sont largement plus élevées par rapport à celle du béton ordinaire témoin BO₁; sauf l'essai 1 et l'essai 2. L'augmentation des fines de cipolin joue un rôle très important sur la résistance en compression du béton : plus la quantité de fine de cipolin est élevée, plus la résistance en compression est bonne à même dosage en ciment.

L'essai 6 montre une valeur élevée de la résistance qui atteint jusqu'à 40 MPa à 28 jours mais nous ne le pouvons pas classer comme un béton fluide : il a une valeur d'affaissement de 14 cm. Les bétons obtenus à partir de l'essai 5 et l'essai 6 sont des bétons très plastiques.

Ainsi, le béton obtenu à partir de l'essai 4, nous l'appelons béton fluide BFL₁ parce qu'il présente une résistance à la compression à 28 jours élevée allant jusqu'à 35,75 MPa et une valeur d'affaissement en cône d'Abrams de 18 cm.

Ce béton fluide BFL₁ a été obtenu avec un dosage de ciment $C = 400 \text{ Kg/m}^3$, un dosage en eau de 220 L/m^3 ($E / C = 0,55$), un dosage en filler cipolin de 220 Kg / m^3 ($F_{CP} / C = 0,55$) et un dosage de superplastifiant Sp₁ de 7L ($Sp_1 / C = 0,0175$).

8. Conclusion partielle

Nous avons trouvé selon l'essai 4, un béton fluide à haute compacité ($C[\%] = 95,66\%$) ; d'affaissement égal à 18 cm, de faible retrait ($R[\%] = 0,17\%$) et d'une résistance en compression du béton à 28 jours $R_{c28} = 35,75 \text{ MPa}$.

Ces résultats sont obtenus par le dosage dans un mètre cube de béton, de 400 Kg de ciment MANDA CEM II/A - 42,5 , de 672 Kg de sable Sr₁, de 672 Kg de gravillon g₁, de 220 Kg du filler cipolin, de 7 L du superplastifiant Sika viscocrète tempo 12 Sp₁, et de 220 L d'eau.

I. FORMULATION DE BÉTON ORDINAIRE BO₂ PAR LA MÉTHODE DE DREUX GORISSE

Puisque le BO₁ ne permet pas d'obtenir une valeur de 25 MPa de résistance à la compression à 28 jours, il nous incitait à utiliser des matériaux de bonne qualité par rapport à ceux utilisés précédemment pour la formulation des bétons fluides.

Nous utilisons à partir de maintenant le gravillon g₂ et G, le sable de rivière Sr₂ et le sable de carrière Sc. Notons alors $BO_2 = g_2 + G + Sr_2 + Sc$

Nous allons également réduire le dosage en ciment à 350 kg / m^3 qui a pour but de réduire un peu les coûts des bétons. Ainsi, nous fixerons le dosage en ciment à 350 kg/m^3 .

D'après la lecture de l'abaque (figure 3, page 28), pour un béton d'affaissement $A_{ff} = 8$ cm et de dosage en ciment fixé à $C = 350 \text{ kg/m}^3$, on a trouvé le rapport $C/E = 1,72$, plus précisément $E/C = 0,58$.

d) Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO₂

Nous pouvons alors estimer la résistance en compression à 28 jours en MPa du béton ordinaire par la relation (2) vue dans l'étude bibliographique.

$$R_c = G \times F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

La classe vraie du CEMII/A 42,5N est de 54 MPa et les granulats sont de qualité moyenne donc $G = 0,40$.

$$R_{c28} = 0,40 \times 54 \times (1,72 - 0,5) = 26,35 \approx 26 \text{ MPa}$$

La résistance en compression de béton ordinaire BO₂ envisageable est de 26 MPa.

e) Calcul de dosage des granulats (pour 1 m³ de béton)

1.3. Détermination des proportions des granulats à partir de la courbe de référence

Le point de brisure **A** a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x = \frac{D_{\max}}{2} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ mm} \\ y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p \end{cases}$$

$K = 2$ (vibration normale et dosage du ciment $C = 350 \text{ Kg/m}^3$). Et $K_p = 0$

Le module de finesse du sable de rivière est fort (sable grossier), donc K_s est déterminé par la relation (4)

$$K_s = 6Mf_{sr2} - 15 = 6 \times 3,1 - 15 = 3,6$$

Le point de brisure a pour coordonnées A [12,5 ; 50 %] en module A [42 ; 50%]

La courbe granulaire de référence est donc définie par :

- Origine O [0,08, 0%] ou [20,0%]

- Point de brisure A [42 ; 50 %]
- Point B [25, 100%] ou B [45, 100%]

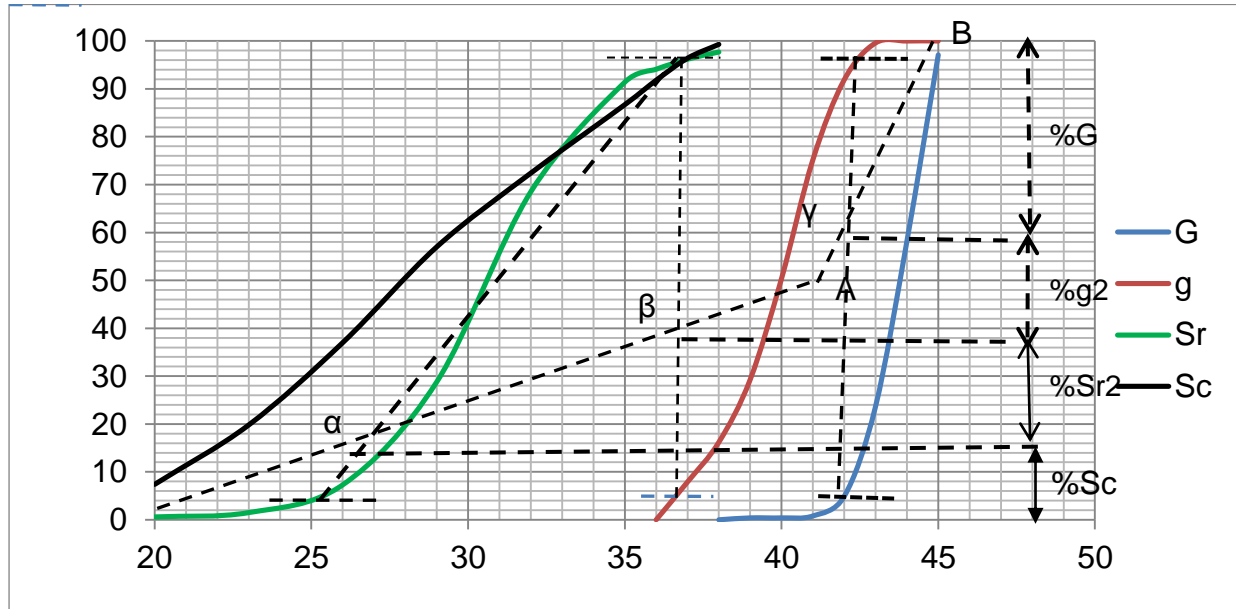


Figure 14: Détermination des pourcentages volumiques des granulats du BO₂

Nous en déduisons d'après cette courbe que notre béton ordinaire BO₂ est composé en pourcentage volumique de 14% de Sc, de 26% de Sr₂, de 16 % de g₂ et de 44% de G.

1.4. Calcul de dosage en Sr₂, Sc, g₂ et G

Nous usons la vibration normale pour la confection du BO₂, $\delta = 0,800$ ($D_{\max} = 25$ mm avec une vibration normale)

Nous calculons alors le dosage de chaque granulat à partir de la relation suivante

$$\text{Dosage de granulat "i" en [Kg]} = (\%G_i) \times \sigma_i \left(1000\delta - \frac{C}{\sigma_c} \right)$$

Les dosages de chaque constituant du BO₂ sont donnés dans le tableau 60 suivant.

Tableau 60 : Composition pour un mètre cube de BO₂

DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT en [Kg/m³]	
C	350
E	203
Sr2	491
Sc	262
g2	292
G	815
CUMUL TOTAL	2413

f) Résultats et interprétation

Les résultats à l'état frais et à l'état durci du BO₂ sont montrés dans le tableau 61

Tableau 61: Résultats d'affaissement et des résistances en compression du BO₂ par la méthode de DREUX GORRISSE

ST [cm]	AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGE en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
8,1	7 Jours	(1)	2,400	395,57	19,68	19,96
		(2)	2,407	408,23	20,31	
		(3)	2,411	399,59	19,88	
	28 jours	(4)	2,398	517,58	25,75	26,22
		(5)	2,400	535,46	26,64	
		(6)	2,403	528,03	26,27	

Nous avons remarqué une plus importante dispersion de la résistance en compression du béton à 7 jours ; par contre, à 28 jours, cette dispersion de la résistance est faible.

La résistance obtenue expérimentalement à 28 jours correspond bien à celle prévue par la formule de Bolomey.

La formulation adoptée pour le BO₂ est donc satisfaisante.

II. FORMULATION DES BÉTONS ORDINAIRES BO₃ SELON LA NORME TBM

Selon la norme TBM, la formule est donnée par le tableau 62 suivant

Tableau 62 : Dosage du béton classique selon la norme TBM

TYPE DE BÉTON	Ciment [Kg]	Gravillon [m3]	Sable [m3]	Eau [L]
Q350	350	0,800	0,400	170

Gravillons : $0,800 \text{ m}^3 (g_2+G)$

Sables : $0,400 \text{ m}^3 (sr_2+sc)$

D'où la formule suivante :

Tableau 63 : composition pour un mètre cube de BO₃ selon la norme TBM

CONSTITUANTS	SABLES		GRAVILLONS		CIMENT CEM II-A-42,5N	EAU
DOSAGE	Sr ₂ [Kg]	Sc[Kg]	G[Kg]	g ₂ [Kg]	C [Kg]	E [L]
	292.6	301	1043.2	1045.2	350	170
	0,400 m ³		0,800 m ³			

Cette formule est très utilisée dans la construction surtout des bâtiments en Génie Civil ; mais le but est de s'assurer que nos matériaux sont des matériaux de bonne qualité.

Le tableau 64 montre les résultats après les essais.

Tableau 64 : Résultats d'affaissement et des résistances en compression du BO₃ par la formule de TBM

ST [cm]	AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGES en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
7,2	7 Jours	(1)	2,601	433,67	21,58	21,86
		(2)	2,597	440,30	21,91	
		(3)	2,59	444,12	22,10	
	28 jours	(1)	2,612	559,67	27,85	27,10
		(2)	2,598	548,42	27,29	
		(3)	2,6	525,51	26,15	

La résistance à la compression supérieure à 25 MPa est toujours obtenue. Il a été prouvé que nous avons des matériaux de bonne qualité pour confectionner des bétons fluides. Ainsi, pour la suite de nos études, nous avons utilisé les gravillons g_2 et G, les sables Sr_2 et Sc.

III. FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES BFL₂, BFL₃, BFL₄ ET BFL₅

1. Paramètres des dosages

Dans le paragraphe (I) de ce chapitre, nous avons trouvé par tâtonnement :

- le dosage en superplastifiant Sp_1 (Sika viscocrète tempo 12) qui est égal à 1,75% du poids de ciment ;
- Le dosage en filler cipolin $F_{cp} = 0,55C$ ($F_C/C = 0,55$)

Dans la suite, nous garderons les valeurs :

- $C = 350 \text{ Kg/m}^3$
- $E/C = 0,58$ (abaque de DREUX Gorisse pour un dosage de 350 Kg)
- $G/S = 1$;
- $D_{max} = 25 \text{ mm}$;
- $F_C/C = 0,55$ et $F_D/C = 0,55$
- $Sp_1 = \frac{1,75}{100} C$ et $Sp_2 = \frac{1,75}{100} C$

• Dosage en Ciment

Nous assurons un dosage $C = 350 \text{ Kg/m}^3$ qui a pour but d'avoir un béton encore de bonne qualité, mais qui coûte moins cher.

• Dosage en Eau

Le dosage en eau est calculé à partir de la valeur de $E/C = 0,58$. Le dosage en eau est donc $E = 203 \text{ L/m}^3$.

• Dosage en Filler cipolin et en Filler dolomie

Le dosage en fillers joue un rôle important dans la résistance mécanique du béton.

Nous utilisons deux types de fillers ayant des caractéristiques différentes, mais nous gardons toujours le dosage $F_C/C = 0,55$ pour le cipolin et $F_D/C = 0,55$ pour la dolomie.

- **Dosage en superplastifiant**

De même, nous gardons le dosage en superplastifiant $Sp = \frac{1,75}{100} C$

Les dosages du superplastifiant Sika viscocrète tempo 12 et du rhéobuild 561 sont donc respectivement $Sp_1 = 6 \text{ L/m}^3$ et $Sp_2 = 6 \text{ L /m}^3$ (notons, $d_{Sp1} = 1,06$ et $d_{Sp2} = 1,17$).

- **Dosages en sable et en gravillon**

Les dosages en sable et en gravillon ne sont trouvés qu'après ceux des autres constituants. Ils ont la même valeur, car on fixe le rapport G/S à 1.

Les quantités de ciment, d'eau, de superplastifiant et d'air sont connues. Nous devons donc compléter la formule par de sable et de gravillon de manière à obtenir un mètre cube de béton, ce qui donne la relation suivante :

$$V_{Sr2} + V_{Sc} + V_G + V_{g2} + V_E + V_C + V_{Sp} + V_a + V_F = 1000 \text{ L (1m}^3 \text{ du béton)}$$

Le volume d'air V_a du béton est environ de 5 % (récommandations AFGC),

donc $V_a = 50 \text{ L}$

$$\text{Nous avons } \frac{S_{r2}}{\sigma_{Sr2}} + \frac{S_r}{\sigma_{Sc}} + \frac{S_r}{\sigma_G} + \frac{S_r}{\sigma_{g2}} + \frac{E}{\sigma_E} + \frac{C}{\sigma_C} + \frac{S_p}{\sigma_{Sp}} + \frac{F}{\sigma_F} + V_a = 1000 \quad (66)$$

Or le volume des pâtes de béton est

$$V_{Pates} = \frac{E}{\sigma_E} + \frac{C}{\sigma_C} + \frac{S_p}{\sigma_{Sp}} + \frac{F}{\sigma_F} + V_a \quad (67) \quad \text{en [L/m}^3\text{]}$$

$$\text{Donc } S_r \left(\frac{1}{\sigma_{Sr2}} + \frac{1}{\sigma_{Sc}} + \frac{1}{\sigma_G} + \frac{1}{\sigma_{g2}} \right) = 1000 - V_{pates}$$

$$S_{r2} = S_C = g = G = \frac{1000 - V_{pates}}{\left(\frac{1}{\sigma_{Sr}} + \frac{1}{\sigma_{Sc}} + \frac{1}{\sigma_G} + \frac{1}{\sigma_{g2}} \right)} \quad (68)$$

2. Formulation de béton fluide BFL₂ (BFL₂= Sr₂ + Sc + G + g₂ + F_c + Sp₁ + C + E)

Nous essayerons de produire un béton fluide BFL₂ de mélange de gravillons 5/15, 5/25, de sable de rivière, de sable de carrière, de filler cipolin, de superplastifiant Sika viscocrète tempo 12 et d'eau.

Le dosage en ciment est diminué à 350 Kg/m³.

La nouvelle formule de ce béton afin de vérifier les essais effectués en laboratoire donnant les caractéristiques physiques des constituants est donnée par le tableau 65 ci-après.

Tableau 65: Formule du béton fluide BFL₂ dans un mètre cube

CONSTITUANTS	SABLES [Kg]		GRAVILLONS [Kg]		CIMENT CEM II-A-42,5N [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	EAU [L]
DOSAGE	Sr ₂	Sc	G	g ₂	C	F _c	Sp ₁	E
	368	368	368	368	350	193	7	203

Ce qui nous donne les résultats indiqués dans le tableau 66 et tableau 67.

Tableau 66: Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL₂.

RÉFÉRENCES	ST [cm]	Retrait R [%]	Porosité P [%]	Compacité C [%]
VALEURS	16	0,10	4,1	95,9

Tableau 67: Résultats des résistances en compression du BFL₂.

AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGE en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
7 Jours	(1)	2,298	399,39	19,87	19,86
	(2)	2,300	404,21	20,11	
	(3)	2,360	414,06	20,60	
28 jours	(4)	2,387	674,36	33,55	33,87
	(5)	2,395	690,23	34,34	
	(6)	2,295	677,97	33,73	

3. Formulation du béton fluide BFL₃ ($BFL_3 = S_{r2} + S_c + G + g_2 + F_D + Sp_1 + C + E$)

Le cipolin est remplacé par la dolomie. La formule est présentée dans le tableau 68 suivant :

Tableau 68: Formule du béton fluide BFL₃ dans un mètre cube

CONSTITUANTS	SABLES [Kg]		GRAVILLONS [Kg]		CIMENT CEM II-A-42,5N [Kg]	FILLER DOLOMIE [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	EAU [L]
DOSAGE	Sr2	Sc	G	g2	C	F _D	Sp1	E
	368	368	368	368	350	193	7	203

Les résultats obtenus à partir de cette formule sont présentés dans les tableaux 69 et 70.

Tableau 69: Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL₃.

RÉFÉRENCES	ST [cm]	Retrait R [%]	Porosité P [%]	Compacité C [%]
VALEURS	19	0,16	4,7	95,3

Tableau 70: Résultats des résistances en compression et de la densité du BFL₃

AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGE en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
7 Jours	(1)	2,277	363,61	18,09	18,88
	(2)	2,312	390,74	19,44	
	(3)	2,270	384,31	19,12	
28 jours	(4)	2,263	586,32	29,17	29,58
	(5)	2,299	614,26	30,56	
	(6)	2,303	583,50	29,03	

4. Formulation du béton fluide BFL₄ ($BFL_4 = S_{r2} + S_c + G + g_2 + F_c + Sp_2 + C + E$)

Nous changeons le superplastifiant Sika viscocrète tempo 12 par le Rhéobuild 561. Le filler, les sables et les gravillons restent toujours les mêmes.

La formule du béton et les résultats sont représentés dans les tableaux 71, 72 et 73 suivants.

Tableau 71: Formule du BFL₄ en utilisant le filler cipolin et le rhéobuild 561.

CONSTITUANTS	SABLES [Kg/m ³]		GRAVILLONS [Kg/m ³]		CIMENT CEM II- A-42,5N [Kg/m ³]	FILLER CIPOLIN [Kg/m ³]	RHEOBUILD 561 [L/m ³]	EAU [L/m ³]
DOSAGE	Sr ₂	Sc	G	g ₂	C	F _c	Sp ₂	E
	368	368	368	368	350	193	7	203

Tableau 72: Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL₄.

RÉFÉRENCES	ST [cm]	Retrait R [%]	Porosité P [%]	Compacité C [%]
VALEURS	18	0,07	3,6	96,4

Tableau 73: Résultats des résistances en compression et de la densité de BFL₄.

AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGE en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
7 Jours	(1)	2,383	384,71	19,14	19,67
	(2)	2,306	412,85	20,54	
	(3)	2,397	388,33	19,32	
28 jours	(4)	2,351	606,02	30,15	29,79
	(5)	2,349	596,97	29,70	
	(6)	2,311	593,55	29,53	

5. Formulation du béton fluide BFL₅ (BFL₅= S_{r2} + Sc + G + g₂ + F_D+Sp₂ + C+ E)

Les tableaux 74, 75 et 76 suivants renseignent la formule et les résultats de ce BFL₅ obtenu à partir de filler dolomie et de rhéobuild 561.

Tableau 74: Formule du BFL₅ en utilisant le filler dolomie et le rhéobuild 561.

CONSTITUANTS	SABLES [Kg/m ³]		GRAVILLONS [Kg/m ³]		CIMENT CEM II- A-42,5N [Kg/m ³]	FILLER DOLOMIE [Kg/m ³]	RHEOBUILD 561 [L/m ³]	EAU [L/m ³]
DOSAGE	Sr ₂	Sc	G	g ₂	C	F _D	Sp ₂	E
	368	368	368	368	350	193	7	203

Tableau 75: Résultats d'affaissement, de retrait, de porosité et de compacité du BFL₅.

RÉFÉRENCES	ST [cm]	Retrait R [%]	Porosité P [%]	Compacité C [%]
VALEURS	21	0,17	3,8	95,2

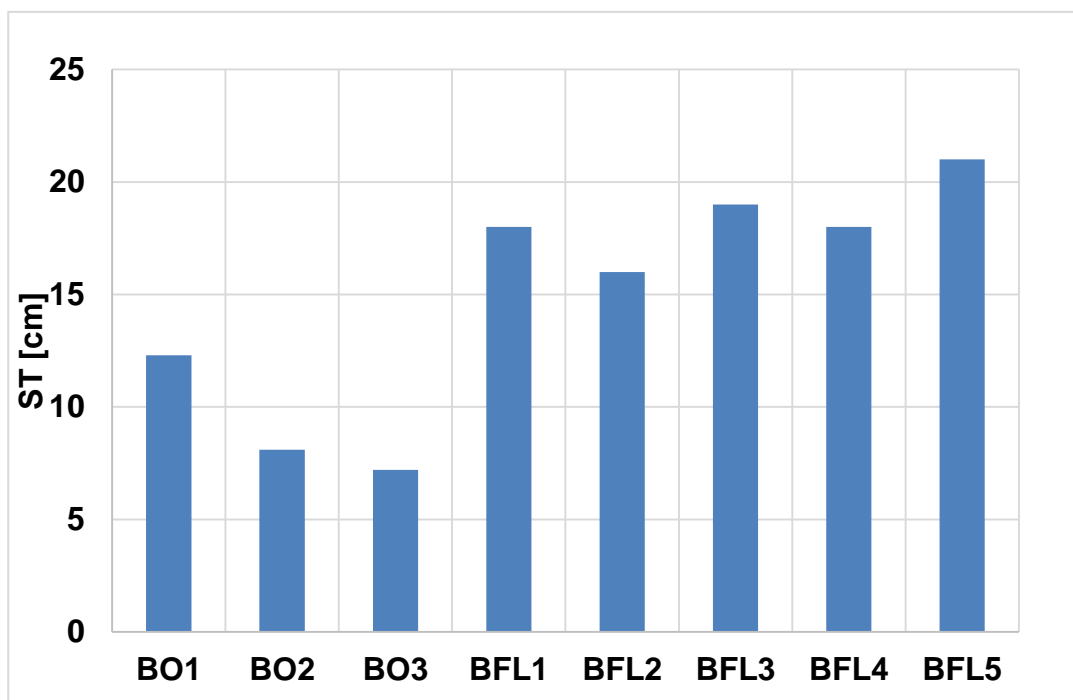
Tableau 76: Résultats des résistances en compression et de la densité du BFL₅.

AGE	N° DE L'ÉPROUVETTE	DENSITÉ	CHARGE en [KN]	Rc en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE DE Rc en [MPa]
7 Jours	(1)	2,356	390,95	19,45	19,22
	(2)	2,297	384,51	19,13	
	(3)	2,315	383,31	19,07	
28 jours	(4)	2,391	526,82	26,21	26,71
	(5)	2,386	540,29	26,88	
	(6)	2,351	523,20	26,03	

Nous pouvons récapituler dans le tableau 77 et illustrer par des figures (figure 16,17 et 18), les résultats des affaissements, des compacités et des résistances en compressions de ces BFL et des BO.

Tableau 77 : Récapitulation des résultats d'affaissement, des compacités et des résistances en compressions des BFL et des BO

RÉSULTATS	BO ₁	BO ₂	BO ₃	BFL ₁	BFL ₂	BFL ₃	BFL ₄	BFL ₅
Rc07 [MPa]	16,4	19,96	21,86	20,98	19,86	18,88	19,67	19,22
Rc28 [MPa]	23,2	26,22	27,1	35,75	33,87	29,58	29,79	26,71
ST [cm]	12,3	8,1	7,2	18	16	19	18	21
C [%]	-	-	-	95,66	95,9	95,3	96,4	95,2
R [%]	-	-	-	0,17	0,1	0,16	0,07	0,17



Figure

15 : Affaissements des BO et des BFL

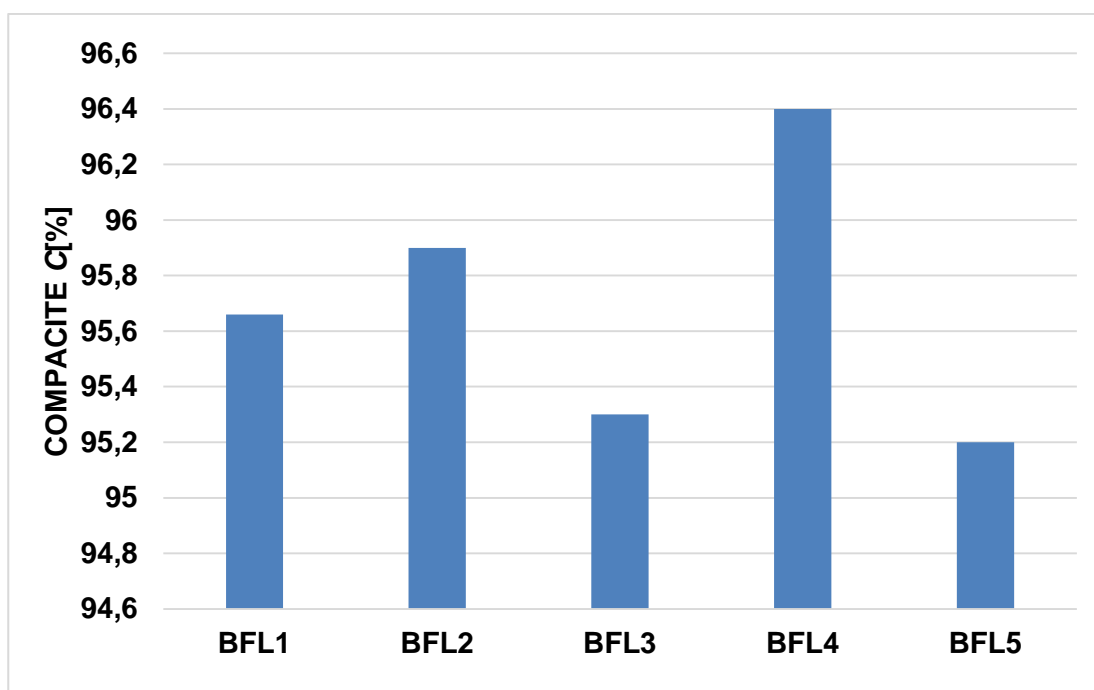


Figure 16: Compacités des BFL

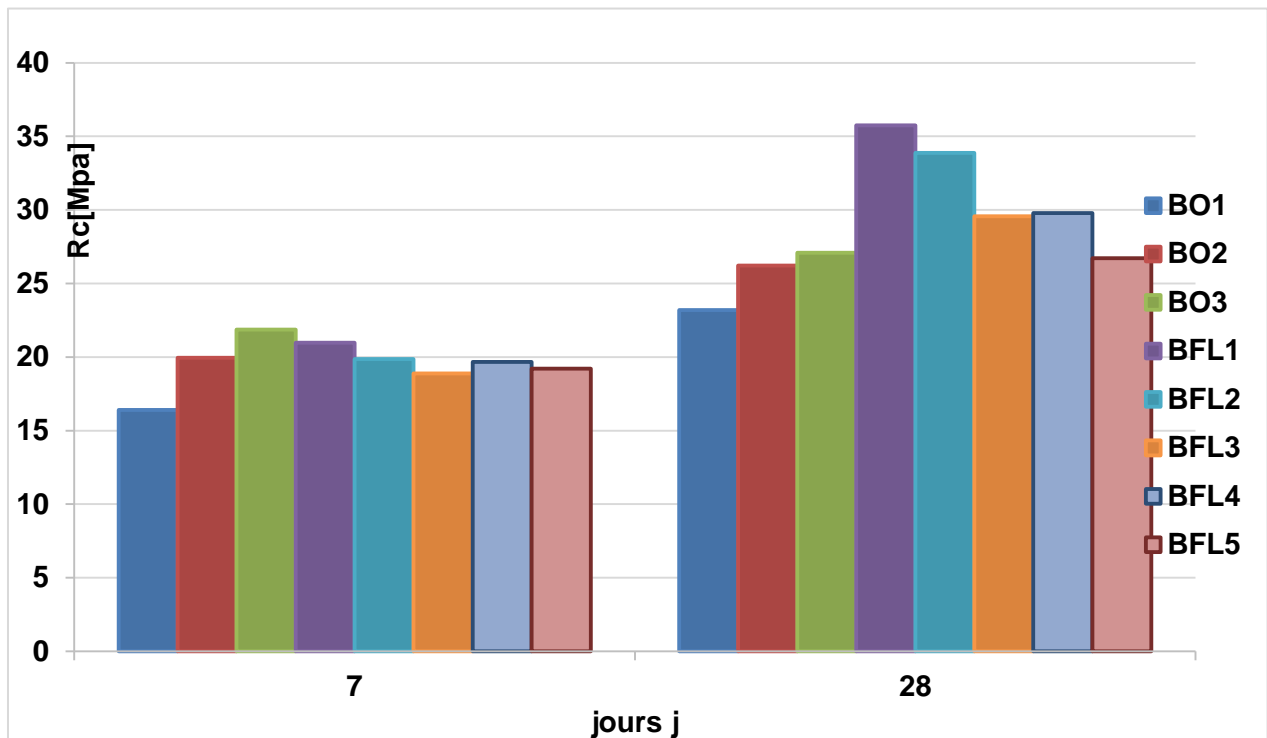


Figure 17: Evolution des résistances en compression des BO et des BFL.

6. Discussion et interprétation

Pour le BO, l'objectif primordial est la résistance mécanique à la compression, par contre pour les BFL, la priorité est donnée au comportement du béton à l'état frais et la résistance à la compression fait l'objet d'une vérification. À 28 jours, ces BFL présentent des résistances en compression élevées par rapport aux BO.

Pour le BFL₁. L'utilisation de dosage en ciment plus élevé ($C = 400 \text{ Kg/m}^3$) nous a permis d'obtenir un béton fluide dont l'affaissement est $ST = 18 \text{ cm}$ avec une résistance en compression $R_{c28} = 35,75 \text{ MPa}$ à l'âge de 28 jours.

Lors de la formulation de BFL₁, l'ajout de Sika viscocrète tempo 12 lui permet de s'écouler facilement sans ségrégation. Le BFL₁ a une bonne compacité.

Ces résultats respectent les normes, mais nous avons constaté que le dosage en ciment est élevé. C'est pourquoi nous avons formulé des autres BFL avec un dosage en ciment $C = 350 \text{ Kg/m}^3$.

Pour les bétons fluides (BFL₂, BFL₃, BFL₄, BFL₅) de dosage en ciment $C = 350 \text{ Kg/m}^3$, les essais mécaniques à 7 jours et à 28 jours sur les éprouvettes de béton donnent des résultats satisfaisants, mais un peu faibles par rapport à celle du BFL₁. C'est tout à fait normal, car le dosage en ciment est démun.

Lors de malaxage de ces bétons fluides, nous observons que le mélange est visqueux et les gros grains sont entraînés vers la périphérie avec l'ensemble du béton.

Les résultats d'affaissement au cône d'Abrams de ces bétons sont acceptables : ces bétons sont classés comme des bétons de type S4 ($16\text{cm} \leq ST \leq 21\text{cm}$) selon la norme NF EN 206-1.

Concernant la porosité de ces BFL, on remarque qu'aucune bulle d'air n'est pas trouvée lors de l'immersion des éprouvettes dans l'eau froide. Ces BFL sont des bétons de faible porosité, de faible retrait. Ils ont une compacité très élevée. C'est pourquoi nous les appelons BFLHC.

L' utilisation de filler cipolin permet d'obtenir de meilleurs résultats sur la résistance en compression par rapport au filler dolomie. Tel est le cas du BFL₄ et du BFL₅ : Le BFL₄ a une bonne résistance en compression par rapport au BFL₅.

Le superplastifiant rhéobuild 561 ne donne qu'une grande durée de maniabilité du béton (BFL₅). Il joue le rôle de réducteur d'eau, mais il agit très peu sur les résistances mécaniques du béton : la résistance en compression du BFL₂ obtenu à partir de filler cipolin et de Sika viscocrète tempo 12 est supérieure à la résistance en compression du BFL₄ obtenu à partir de filler cipolin et de rhéobuild 561. Par contre le BFL₄ (ST = 18 cm) présente une meilleure maniabilité par rapport au BFL₂ (ST = 16 cm).

Pour avoir des bétons fluides ayant des résistances en compressions plus élevées, il est donc préférable d'utiliser le Sika viscocrète tempo 12 comme superplastifiant réducteur d'eau et le filler cipolin au lieu de filler dolomie comme fine d'ajout du béton, car avec cet adjuvant et ce filler, les bétons sont maniabiles et plus résistant en compression (BFL₁, BFL₂, BFL₃, BFL₄).

PARTIE III : MODÉLISATIONS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACITÉ PAR DES PLANS D'EXPÉRIENCES

INTRODUCTION

Nous avons trouvé une formule optimale de bétons fluides avec les matières premières dont nous disposons, et nous avons observé qu'ils présentaient une bonne fluidité, une bonne résistance à la compression, même avec un dosage en ciment de 350 Kg /m^3 .

Les fourchettes d'études des différents paramètres comme le rapport G/S (gravillon sur sable), E/C (eau sur ciment), le dosage en superplastifiant, le dosage en filler ont été déjà déterminés à partir des nos études précédentes dans le chapitre VI (Formulations des bétons fluides par la méthode des volumes absolus).

Dans ce chapitre, nous avons utilisé, la méthode des volumes absolue pour déterminer les dosages de chaque constituant du béton en faisant varier les paramètres du mélange et mesurer ses effets sur les comportements du béton à l'état frais et à l'état durci. Vu la longivité de cette méthode, nous avons envisagé d'utiliser un modèle expérimental pour donner des informations très précises sur les bétons fluides. Ce modèle est basé sur les plans d'expériences dont le but est de les modéliser mathématiquement afin d'évaluer l'influence de ses paramètres et ses interactions.

Des formulations à partir d'une matrice d'expérience ont été effectuées dans le but d'estimer l'affaissement, la compacité, le retrait et la résistance mécanique à la compression des bétons.

Des outils statistiques sont employés afin de vérifier ou de prendre une décision sur les formulations et sur nos hypothèses des modèles mathématiques.

Pour la suite de l'étude, les nouvelles formules tiennent compte des conditions suivantes :

- Utilisation du ciment MANDA de la société HOLCIM CEM II/A -42,5N ; dosé à la fois 350 Kg et 400 Kg (en suivant les plans factoriels complets à deux niveaux) dans un mètre cube de béton ;
- Utilisation des granulats Sr_2 , g_2 et G ;
- Utilisation du mélange de deux superplastifiants ($Sp = Sp_1 + Sp_2$) en considérant le rapport $r_{Sp} = Sp_1 / Sp_2$
- Utilisation du mélange de deux fillers ($F = F_C + F_D$) en prendre en compte son rapport $r_F = F_C / F_D$ avec $F = 0,55C$.

Chapitre VII : GÉNÉRALITÉS SUR LES PLANS D'EXPÉRIENCES

I. PRINCIPE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23]

La technique des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

II. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE [23]

La figure 18 montre l'organigramme général de traitement des plans d'expériences

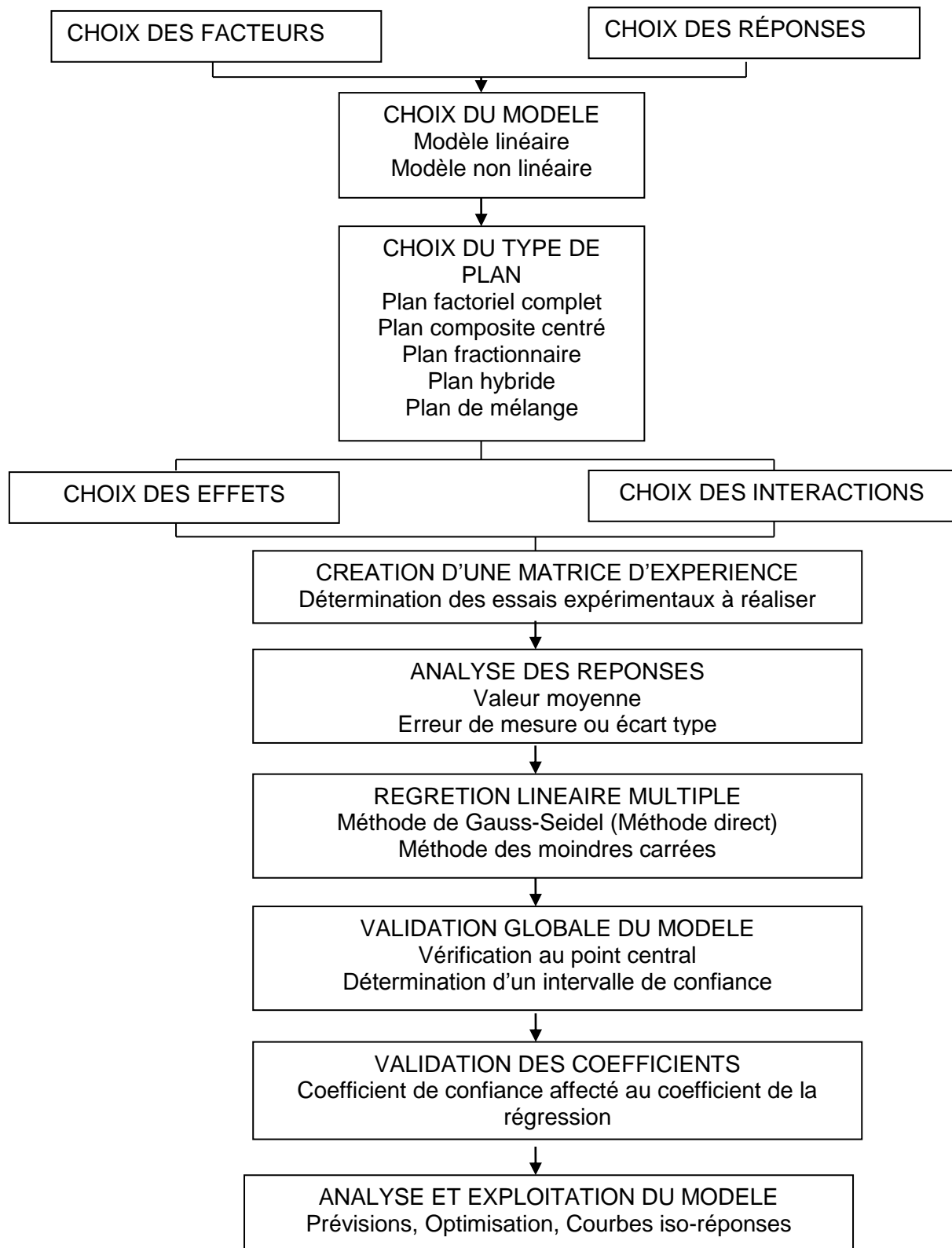


Figure 18 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [S.M.A. BoukliHacene, 2010]

III. CHOIX DE LA MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

IV. ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels, la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

V. CONDITIONS D'APPLICATION DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23] [24]

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, 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 [Sier, 1993] :

- 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.

- Condition 2 : La réponse doit être homoscedastique. 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.

VI. VOCABULAIRE DE BASE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23] [24]

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 (figure 19).

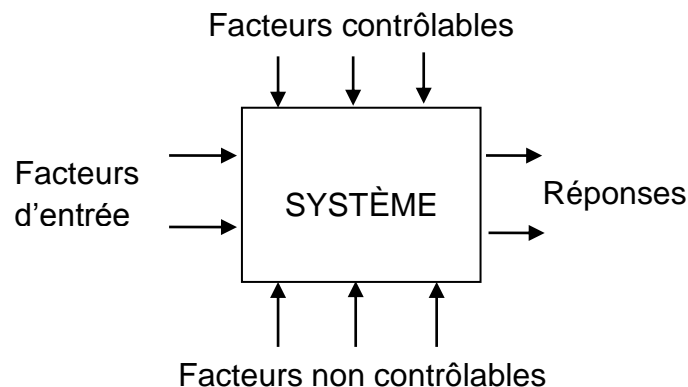


Figure 19: vocabulaire de base des plans d'expériences

1- Facteurs

Parmi les facteurs on distinguera :

- les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix (pression, température, matériau ...)
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température,) les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée.

Ils en existent deux types :

-Facteur quantitatif

Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue par exemple le dosage en ciment, pourcentage d'adjuvant, masse de sable, etc... Et rarement à variation discontinue ex : classe de ciment qui est fixée par le cimentier.

-Facteurs qualitatifs

Facteurs dont la valeur est non mesurable, comme la qualité, le type, la marque, le procédé ou d'autres caractéristiques qu'on ne peut quantifier par exemple le type de ciment (CPA. CPJ. CLK...), le procédé de vibration du béton (table vibrante ou aiguille).

- Niveau d'un facteur : Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur et un niveau inférieur. Pour les facteurs quantitatifs, la valeur est algébrique, donc classée numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables, alors peu importe leur classement, l'important est de mettre une borne inférieure et une borne supérieure (+1 et -1). Les niveaux extrêmes de chaque facteur délimitent le domaine de l'étude [G. SADO et M. C SADO, 1991].
- Valeurs centrées réduites ou codées : L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences, quels que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1) comme l'exemple indiqué par le tableau 78 suivant.

Tableau 78 : Exemple des facteurs codés (-1) et (1)

Facteurs	Niveau (-1)	Niveau (+1)
Dosage en ciment [Kg]	350	400
Filler cipolin [Kg]	100	300
Superplastifiant [L]	5	8

2- Réponse

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus (la porosité), mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation (ségrégation, pas de ségrégation) sur un béton.

•L'effet d'un facteur

L'effet d'un facteur $[X_i]$ est la comparaison entre les valeurs prises par la réponse $[Y]$ lorsque cette dernière passe du niveau (-1) au niveau $(+1)$ [J. BARON et J. P OLIVIER, 1996]. Il est caractérisé par une constante notée « A_i » qui sera :

- Positive si cette variation du facteur est favorable à l'accroissement de la réponse (Figure 20-a).
- Négative si elle est favorable à la diminution de la valeur de la réponse (Figure 20-b).
- Nulle si elle est sans influence sur le système (figure 20-c).

Cette constante intervient dans le modèle mathématique décrivant cette réponse.

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i \dots\dots\dots (69)$$

Y : Réponse prédite par le modèle.

A_0 : Constante du modèle elle répond à la moyenne des résultats de mesure.

X_i : Facteur « i ».

A_i : Effet du facteur « i ».

k: Nombre de facteurs étudiés.

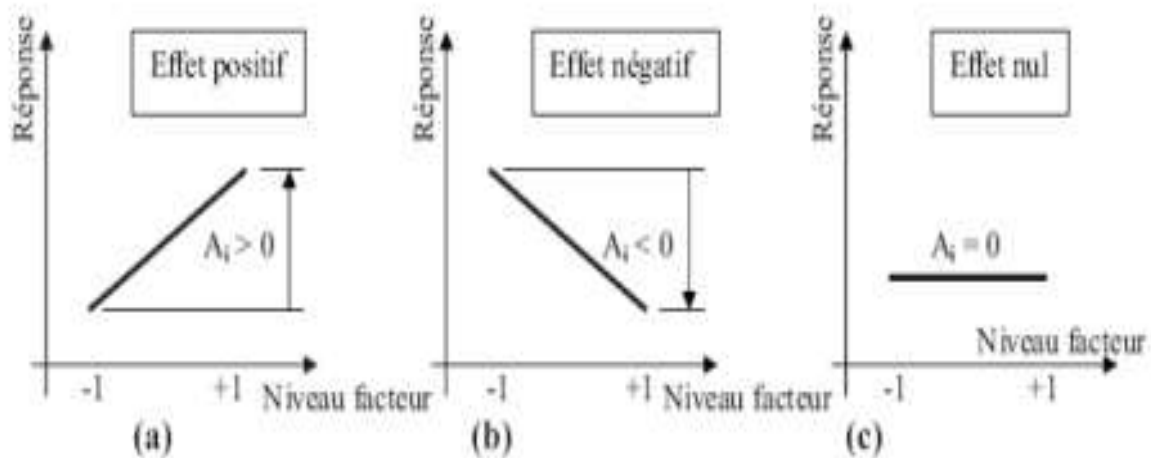


Figure 20 : Effet de facteurs à étudier

• Interaction

Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrées. On parle d'interaction entre deux facteurs X_i et X_j quand l'effet du facteur X_i sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur X_j . Dans la plupart des cas, les études se limitent au premier ordre (interactions entre deux facteurs) [M. Pillet, 1992]. Noté « A_{ij} » l'interaction intervient dans le modèle de la manière suivante

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{ij} A_{ij} X_i X_j \dots \dots \dots (70)$$

A_{ij} : Effet d'interaction $X_i X_j$

• Matrice des effets

La matrice des essais à réaliser pour obtenir le plan d'expériences optimal se déduit en fait des critères permettant d'obtenir les coefficients avec le maximum de précision. Le système d'équations à résoudre doit présenter des coefficients devant les inconnues (qui sont les coefficients du modèle à déterminer) pouvant se mettre sous la forme d'une matrice nommée matrice des effets.

Par exemple pour le plan de deux niveaux à deux facteurs la matrice des effets s'écrit sous la forme :

$$\begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix}$$

Figure 21: Exemple de matrice des effets

Cette matrice est dite matrice de Hadamard.

Pour cette matrice, les vecteurs colonnes sont orthogonaux deux à deux. Cette propriété n'est pas suffisante pour obtenir la variance minimale pour l'estimation des coefficients. Hadamard a montré que la matrice X devait aussi vérifier la condition :

$$X^t \cdot X = N \cdot I \dots \dots \dots (71)$$

Où

X^t : la matrice transposée de X.

I : la matrice identité.

N : le nombre d'expériences réalisées.

N doit être un multiple de 4.

Par exemple, on verra que pour un plan complet à n facteurs, le nombre d'expériences N sera égal à : $N = 2^n$

Soit 8 expériences avec 3 facteurs permettant la détermination des 8 coefficients du modèle et 16 expériences avec 4 facteurs.

- **Modélisation mathématique de la réponse**

Pour permettre la prévision de la réponse et l'optimisation du système, la méthode des plans d'expériences de par sa conception et sa structure permet une représentation mathématique de la réponse « y » en fonction des facteurs sujets de l'étude.

Nous nous limiterons aux modèles polynomiaux linéaires en utilisant la régression linéaire multiple qui se base principalement sur la méthode des moindres carrés. Deux conditions doivent être respectées [Baron et Olivier, 1996] :

- Le nombre minimal des essais effectués doit être égal au nombre des inconnues A_i , et augmente avec le degré du polynôme. Donc il est de notre intérêt de rechercher les modèles les plus simples avant tout.
- Le modèle constitué doit être validé afin que les prévisions soient fiables.

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse Y aux facteurs $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$. Ce modèle théorique est postulé a priori. Il s'agit d'un modèle polynomial.

Les modèles recherchés sont des modèles exprimant la réponse « y_j » en fonction des facteurs « X_i » et leurs interactions :

$$Y_j = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_1 X_3, \dots, X_1 X_2 X_3, \dots)$$

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n + \sum_{i,j=1;i \neq j}^n A_{ij} X_i X_j + \sum_{i,j,k=1;i \neq j \neq k}^n A_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (72)$$

Sous forme matricielle, on a

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_j \\ Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & X_i & \dots & X_i X_j & \dots & X_i X_j X_k \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_{ij} \\ A_{ijk} \end{bmatrix}$$

De façon condensée : $[Y] = [X] \cdot [A]$

Où les inconnues du problème sont les composantes du vecteur $[A]$

$$[A] = [X]^{-1} [y]$$

Où A_0, A_1, \dots, A_n : sont les coefficients du polynôme.

X_i : représente un niveau du facteur i

X_j : représente un niveau du facteur j

Y : la repense ou la grandeur d'intérêt

Les termes produits de type par exemple $A_{ij}X_iX_j$ correspondent aux interactions d'ordre 2.

Les termes produits de type par exemple $A_{ijk}X_iX_jX_k$ correspondent aux interactions d'ordre 3.

Le calcul d'un effet de facteur ou d'une interaction entre facteurs fait intervenir l'ensemble des résultats de mesure. Or ces derniers sont collectés tout le long de la campagne expérimentale, ils sont entachés d'erreurs de mesure. Et que seul l'écart type de mesure permet son estimation. Après avoir établi le modèle mathématique, il s'agit de savoir si les coefficients du modèle (facteurs et interactions) sont significativement différents de zéro. En effet, des valeurs mathématiques voisines de zéro peuvent être la conséquence de la dispersion expérimentale autour d'une valeur moyenne nulle. On va donc comparer la valeur du coefficient à l'erreur de mesure. Si ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur, on conclura à la nullité de l'effet (ou de l'interaction) envisagé.

Pour un plan factoriel à 3 facteurs X_1, X_2 et X_3 , on obtient :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{123}X_1X_2X_3 \quad (73)$$

- **Modélisation expérimentale**

Deux compléments doivent être apportés au modèle purement mathématique précédemment décrit. Le premier complément est le manque d'ajustement. Cette expression traduit le fait que le modèle choisi par l'expérimentateur avant les expériences est probablement un peu différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement, on le note par la lettre D .

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse.

En effet, dans le cas général, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtiendra pas exactement le même résultat. Il y a une dispersion des résultats. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs aléatoire ou erreurs expérimentales et on les note par la lettre « e ». La relation générale (57) doit être modifiée ainsi :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) + D + e \dots \dots \dots (74)$$

- **Calcul des coefficients**

Dans le cas d'une matrice de Hadamard, les coefficients peuvent aisément être calculés avec une simple calculatrice ou un tableur. On reprend pour cela l'exemple du plan de trois facteurs à deux niveaux. Les résultats de calcul des coefficients sont récapitulés dans le tableau 79 suivant

Tableau 79 : Calcul des coefficients A_0, A_1, A_2, A_3 de trois facteurs à deux niveaux dans le cas des matrices de Hardman.

N° ESSAI	CONSTANT	X1	X2	X3	RÉSULTATS (Y)
ESSAI1	1	-1	-1	1	Y1
ESSAI2	1	1	-1	-1	Y2
ESSAI3	1	-1	1	-1	Y3
ESSAI4	1	1	1	1	Y4

On calcule $A_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}$;

$$A_1 = \frac{-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4}{4} ;$$

$$A_2 = \frac{-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}$$

et $A_3 = \frac{Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4}{4}$

- **Les surfaces de réponse**

À chaque point du domaine d'études correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse (figure 22).

L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'études forme la surface de réponse.

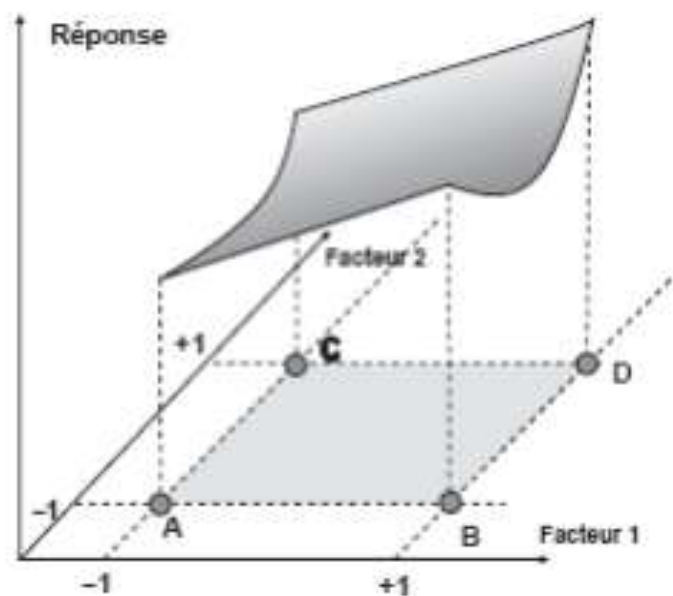


Figure 22 : Surface des réponses

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

VII. LES TYPES DE PLANS D'EXPÉRIENCES [23][24]

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 davantage, cette méthode de plans d'expériences nous allons donner dans ce qui suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hybrides.

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 ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets.

Avec deux niveaux et k facteurs, ceux-ci sont notés 2^k . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard.

Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener 2^k expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté : 2^2 . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental, ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés.

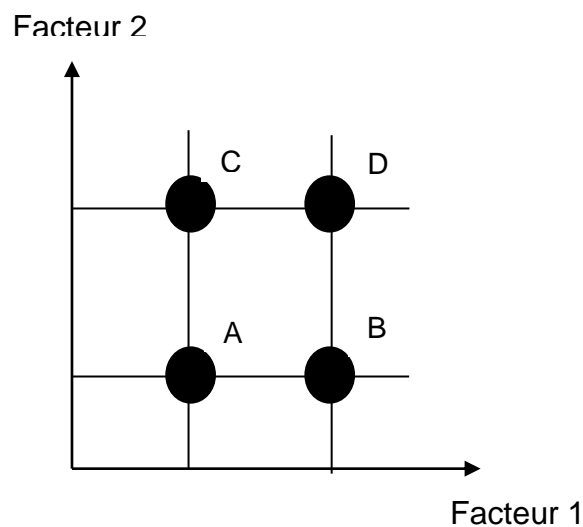


Figure 23 : Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental

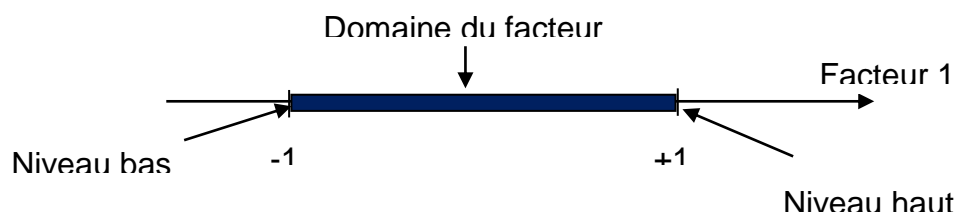


Figure 24 : Représentation de niveaux du facteur dans un plan factoriel complet

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

2-1- Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation.

Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

2-1-1- Plans à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_{12} X_1 X_2 + \dots \quad (75)$$

Y : est la réponse

$X_{1,2}$: représente le niveau attribué au facteur 1,2

A_0 : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude

A_1 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1

A_2 : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2

A_{12} : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2

e : est l'écart.

La matrice d'expériences se construit selon le tableau suivant pour le cas des plans 2^2 et avec des facteurs A_1, A_2 .

Tableau 80 : Matrice d'expérience pour les plans d'expérience à deux niveaux et à 2 facteurs

ESSAIS	A_1	A_2
ESSAI N°1	-1	1
ESSAI N°2	1	-1
ESSAI N°3	-1	1
ESSAI N°4	1	-1

2-1-2- Plans factoriels à k facteurs

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum A_{ij} X_i X_j + \dots + \sum A_{ij} X_i + A_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z + e \dots \dots \dots (76)$$

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k .

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

Le chiffre 2 indique le nombre de niveaux par facteur

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante :

- colonne du 1er facteur : alternance de -1 et +1
- colonne du 2e facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- colonne du 3e facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- colonne du 4e facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8 et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

2-2- Plans factoriels complets à trois niveaux [23] [24]

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan 3^2 . S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3^3), il faut exécuter 27 essais. En général s'il y a k facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 3^k essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

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.

D'où les plans fractionnaires. Les plans fractionnaires optimaux sont des plans issus des plans factoriels complets.

Leur intérêt principal est de réduire cette charge expérimentale en focalisant sur les effets les plus intéressants sans pour autant affecter de façon compromettante l'efficacité du plan [J. Goupy, 2003]. Il existe deux types :

Plans fractionnaires 2^{k-p}

Ce plan consiste à utiliser pour l'étude de « k » facteurs la matrice d'effet d'un plan factoriel complet $2^{k-1}, 2^{k-2}, 2^{k-3}, \dots$. Ce qui permet de réduire le nombre d'essais par 2^p .

Nous remarquons que pour un plan factoriel complet les interactions d'ordre deux et plus sont le plus souvent négligeables. L'astuce est que les interactions les moins influentes sont remplacées par les facteurs « k - p » « k », en suivant leurs mêmes alternances de signes. Le plan obtenu est dit fractionnaire 2^{k-p} [J. Goupy, 2003].

3- Plans de mélange

Un plan de mélange est une forme particulière d'un plan factoriel complet. Les propriétés [G.Sado et M.C Sado, 1991] d'un mélange dépendent généralement de sa composition et il est fréquent que l'on veuille traduire les variations d'une propriété en fonction de la concentration des divers constituants. C'est le cas du triangle de Féret (figure 25) ou l'on souhaite déterminer la compacité en tout point, caractérisée par les proportions du mélange qu'il représente.

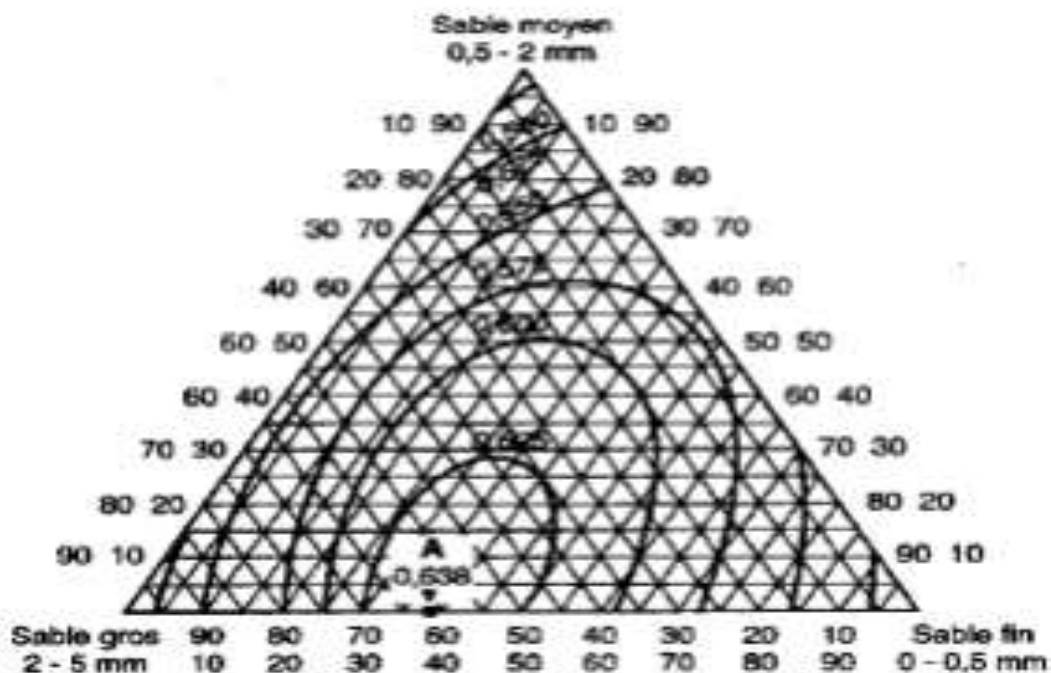


Figure 25 : Triangle de Feret, 1892

Les sommets de triangle représentent chacun des facteurs.

Les courbes d'isocompacité sont représentées ici et la compacité maximale est obtenue en A.

4- Les plans hybrides

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemore [Brereton R, 2006]. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'isovariance par rotation. L'orthogonalité garantit la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'isovariance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride. Les plans hybrides se désignent de la manière suivante : on indique le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

VIII. STATISTIQUES APPLIQUES PAR LES PLANS D'EXPÉRIENCES [23][24]

- **Erreur expérimentale**

En général, on prend la moyenne arithmétique comme valeur centrale et l'écart-type comme mesure de la dispersion.

- **Moyenne**

La moyenne arithmétique d'un ensemble de valeurs est la somme de toutes les valeurs divisées par le nombre de valeurs.

- **Écart- type**

La définition de l'écart-type est un peu moins simple que celle de la moyenne. Nous allons décrire son calcul pas à pas :

- On commence par calculer les écarts à la moyenne, c'est-à-dire la différence entre chaque valeur et la moyenne.
- La variance est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre de valeurs moins 1.
- Enfin l'écart-type est obtenu en prenant la racine carrée de la variance

- **Intervalle de confiance des réponses**

Nous venons de voir l'importance de l'écart-type de la population des réponses qui est considéré comme une évaluation de l'erreur expérimentale ou erreur pure. L'estimation de l'écart-type(S) d'une population de réponses à partir d'un échantillon est obtenue à l'aide de la relation :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (77)$$

Mais la qualité de cette estimation dépend du nombre n de valeurs prises en compte pour calculer l'écart-type. Si l'échantillon contient beaucoup de mesures, l'écart-type calculé sera de bonne qualité, c'est-à-dire proche de l'écart-type de la population. Si l'échantillon contient peu de mesures, l'écart-type calculé sera de moins bonne qualité et il faudra prendre des précautions supplémentaires pour l'utiliser. L'intervalle de confiance Ic dépend :

- De la probabilité choisie par l'utilisateur ; cette probabilité est souvent de 95 ou 99 % ;
- De la qualité de l'écart-type calculé.

$$I_c = k \cdot \sigma_{\text{échantillon}} \quad (78)$$

- **Analyse de la variance**

L'analyse de la variance consiste à rechercher les sources de variation des réponses. On suppose que les réponses ont été calculées avec le modèle postulé,

$Y_i = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + e_i$, en utilisant la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire en minimisant la somme des carrés des écarts. Dans ce cas, les réponses calculées s'écrivent et les écarts (e) prennent des valeurs particulières r_i qui s'appellent les résidus. Les résidus sont donc des valeurs particulières des écarts. On a :

$$\bar{y}_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Avec ces nouvelles notations, la relation donnant la réponse peut s'écrire :

$$y_i = \overline{y_i} + r_i$$

L'analyse classique de la variance fait intervenir non pas les réponses, mais la différence entre les réponses et leur moyenne.

- **Coefficient de détermination (R^2)**

L'analyse de la variance permet de calculer une statistique très utile : le R^2 ou R carrés.

Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne) :

$$R^2 = \frac{\text{Somme des carrés des réponses calculées corrigées de la moyenne}}{\text{Somme des carrés des réponses mesurées corrigées de la moyenne}} \quad (79)$$

Si le modèle permet de retrouver exactement la valeur des réponses mesurées, la somme des carrés des réponses calculées est égale à la somme des carrés des réponses mesurées (R^2 est égal à 1).

Si le modèle fournit des réponses calculées égales à la moyenne, la somme des carrés des réponses calculées est égale à 0 (R^2 est égal à 0). On dit que le modèle n'a pas de puissance d'explication.

Le R^2 est donc une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses. Le R^2 joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls. Si les résidus sont nuls, le R^2 est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté. Le R^2 est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

- **Résidus**

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée

- **P-Value**

La « P-Value » est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. On calcule cette « P-Value » à partir du rapport du coefficient à son écart-type (test de Student). La probabilité d'acceptation des coefficients à un « P-value » de 0,10.

- F de Fisher

Le F de Fisher qui est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs.

Si le F de Fisher est proche de 1 (forte probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus.

- **Variance de mesure : [J. Goupy et col, 2006]**

$$V(y) = S_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_o - y_{0i})^2 \quad (80)$$

$V(y)$: Variance de mesure.

y_0 : Moyenne des essais au centre du domaine.

y_{0i} : Essai « i » au centre du domaine.

- **Validation du modèle**

La validation du modèle issue de la régression linéaire se fait en comparant les valeurs mesurées au centre du domaine avec ceux prédits par le modèle en ce même point. Le modèle est validé si la réponse « y_0 » mesurée au centre du domaine appartient à l'intervalle :

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y) \quad (81)$$

$y_{\text{modèle}}$: Valeur donnée par le modèle au centre.

$\sigma(y)$: Écart type des mesures

Chapitre VIII : APPLICATIONS DES PLANS D'EXPÉRIENCE SUR LES BÉTONS FLUIDES

I. PERSPECTIVES DE L'ESSAI

Lors de la réalisation de formulation des bétons fluides, les formules et les résultats sont rappelés par les tableaux suivants (tableaux 81, 82 et 83).

Tableau 81 : Rappel sur la formule de BFL₁

BÉTONS FLUIDES	CONSTITUANTS					
	C [Kg]	E[L]	Sr ₁ [Kg]	g ₁ [Kg]	F _C [Kg]	Sp ₁ [L]
BFL ₁	400	220	690	690	180	7

Tableau 82 : Rappel sur les formules des BFL₂, BFL₃, BFL₄, BFL₅

BÉTONS FLUIDES	CONSTITUANTS									
	C[Kg]	E[L]	Sr ₂ [Kg]	Sc[Kg]	G[Kg]	g ₂ [Kg]	F _C [Kg]	F _D [Kg]	Sp ₁ [L]	Sp ₂ [L]
BFL ₂	350	203	368	368	368	368	193	-	6	-
BFL ₃	350	203	368	368	368	368	-	193	6	-
BFL ₄	350	203	368	368	368	368	193	-	-	6
BFL ₅	350	203	368	368	368	368	-	193	-	6

Tableau 83 : Récapitulations des résultats sur les essais des bétons fluides

PARAMÈTRES	BFL ₁	BFL ₂	BFL ₃	BFL ₄	BFL ₅
Rc07 [MPa]	20,98	19,86	18,88	19,67	19,22
Rc28 [MPa]	35,75	33,87	29,58	29,79	26,71
ST [cm]	18	16	19	18	21
C [%]	95,66	95,9	95,3	96,4	95,2
R [%]	0,17	0,10	0,16	0,07	0,17

Pour la suite, nous allons formuler des bétons fluides par de plan factoriel à deux niveaux, en prenant toujours le même de chaque constituant de béton fluide.

Les conditions sont donc :

- Réalisons le mélange des deux fillers ($F = F_C + F_D = 193 \text{ Kg}$). Nous avons donc le rapport $r_F = F_C/F_D$;
- Réalisons aussi le mélange des deux superplastifiants ($Sp = Sp_1 + Sp_2 = 7 \text{ L}$). Nous aurons également le rapport $r_{Sp} = Sp_1/Sp_2$;

- Le dosage en ciment est ajusté à la fois 350Kg/m^3 ou 400Kg/m^3 en suivant les plans d'expériences (Plan factoriel complet à deux niveaux) ;
- Le dosage en eau change autant que le dosage en ciment change, mais le rapport E/C reste fixe ($E/C = 0,58$) ;
- Le dosage de sable et de gravillons (pas de niveau) sera tout également maintenu à 368Kg/m^3

II. NIVEAUX DES FACTEURS

Les facteurs ciblés par cette recherche sont la quantité de ciment (C), la quantité d'eau E, les quantités des superplastifiants Sp et les quantités des fillers F, le tout par unité de volume du mélange à l'état frais.

Le choix des fourchettes d'étude des différents paramètres a été déterminé en se basant sur les formules des bétons fluides rappelés dans le tableau 84 précédemment. Une nouvelle série de formulations a été donc effectuée.

Tableau 84 : Paramètres de niveau des facteurs

CONSTITUANTS	Ciment C [Kg]		Eau E [L]		Sables [Kg]		Gravillon s [Kg]		Fillers $r_F = F_C/F_D$		Superplastifiants $r_{Sp} = Sp_1/Sp_2$	
					Sr2	Sc	g2	G				
DOSAGES	350	400	203	232	368	368	368	368	1	1,5	1	1,5
NIVEAUX	-1	+1	-1	+1	Pas de niveau				-1	+1	-1	+1

Le dosage en eau varie en fonction du dosage en ciment : un dosage de 350 Kg de ciment correspond à 203 L d'eau dans un mètre cube de béton ($E/C = 0,58$), et si le dosage en ciment est à 400 Kg, alors l'eau est dosée à 220 L.

Le dosage en superplastifiant est de 7L, donc si nous combinons les deux superplastifiants, nous avons $Sp = Sp_1 + Sp_2 = 7\text{ L}$. Si le rapport $r_{Sp} = Sp_1 / Sp_2 = 1$, il indique que nous utilisons 3,5L de Sp_1 et 3,5L de Sp_2 . Et si $r_{Sp} = Sp_1 / Sp_2 = 1,5$; nous réalisons un mélange de 4,2 L de Sp_1 et de 2,8 L de Sp_2 .

Le superplastifiant Sp_1 a été abondamment utilisé, car la réalisation des bétons fluides à partir de Sp_1 a été satisfaisante par rapport à Sp_2 (Sp_1 permet d'avoir une bonne résistance en compression des bétons).

Le dosage des fillers est de 193 Kg, le mélange de filler cipolin et de filler dolomie est alors $F = F_C + F_D = 193$ Kg. Le rapport $r_F = F_C / F_D = 1$ donne un dosage de 96,5 Kg de F_C et un dosage de 96,5 Kg de F_D . Et si $r_F = F_C / F_D = 1,5$; nous avons le dosage de F_C est égale à 115,8 kg et le dosage de F_D égal à 77,2 Kg.

Similaire aux superplastifiants, le dosage de filler cipolin est considérablement utilisé, car son utilisation en excès par rapport au filler dolomie permet d'obtenir un bon résultat, comme nous l'avons vu dans les études précédentes.

III. CHOIX DU PLAN D'EXPÉRIENCE POUR NOTRE ÉTUDE

Avec un plan de quatre facteurs à deux niveaux, nous avons un nombre d'essais égal à $2^4 = 16$, et vu que ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis.

Plan factoriel complet 2^4 (quatre facteurs à deux niveaux)

La matrice des effets est une matrice à 16 lignes et à 4 colonnes (figure 26) selon le plan factoriel

—	1	—	1	—	1	—	1
+	1	—	1	—	1	—	1
—	1	+	1	—	1	—	1
+	1	+	1	—	1	—	1
—	1	—	1	+	1	—	1
+	1	—	1	+	1	—	1
—	1	+	1	+	1	—	1
+	1	+	1	+	1	—	1
—	1	—	1	—	1	+	1
+	1	—	1	—	1	+	1
—	1	+	1	—	1	+	1
+	1	+	1	—	1	+	1
—	1	—	1	+	1	+	1
+	1	—	1	+	1	+	1
—	1	+	1	+	1	+	1
+	1	+	1	+	1	+	1

Figure 26: Matrice des effets

Interactions

Pour le plan factoriel (C, E, r_F , r_{Sp}), les interactions sont les suivantes : C^*E , C^*r_F , C^*r_{Sp} , E^*r_F , E^*r_{Sp} , $r_F^*r_{Sp}$, $C^*E^*r_F$, $C^*E^*r_{Sp}$, et $E^*r_F^*r_{Sp}$.

Nous avons 9 interactions, 4 facteurs et 16 essais de formulation, d'où la matrice est une matrice à 16 lignes et à 13 colonnes (9 interactions + 4 facteurs). La matrice des effets avec interactions est présentée par la figure 27.

-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Figure 27: Matrice des effets avec ses interactions

IV. FORMULATIONS DES BETONS FLUIDES SUIVANT LES MATRICES DES EFFETS

Les matrices des effets nous donnent les formules des bétons fluides suivants

Tableau 85 : Formules des bétons fluides par des plans d'expériences

BFL	CIMENT [Kg]	E[L]	g ₂ [Kg]	G [Kg]	Sr ₂ [Kg]	Sc[Kg]	F		Sp	
							F _C [Kg]	F _D [Kg]	Sp ₁ [L]	Sp ₂ [L]
BFL ₆	350	203	368	368	368	368	96,5	96,5	3,5	3,5
BFL ₇	400	203	368	368	368	368	96,5	96,5	3,5	3,5
BFL ₈	350	232	368	368	368	368	96,5	96,5	3,5	3,5
BFL ₉	400	232	368	368	368	368	96,5	96,5	3,5	3,5
BFL ₁₀	350	203	368	368	368	368	115,8	77,2	3,5	3,5
BFL ₁₁	400	203	368	368	368	368	115,8	77,2	3,5	3,5
BFL ₁₂	350	232	368	368	368	368	115,8	77,2	3,5	3,5
BFL ₁₃	400	232	368	368	368	368	115,8	77,2	3,5	3,5
BFL ₁₄	350	203	368	368	368	368	96,5	96,5	4,2	2,8
BFL ₁₅	400	203	368	368	368	368	96,5	96,5	4,2	2,8
BFL ₁₆	350	232	368	368	368	368	96,5	96,5	4,2	2,8
BFL ₁₇	400	232	368	368	368	368	96,5	96,5	4,2	2,8
BFL ₁₈	350	203	368	368	368	368	115,8	77,2	4,2	2,8
BFL ₁₉	400	203	368	368	368	368	115,8	77,2	4,2	2,8
BFL ₂₀	350	232	368	368	368	368	115,8	77,2	4,2	2,8
BFL ₂₁	400	232	368	368	368	368	115,8	77,2	4,2	2,8

V. RÉSULTATS DES ESSAIS ET MODÉLISATION

1. Résultats et modélisation de la résistance en compression des bétons fluides à 7 jours (Rc07)

1.1 Résultats des essais expérimentaux de Rc07 des bétons fluides

Nous pouvons représenter par les tableaux 86, les résistances à 7 jours d'âges des bétons fluides formulés à partir du plan factoriel à 2 niveaux.

Tableau 86 : Résistances en compression à 7 jours des bétons fluides formulés à partir des plans d'expériences

BÉTONS FLUIDES	N° DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES [KN]	Rc ₀₇ EN [MPa]	MOYENNE ARITHMETIQUE DE Rc ₀₇ [MPa]
BFL ₆	(1)	344,04	17,12	17,14
	(2)	348,46	17,34	
	(3)	340,83	16,96	
BFL ₇	(1)	460,00	22,89	23,16
	(2)	480,09	23,89	
	(3)	456,18	22,7	
BFL ₈	(1)	284,76	14,17	14,29
	(2)	313,70	15,61	
	(3)	263,06	13,09	
BFL ₉	(1)	380,42	18,93	17,71
	(2)	324,35	16,14	
	(3)	362,93	18,06	
BFL ₁₀	(1)	339,02	16,87	16,12
	(2)	320,13	15,93	
	(3)	312,69	15,56	
BFL ₁₁	(1)	516,87	25,72	24,89
	(2)	500,19	24,89	
	(3)	483,51	24,06	
BFL ₁₂	(1)	323,14	16,08	15,23
	(2)	316,71	15,76	
	(3)	278,33	13,85	
	(1)	336,01	16,72	16,25
	(2)	292,60	14,56	

BÉTONS FLUIDES	N° DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES [KN]	R _{c07} EN [MPa]	MOYENNE ARITHMETIQUE DE R _{c07} [MPa]
BFL ₁₃	(3)	351,08	17,47	
BFL ₁₄	(1)	381,42	18,98	18,66
	(2)	370,37	18,43	
	(3)	373,18	18,57	
BFL ₁₅	(1)	417,19	20,76	21,83
	(2)	423,22	21,06	
	(3)	475,67	23,67	
BFL ₁₆	(1)	399,11	19,86	18,82
	(2)	343,64	17,1	
	(3)	391,87	19,5	
BFL ₁₇	(1)	443,72	22,08	21,71
	(2)	421,61	20,98	
	(3)	443,52	22,07	
BFL ₁₈	(1)	342,84	17,06	16,85
	(2)	322,54	16,05	
	(3)	350,47	17,44	
BFL ₁₉	(1)	527,92	26,27	26,13
	(2)	523,30	26,04	
	(3)	524,10	26,08	
BFL ₂₀	(1)	464,42	23,11	23,21
	(2)	479,49	23,86	
	(3)	455,38	22,66	
BFL ₂₁	(1)	471,25	23,45	24,08
	(2)	479,69	23,87	
	(3)	500,79	24,92	

1.2 Conception des plans d'expériences par le logiciel minitab [25] [26]

1.2.1 Généralités

Les plans d'expériences (DOE) constituent une méthode d'analyse simultanée des effets produits par plusieurs variables sur une variable de résultat (réponse).

Ces expériences consistent en une série d'essais ou de tests au cours desquels les variables d'entrée ou les facteurs sont intentionnellement modifiés et dont les données sont recueillies à la fin de chaque essai.

Minitab propose quatre types de plans d'expériences : factoriel, surface de réponse, mélange et Taguchi (robuste). Les étapes à suivre dans Minitab pour créer, analyser et tracer un plan d'expériences sont similaires pour tous les types de plans. Une fois que nous avons effectué l'expérience et saisi les résultats, Minitab dispose de plusieurs outils d'analyse et de traçage pour nous aider à mieux comprendre ces résultats. Nous avons détaillé plus spécifiquement les différentes étapes permettant de créer et d'analyser un plan factoriel.

Les commandes DOE de Minitab incluent :

- La mise à disposition de catalogues de plans d'expériences pour faciliter la création de plan
- La création et la mémorisation automatiques de votre plan une fois que ses propriétés ont été définies
- L'affichage et le stockage des statistiques de diagnostic afin de vous aider à interpréter les résultats
- Des graphiques vous permettant d'interpréter et de présenter les résultats

Le logiciel MINITAB a été utilisé pour déterminer les coefficients des polynômes pour chaque réponse. Le degré de signification des coefficients a été déterminé à l'aide du test student et de la valeur de p. La vérification des modèles ajustés a été réalisée par le coefficient de régression R^2 et leurs significations statistiques ont été faites par le t-test. Lorsque R^2 présente des valeurs élevées, il indique que le modèle prévoit correctement les nouvelles observations et quand il présente des valeurs faibles ça montre que le modèle ajuste bien les données existantes.

1.2.2 Création d'un plan d'expériences

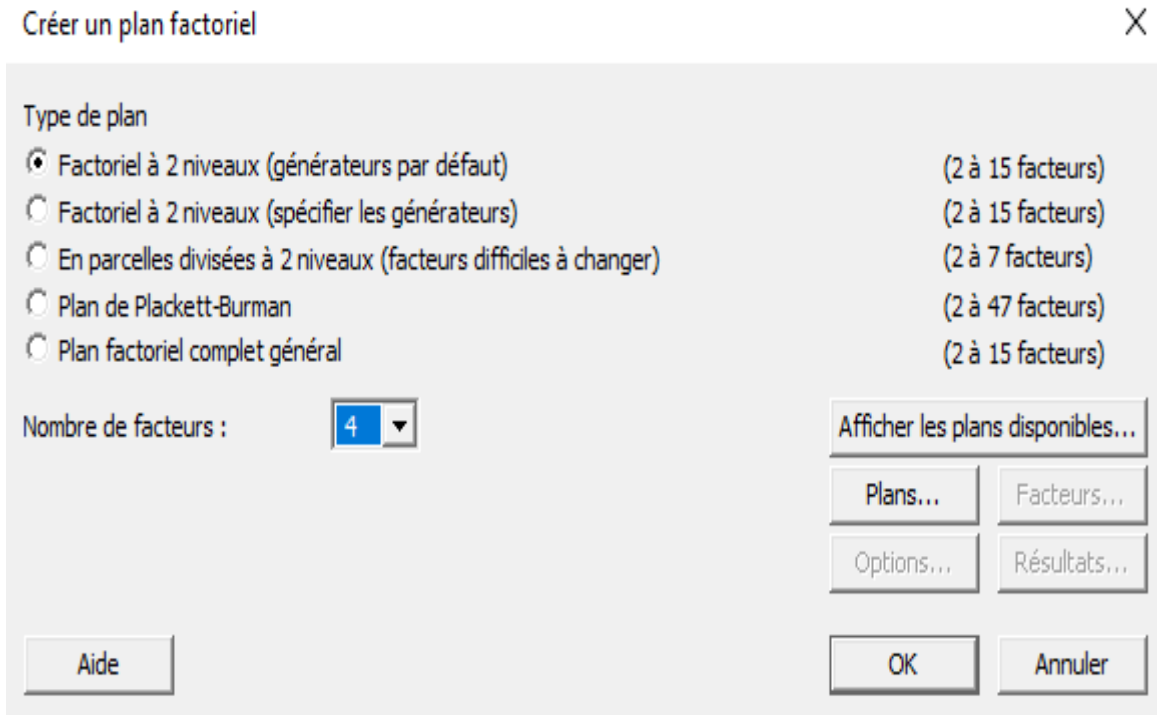
Avant de pouvoir saisir ou analyser des données de mesure dans Minitab, nous devons d'abord créer un plan d'expériences et l'enregistrer dans une feuille de travail. En fonction des critères nécessaires pour l'expérience, il existe différents types de

plan. Minitab facilite la sélection d'un plan en fournissant une liste de tous les plans disponibles.

Une fois que nous avons choisi un plan et ses caractéristiques, Minitab se charge de le créer automatiquement et de le mémoriser dans la feuille de travail. La démarche est présentée comme suit :

Sélection des plans

- Sélectionnez Fichier ► Nouveau, puis choisissez Projet Minitab. Cliquez sur OK. Sinon, démarrez simplement Minitab.
- Sélectionnez Stat ► DOE (plan d'expériences) ► Plan factoriel ► Créer un plan factoriel.
- Lorsque vous créez un plan avec Minitab, seuls deux boutons sont activés dans un premier temps, Afficher les plans disponibles et Plans. Les autres boutons deviennent disponibles dès que la sous-boîte de dialogue Plans a été



Créer un plan factoriel

Type de plan

- ☒ Factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut) (2 à 15 facteurs)
- ☐ Factoriel à 2 niveaux (spécifier les générateurs) (2 à 15 facteurs)
- ☐ En parcelles divisées à 2 niveaux (facteurs difficiles à changer) (2 à 7 facteurs)
- ☐ Plan de Plackett-Burman (2 à 47 facteurs)
- ☐ Plan factoriel complet général (2 à 15 facteurs)

Nombre de facteurs :

Aide

Afficher les plans disponibles...

Plans... Facteurs...

Options... Résultats...

OK Annuler

complétée.

- Cliquez sur Afficher les plans disponibles. Pour la plupart des plans, Minitab affiche tous les plans possibles et le nombre d'essais nécessaires dans la boîte de dialogue Afficher les plans disponibles.

Créer un plan factoriel : Afficher les plans disponibles

Plans factoriels disponibles (avec résolution)

Essa	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Com	III												
8		Com	IV	III	III	III								
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Plans de Plackett-Burman Résolution III disponibles

Facteurs	Essais	Facteurs	Essais	Facteurs	Essais
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Aide OK

- Cliquez sur OK pour revenir à la boîte de dialogue principale.
- Sous Type de plan, sélectionnez Factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut).
- Dans la zone Nombre de facteurs, sélectionnez 4.
- Cliquez sur Plans. La zone située dans la partie supérieure indique tous les plans à disposition pour ce type de plan et le nombre de facteurs que nous avons choisis. Comme nous réalisons un plan factoriel à quatre facteurs, nous avons deux options : un plan factoriel complet avec huit essais et un plan factoriel complet avec seize essais. Il existe $2^{(4-1)}$ (ou huit) et 2^4 (seize) combinaisons de facteurs possibles pour un plan à deux niveaux avec quatre

facteurs.

Créer un plan factoriel : Plans

Plans	Essais	Résolution	$2^{(k-p)}$
Fraction 1/2	8	IV	$2^{(4-1)}$
Fact. compl.	16	Complet	2^4

Nombre de points centraux par bloc : 0

Nombre de répliques pour les points de sommets : 1

Nombre de blocs : 1

Aide OK Annuler

Nous avons choisi plans factoriels complets à 16 essais

- Cliquez sur OK pour revenir à la boîte de dialogue principale. Notez que Minitab active les autres boutons.

Attribution de noms aux facteurs et définition des niveaux

Minitab indique les noms et les niveaux que nous saisissons pour chaque facteur dans la feuille de travail et utilise ces noms comme étiquettes pour les facteurs dans les résultats d'analyse et les légendes des graphiques. Si aucun niveau de facteur n'est défini, Minitab définit le niveau inférieur à -1 et le niveau supérieur à 1 .

- Cliquez sur Facteurs.
- Cliquez sur la première ligne de la colonne Nom pour changer le nom du premier facteur. Ensuite, servons-nous des touches fléchées pour naviguer dans le tableau (d'une colonne à l'autre, puis d'une ligne à l'autre). Dans la ligne correspondant au :
 - **Facteur A**, saisissez *C (ciment)* dans la zone, la valeur 350 sous **Min** et 400 sous **Max**. Sélectionnez *Numérique* pour la **colonne Type**.
 - **Facteur B**, saisissez *E (Eau)* dans la zone, la valeur 203 sous **Min** et 232 sous **Max**. Sélectionnez *Numérique* pour la colonne Type.
 - **Facteur C**, saisissez *rF (rapport des fillers)* dans la zone, la valeur 1 sous **Min** et 1,5 sous **Max**. Sélectionnez *Numérique* pour la **colonne Type**.
 - **Facteur D**, saisissez *rSp (rapport des superplastifiants)* dans la zone, la valeur 1 sous **Min** et 1,5 sous **Max**. Sélectionnez *Numérique* pour la **colonne Type**.

Créer un plan factoriel : Facteurs



Facteur	Nom	Type	Min	Max
A	C	Numérique ▼	350	400
B	E	Numérique ▼	203	232
C	rF	Numérique ▼	1	1,5
D	rSp	Numérique ▼	1	1,5

Aide
OK
Annuler

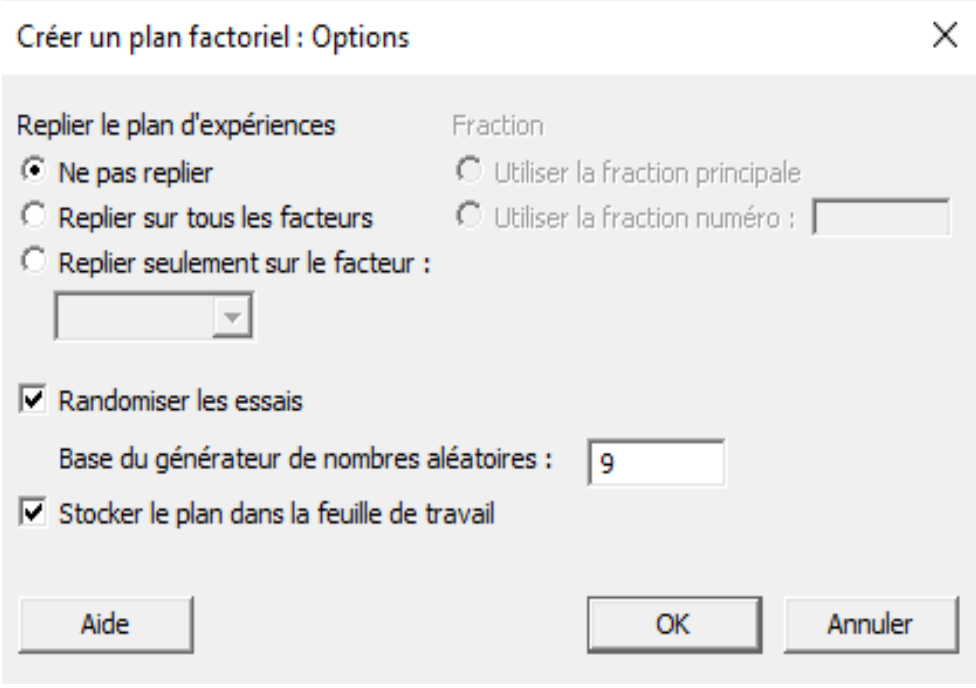
- Cliquez sur OK pour revenir à la boîte de dialogue principale

Randomisation et stockage du plan

Par défaut, Minitab randomise l'ordre des essais de tous les types de plans, à l'exception des plans de Taguchi. La randomisation permet de s'assurer que le modèle respecte certaines hypothèses statistiques et peut également réduire les effets des facteurs n'étant pas inclus dans l'étude.

Le paramétrage de la base du générateur de nombres aléatoires permet d'obtenir le même ordre d'essais à chaque création de plans.

- Cliquez sur Options.
- Entrez 9 dans le champ Base du générateur de nombres aléatoires.
- Assurez-vous que l'option Stocker le plan dans la feuille de travail est cochée. Cliquez sur OK dans chaque boîte de dialogue.



Créer un plan factoriel : Options [X]

Replier le plan d'expériences

- ☒ Ne pas replier
- ☐ Replier sur tous les facteurs
- ☐ Replier seulement sur le facteur :

Fraction

- ☐ Utiliser la fraction principale
- ☐ Utiliser la fraction numéro :

☒ Randomiser les essais

Base du générateur de nombres aléatoires :

☒ Stocker le plan dans la feuille de travail

1.2.3 Affichage d'un plan

A chaque création de plan, Minitab enregistre les informations qui le concernent et les facteurs dans les colonnes de la feuille de travail. Ouvrez la fenêtre Données afin de visualiser la structure d'un plan classique. Vous pouvez aussi ouvrir la feuille de travail PLANEXPERIENCE.MTW dans le dossier Introduction à Minitab qui comprend le plan et les données de réponse.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	C	E	rF	rSp	
1	1	5	1	1	350	203	1,0	1,0	
2	2	1	1	1	400	203	1,0	1,0	
3	3	4	1	1	350	232	1,0	1,0	
4	4	3	1	1	400	232	1,0	1,0	
5	5	11	1	1	350	203	1,5	1,0	
6	6	9	1	1	400	203	1,5	1,0	
7	7	8	1	1	350	232	1,5	1,0	
8	8	10	1	1	400	232	1,5	1,0	
9	9	12	1	1	350	203	1,0	1,5	
10	10	14	1	1	400	203	1,0	1,5	
11	11	7	1	1	350	232	1,0	1,5	
12	12	13	1	1	400	232	1,0	1,5	
13	13	16	1	1	350	203	1,5	1,5	
14	14	2	1	1	400	203	1,5	1,5	
15	15	15	1	1	350	232	1,5	1,5	
16	16	6	1	1	400	232	1,5	1,5	
17									

La colonne (C2) OrdEssai, déterminée de façon aléatoire, indique l'ordre dans lequel les données doivent être recueillies. Si nous ne randomisons pas le plan, les colonnes OrdreStd et OrdEssai sont identiques. Dans le cas présent, comme nous n'avons pas ajouté de points centraux ni employé la méthode des blocs pour ce plan, Minitab a inséré la même valeur 1 dans les colonnes C3 et C4. Les facteurs sont situés dans les colonnes C5 et C6, respectivement intitulées C, E, rF et rSp. Etant donné que nous avons saisi les niveaux de facteurs dans la sous-boîte de dialogue Facteurs, nous pouvons voir les niveaux réels dans la feuille de travail.

La commande Stat ► DOE (plan d'expériences) ► Afficher le plan permet de basculer entre les affichages aléatoire et standard, et entre les affichages codé et non codé dans la feuille de travail.

Pour modifier les paramètres ou les noms des facteurs, utilisons la commande Stat ► DOE (plan d'expériences) ► Modifier le plan. Si vous devez uniquement modifier les noms des facteurs, vous pouvez les entrer directement dans la fenêtre donnée.

1.2.4 Saisie de données

Une fois que nous avons réalisé l'expérience et recueilli les données, nous pouvons entrer ces dernières dans la feuille de travail. On appelle réponse la caractéristique mesurée. Nous mesurons les résistances en compression du béton à 7 jours d'âges. A la suite de l'expérience, nous avons obtenu les données indiquées dans le tableau 86.

Saisie des données dans la feuille de travail

- Dans la fenêtre Données, cliquez sur la cellule du nom de la colonne C7 et saisissez Heures.
- Recopiez les résistances en compression à 7 jours indiquées ci-dessus dans la colonne Rc07. Nous pouvons saisir les données indifféremment dans toutes les colonnes à l'exception de celles comportant les informations relatives au plan. Nous pouvons aussi entrer plusieurs réponses pour une seule expérience à raison d'une expérience par colonne.

1.2.5 Analyse d'un plan

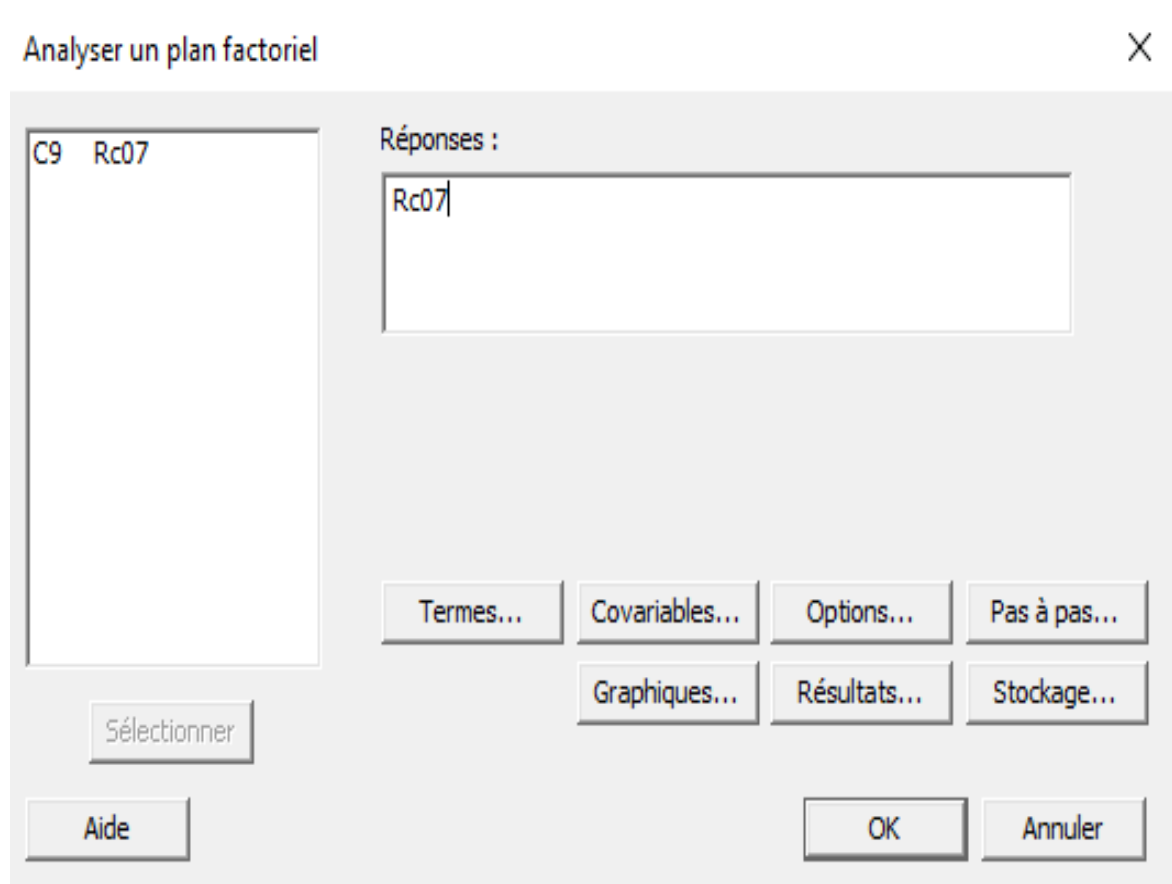
Maintenant que nous avons créé un plan et collecté les données de réponse, nous pouvons ajuster un modèle aux données et générer des diagrammes pour en évaluer les effets.

Utilisez les résultats du modèle ajusté et des graphiques pour identifier les facteurs clés pouvant améliorer les résistances en compression Rc07 des bétons.

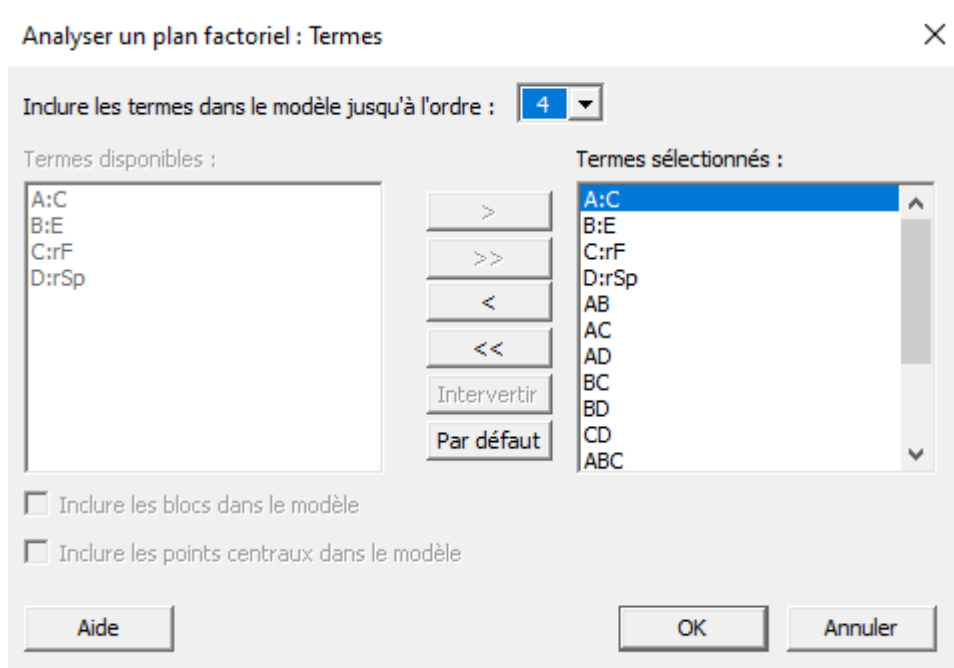
Ajustement d'un modèle

Après la création et la mémorisation d'un plan factoriel, Minitab active les commandes du menu DOE (plan d'expériences) ► Plan factoriel % Analyser un plan factoriel et Diagrammes factoriels. Nous pouvons à présent ajuster un modèle ou générer des diagrammes, en fonction du plan.

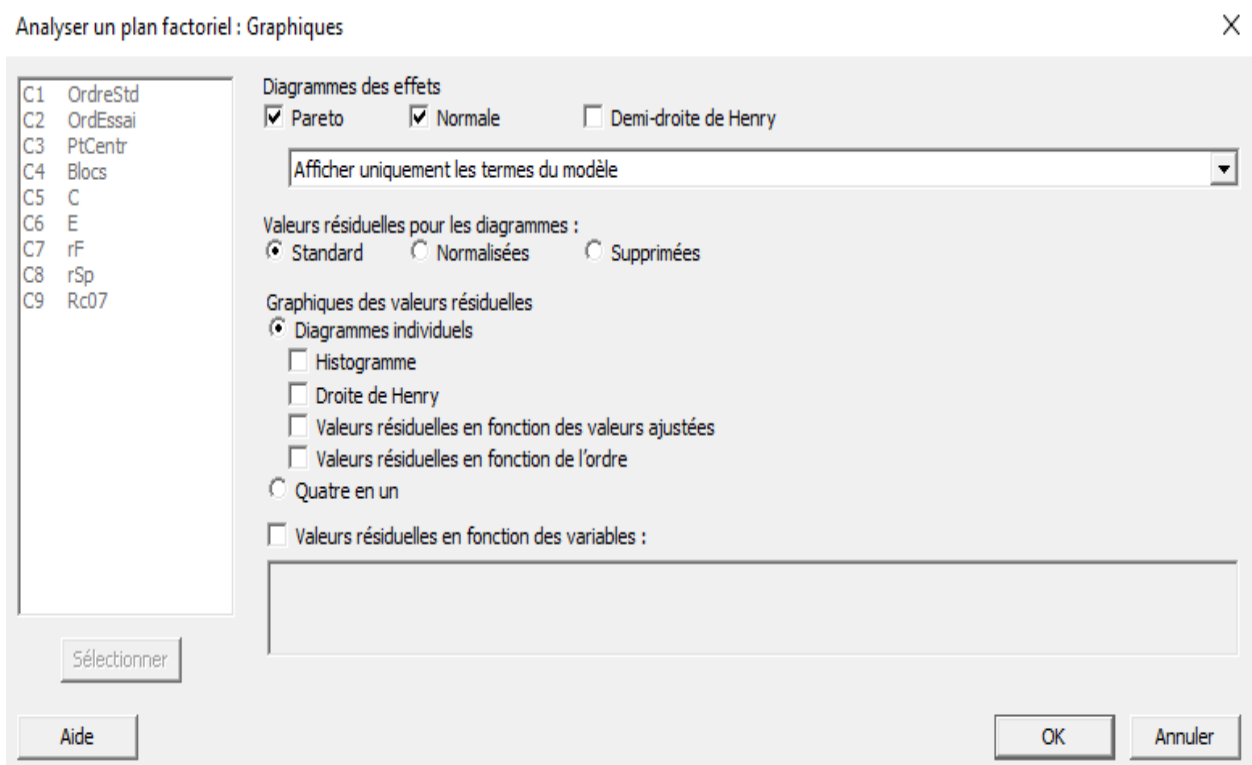
- Sélectionnez Stat ► DOE (plan d'expériences) ► Plan factoriel ► Analyser un plan factoriel.
- Dans la zone Réponses, entrez Rc07. Une colonne de réponse est nécessaire à l'ouverture des sous-boîtes de dialogue.



- Cliquez sur Termes. Veillez à ce que A : C, B : E, C : rF, D : rSp, AB, AC, AD, BC, BD, CD, ABC, ABD, ACD, BCD et ABCD figurent dans la zone Termes sélectionnés. Lorsque nous analysons un plan, utilisons la sous-boîte de dialogue Termes pour sélectionner les termes à inclure dans le modèle. Nous pouvons ajouter ou supprimer des facteurs et des interactions en utilisant les flèches. Utilisons les cases à cocher pour inclure des blocs et des points centraux au modèle.



- Cliquer sur OK
- Cliquer sur graphiques
- Sous Diagrammes des effets, cochez Normal et Pareto. Les diagrammes des effets ne sont disponibles que pour les plans factoriels. Les graphiques des valeurs résiduelles, utiles pour vérifier les hypothèses du modèle, peuvent être affichés pour tous les types de plan.



- Cliquez sur OK dans chaque boîte de dialogue.

Identification des effets importants

Nous pouvons utiliser à la fois les résultats de la fenêtre Session et les deux diagrammes des effets pour nous aider à déterminer les effets qui sont importants pour le procédé. Examinez d'abord les résultats de la fenêtre Session.

1.3 Modèles mathématiques des résistances en compression des bétons fluides à 7 jours.

Le modèle linéaire de la résistance en compression à 7 jours R_{c07} s'écrit de la façon suivante :

$$R_{c07} = A_0 + A_1 * C + A_2 * E + A_3 * rF + A_4 * rSp + A_{12} * CE + A_{13} * C * rF + A_{14} * C * rSp + A_{23} * E * rF + A_{24} * E * rSp + A_{34} * rF * rSp + A_{123} * C * E * rF + A_{124} * C * E * rSp + A_{234} * E * rF * rSp + A_{1234} * C * E * rF * rSp$$

(82)

$$rF = \frac{F_c}{F_d}$$

$$rSp = \frac{Sp_1}{Sp_2}$$

1.3.1 Coefficients codés

La détermination des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 de R_{c07} se font par le Logiciel Minitab 19.2 et nous avons les résultats présentés par le tableau ANOVA suivant :

Tableau 87: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle préliminaire de R_{c07}

Terme	Effet	Coeff
Constante		19,75
C	4,430	2,215
E	-1,6850	-0,8425
rF	1,1800	0,5900
rSp	3,312	1,656
C*E	-2,380	-1,190

Terme	Effet	Coeff
C*rF	0,5550	0,2775
C*rSp	-0,3775	-0,1888
E*rF	0,3800	0,1900
E*rSp	2,773	1,386
rF*rSp	1,1325	0,5663
C*E*rF	-1,6600	-0,8300
C*E*rSp	0,2075	0,1037
C*rF*rSp	0,4675	0,2337
E*rF*rSp	0,6875	0,3438
C*E*rF*rSp	-0,3725	-0,1862

1.3.2 Équation de régression préliminaire en unités codées de Rc07

Le modèle préliminaire des valeurs codées -1 et +1 de la résistance en compression à 7 jours d'âges Rc07 des bétons fluides est :

$$\begin{aligned}
 \text{Rc07} = & 19,75 + 2,215 C - 0,8425 E + 0,5900 rF + 1,656 rSp - 1,190 C*E + 0,2775 C*rF \\
 & - 0,1888 C*rSp + 0,1900 E*rF + 1,386 E*rSp + 0,5663 rF*rSp - 0,8300 C*E*rF \\
 & + 0,1037 C*E*rSp + 0,2337 C*rF*rSp + 0,3438 E*rF*rSp - 0,1862 C*E*rF*rSp
 \end{aligned}
 \quad (83)$$

1.3.3 Test de significatif

La signification des coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « q ». Les valeurs qui montrent les significatifs des modèles selon les plans d'expérience en 2003 sont représentées comme suit

- $q \leq 0.01$ très significatif ;
- $q \leq 0.05$ significatif ;
- $q \leq 0.1$ peu significatif ;
- $q > 0.1$ très peu à non significatif.

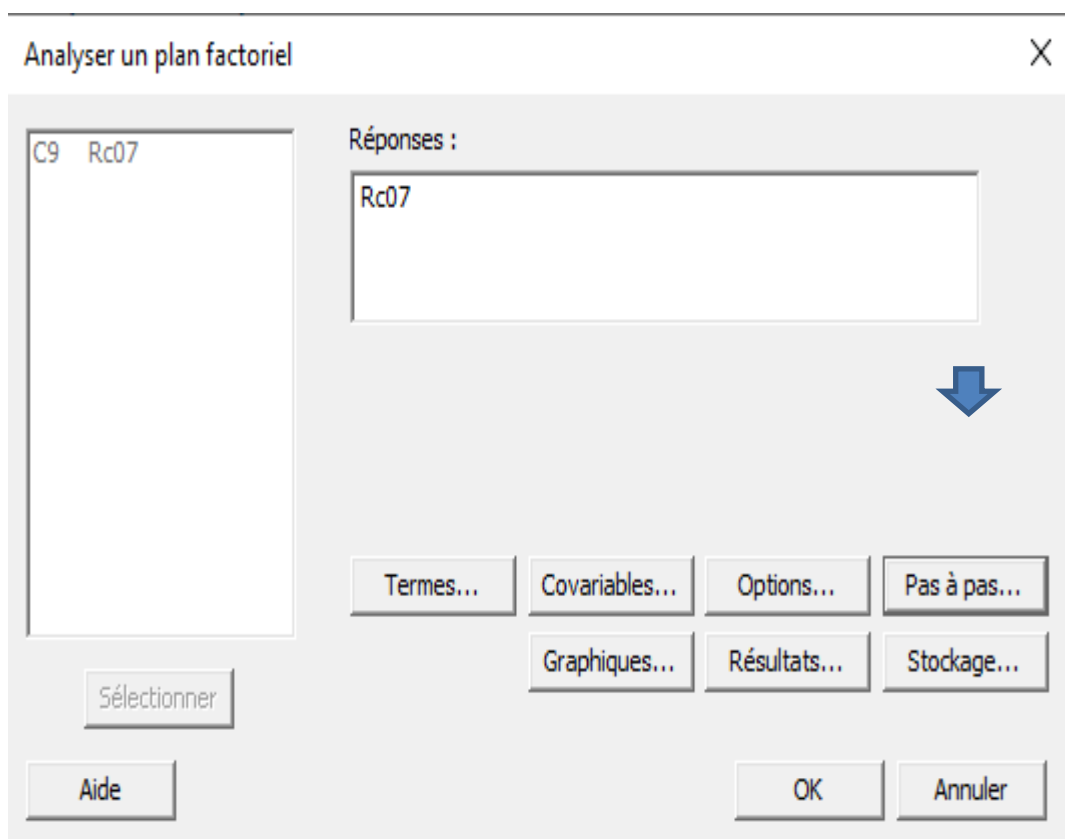
Dans un tableau ANOVA (**A**nalysis **O**f **V**ariance), les facteurs dont la valeur de p est inférieure à 0,1 sont statistiquement significatifs. Si le tableau ANOVA de ce modèle ne comprend aucune valeur de p, cela s'explique par l'absence de degrés de liberté pour l'erreur une fois l'ensemble de nos facteurs inclus dans le modèle.

Or, nous avons besoin d'au moins 1 degré de liberté pour calculer les valeurs de p. Toutefois, si nous ne pouvons pas accepter ce modèle sur la base des résultats de l'ANOVA, nous pouvons utiliser la droite de Henry ou le diagramme de Pareto pour identifier les facteurs et les interactions non significatifs.

1.3.4 Réduction des modèles

Nous devons éliminer les facteurs, réexécutant l'analyse jusqu'à ce qu'il ne reste plus que les facteurs et les interactions significatifs. Cette méthode est appelée "réduction du modèle". Lorsque les facteurs sont supprimés du modèle, des degrés de liberté supplémentaires sont disponibles pour le calcul des valeurs de p. Le nombre de modèles à évaluer dépend du nombre de facteurs de notre analyse.

Pour cela, nous avons utilisé la fonction "pas à pas" de Minitab 19.2.



La fonction régression pas à pas simplifie et accélère la sélection du modèle optimal pour nos données en supprimant automatiquement les facteurs de façon à identifier le modèle qui correspond le mieux à nos données.

Nous pouvons choisir une méthode d'analyse pas à pas parmi les trois suivantes : pas à pas, Sélection ascendante et Élimination descendante.

Dans le cas de l'élimination descendante, tous les facteurs sont compris dans l'analyse initiale, puis les facteurs non significatifs sont supprimés l'un après l'autre. Pour cela, nous avons sélectionné l'élimination descendante.

Analyser un plan factoriel : Pas à pas

Méthode : **Elimination descendante**

Termes potentiels :

- I
- A
- B
- C
- D
- AB
- AC
- AD
- BC
- BD
- CD
- ABC
- ABD
- ACD
- BCD
- ABCD

E = Inclure le terme dans chaque modèle I = Inclure le terme dans le modèle initial

Alpha pour inclure :

Alpha pour exclure :

Hiérarchie...

☒ Afficher le tableau des détails pour la sélection du modèle

Détails sur la méthode

Aide OK Annuler

▪ **Élimination descendante des termes**

α pour exclure = 0,1, le modèle initial était saturé (équation n°83). La procédure pas à pas a supprimé les termes suivants afin d'obtenir des degrés de liberté suffisants pour commencer : $C \cdot rSp$; $C \cdot E \cdot rSp$; $C \cdot rF \cdot rSp$; $C \cdot E \cdot rF \cdot rSp$

▪ **Coefficients codés**

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du nouveau modèle de Rc07 sont donnés dans le tableau 88 suivant

Tableau 88: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc07 retenu

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		19,755	0,225	87,67	0,000	
C	4,430	2,215	0,225	9,83	0,000	1,00

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
E	-1,685	-0,843	0,225	-3,74	0,013	1,00
rF	1,180	0,590	0,225	2,62	0,047	1,00
rSp	3,312	1,656	0,225	7,35	0,001	1,00
C*E	-2,380	-1,190	0,225	-5,28	0,003	1,00
C*rF	0,555	0,278	0,225	1,23	0,273	1,00
E*rF	0,380	0,190	0,225	0,84	0,438	1,00
E*rSp	2,773	1,386	0,225	6,15	0,002	1,00
rF*rSp	1,132	0,566	0,225	2,51	0,054	1,00
C*E*rF	-1,660	-0,830	0,225	-3,68	0,014	1,00

▪ **Récapitulatif du modèle**

Tableau 89: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de Rc07

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,901346	98,11%	94,33%	80,63%

Nous avons la valeur de R carré élevé, nous pouvons dire que notre nouveau modèle de Rc07 est un modèle de qualité. Le modèle permet de retrouver la valeur des Rc07 mesurés.

▪ **Analyse de la variance**

Le tableau d'analyse de variance du nouveau modèle retenu de Rc07 est donné par le tableau 90 suivant :

Tableau 90: Analyse de variance du nouveau modèle de Rc07

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	10	210,684	21,0684	25,93	0,001
Linéaires	4	139,317	34,8292	42,87	0,000
C	1	78,500	78,4996	96,62	0,000
E	1	11,357	11,3569	13,98	0,013

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
rF	1	5,570	5,5696	6,86	0,047
rSp	1	43,891	43,8906	54,02	0,001
Interactions à 2 facteur(s)	5	60,345	12,0689	14,86	0,005
C*E	1	22,658	22,6576	27,89	0,003
C*rF	1	1,232	1,2321	1,52	0,273
E*rF	1	0,578	0,5776	0,71	0,438
E*rSp	1	30,747	30,7470	37,85	0,002
rF*rSp	1	5,130	5,1302	6,31	0,054
Interactions à 3 facteur(s)	1	11,022	11,0224	13,57	0,014
C*E*rF	1	11,022	11,0224	13,57	0,014
Erreur	5	4,062	0,8124		
Total	15	214,746			

- *Modèle mathématique de Rc07 retenu en unités codées -1 et +1*

$$\begin{aligned} \text{Rc07} = & 19,755 + 2,215 \text{ C} - 0,843 \text{ E} + 0,590 \text{ rF} + 1,656 \text{ rSp} - 1,190 \text{ C*E} + 0,278 \text{ C*rF} \\ & + 0,190 \text{ E*rF} + 1,386 \text{ E*rSp} + 0,566 \text{ rF*rSp} - 0,830 \text{ C*E*rF} \end{aligned} \quad (84)$$

- *Modèle mathématique de Rc07 retenu en unités non codées*

$$\begin{aligned} \text{Rc07} = & 807 - 1,743 \text{ C} - 3,66 \text{ E} - 784 \text{ rF} - 87,9 \text{ rSp} + 0,00817 \text{ C*E} + 2,036 \text{ C*rF} \\ & + 3,487 \text{ E*rF} + 0,3824 \text{ E*rSp} + 9,06 \text{ rF*rSp} - 0,00916 \text{ C*E*rF} \end{aligned} \quad (85)$$

- *Ajustements et diagnostics pour les observations aberrantes*

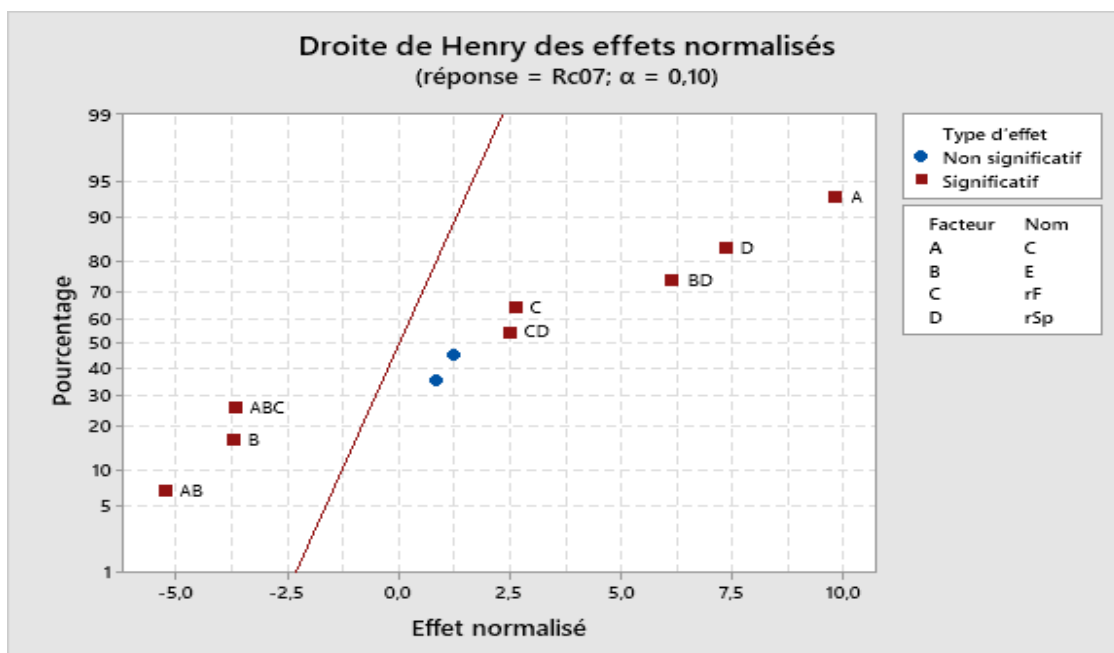
Tableau 91: Ajustements et diagnostics pour les observations aberrantes du modèle de Rc07 retenu

Observation	Rc07	Valeur ajustée	Résiduelle	Val. résid. norm.
1	17,140	18,196	N0 -1,056	-2,10R
9	18,660	17,604	1,056	2,10R

R : Valeur résiduelle élevée

▪ Droite de Henry des effets normalisés

La droite de Henry des effets normalisés pour ce modèle est présentée par la figure suivante



: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de Rc07 pour un risque $\alpha = 0,1$

▪ Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau du modèle de Rc07 pour un risque $\alpha = 0,1$

Le diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc07 pour un risque $\alpha = 0,1$ est présenté comme suit

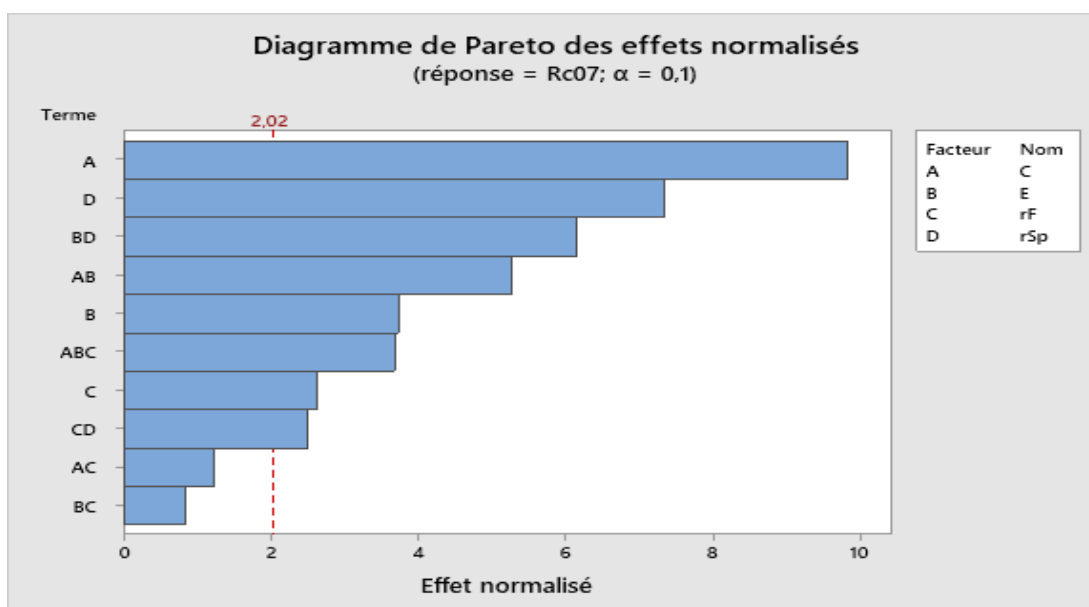
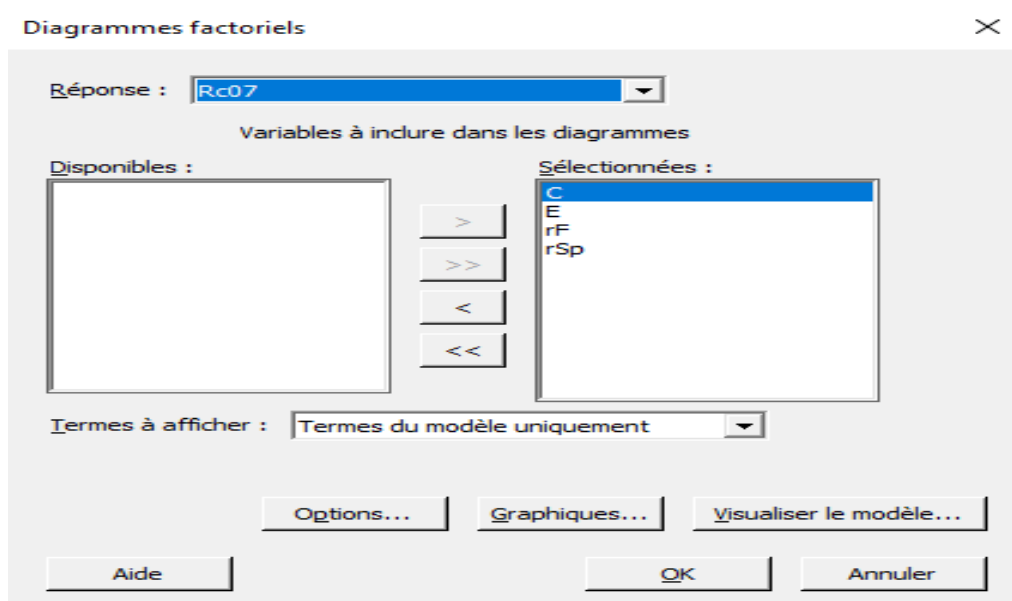


Figure 29 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc07

▪ **Diagramme factoriels**

Pour plus d'information sur l'interprétation de nos résultats, Essayons d'établir le graphe des effets principaux et le diagramme des interactions toujours par le logiciel Minitab. Dans ce cas, sélectionnons le sous-menu DOE (plan d'expériences) > Plan factoriel > Diagrammes factoriels... Comme nous avons déjà analysé les résultats, Minitab sélectionne automatiquement les facteurs utilisés dans notre modèle.



Nous avons les diagrammes suivants

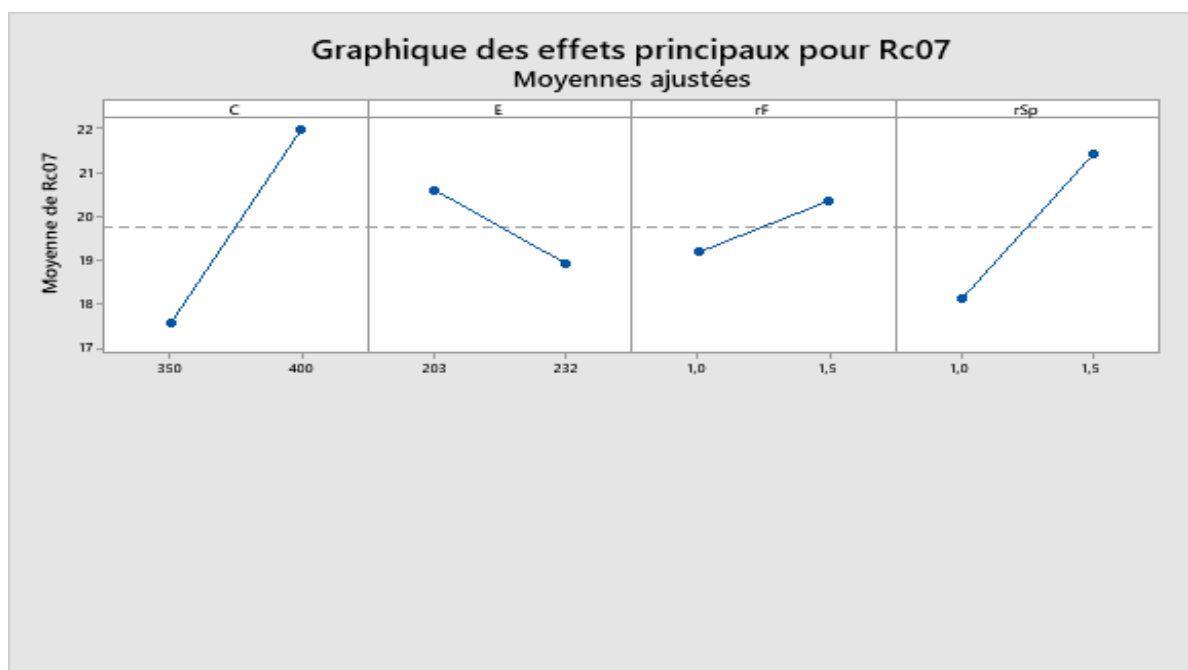


Figure 30: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de Rc07

Ce graphe montre que l'augmentation du dosage de ciment permet d'améliorer la résistance en compression du béton à 7 jours : nous avons une droite ascendante qui prend de l'origine de 350, jusqu'au point final de 400. Il en est de même pour le rapport rF et rSp .

Par contre, la présence majeure de l'eau dans le modèle permet de diminuer la résistance en compression R_{c07} . Ce qui explique le signe négatif des effets de facteur Eau E dans les modèles (**- 0,843 pour les valeurs codées et - 3,66 pour les valeurs non codées**)

Le diagramme des effets des interactions pour le nouveau modèle de R_{c07} est présenté par la figure 31 suivante

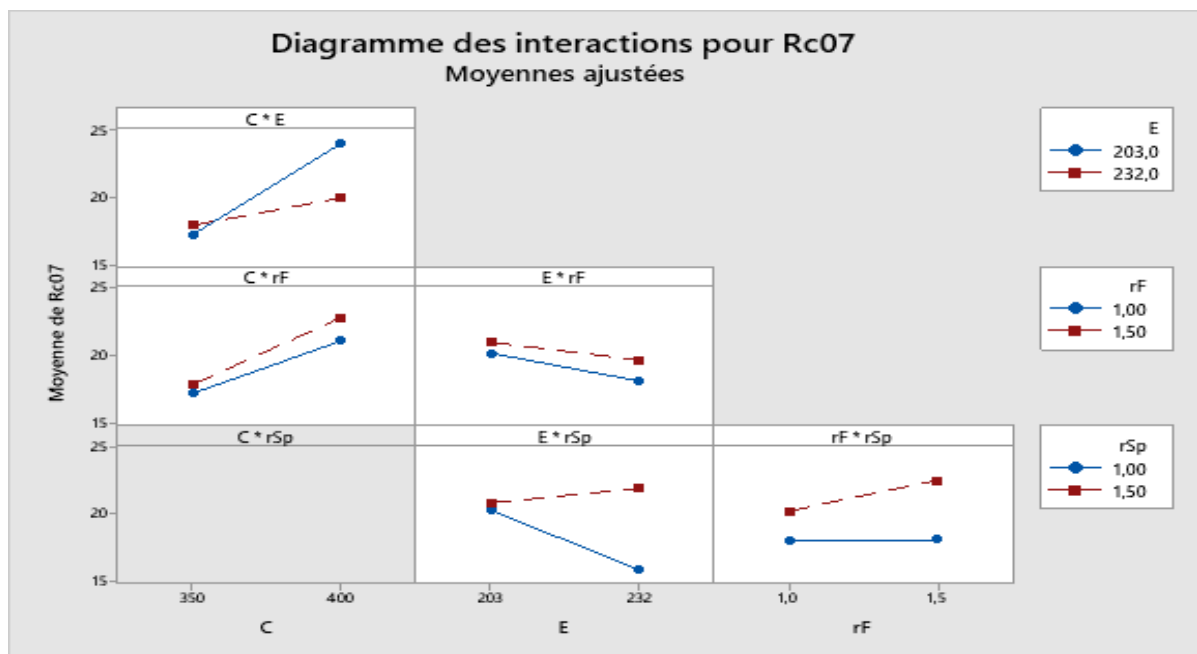


Figure 31: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de R_{c07}

Pareilles pour le graphe des effets de facteurs, les interactions $C * E$, $C * rF$, $E * rSp$, et $rF * rSp$ ont une influence sur l'augmentation de la résistance de R_{c07} des bétons. Tandis que l'interaction $E * rF$, sa présence diminue la résistance en compression des bétons R_{c07} .

- **Graphique de contours et surface des réponses**
 - **Influence des fillers (augmentation de rapport rF)**

Nous avons analysé les graphes de contours de R_{c07} suivants en fixant le rapport de superplastifiants rSp constant ($rSp = 1$).

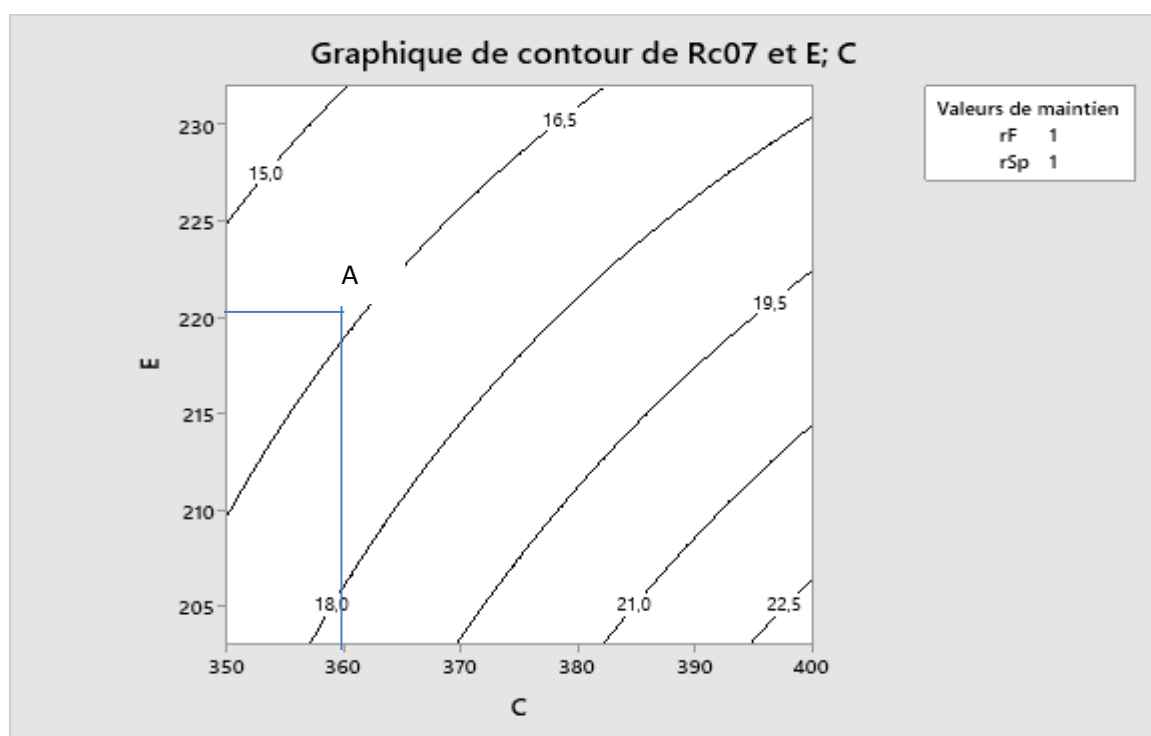


Figure 32: Iso-réponses de Rc07 en fonction du dosage en eau et en ciment

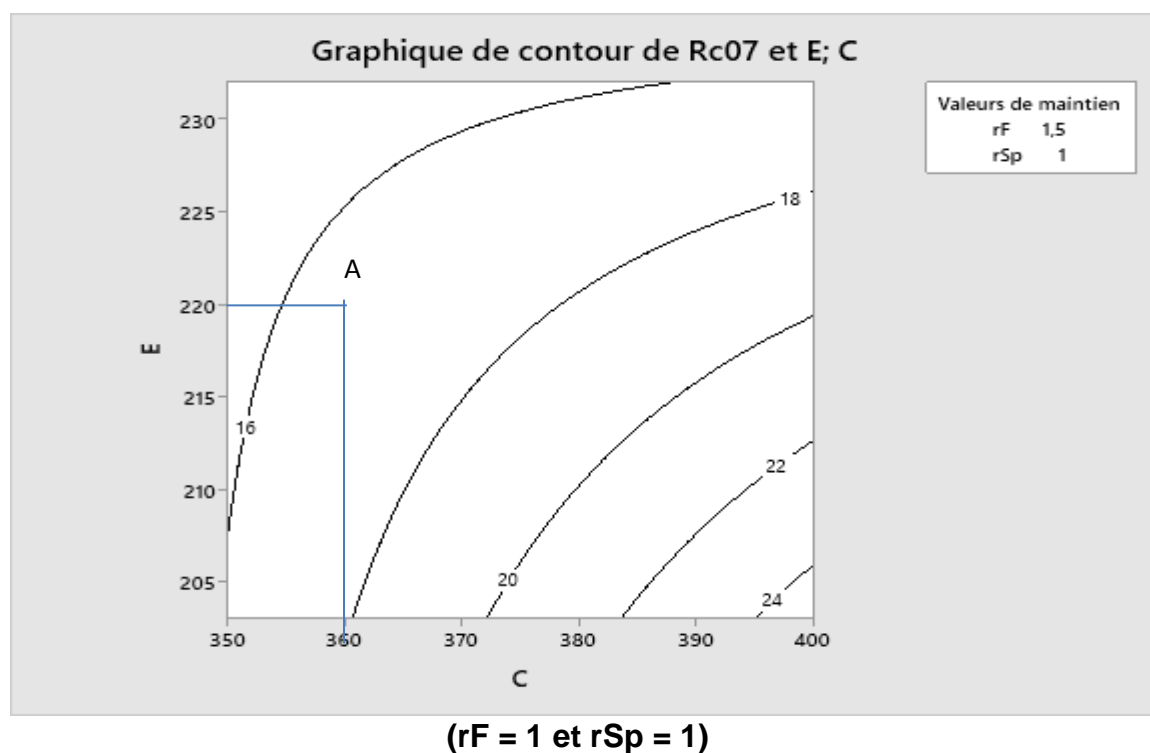


Figure 33: Iso-réponses de Rc07 en fonction du dosage en eau et en ciment
(rF = 1,5 et rSp = 1)

Dans la figure 32, le rapport r_F et le rapport r_{Sp} sont maintenus respectivement égaux à 1 et 1. Par contre, dans la figure 33, le rapport r_F est augmenté jusqu'à une valeur de 1,5 et le rapport r_{Sp} est fixé toujours à 1. L'objectif étant de regarder l'influence de rapport r_F dans la résistance en compression R_{c07} des bétons. C'est-à-dire la présence majeure de filler cipolin dans les bétons. Dans ces deux graphes (figure 32 et 33), nous avons pris le point A qui a pour coordonnées A (360, 220).

Dans la figure 32, le béton obtenu dans ce point a un dosage de ciment $C = 360 \text{ Kg/m}^3$, un dosage d'eau $E = 220 \text{ L/m}^3$, un mélange des superplastifiants $Sp_1 = 3 \text{ L/m}^3$ et $Sp_2 = 3 \text{ L/m}^3$, un mélange des fillers $F_{CP} = 96,5 \text{ Kg/m}^3$ et $F_D = 96,5 \text{ Kg/m}^3$. Avec ces dosages, nous pouvons obtenir une résistance en compression R_{c07} comprise entre 15 MPa et 16,5 MPa. Cependant, dans la figure 33, l'augmentation de rapport $r_F = 1,5$ (un mélange des fillers $F_{CP} = 115,8 \text{ Kg/m}^3$ et $F_D = 77,2 \text{ Kg/m}^3$) ; nous permet d'avoir une résistance en compression R_{c07} un peu plus élevée comprise entre 16 MPa et 18 MPa. Ainsi, nous pouvons dire que la présence de filler cipolin F_{CP} dans le béton permet d'améliorer la résistance en compression R_{c07} .

- ***Influence des superplastifiants (augmentation de rapport***

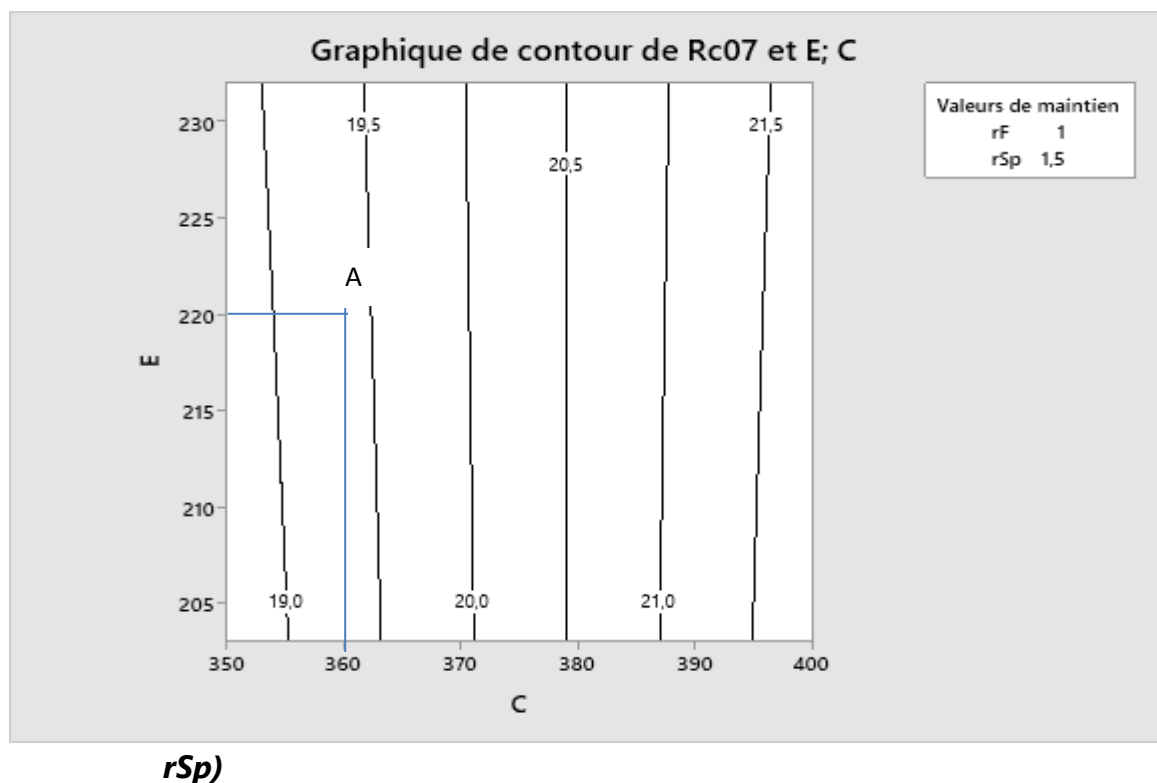


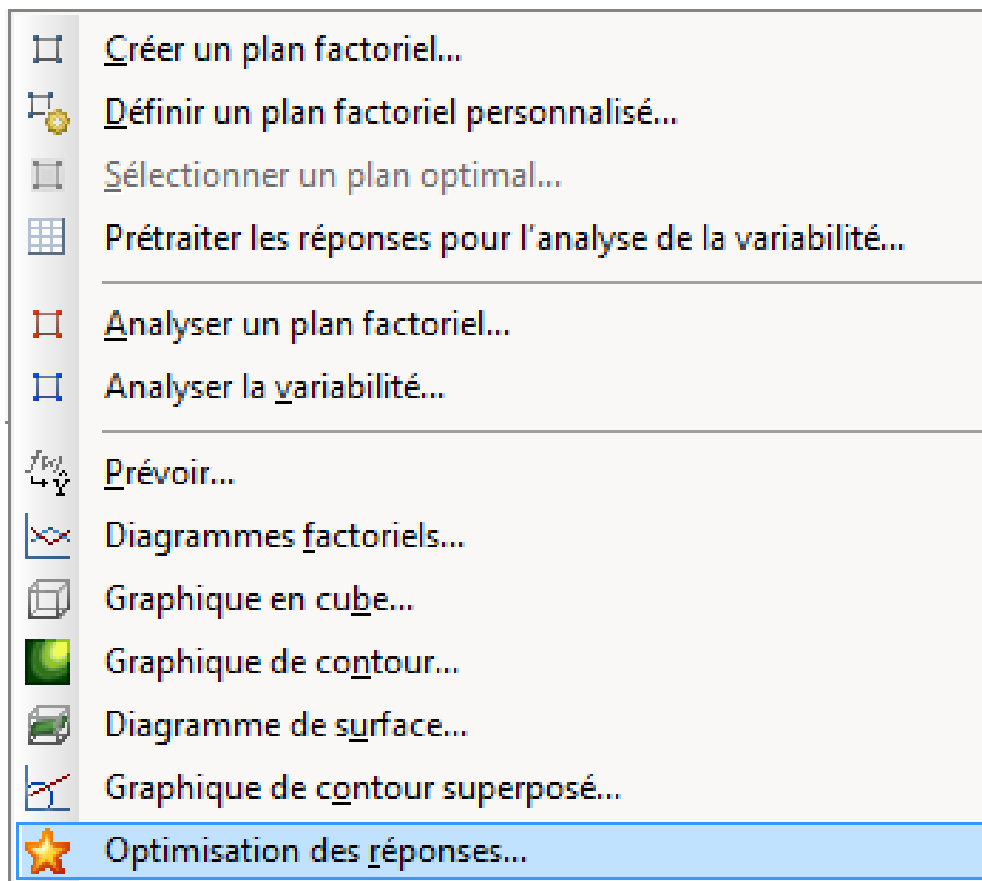
Figure 34: Iso-réponses de R_{c07} en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1,5$ et $r_{Sp} = 1,5$)

La comparaison des figures 34 et 39, nous permet de dire que l'augmentation de rapport $r_{Sp} = 1,5$ (augmentation du dosage de superplastifiant Sp_1 de $4,2 \text{ L/m}^3$ et diminution du dosage de $Sp_2 = 2,8 \text{ L/m}^3$) améliore la résistance R_{c07} des bétons. Nous pouvons vérifier cette explication à l'aide de la surface de réponses suivante.

▪ **Optimisation des réponses R_{c07}**

Nous pouvons utiliser l'optimisation des réponses afin d'identifier la combinaison de paramètres de facteurs qui nous donnera la résistance en compression R_{c07} le plus élevée.

Sélectionnons Stat > DOE (plan d'expériences) > Factoriel > Optimisation des réponses...



L'optimisation produit le graphique affiché ci-dessous (figure 36). En rouge, apparaissent les paramètres de facteur optimaux. En bleu, la réponse prévue concernant les résistances Rc07 conçues avec ces paramètres.

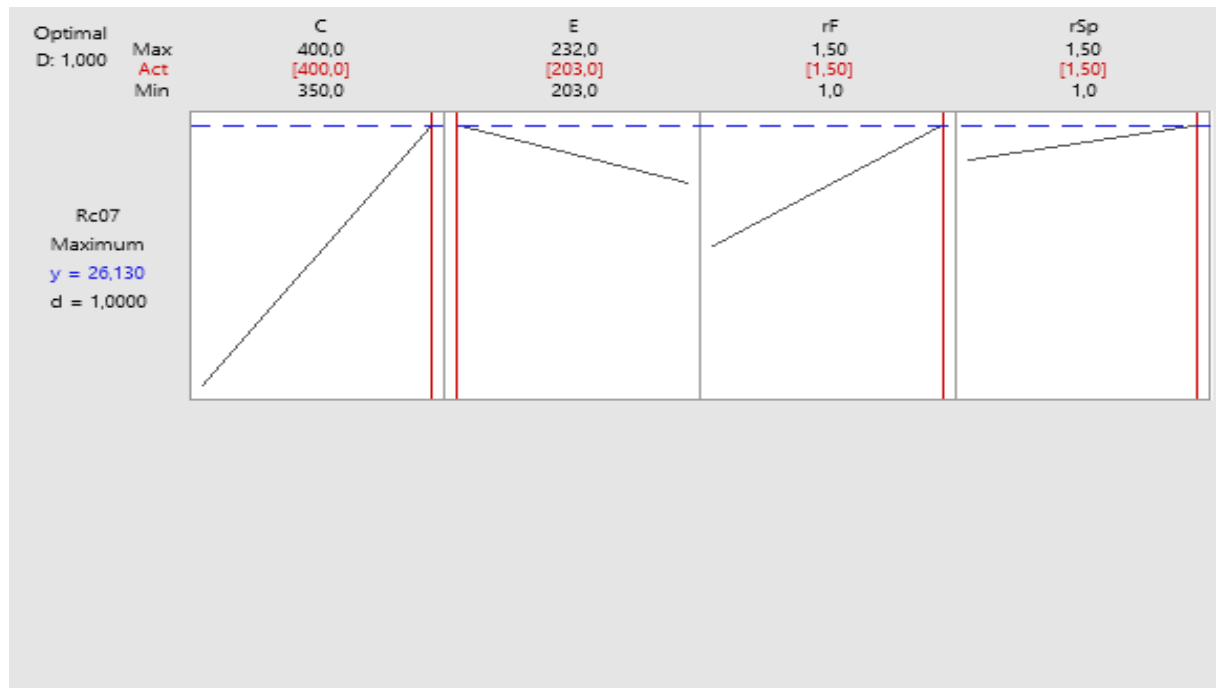


Figure 35: Optimisation des réponses Rc07

D'après cette figure, pour avoir une résistance en compression à 7 jours d'âges optimale, il suffit d'utiliser les dosages (coloré en rouge) de chaque constituant du béton dans un m³ suivant :

- Un dosage en ciment de 400 Kg,
- Un dosage en eau de 203 L,
- Un rapport rF = 1,5 (dosage de F_C = 115,8 Kg et F_D = 77,2 Kg),
- Un rapport rSp = 1,5 (dosage de Sp₁ = 4,2 L et Sp₂ = 2,8 L),

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir une résistance optimale de Rc07 = 26,13 MPa. Le béton fluide ayant ces dosages et ce résultat de Rc07 est le BFL₁₉.

1.4 Conclusion partielle

L'élimination descendante des termes dans la fonction pas à pas du logiciel Minitab, pour $\alpha = 0,1$ exclure, nous permet d'avoir deux nouveaux modèles de Rc07 des valeurs codées et non codées suivantes :

- Pour les valeurs codées -1 et +1

$$R_{c07} = 19,755 + 2,215 C - 0,843 E + 0,590 rF + 1,656 rSp - 1,190 C^*E + 0,278 C^*rF + 0,190 E^*rF + 1,386 E^*rSp + 0,566 rF^*rSp - 0,830 C^*E^*rF$$

- Pour les valeurs non codées

$$R_{c07} = 807 - 1,743 C - 3,66 E - 784 rF - 87,9 rSp + 0,00817 C^*E + 2,036 C^*rF + 3,487 E^*rF + 0,3824 E^*rSp + 9,06 rF^*rSp - 0,00916 C^*E^*rF$$

Les analyses de régression nous permettent de tirer une conclusion que le ciment C, le rapport des superplastifiants r_{Sp} et son interaction avec l'eau $E^* rSp$ (les trois premiers éléments les plus élevés dans le diagramme de PARETO) agissent sur la résistance en compression des bétons fluides à 7 jours d'âges.

Nous pouvons dire que le ciment, le Sika viscocrete Tempo 12 Sp_1 ont une influence sur la résistance en compression du béton à 7 jours. Nous déduisons que l'augmentation des résistances en compression des bétons fluides à 7 jours viennent d'utilisation de ciment et d'utilisation en excès de superplastifiant viscocrete tempo 12 (Sp_1) par rapport au rhéobuild 561 (Sp_2).

Il est à noter aussi que la diminution de dosage en eau jusqu'à 203 L par mètre cube de béton permet d'améliorer aussi la résistance R_{c07} des bétons.

Ainsi, il faut tenir compte du dosage en ciment, du dosage d'eau et du superplastifiant Sika viscocrete tempo 12 (Sp_1).

2. Résultats et modélisation de la résistance en compression des bétons fluides à 28 jours (R_{c28})

2.1. Résultats des essais expérimentaux de R_{c28} des bétons fluides

Les résultats des essais expérimentaux des résistances R_{c28} des bétons fluides sont donnés dans le tableau 92 suivant.

Tableau 92 : Résistances en compression à 28 jours des bétons fluides formulés à partir des plans d'expérience

BÉTONS FLUIDES	N° DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES [KN]	R_{c28} en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE de R_{c28}
BFL ₆	(1)	542,99	27,02	27,15
	(2)	553,44	27,54	
	(3)	540,38	26,89	

BÉTONS FLUIDES	N° DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES [KN]	Rc28 en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE de Rc28
BFL ₇	(1)	573,94	28,56	29,12
	(2)	597,45	29,73	
	(3)	584,19	29,07	
BFL ₈	(1)	539,18	26,83	26,11
	(2)	524,51	26,1	
	(3)	510,44	25,4	
BFL ₉	(1)	574,34	28,58	28,28
	(2)	583,79	29,05	
	(3)	546,81	27,21	
BFL ₁₀	(1)	597,45	29,73	29,72
	(2)	586,00	29,16	
	(3)	608,31	30,27	
BFL ₁₁	(1)	834,39	41,52	42,18
	(2)	835,39	41,57	
	(3)	873,17	43,45	
BFL ₁₂	(1)	537,17	26,73	27,24
	(2)	560,48	27,89	
	(3)	544,60	27,1	
BFL ₁₃	(1)	618,76	30,79	30,73
	(2)	625,19	31,11	
	(3)	608,71	30,29	
BFL ₁₄	(1)	539,38	26,84	26,08
	(2)	531,14	26,43	
	(3)	501,80	24,97	
BFL ₁₅	(1)	567,11	28,22	28,34
	(2)	595,04	29,61	
	(3)	546,41	27,19	
BFL ₁₆	(1)	541,79	26,96	27,14
	(2)	544,60	27,1	
	(3)	549,83	27,36	
BFL ₁₇	(1)	544,20	27,08	27,89
	(2)	582,38	28,98	
	(3)	554,85	27,61	
BFL ₁₈	(1)	640,26	31,86	30,73
	(2)	607,90	30,25	

BÉTONS FLUIDES	N° DE L'ÉPROUVETTE	CHARGES [KN]	Rc28 en [MPa]	MOYENNE ARITHMÉTIQUE de Rc28
	(3)	604,49	30,08	
BFL ₁₉	(1)	816,50	40,63	40,88
	(2)	828,76	41,24	
	(3)	819,31	40,77	
BFL ₂₀	(1)	705,57	35,11	36,11
	(2)	728,68	36,26	
	(3)	742,75	36,96	
BFL ₂₁	(1)	783,94	39,01	39,87
	(2)	781,13	38,87	
	(3)	838,61	41,73	

2.2. Modèles mathématiques des résistances en compression des bétons fluides à 28 jours.

Le modèle de Rc28 est exprimé par

$$\begin{aligned}
 Rc28 = & A_0 + A_1 * C + A_2 * E + A_3 * rF + A_4 * rSp + A_{12} * CE + A_{13} * C * rF + A_{14} * C * rSp + A_{23} * E * rF \\
 & + A_{24} * E * rSp + A_{34} * rF * rSp + A_{123} * C * E * rF + A_{124} * C * E * rSp + A_{234} * E * rF * rSp + A_{1234} * C * E * rF * rSp
 \end{aligned}
 \quad (86)$$

2.2.1. Coefficients codés

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} de modèle de Rc28 sont présentés dans le tableau d'ANOVA 93

Tableau 93: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc28 des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		31,10
C	4,626	2,313
E	-1,3538	-0,6769
rF	7,169	3,584
rSp	2,064	1,032
C*E	-2,084	-1,042
C*rF	2,839	1,419

Terme	Effet	Coeff
C*rSp	-0,3963	-0,1981
E*rF	-1,0363	-0,5181
E*rSp	2,599	1,299
rF*rSp	2,366	1,183
C*E*rF	-1,7563	-0,8781
C*E*rSp	0,10875	0,05437
C*rF*rSp	-0,11375	-0,05687
E*rF*rSp	1,9762	0,9881
C*E*rF*rSp	0,5362	0,2681

2.2.2. Équation de régression préliminaire en unités non codées de Rc28

Le modèle préliminaire des valeurs codées -1 et +1 de la résistance en compression à 28 jours d'âges Rc28 des bétons fluides est donnée par la relation :

$$\begin{aligned}
 \text{Rc28} = & 31,10 + 2,313 C - 0,6769 E + 3,584 rF + 1,032 rSp - 1,042 C*E + 1,419 C*rF \\
 & - 0,1981 C*rSp - 0,5181 E*rF + 1,299 E*rSp + 1,183 rF*rSp - 0,8781 C*E*rF \\
 & + 0,05437 C*E*rSp - 0,05687 C*rF*rSp + 0,9881 E*rF*rSp \\
 & + 0,2681 C*E*rF*rSp
 \end{aligned}
 \quad (87)$$

2.2.3. Réduction des modèles

▪ Élimination descendante des termes

Pour l'équation (87), la procédure pas à pas a supprimé les termes suivants afin d'obtenir des degrés de liberté suffisants pour commencer : C*rSp; C*E*rSp; C*rF*rSp; C*E*rF*rSp

▪ Coefficients codés

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du nouveau modèle de Rc07 sont donnés dans le tableau d'ANOVA 94 suivant :

Tableau 94: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de Rc28 retenu

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		31,098	0,171	181,57	0,000	

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
C	4,626	2,313	0,171	13,51	0,000	1,00
E	-1,354	-0,677	0,171	-3,95	0,017	1,00
rF	7,169	3,584	0,171	20,93	0,000	1,00
rSp	2,064	1,032	0,171	6,02	0,004	1,00
C*E	-2,084	-1,042	0,171	-6,08	0,004	1,00
C*rF	2,839	1,419	0,171	8,29	0,001	1,00
E*rF	-1,036	-0,518	0,171	-3,03	0,039	1,00
E*rSp	2,599	1,299	0,171	7,59	0,002	1,00
rF*rSp	2,366	1,183	0,171	6,91	0,002	1,00
C*E*rF	-1,756	-0,878	0,171	-5,13	0,007	1,00
E*rF*rSp	1,976	0,988	0,171	5,77	0,004	1,00

▪ **Récapitulatif du modèle**

Tableau 95: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de Rc28

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,685087	99,58%	98,43%	93,31%

La valeur de R carré est élevée. Ainsi, le nouveau modèle permet de retrouver la valeur des Rc28 mesurés.

▪ **Analyse de la variance**

Le tableau 96 suivant montre l'analyse de variance du nouveau modèle retenu de Rc28.

Tableau 96: Analyse de variance du nouveau modèle de Rc28

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	11	446,807	40,619	86,54	0,000
Linéaires	4	315,539	78,885	168,07	0,000
C	1	85,609	85,609	182,40	0,000
E	1	7,331	7,331	15,62	0,017
rF	1	205,564	205,564	437,98	0,000
rSp	1	17,036	17,036	36,30	0,004
Interactions à 2 facteur(s)	5	103,308	20,662	44,02	0,001
C*E	1	17,368	17,368	37,00	0,004
C*rF	1	32,234	32,234	68,68	0,001
E*rF	1	4,295	4,295	9,15	0,039

E*rSp	1	27,014	27,014	57,56	0,002
rF*rSp	1	22,397	22,397	47,72	0,002
Interactions à 3 facteur(s)	2	27,960	13,980	29,79	0,004
C*E*rF	1	12,338	12,338	26,29	0,007
E*rF*rSp	1	15,622	15,622	33,29	0,004
Erreur	4	1,877	0,469		
Total	15	448,685			

▪ **Modèle mathématique de Rc28 retenu en unités codées -1 et +1**

$$\begin{aligned} \text{Rc28} = & 31,098 + 2,313 \text{ C} - 0,677 \text{ E} + 3,584 \text{ rF} + 1,032 \text{ rSp} - 1,042 \text{ C*E} + 1,419 \text{ C*rF} \\ & - 0,518 \text{ E*rF} + 1,299 \text{ E*rSp} + 1,183 \text{ rF*rSp} - 0,878 \text{ C*E*rF} + 0,988 \text{ E*rF*rSp} \end{aligned}$$

(88)

▪ **Modèle mathématique de Rc28 retenu en unités non codées**

$$\begin{aligned} \text{Rc28} = & 561 - 2,201 \text{ C} - 2,077 \text{ E} - 557 \text{ rF} + 198,9 \text{ rSp} + 0,00924 \text{ C*E} + 2,335 \text{ C*rF} \\ & + 2,128 \text{ E*rF} - 1,004 \text{ E*rSp} - 218,2 \text{ rF*rSp} - 0,00969 \text{ C*E*rF} + 1,090 \text{ E*rF*rSp} \end{aligned}$$

(89)

▪ **Droite de Henry des effets normalisés**

La figure suivante montre la droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de Rc28 retenu

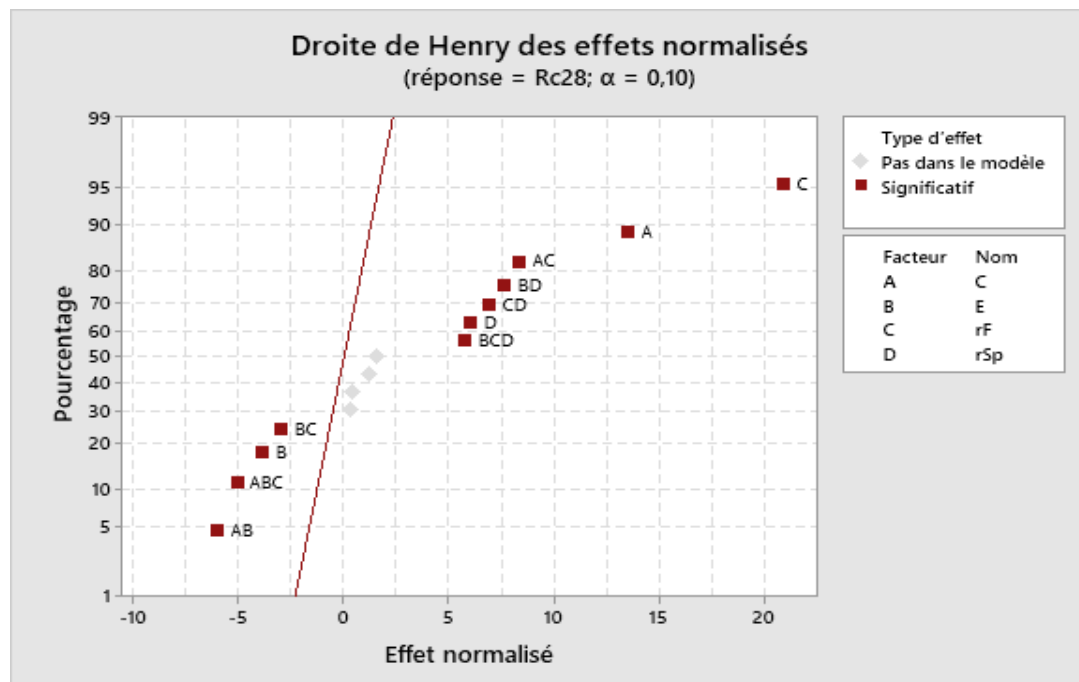


Figure 36: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de Rc28 pour un risque $\alpha = 0,1$

▪ **Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau du modèle de Rc28 pour un risque $\alpha = 0,1$**

Le diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc28 pour un risque $\alpha = 0,1$ est présenté comme suit

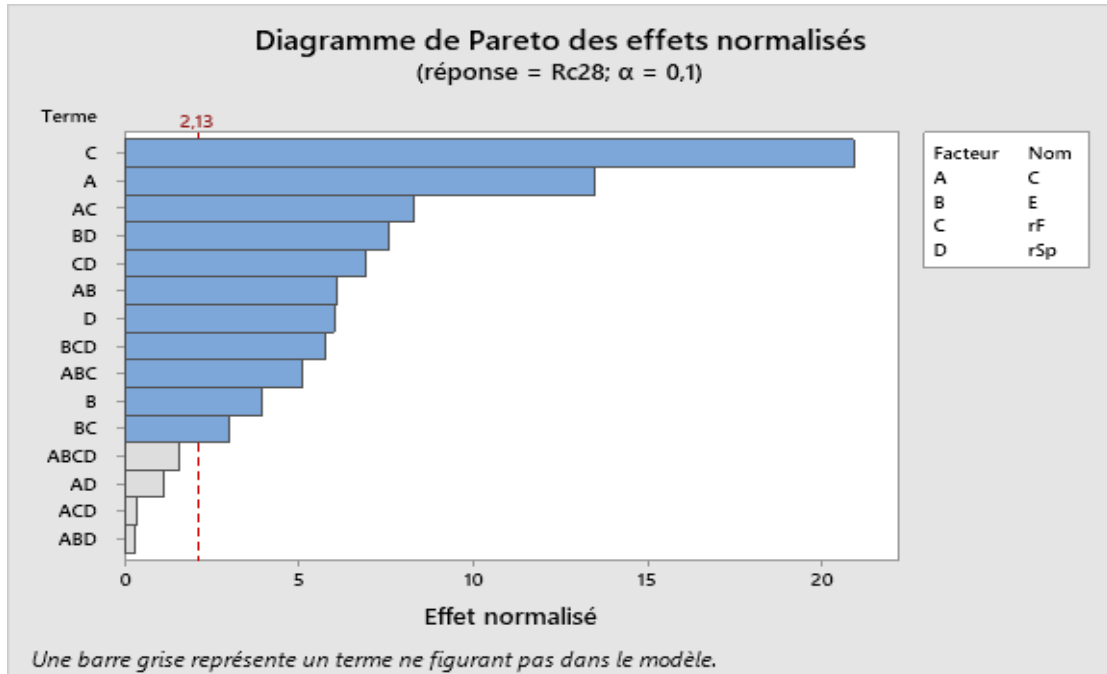
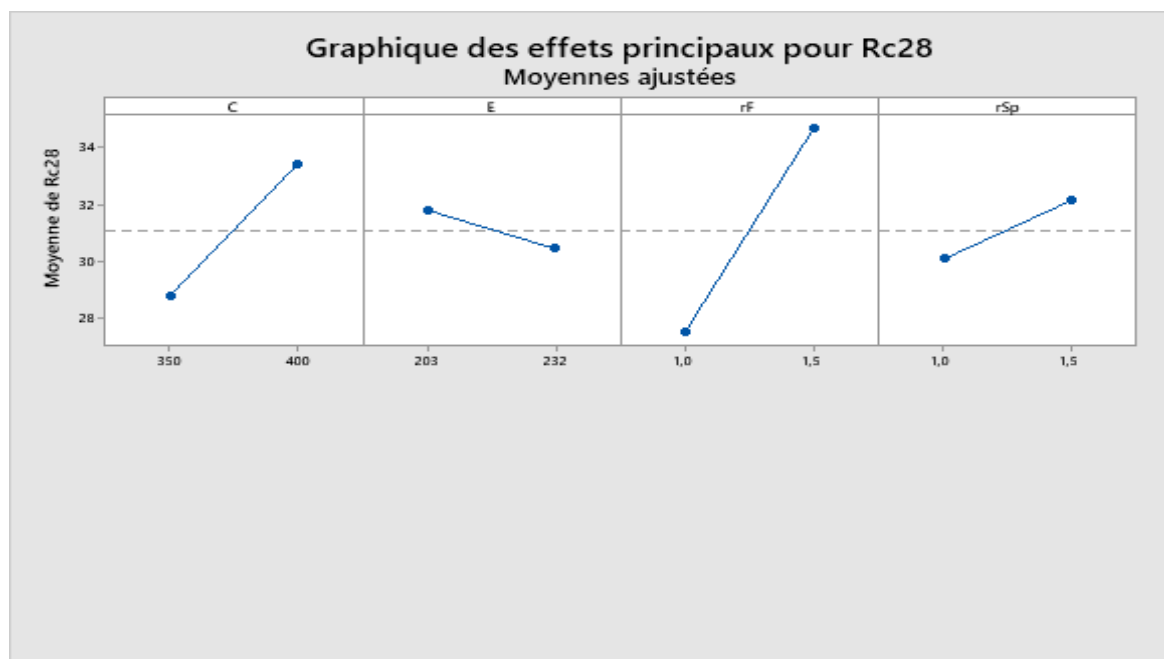


Figure 37 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de Rc28

▪ **Diagramme factoriels**

Les diagrammes factoriels des effets des facteurs et des interactions sont présentés



par les figures 38 et 39 suivantes.

Figure 38: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de Rc28

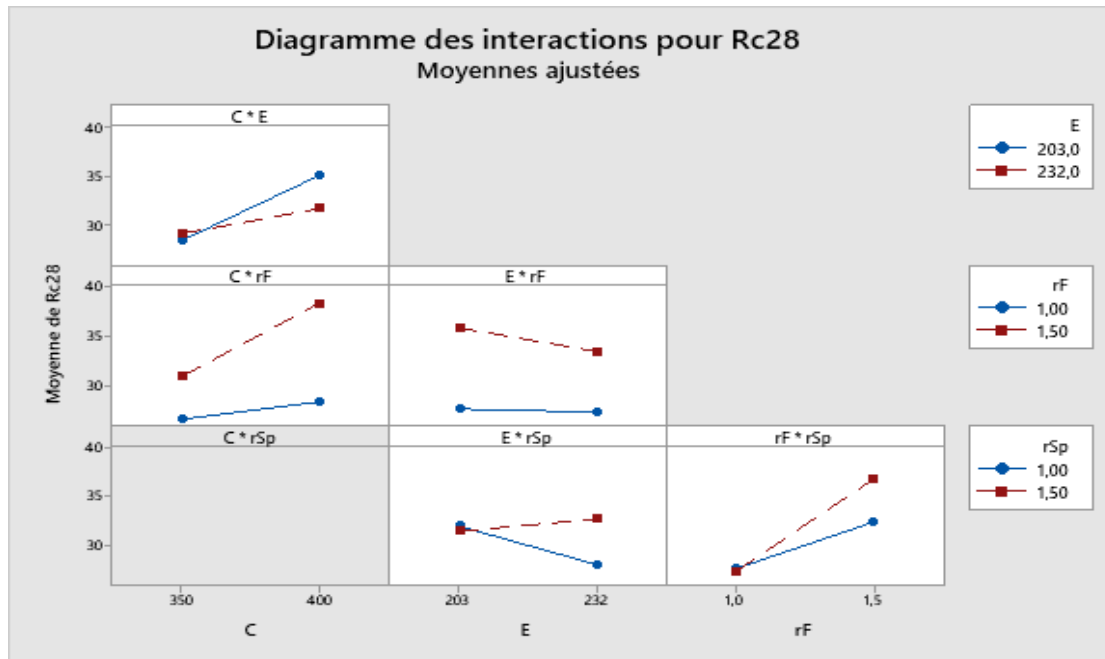


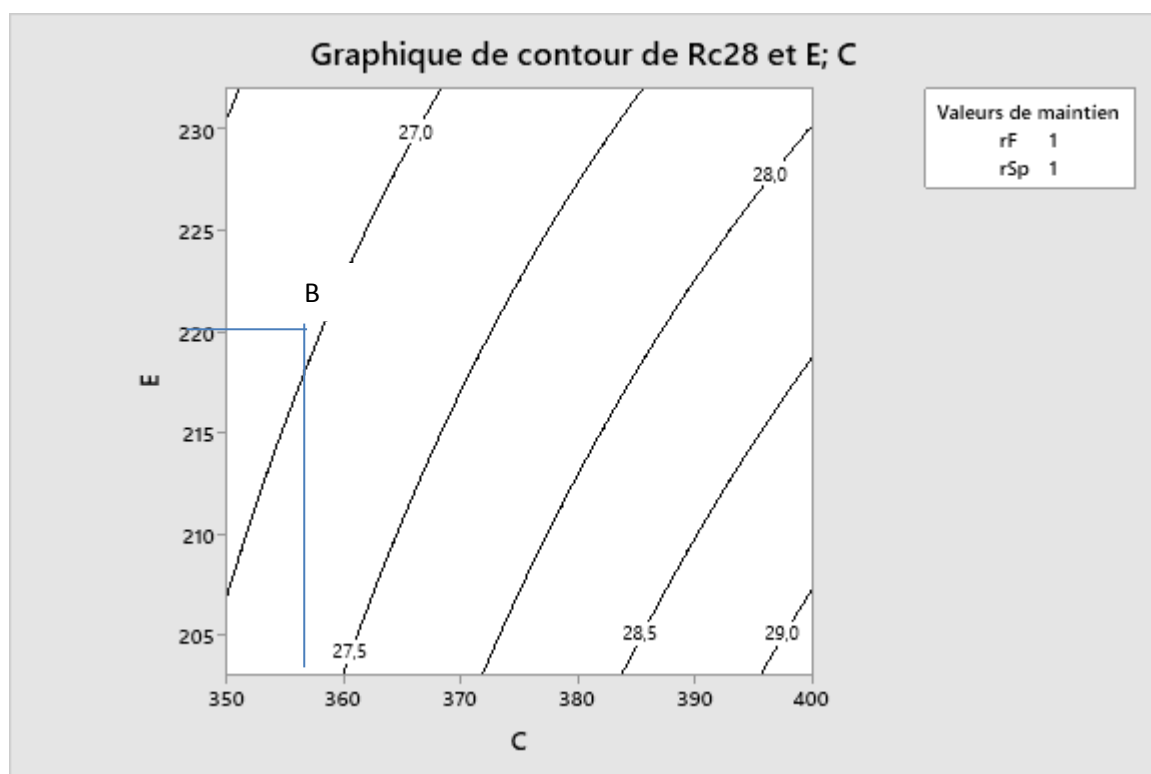
Figure 39: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de Rc28

Le graphe de la figure 38 montre que l'augmentation du dosage de ciment, de rapport rF et rSp améliore la résistance en compression du béton à 28 jours : nous avons des droites ascendantes dans ces paramètres. Néanmoins, nous avons une chute de la résistance en compression Rc28 si le dosage d'eau est augmenté.

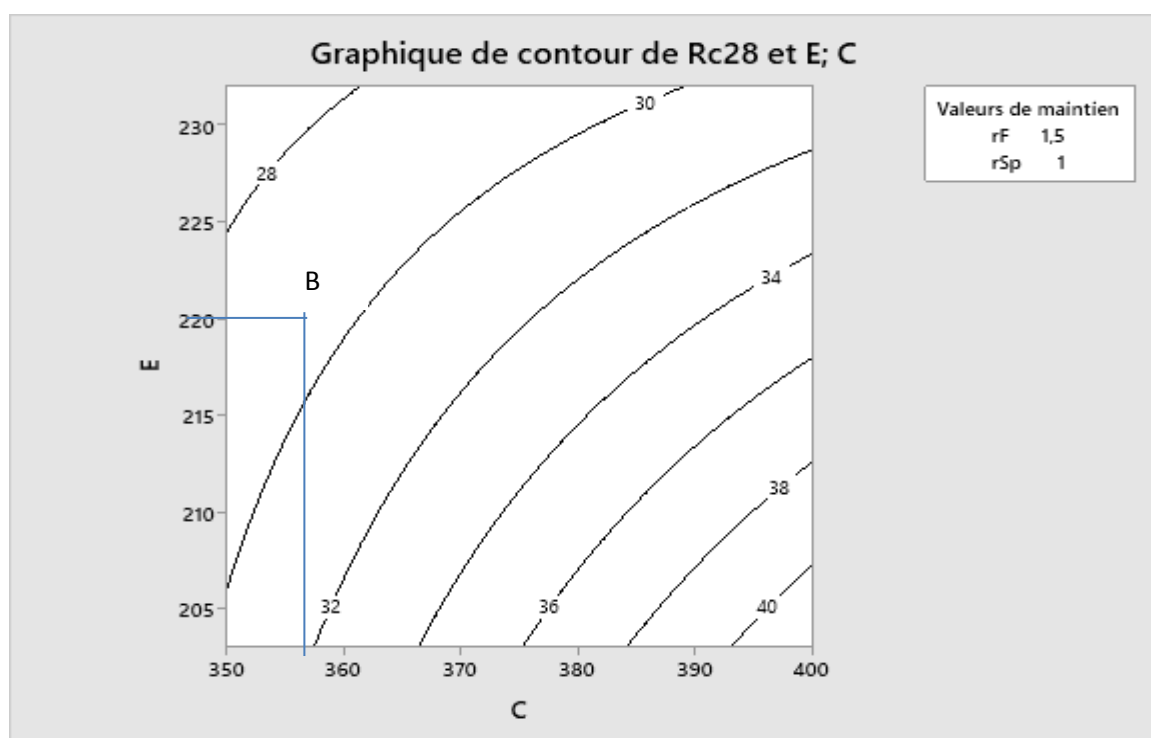
Pour le graphe de la figure 39 des effets de facteurs, les interactions C*E, C*rF, et rF*rSp ont une influence sur l'augmentation de la résistance de Rc28 des bétons. Tandis que les interactions E*rF et E*rSp, leurs présences diminuent la résistance en compression des bétons Rc28.

- **Graphique de contours et surface des réponses**
 - **Influence des fillers (augmentation de rapport rF)**

Les graphes de contours de Rc28 permettent d'analyser le modèle de Rc28 retenu



**Figure 40: Iso-réponses de Rc28 en fonction du dosage en eau et en ciment
($rF = 1$ et $rSp = 1$)**



**Figure 41: Iso-réponses de Rc28 en fonction du dosage en eau et en ciment
($rF = 1,5$ et $rSp = 1$)**

Ces figures (figure 40 et 41)) montrent que l'augmentation du rapport rF améliore la résistance R_{c28} des bétons. C'est-à-dire la présence de filler cipolin F_C .

- ***Influence des superplastifiants (augmentation de rapport rSp)***

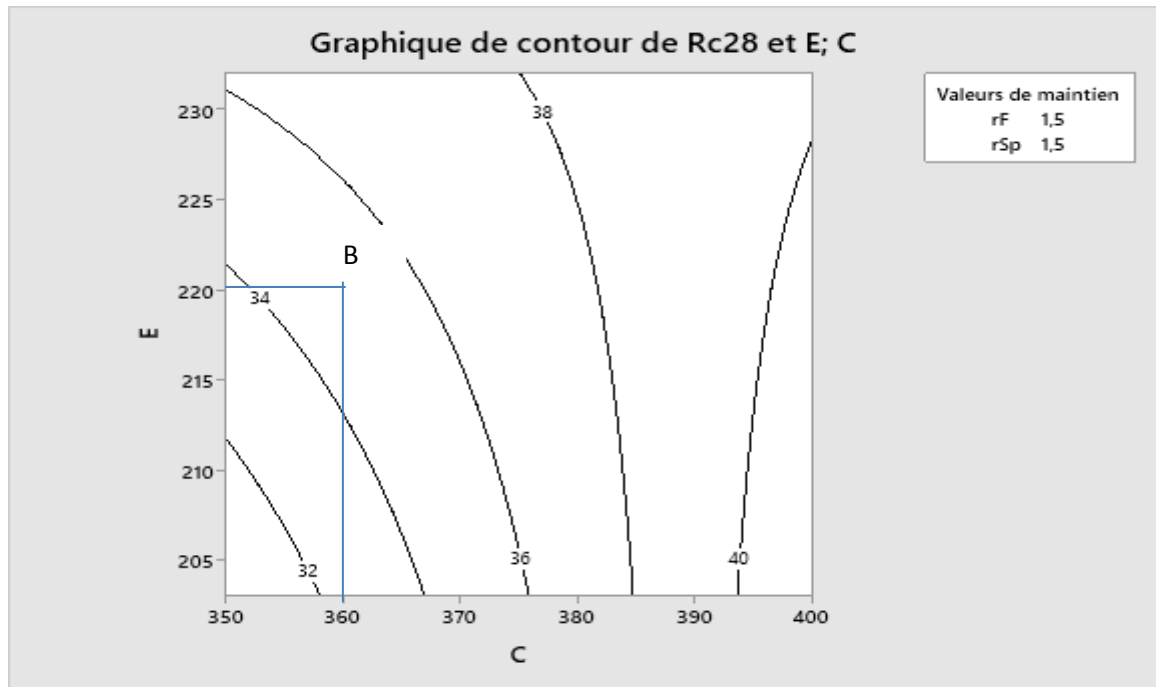


Figure 42: Iso-réponses de R_{c28} en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1,5$)

L'analyse des figures 41 et 42, nous permet de dire que l'augmentation de rapport $rSp = 1,5$ (utilisation en excès du dosage de superplastifiant Sp_1 par rapport à Sp_2) améliore aussi la résistance R_{c28} des bétons.

▪ ***Optimisation de réponse R_{c28}***

L'optimisation de la réponse R_{c28} produit le graphique affiché ci-dessous

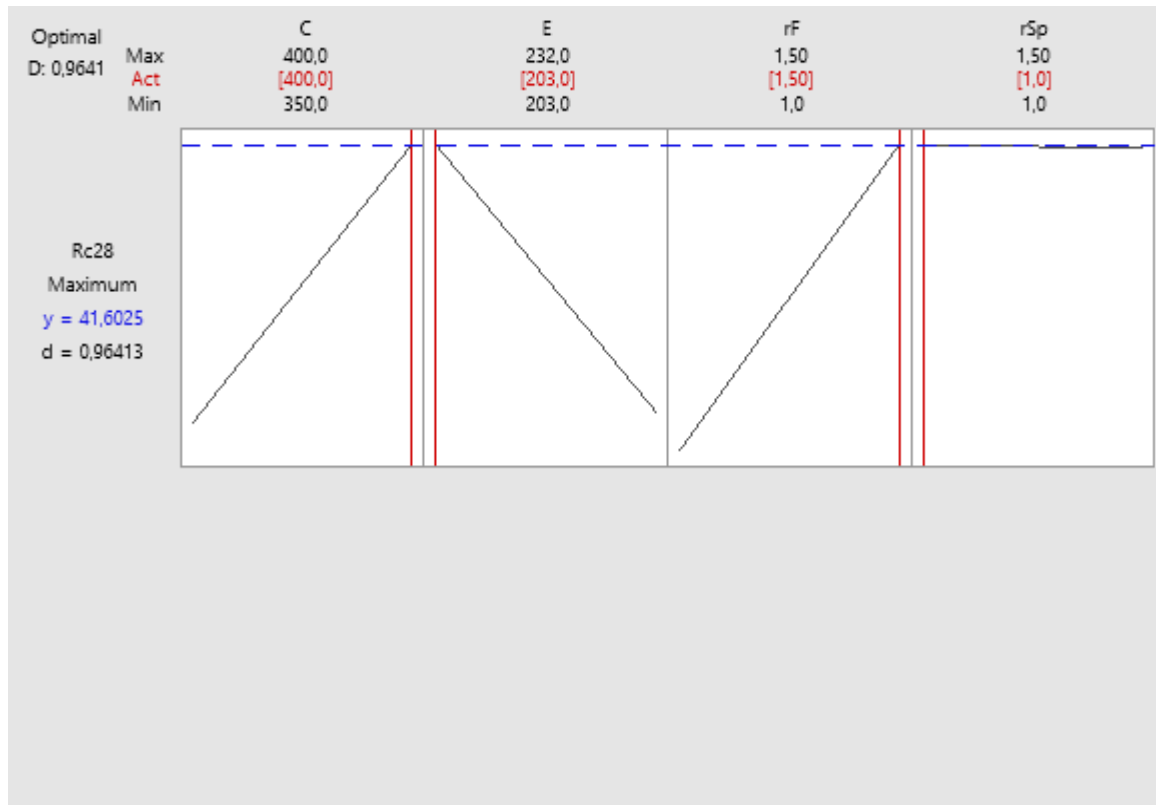


Figure 43: Optimisation des réponses Rc28

Pour avoir une résistance en compression à 28 jours d'âges optimale, il suffit d'utiliser les dosages (coloré en rouge) de chaque constituant du béton dans un m³ suivant :

- Un dosage en ciment de 400 Kg,
- Un dosage en eau de 203 L,
- Un rapport $rF = 1,5$ (dosage de $F_C = 115,8$ Kg et $F_D = 77,2$ Kg),
- Un rapport $rSp = 1$ (dosage de $Sp_1 = 4$ L et $Sp_2 = 4$ L),

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir une résistance optimale de $Rc28 = 41,60$ MPa.

2.3. Conclusion partielle

Pour un risque $\alpha = 0,1$; nous avons deux nouveaux modèles de Rc28 des valeurs codées et non codées suivants :

- Pour les valeurs codées -1 et +1

$$Rc28 = 31,098 + 2,313 C - 0,677 E + 3,584 rF + 1,032 rSp - 1,042 C \cdot E + 1,419 C \cdot rF - 0,518 E \cdot rF + 1,299 E \cdot rSp + 1,183 rF \cdot rSp - 0,878 C \cdot E \cdot rF + 0,988 E \cdot rF \cdot rSp$$

- Pour les valeurs non codées

$$\begin{aligned} R_{c28} = & 561 - 2,201 C - 2,077 E - 557 rF + 198,9 rSp + 0,00924 C \cdot E + 2,335 C \cdot rF \\ & + 2,128 E \cdot rF - 1,004 E \cdot rSp - 218,2 rF \cdot rSp - 0,00969 C \cdot E \cdot rF \\ & + 1,090 E \cdot rF \cdot rSp \end{aligned}$$

Nous en interprétons d'après le diagramme de PARETO que le rapport rF , le ciment C et son interaction $rF \cdot C$ jouent un rôle très important dans la résistance en compression du béton à 28 jours : le ciment C , le rapport rF et l'interaction $rF \cdot C$ présentent un histogramme élevé (figure 37) : l'augmentation de la résistance en compression à 28 jours des bétons fluides viennent de l'utilisation de ciment et d'utilisation en excès de filler cipolin par rapport au filler dolomie.

Ainsi, on devra tenir compte en priorité sur le filler cipolin, sur le ciment C et sur l'interaction $C \cdot rF$.

3. Résultats et modélisation des affaissements (Slump Test) des bétons fluides

3.1. Résultats des essais expérimentaux des affaissements des bétons fluides

Lors des essais aux laboratoires, nous avons les résultats qui sont présentés dans le tableau 100.

Tableau 97 : Test à l'affaissement ou Slump-Test des bétons fluides formulés à partir des plans d'expérience

BFL _i	ST [cm]
BFL ₆	22
BFL ₇	16
BFL ₈	22,5
BFL ₉	21,5
BFL ₁₀	22
BFL ₁₁	15,5
BFL ₁₂	21
BFL ₁₃	19
BFL ₁₄	19,5
BFL ₁₅	17
BFL ₁₆	18
BFL ₁₇	18

BFL _i	ST [cm]
BFL ₁₈	18
BFL ₁₉	15
BFL ₂₀	17,5
BFL ₂₁	17

3.2. Modèle mathématique des affaissements des bétons fluides

Le modèle linéaire des affaissements ST des bétons fluides s'écrit de la façon suivante :

$$ST[cm] = A_0 + A_1 * C + A_2 * E + A_3 * rF + A_4 * rSp + A_{12} * CE + A_{13} * C * rF + A_{14} * C * rSp + A_{23} * E * rF + A_{24} * E * rSp + A_{34} * rF * rSp + A_{123} * C * E * rF + A_{124} * C * E * rSp + A_{234} * E * rF * rSp + A_{1234} * C * E * rF * rSp$$

(90)

3.2.1. Coefficients codés

Le tableau suivant représente les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides.

Tableau 98: Tableau donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		18,72
C	-2,687	-1,344
E	1,1875	0,5938
rF	-1,1875	-0,5938
rSp	-2,438	-1,219
C*E	1,8125	0,9063
C*rF	-0,3125	-0,1563
C*rSp	1,1875	0,5937
E*rF	-0,18750	-0,09375
E*rSp	-0,9375	-0,4687
rF*rSp	-0,06250	-0,03125
C*E*rF	-0,06250	-0,03125
C*E*rSp	-0,5625	-0,2813
C*rF*rSp	0,06250	0,03125
E*rF*rSp	0,6875	0,3438
C*E*rF*rSp	0,06250	0,03125

3.2.2. Équation de régression préliminaire en unités non codées de ST

L'équation suivante montre le modèle préliminaire des valeurs codées -1 et +1 de test à l'affaissement ST des bétons fluides :

$$\begin{aligned} ST = & 18,72 - 1,344 C + 0,5938 E - 0,5938 rF - 1,219 rSp + 0,9063 C \cdot E - 0,1563 C \cdot rF \\ & + 0,5937 C \cdot rSp - 0,09375 E \cdot rF - 0,4687 E \cdot rSp - 0,03125 rF \cdot rSp - 0,03125 C \cdot E \cdot rF \\ & - 0,2813 C \cdot E \cdot rSp + 0,03125 C \cdot rF \cdot rSp + 0,3438 E \cdot rF \cdot rSp + 0,03125 C \cdot E \cdot rF \cdot rSp \end{aligned}$$

(91)

3.2.3. Réduction des modèles

▪ *Élimination descendante des termes*

Pour un risque $\alpha = 0,1$, les interactions $C \cdot rF$; $C \cdot E \cdot rF$; $C \cdot rF \cdot rSp$; $C \cdot E \cdot rF \cdot rSp$ sont éliminés pour obtenir des degrés de liberté suffisants.

▪ *Coefficients codés*

Nous présentons sur ce tableau les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du nouveau modèle de ST.

Tableau 99 : Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST retenu

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		18,7188	0,0827	226,40	0,000	
C	-2,6875	-1,3437	0,0827	-16,25	0,000	1,00
E	1,1875	0,5938	0,0827	7,18	0,002	1,00
rF	-1,1875	-0,5938	0,0827	-7,18	0,002	1,00
rSp	-2,4375	-1,2188	0,0827	-14,74	0,000	1,00
C*E	1,8125	0,9063	0,0827	10,96	0,000	1,00
C*rSp	1,1875	0,5937	0,0827	7,18	0,002	1,00
E*rF	-0,1875	-0,0937	0,0827	-1,13	0,320	1,00
E*rSp	-0,9375	-0,4687	0,0827	-5,67	0,005	1,00
rF*rSp	-0,0625	-0,0312	0,0827	-0,38	0,725	1,00
C*E*rSp	-0,5625	-0,2813	0,0827	-3,40	0,027	1,00
E*rF*rSp	0,6875	0,3438	0,0827	4,16	0,014	1,00

▪ **Récapitulatif du modèle**

Tableau 100: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de ST

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,330719	99,51%	98,18%	92,22%

La valeur de R carré est élevée. Ainsi, le nouveau modèle permet de retrouver la valeur des ST mesurés.

▪ **Analyse de la variance**

Le tableau 101 suivant montre l'analyse de variance du nouveau modèle retenu de ST.

Tableau 101: Analyse de variance du nouveau modèle de ST

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	11	89,5469	8,1406	74,43	0,000
Linéaires	4	63,9375	15,9844	146,14	0,000
C	1	28,8906	28,8906	264,14	0,000
E	1	5,6406	5,6406	51,57	0,002
rF	1	5,6406	5,6406	51,57	0,002
rSp	1	23,7656	23,7656	217,29	0,000
Interactions à 2 facteur(s)	5	22,4531	4,4906	41,06	0,002
C*E	1	13,1406	13,1406	120,14	0,000
C*rSp	1	5,6406	5,6406	51,57	0,002
E*rF	1	0,1406	0,1406	1,29	0,320
E*rSp	1	3,5156	3,5156	32,14	0,005
rF*rSp	1	0,0156	0,0156	0,14	0,725
Interactions à 3 facteur(s)	2	3,1563	1,5781	14,43	0,015
C*E*rSp	1	1,2656	1,2656	11,57	0,027
E*rF*rSp	1	1,8906	1,8906	17,29	0,014
Erreur	4	0,4375	0,1094		
Total	15	89,9844			

• **Modèle mathématique de ST retenu en unités codées -1 et +1**

$$ST = 18,7188 - 1,3437 C + 0,5938 E - 0,5938 rF - 1,2188 rSp + 0,9063 C*E + 0,5937 C*rSp$$

$$- 0,0937 E*rF - 0,4687 E*rSp - 0,0312 rF*rSp - 0,2813 C*E*rSp + 0,3438 E*rF*rSp$$

(92)

▪ **Modèle mathématique de ST retenu en unités non codées**

$$ST = 432 - 1,560 C - 1,565 E + 107,0 rF - 161,7 rSp + 0,00638 C*E + 0,770 C*rSp - 0,500 E*rF + 0,560 E*rSp - 83,0 rF*rSp - 0,003103 C*E*rSp + 0,3793 E*rF*rSp$$

(93)

▪ **Droite de Henry des effets normalisés**

La figure suivante montre la droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de ST retenu

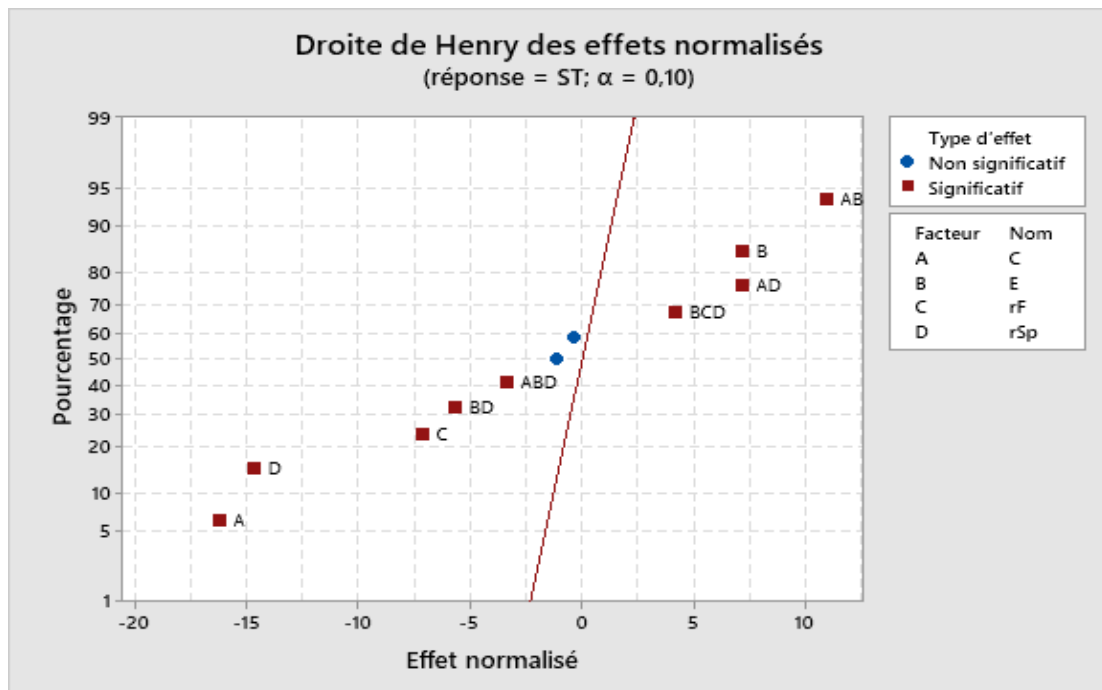


Figure 44: : Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de ST pour un risque $\alpha = 0,1$

▪ **Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau du modèle de ST pour un risque $\alpha = 0,1$**

Le diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de ST pour un risque $\alpha = 0,1$ est présenté comme suit

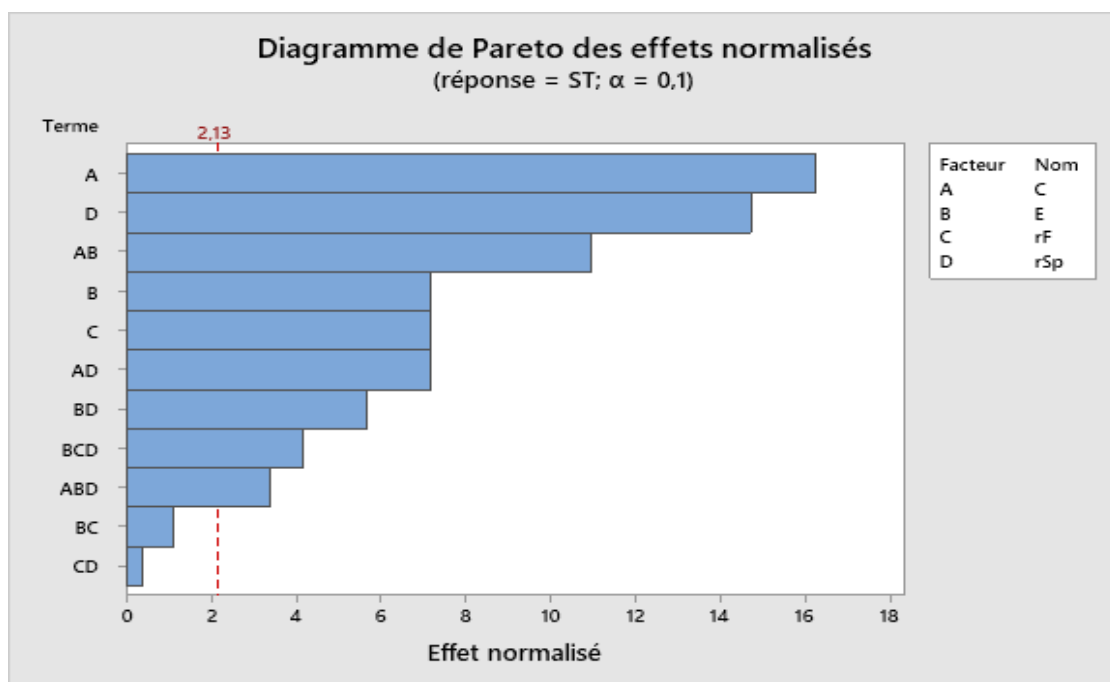


Figure 45 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de ST

▪ **Diagramme factoriels**

Les figures 46 et 47 suivantes montrent les diagrammes factoriels des effets des facteurs et des interactions

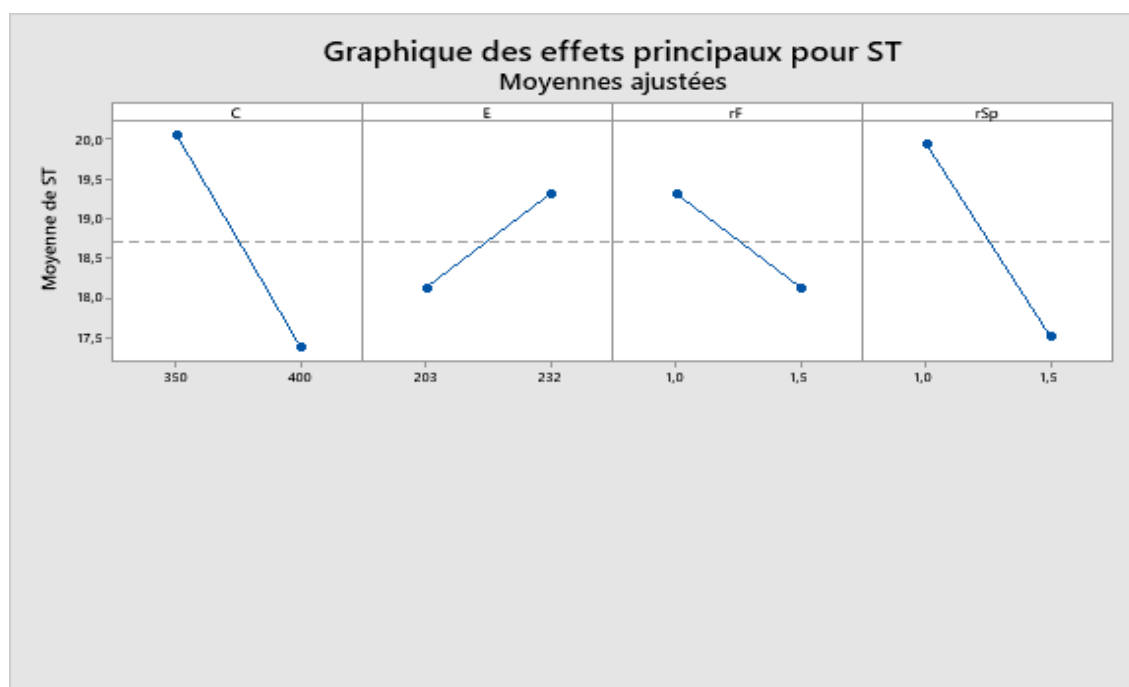


Figure 46 : Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de ST

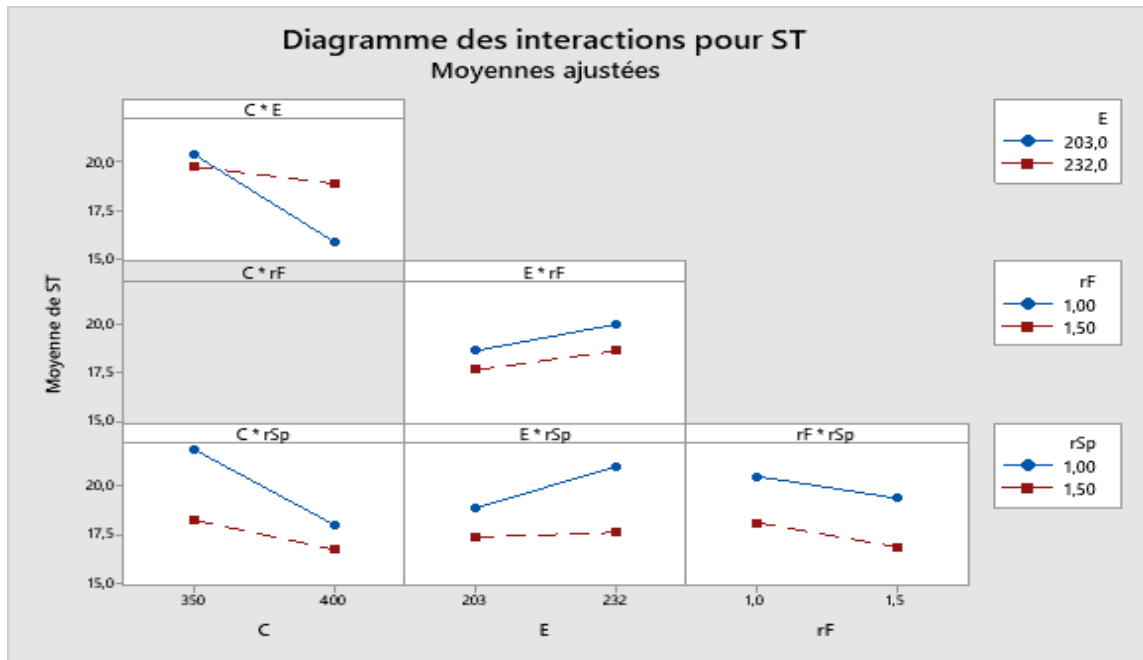


Figure 47: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de ST

Le graphe de la figure 46 montre que l'augmentation du dosage de ciment, de rapport rF et de rapport rSp diminue l'affaissement du béton fluide. : la droite descendante de rapport rF signifie que l'ajout en excès de filler cipolin dans le béton diminue l'affaissement du béton. C'est tout à fait normal, puisque le filler cipolin est riche en calcaire qui peut absorber de l'eau. De même, pour le rapport rSp, la présence de rhéobuild 561 par rapport au sika viscocrete tempo 12 améliore l'affaissement du béton fluide. Ainsi, pour assurer une bonne maniabilité des bétons fluides, il est conseillé d'utiliser un dosage sur plus de rhéobuild 561.

La figure 47 montre que les interactions E*rF, et E*rSp ont une influence sur l'augmentation de l'affaissement ST des bétons. Tandis que les interactions C*E et C*rSp et rF*rSp leurs présences diminuent l'affaissement ST des bétons fluides.

- **Graphique de contours et surface des réponses**
 - **Influence des fillers (augmentation de rapport rF)**

Les graphes de contours de ST permettent d'analyser le modèle de ST retenu

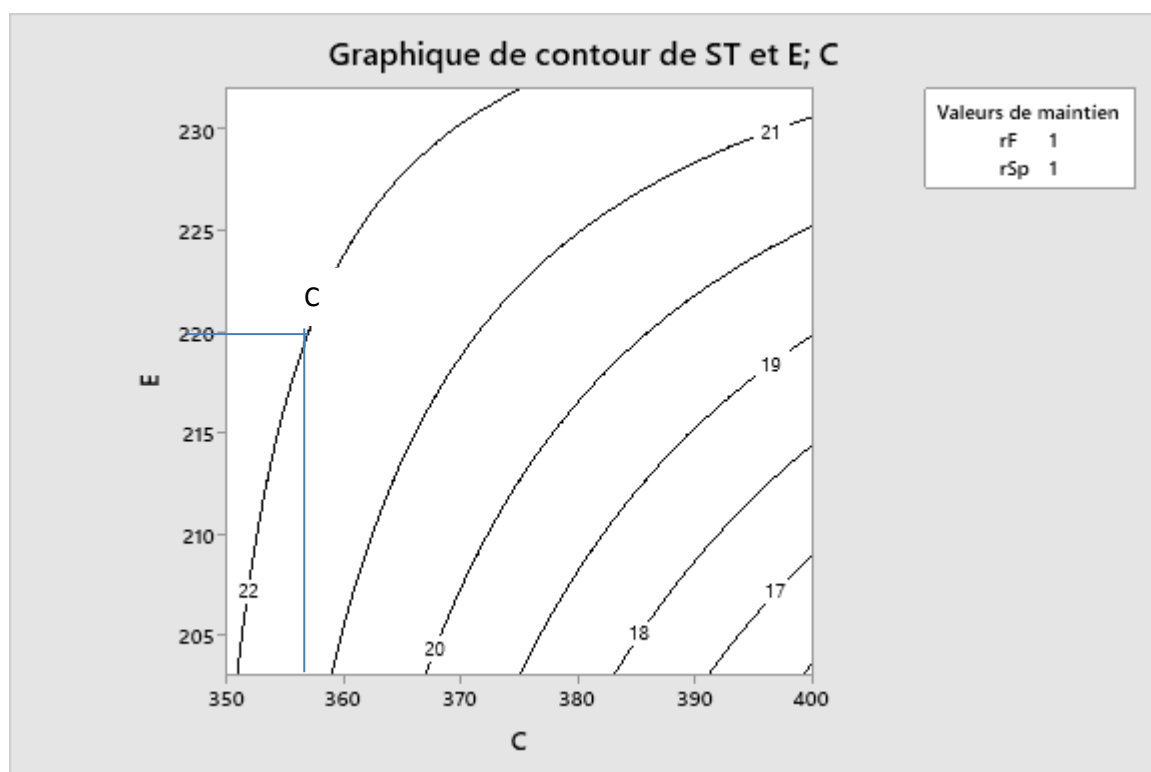


Figure 48: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1$ et $rSp = 1$)

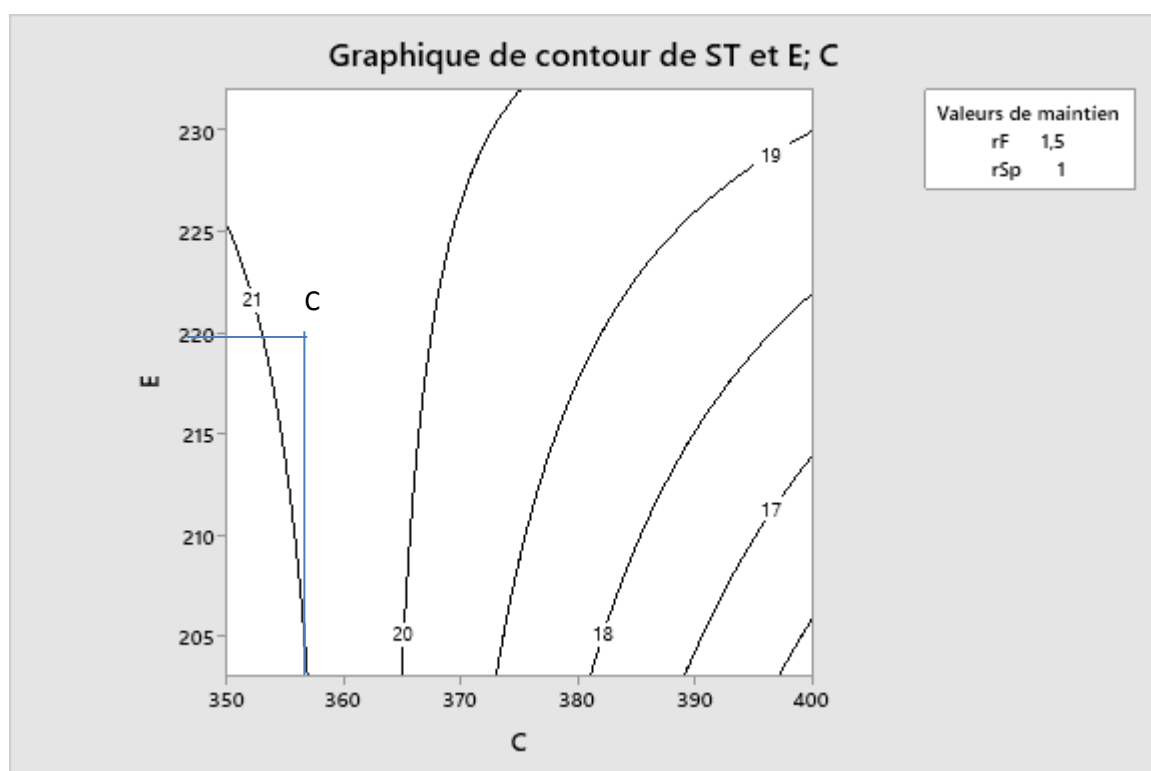


Figure 49: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1$)

Les figures 48 et 49 montrent que l'augmentation du rapport rF diminue l'affaissement des bétons. C'est-à-dire l'ajout en excès de filler cipolin F_{CP} par rapport au filler dolomie.

- ***Influence des superplastifiants (augmentation de rapport rSp)***

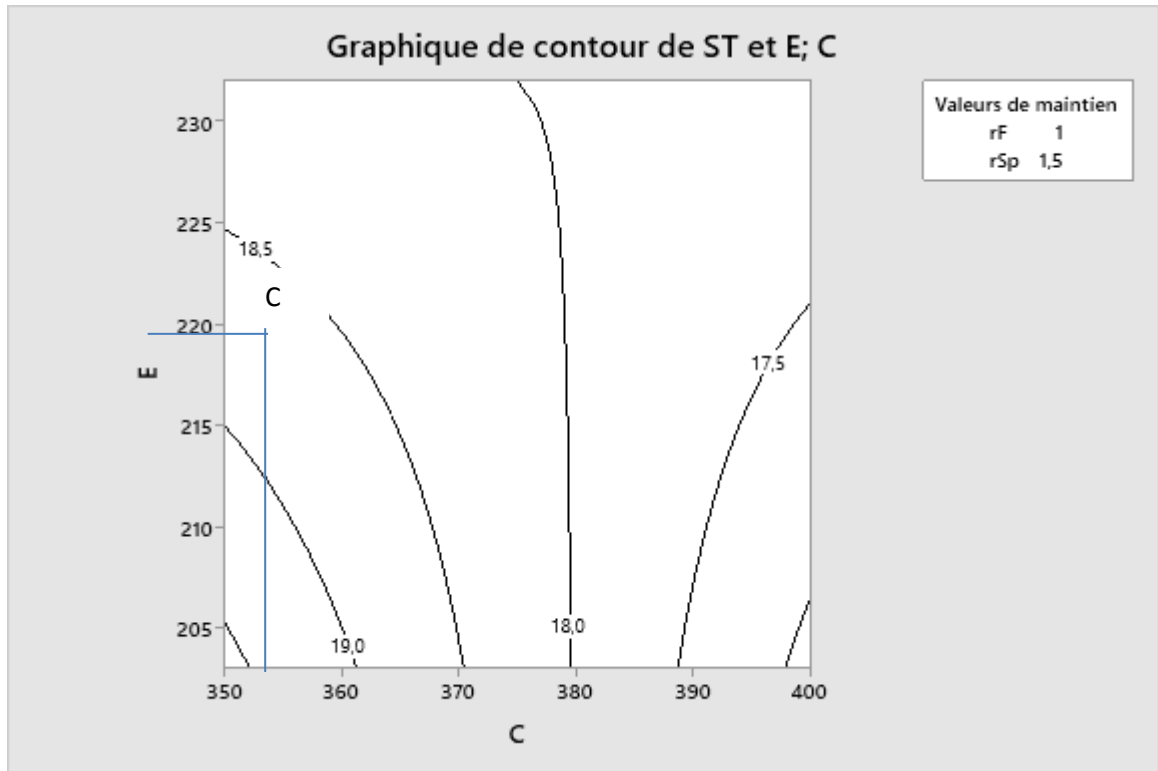


Figure 50: Iso-réponses de ST en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1,5$)

L'analyse des figures 49 et 50, nous permet de dire que l'augmentation de rapport $rSp = 1,5$ (utilisation en excès du dosage de superplastifiant Sp_1 par rapport à Sp_2) diminue l'affaissement des bétons.

▪ ***Optimisation de réponse ST***

L'optimisation de la réponse ST produit le graphique affiché ci-dessous



Figure 51: Optimisation des réponses ST

Pour avoir l'affaissement optimal, il suffit d'utiliser les dosages (coloré en rouge) de chaque constituant du béton dans un m³ suivant :

- Un dosage en ciment de 350 Kg,
- Un dosage en eau de 262 L,
- Un rapport $rF = 1$ (dosage de $F_C = 96,5\text{Kg}$ et $F_D = 96,5\text{Kg}$),
- Un rapport $rSp = 1$ (dosage de $Sp_1 = 4\text{ L}$ et $Sp_2 = 4\text{ L}$),

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir un affaissement optimal de $ST = 22,75\text{ cm}$.

3.3. Conclusion partielle

Pour un risque $\alpha = 0,1$; nous avons deux nouveaux modèles de ST des valeurs codées et non codées suivants :

- Pour les valeurs codées -1 et +1

$$\begin{aligned}
 ST = & 18,7188 - 1,3437 C + 0,5938 E - 0,5938 rF - 1,2188 rSp + 0,9063 C \cdot E \\
 & + 0,5937 C \cdot rSp \\
 & - 0,0937 E \cdot rF - 0,4687 E \cdot rSp - 0,0312 rF \cdot rSp - 0,2813 C \cdot E \cdot rSp + 0,3438 E \cdot rF \cdot rSp
 \end{aligned}$$

- Pour les valeurs non codées

$$ST = 432 - 1,560 C - 1,565 E + 107,0 rF - 161,7 rSp + 0,00638 C \cdot E + 0,770 C \cdot rSp - 0,500 E \cdot rF + 0,560 E \cdot rSp - 83,0 rF \cdot rSp - 0,003103 C \cdot E \cdot rSp + 0,3793 E \cdot rF \cdot rSp$$

D'après le diagramme de PARETO, le Ciment C et le rapport r_{Sp} sont les éléments les plus importants dans le modèle d'affaissement des bétons fluides. La dérive couplée de ciment et de l'eau CE agissent aussi sur leurs affaissements.

Dans le modèle de ST, nous avons la valeur d'effet de ciment négative ($A_1 = -1,343$). Ce signe négatif montre que la diminution du dosage en ciment augmente l'affaissement du béton. De même pour le superplastifiant ($Sp = Sp_1 + Sp_2$), son effet est aussi négatif ($A_4 = -1,212$). Cela montre que la diminution de rapport $r_{Sp} = Sp_1 / Sp_2$ permet de nous donner une bonne maniabilité des bétons : si Sp_2 augmente, r_{Sp} diminue. Ainsi, la présence de superplastifiants rhéobuild 561 Sp_2 permet d'améliorer l'affaissement des bétons fluides. Nous avons déjà découvert lors de la comparaison des affaissements de BFL₄ (ST = 18 cm en utilisant Sp_2) et de BFL₂ (ST = 16 cm en utilisant Sp_1) que le Sp_2 rhéobuild 561 permet de donner une bonne fluidité de béton par rapport au superplastifiant Sp_1 Sika viscocrete Tempo 12. Cette hypothèse est bien vérifiée dans le modèle de ST des bétons fluides.

4. Résultats et modélisation des retraits des bétons fluides

4.1. Résultats des retraits des bétons fluides

Lors des essais aux laboratoires, nous avons les résultats suivants (tableau 102) :

Tableau 102: Retraits des BFL formulés à partir des plans d'expérience

BFL _i	R [%]
BFL ₆	0,13
BFL ₇	0,12
BFL ₈	0,11
BFL ₉	0,12
BFL ₁₀	0,06
BFL ₁₁	0,08
BFL ₁₂	0,13
BFL ₁₃	0,12
BFL ₁₄	0,16

BFL _i	R [%]
BFL ₁₅	0,11
BFL ₁₆	0,12
BFL ₁₇	0,13
BFL ₁₈	0,09
BFL ₁₉	0,08
BFL ₂₀	0,09
BFL ₂₁	0,08

4.2. Modèle mathématique des retraits des bétons fluides

Le modèle linéaire des retraits R des bétons fluides s'écrit de la façon suivante

$$R[\%] = A_0 + A_1 * C + A_2 * E + A_3 * rF + A_4 * rSp + A_{12} * CE + A_{13} * C * rF + A_{14} * C * rSp + A_{23} * E * rF + A_{24} * E * rSp + A_{34} * rF * rSp + A_{123} * C * E * rF + A_{124} * C * E * rSp + A_{234} * E * rF * rSp + A_{1234} * C * E * rF * rSp$$

(94)

4.2.1. Calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1

Les calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides se calcul par le logiciel Minitab et nous avons les résultats indiqués par le tableau suivant

Tableau 103: Coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		0,1081
C	-0,006250	-0,003125
E	0,008750	0,004375
rF	-0,03375	-0,01688
rSp	-0,001250	-0,000625
C*E	0,006250	0,003125
C*rF	0,003750	0,001875
C*rSp	-0,008750	-0,004375
E*rF	0,018750	0,009375
E*rSp	-0,013750	-0,006875
rF*rSp	-0,011250	-0,005625
C*E*rF	-0,013750	-0,006875
C*E*rSp	0,008750	0,004375
C*rF*rSp	0,001250	0,000625
E*rF*rSp	-0,013750	-0,006875
C*E*rF*rSp	-0,001250	-0,000625

4.2.2. Calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1

Les calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides se calcul par le logiciel Minitab et nous avons les résultats indiqués par le tableau suivant

Tableau 104: Coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		0,1081
C	-0,006250	-0,003125
E	0,008750	0,004375
rF	-0,03375	-0,01688
rSp	-0,001250	-0,000625
C*E	0,006250	0,003125
C*rF	0,003750	0,001875
C*rSp	-0,008750	-0,004375
E*rF	0,018750	0,009375
E*rSp	-0,013750	-0,006875
rF*rSp	-0,011250	-0,005625
C*E*rF	-0,013750	-0,006875
C*E*rSp	0,008750	0,004375
C*rF*rSp	0,001250	0,000625
E*rF*rSp	-0,013750	-0,006875
C*E*rF*rSp	-0,001250	-0,000625

4.2.3. Coefficients codés

Le tableau suivant représente les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides.

Tableau 105: Tableau donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de ST des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		18,72
C	-2,687	-1,344
E	1,1875	0,5938
rF	-1,1875	-0,5938
rSp	-2,438	-1,219

Terme	Effet	Coeff
C*E	1,8125	0,9063
C*rF	-0,3125	-0,1563
C*rSp	1,1875	0,5937
E*rF	-0,18750	-0,09375
E*rSp	-0,9375	-0,4687
rF*rSp	-0,06250	-0,03125
C*E*rF	-0,06250	-0,03125
C*E*rSp	-0,5625	-0,2813
C*rF*rSp	0,06250	0,03125
E*rF*rSp	0,6875	0,3438
C*E*rF*rSp	0,06250	0,03125

4.2.4. Équation de régression préliminaire en unités non codées de ST

Le modèle d'équation de régression préliminaire des valeurs codées -1 et +1 des retraits des bétons fluides est donné par la relation :

$$\begin{aligned}
 R[\%] = & 0,1081 - 0,003125 C + 0,004375 E - 0,01688 rF - 0,000625 rSp \\
 & + 0,003125 C*E + 0,001875 C*rF - 0,004375 C*rSp + 0,009375 E*rF - \\
 & 0,006875 E*rSp - 0,005625 rF*rSp - 0,006875 C*E*rF + 0,004375 C*E*rSp \\
 & + 0,000625 C*rF*rSp - 0,006875 E*rF*rSp - 0,000625 C*E*rF*rSp
 \end{aligned}$$

(95)

4.2.5. Réduction des modèles

▪ *Élimination descendante des termes*

Le modèle initial était saturé. La procédure pas à pas a supprimé les termes suivants afin d'obtenir des degrés de liberté suffisants pour commencer : C*rSp; C*E*rSp; C*rF*rSp; C*E*rF*rSp

▪ *Coefficients codés*

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du nouveau modèle de R sont présentés dans le tableau 105.

Tableau 106 :Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de R retenu

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		0,10813	0,00312	34,60	0,000	
C	-0,00625	-0,00313	0,00312	-1,00	0,374	1,00
E	0,00875	0,00437	0,00312	1,40	0,234	1,00
rF	-0,03375	-0,01688	0,00312	-5,40	0,006	1,00
rSp	-0,00125	-0,00062	0,00312	-0,20	0,851	1,00
C*E	0,00625	0,00313	0,00312	1,00	0,374	1,00
C*rF	0,00375	0,00188	0,00312	0,60	0,581	1,00
E*rF	0,01875	0,00938	0,00312	3,00	0,040	1,00
E*rSp	-0,01375	-0,00687	0,00312	-2,20	0,093	1,00
rF*rSp	-0,01125	-0,00562	0,00312	-1,80	0,146	1,00
C*E*rF	-0,01375	-0,00688	0,00312	-2,20	0,093	1,00
E*rF*rSp	-0,01375	-0,00688	0,00312	-2,20	0,093	1,00

▪ **Récapitulatif du modèle**

Tableau 107: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de retrait R des bétons fluides

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,0125	93,78%	76,66%	0,44%

La valeur de R carré est élevée. Ainsi, le nouveau modèle permet de retrouver la valeur des retraits des bétons mesurés.

▪ **Analyse de la variance**

Le tableau 107 suivant montre l'analyse de variance du nouveau modèle retenu des retraits des bétons fluides.

Tableau 108: Analyse de variance du nouveau modèle des retraits R des bétons fluides

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	11	0,009419	0,000856	5,48	0,057
Linéaires	4	0,005025	0,001256	8,04	0,034
C	1	0,000156	0,000156	1,00	0,374
E	1	0,000306	0,000306	1,96	0,234
rF	1	0,004556	0,004556	29,16	0,006

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
rSp	1	0,000006	0,000006	0,04	0,851
Interactions à 2 facteur(s)	5	0,002881	0,000576	3,69	0,115
C*E	1	0,000156	0,000156	1,00	0,374
C*rF	1	0,000056	0,000056	0,36	0,581
E*rF	1	0,001406	0,001406	9,00	0,040
E*rSp	1	0,000756	0,000756	4,84	0,093
rF*rSp	1	0,000506	0,000506	3,24	0,146
Interactions à 3 facteur(s)	2	0,001513	0,000756	4,84	0,085
C*E*rF	1	0,000756	0,000756	4,84	0,093
E*rF*rSp	1	0,000756	0,000756	4,84	0,093
Erreur	4	0,000625	0,000156		
Total	15	0,010044			

- **Modèle mathématique de R retenu en unités codées -1 et +1**

$$R[\%] = 0,10813 - 0,00313 C + 0,00437 E - 0,01688 rF - 0,00062 rSp + 0,00313 C*E + 0,00188 C*rF + 0,00938 E*rF - 0,00687 E*rSp - 0,00562 rF*rSp - 0,00688 C*E*rF - 0,00688 E*rF*rSp$$

(96)

- **Modèle mathématique de R retenu en unités non codées**

$$R[\%] = 11,38 - 0,02300 C - 0,0512 E - 8,88 rF - 1,540 rSp + 0,000103 C*E + 0,01680 C*rF + 0,0405 E*rF + 0,00759 E*rSp + 1,560 rF*rSp - 0,000076 C*E*rF - 0,00759 E*rF*rSp$$

(97)

- **Droite de Henry des effets normalisés**

La figure suivante montre la droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de retrait R des bétons fluides retenu

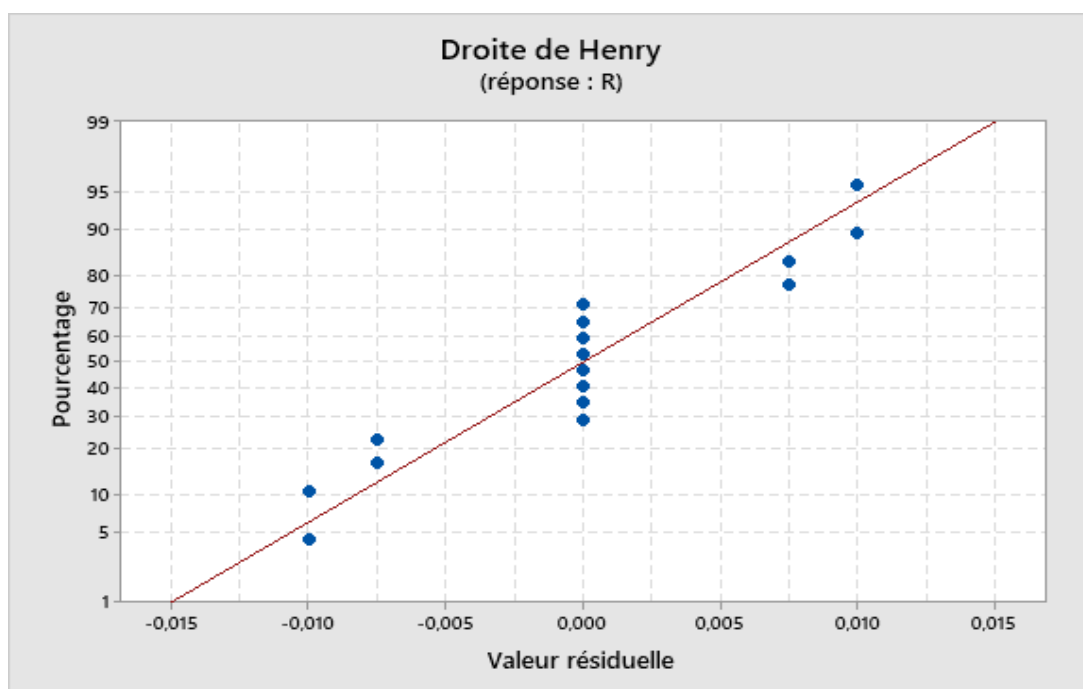


Figure 52: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de R pour un risque $\alpha = 0,1$

- **Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau du modèle de R pour un risque $\alpha = 0,1$**

Le diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de retrait R pour un risque $\alpha = 0,1$ est présenté comme suit

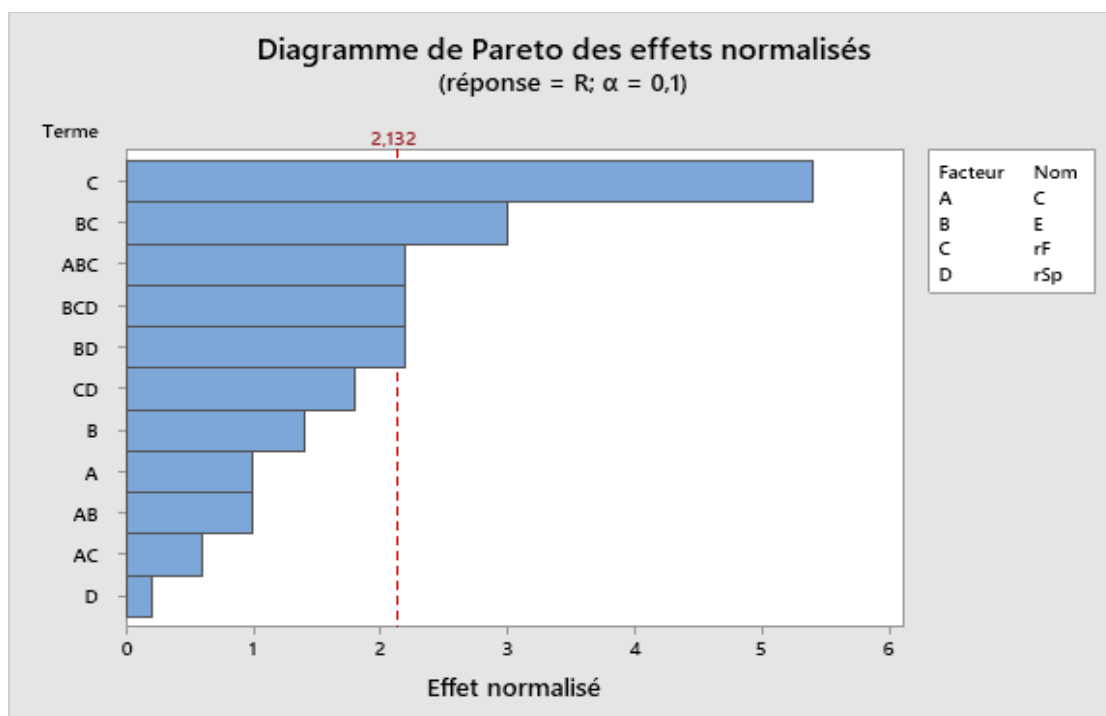


Figure 53 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de retrait $R[\%]$

▪ **Diagramme factoriels**

Les diagrammes factoriels des effets des facteurs et des interactions sont présentés par les figures 54 et 55 suivantes :

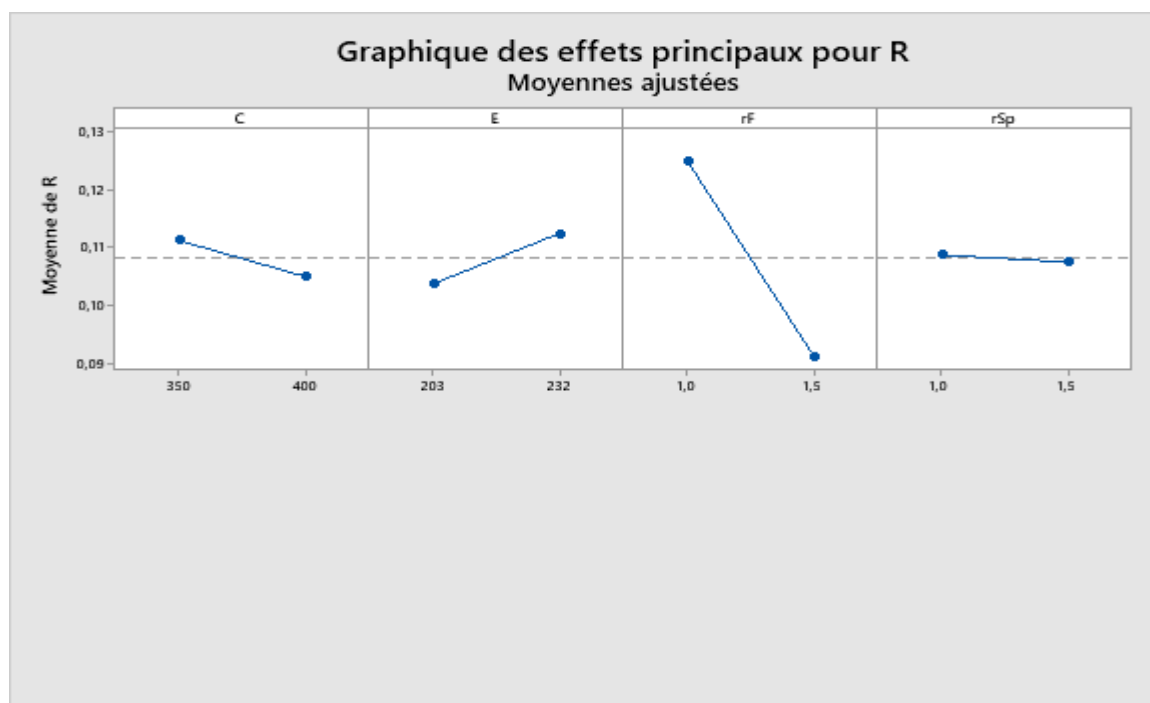


Figure 54 : Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de retrait R

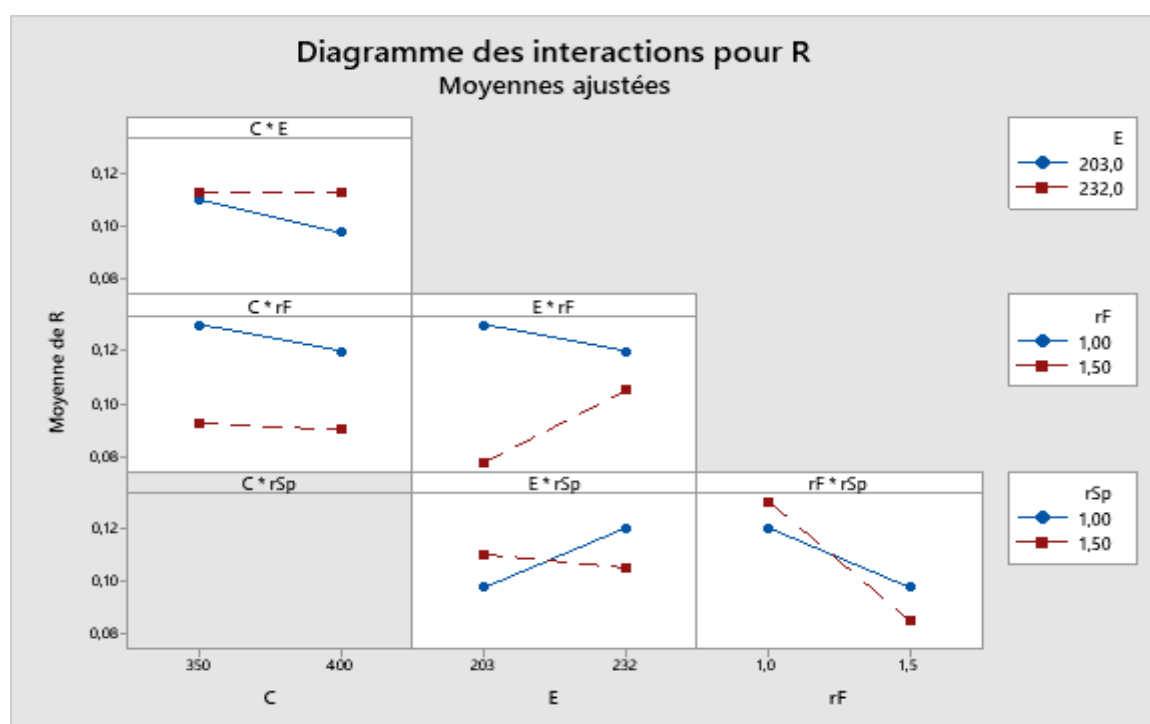


Figure 55: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de retrait R

La droite remarquable dans la figure 54 est la droite du rapport rF . Donc, pour avoir un béton de faible retrait, il faut assurer un rapport rF élevé ou utiliser un dosage en excès de filler cipolin F_C par rapport au filler dolomie. Nous avons des droites descendantes sur les niveaux de ciment C , de rapport rF et du rapport rSp . Cela signifie que l'augmentation de ces facteurs (ciment C , rapport rF et rSp) diminue les retraits du béton fluide. Cependant, l'influence majeure de l'eau dans le béton peut entraîner une fissuration des bétons (avec ce facteur eau E , le retrait du béton est élevé).

La figure 55 montre que les interactions $C*rF$, $E*rSp$ et $rF*rSp$ ont une influence sur la diminution de retrait R des bétons. Tandis que les interactions $C*E$ et $E*rF$, leurs présences augmentent le retrait R des bétons fluides.

- **Graphique de contours et surface des réponses**
 - **Influence des fillers (augmentation de rapport rF)**

Les graphes de contours de R permettent d'analyser le modèle de retrait R des bétons retenus

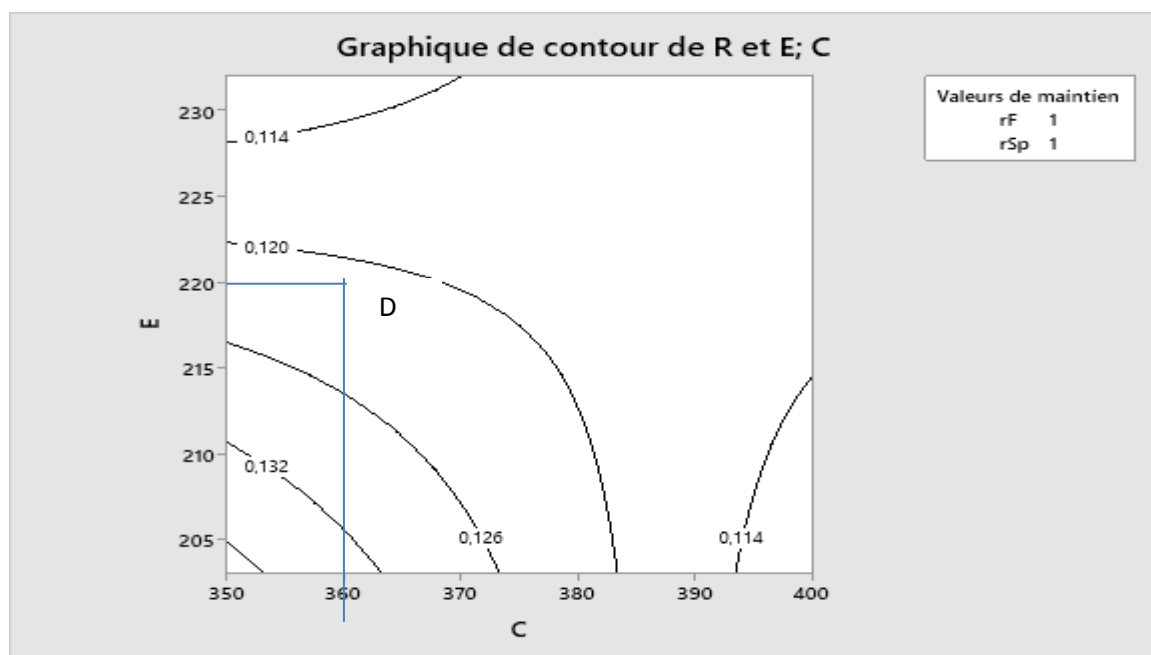


Figure 56: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1$ et $rSp = 1$)

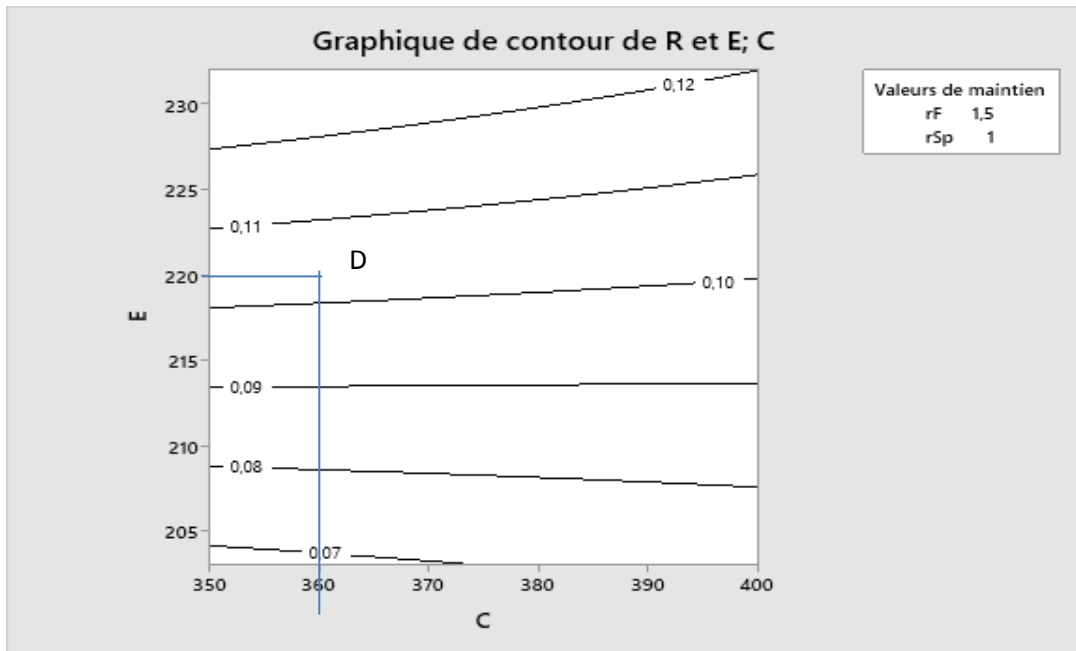


Figure 57: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1$)

Les figures 56 et 57 montrent que l'augmentation du rapport rF diminue les retraits des bétons. C'est-à-dire l'ajout en excès de filler cipolin F_{CP} par rapport au filler dolomie. Au point D, avec un même dosage de ciment, d'eau et des superplastifiants ; le retrait diminue (compris entre 0.10% et 0.11%), si nous avons augmenté le rapport rF .

- Influence des superplastifiants (augmentation de rapport rSp)

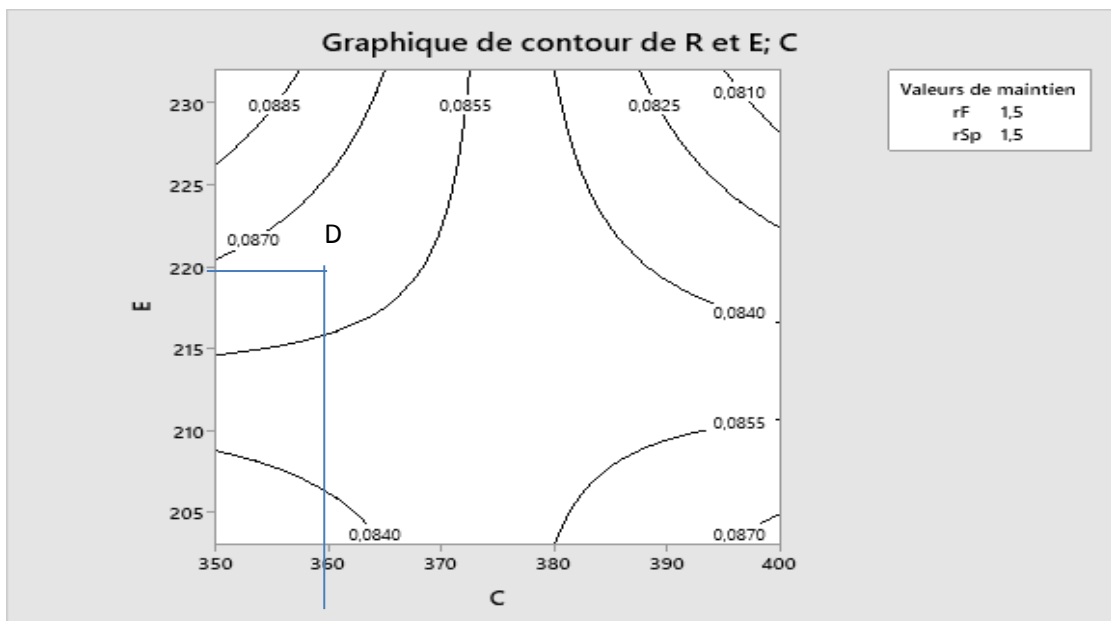


Figure 58: Iso-réponses de R en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1,5$)

Les figures 57 et 58 nous permettent de dire que l'augmentation de rapport $r_{Sp} = 1,5$ (utilisation en excès du dosage de superplastifiant Sp_1) diminue aussi les retraits des bétons.

▪ Optimisation de réponse R

L'optimisation de la réponse R produit le graphique affiché ci-dessous

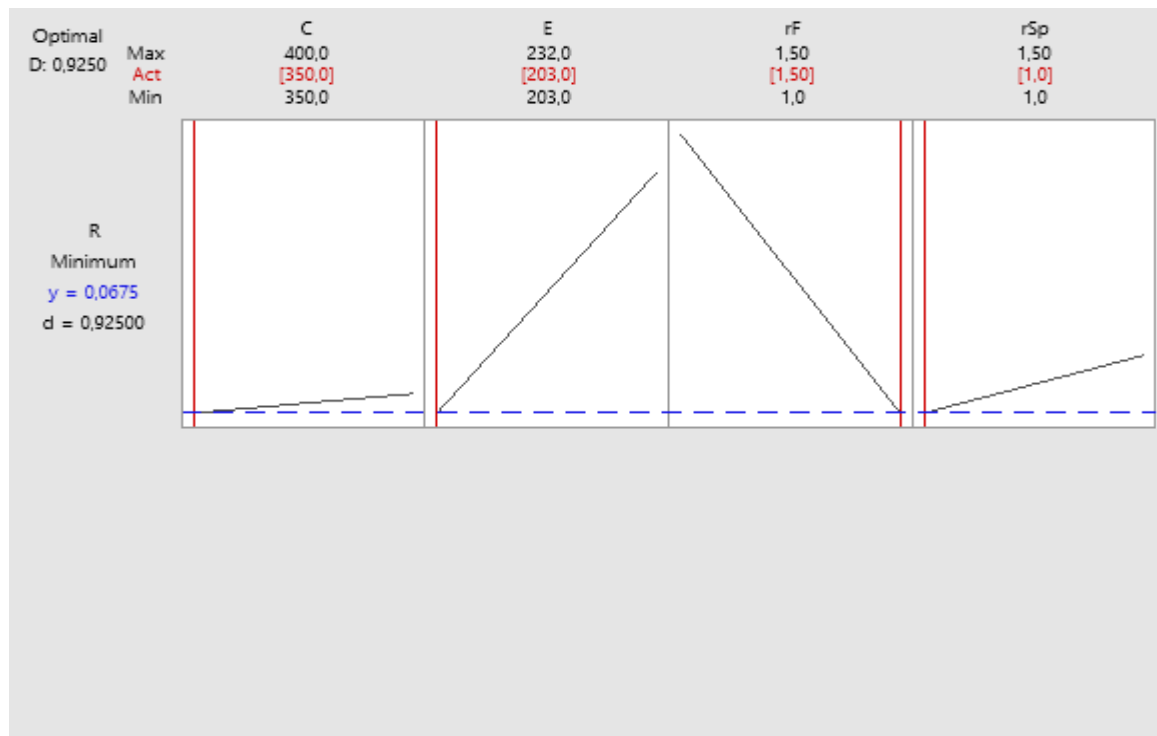


Figure 59: Optimisation des réponses R

Pour avoir un béton le plus faible retrait, il suffit d'utiliser les dosages (coloré en rouge) de chaque constituant du béton dans un m^3 suivant :

- Un dosage en ciment de 350 Kg,
- Un dosage en eau de 203 L,
- Un rapport $r_F = 1,5$ (dosage de $F_C = 115,8$ Kg et $F_D = 77,2$ Kg),
- Un rapport $r_{Sp} = 1$ (dosage de $Sp_1 = 4$ L et $Sp_2 = 4$ L),

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir un béton le plus faible retrait de $R[\%] = 0,0675$ %.

4.3. Conclusion partielle

L'élimination descendante des termes dans la fonction pas à pas du logiciel Minitab, pour $\alpha = 0,1$ exclure, nous permet d'avoir deux nouveaux modèles de retrait R des valeurs codées et non codées suivantes :

- Pour les valeurs codées -1 et +1

$$R[\%] = 0,10813 - 0,00313 C + 0,00437 E - 0,01688 rF - 0,00062 rSp + 0,00313 C * E + 0,00188 C * rF + 0,00938 E * rF - 0,00687 E * rSp - 0,00562 rF * rSp - 0,00688 C * E * rF - 0,00688 E * rF * rSp$$

- Pour les valeurs non codées

$$R[\%] = 11,38 - 0,02300 C - 0,0512 E - 8,88 rF - 1,540 rSp + 0,000103 C * E + 0,01680 C * rF + 0,0405 E * rF + 0,00759 E * rSp + 1,560 rF * rSp - 0,000076 C * E * rF - 0,00759 E * rF * rSp$$

L'analyse du diagramme de PARETO, nous montre que le rapport r_F et son interaction avec l'eau $E * r_F$ agissent sur le retrait des bétons fluides. L'effet de r_F est négatif ($A_3 = - 0,017$ pour les valeurs codées), ce qui montre que la présence de r_F diminue le retrait du béton. A vrai dire, l'abondance de filler cipolin permet de nous donner un faible retrait des bétons fluides. C'est tout à fait normal, puisque, le filler cipolin est riche en calcaire, et peut absorber d'eau. Avec ce faible retrait, nous ne risquons pas d'avoir des fissurations de béton à l'état durci.

5. Résultats et modélisation des compacités des bétons fluides

Nous avons les résultats suivants (tableau 108) :

Tableau 109: Compacités des BFL formulés à partir des plans d'expériences

BFL _i	C [%]
BFL ₆	91,4
BFL ₇	95,12
BFL ₈	95,12
BFL ₉	96,13
BFL ₁₀	96,83
BFL ₁₁	97,73
BFL ₁₂	98,13
BFL ₁₃	97,56

BFL ₁₄	94,19
BFL ₁₅	96,85
BFL ₁₆	92,52
BFL ₁₇	95,29
BFL ₁₈	96,12
BFL ₁₉	96,25
BFL ₂₀	95,24
BFL ₂₁	95,67

5.1. Modèle mathématique des compacités des bétons fluides

Le modèle linéaire des compacités C des bétons fluides s'écrit de la façon suivante

$$C[\%] = A_0 + A_1 * C + A_2 * E + A_3 * rF + A_4 * rSp + A_{12} * CE + A_{13} * C * rF + A_{14} * C * rSp + A_{23} * E * rF + A_{24} * E * rSp + A_{34} * rF * rSp + A_{123} * C * E * rF + A_{124} * C * E * rSp + A_{234} * E * rF * rSp + A_{1234} * C * E * rF * rSp$$

(98)

5.1.1. Coefficients codés

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} de modèle de compacité $C[\%]$ sont présentés dans le tableau d'ANOVA suivant :

Tableau 110: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de $C[\%]$ des bétons fluides

Terme	Effet	Coeff
Constante		95,63
C	1,3813	0,6906
E	0,14625	0,07312
rF	2,114	1,057
rSp	-0,7363	-0,3681
C*E	-0,4712	-0,2356
C*rF	-1,1587	-0,5794
C*rSp	0,11625	0,05813
E*rF	-0,2288	-0,1144
E*rSp	-1,3187	-0,6594
rF*rSp	-1,0062	-0,5031
C*E*rF	0,17875	0,08938
C*E*rSp	0,5738	0,2869
C*rF*rSp	-0,05875	-0,02938
E*rF*rSp	0,6712	0,3356
C*E*rF*rSp	-0,13125	-0,06563

5.1.2. Équation de régression préliminaire en unités non codées de compacité $C[\%]$

Le modèle préliminaire des valeurs codées -1 et +1 de la compacité des bétons fluides est donné par la relation :

$$C[\%] = 95,63 + 0,6906 C + 0,07312 E + 1,057 rF - 0,3681 rSp - 0,2356 C^*E - 0,5794 C^*rF + 0,05813 C^*rSp - 0,1144 E^*rF - 0,6594 E^*rSp - 0,5031 rF^*rSp + 0,08938 C^*E^*rF + 0,2869 C^*E^*rSp - 0,02938 C^*rF^*rSp + 0,3356 E^*rF^*rSp - 0,06563 C^*E^*rF^*rSp$$

(99)

5.1.3. Réduction des modèles

▪ Élimination descendante des termes

Pour l'équation (99), la procédure pas à pas a supprimé les termes suivants afin d'obtenir des degrés de liberté suffisants pour commencer : C^*E^*rF ; C^*E^*rSp ; C^*rF^*rSp ; $C^*E^*rF^*rSp$.

▪ Coefficients codés

Les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du nouveau modèle de compacité $C[\%]$ sont donnés dans le tableau d'ANOVA suivant :

Tableau 111: Tableau d'ANOVA donnant les coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} du modèle de compacité $C[\%]$ retenu

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante		95,634	0,160	596,26	0,000	
C	1,381	0,691	0,160	4,31	0,005	1,00
E	0,146	0,073	0,160	0,46	0,664	1,00
rF	2,114	1,057	0,160	6,59	0,001	1,00
rSp	-0,736	-0,368	0,160	-2,30	0,062	1,00
C*rF	-1,159	-0,579	0,160	-3,61	0,011	1,00
E*rF	-0,229	-0,114	0,160	-0,71	0,503	1,00
E*rSp	-1,319	-0,659	0,160	-4,11	0,006	1,00
rF*rSp	-1,006	-0,503	0,160	-3,14	0,020	1,00
E*rF*rSp	0,671	0,336	0,160	2,09	0,081	1,00

▪ **Récapitulatif du modèle**

Tableau 112: Tableau récapitulatif de calcul de R^2 du nouveau modèle de compacité $C[\%]$

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,641565	94,92%	87,30%	63,88%

La valeur de R carré est élevée. Ainsi, le nouveau modèle permet de retrouver la valeur des compacités mesurées.

▪ **Analyse de la variance**

Le tableau 112 suivant montre l'analyse de variance du nouveau modèle retenu de compacité $C[\%]$.

Tableau 113: Analyse de variance du nouveau modèle de compacité $C[\%]$.

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	46,1460	5,1273	12,46	0,003
Linéaires	4	27,7570	6,9392	16,86	0,002
C	1	7,6314	7,6314	18,54	0,005
E	1	0,0856	0,0856	0,21	0,664
rF	1	17,8718	17,8718	43,42	0,001
rSp	1	2,1683	2,1683	5,27	0,062
Interactions à 2 facteur(s)	4	16,5867	4,1467	10,07	0,008
C*rF	1	5,3708	5,3708	13,05	0,011
E*rF	1	0,2093	0,2093	0,51	0,503
E*rSp	1	6,9564	6,9564	16,90	0,006
rF*rSp	1	4,0502	4,0502	9,84	0,020
Interactions à 3 facteur(s)	1	1,8023	1,8023	4,38	0,081
E*rF*rSp	1	1,8023	1,8023	4,38	0,081
Erreur	6	2,4696	0,4116		
Total	15	48,6156			

- **Modèle mathématique de compacité $C[\%]$ retenu en unités codées -1 et +1**

$$C[\%] = 95,634 + 0,691 C + 0,073 E + 1,057 rF - 0,368 rSp - 0,579 C*rF - 0,114 E*rF - 0,659 E*rSp - 0,503 rF*rSp + 0,336 E*rF*rSp$$

(100)

- **Modèle mathématique de compacité $C[\%]$ retenu en unités non codées**

$$C[\%] = -159,2 + 0,1435 C + 0,851 E + 156,6 rF + 148,8 rSp - 0,0927 C*rF - 0,494 E*rF - 0,645 E*rSp - 88,6 rF*rSp + 0,370 E*rF*rSp$$

(101)

- **Droite de Henry des effets normalisés**

La figure suivante montre la droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de compacité $C[\%]$ retenu.

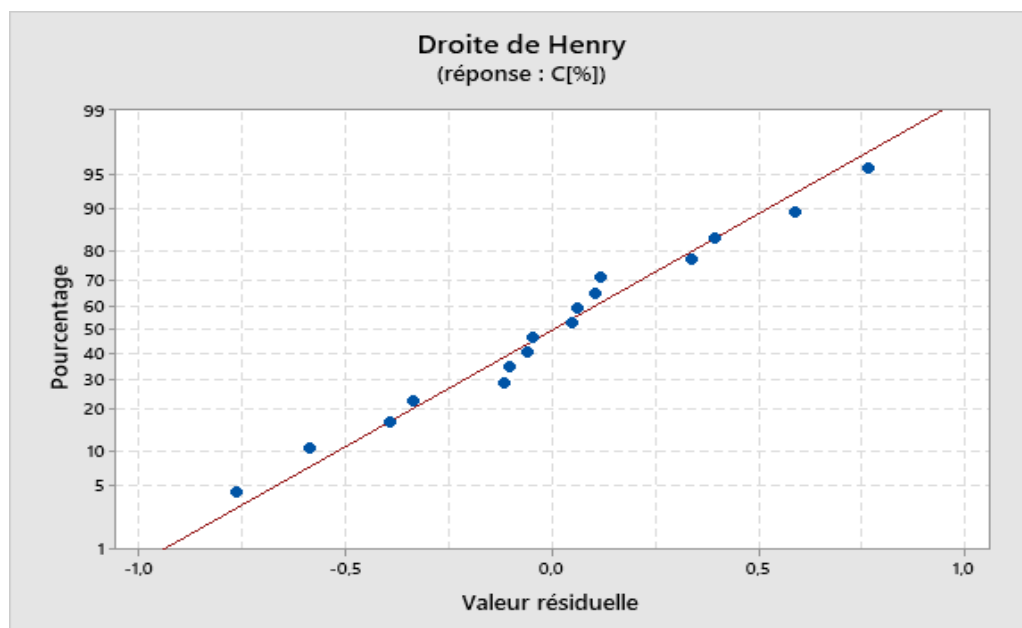


Figure 60: Droite de Henry des effets normalisés de nouveau modèle de compacité $C[\%]$ pour un risque $\alpha = 0,1$

- **Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau du modèle de compacité $C[\%]$ pour un risque $\alpha = 0,1$**

Le diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de compacité $C[\%]$ pour un risque $\alpha = 0,1$ est présenté par la figure 62.

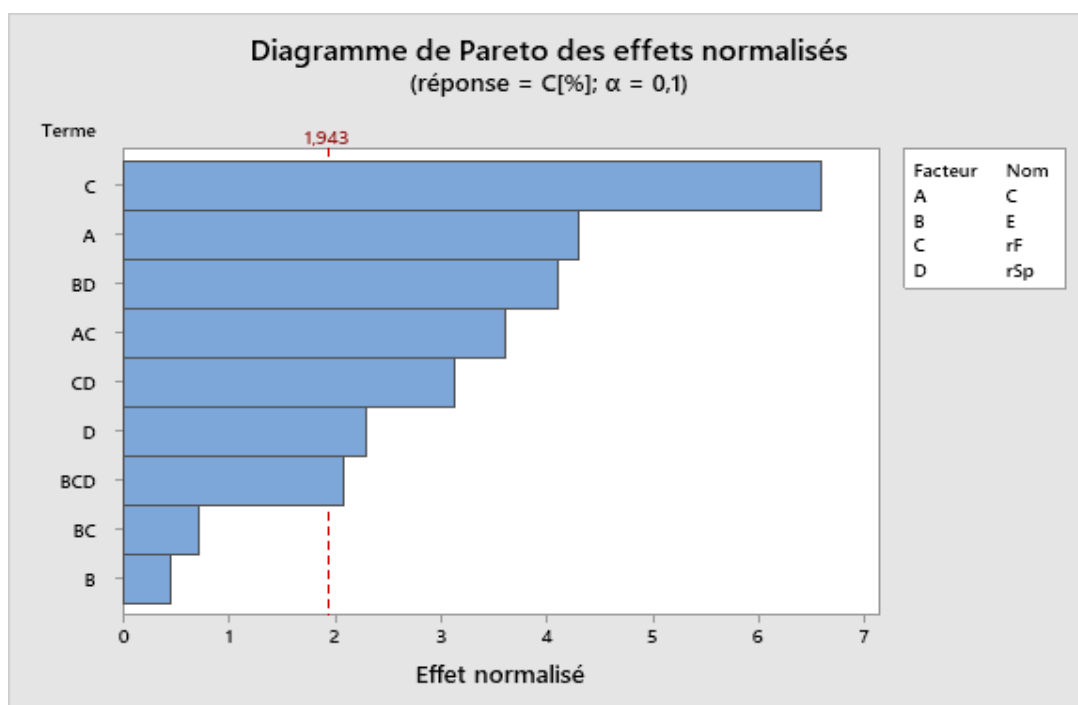


Figure 61 : Diagramme de PARETO des effets normalisés du nouveau modèle de compacité C[%]

▪ **Diagramme factoriels**

Les diagrammes factoriels des effets et des interactions sont présentés par les figures suivantes

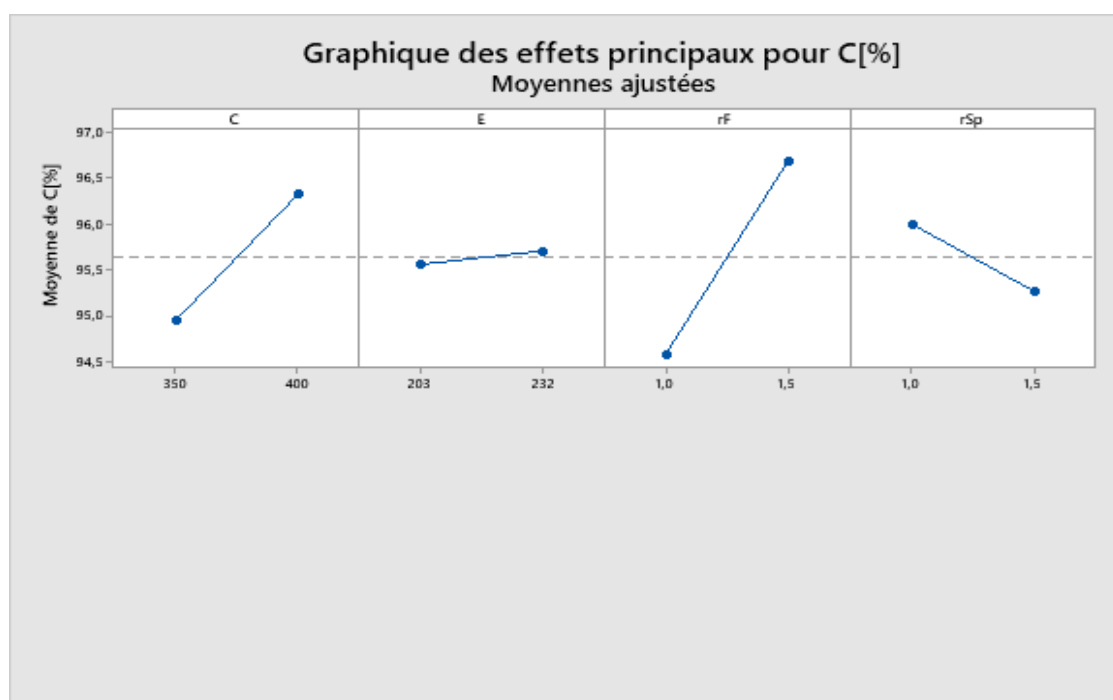


Figure 62: Influence des effets des facteurs sur nouveau modèle de compacité C[%]

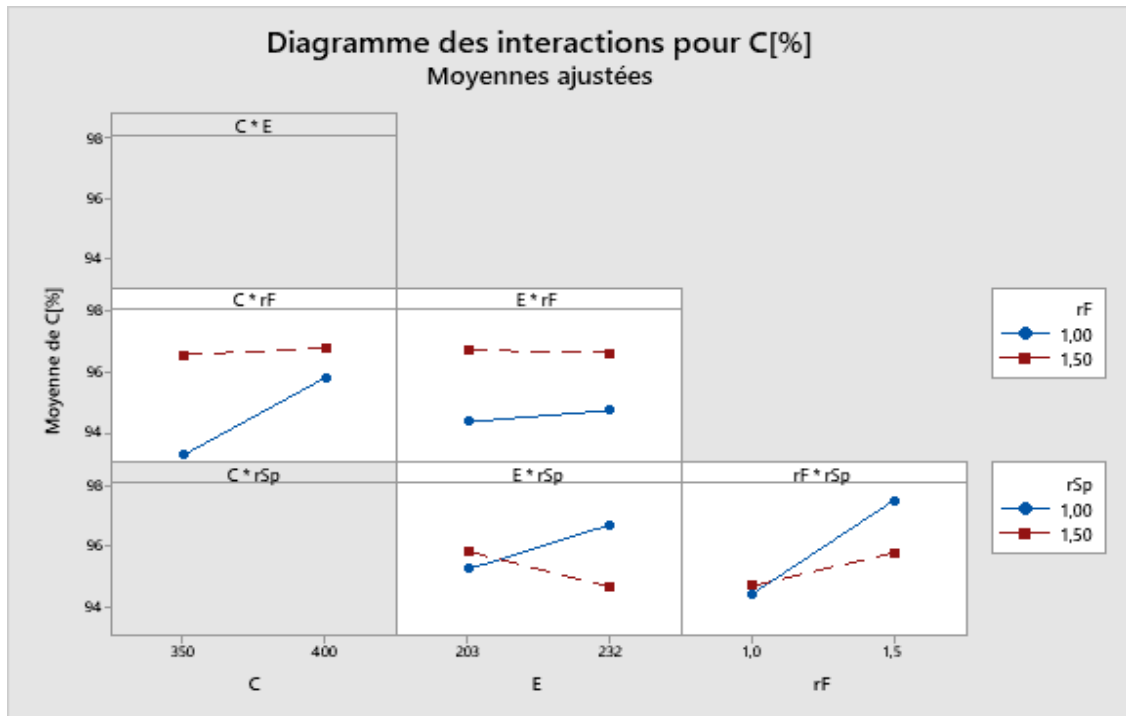


Figure 63: Influence des effets des interactions sur nouveau modèle de compacité $C[\%]$

Le graphe de la figure 62 montre que l'augmentation du dosage de ciment, de rapport rF améliore la compacité $C[\%]$ des bétons fluides : nous avons des droites ascendantes dans ces paramètres. L'ajout des éléments fins dans les bétons permet de donner un béton plus compact et imperméable. Pourtant, nous avons une diminution de compacité des bétons fluides si le rapport rSp est élevé.

Pour le graphe de la figure 63 des effets de facteurs, les interactions $C*rF$ et $rF*rSp$ ont une influence sur l'augmentation de la compacité $C[\%]$ des bétons. Tandis que les interactions $E*rF$ et $E*rSp$, leurs présences diminuent la compacité $C[\%]$ des bétons

- **Graphique de contours et surface des réponses**
 - **Influence des fillers (augmentation de rapport rF)**

Les graphes de contours de compacité $C[\%]$ permettent d'analyser le modèle de $C[\%]$ retenu

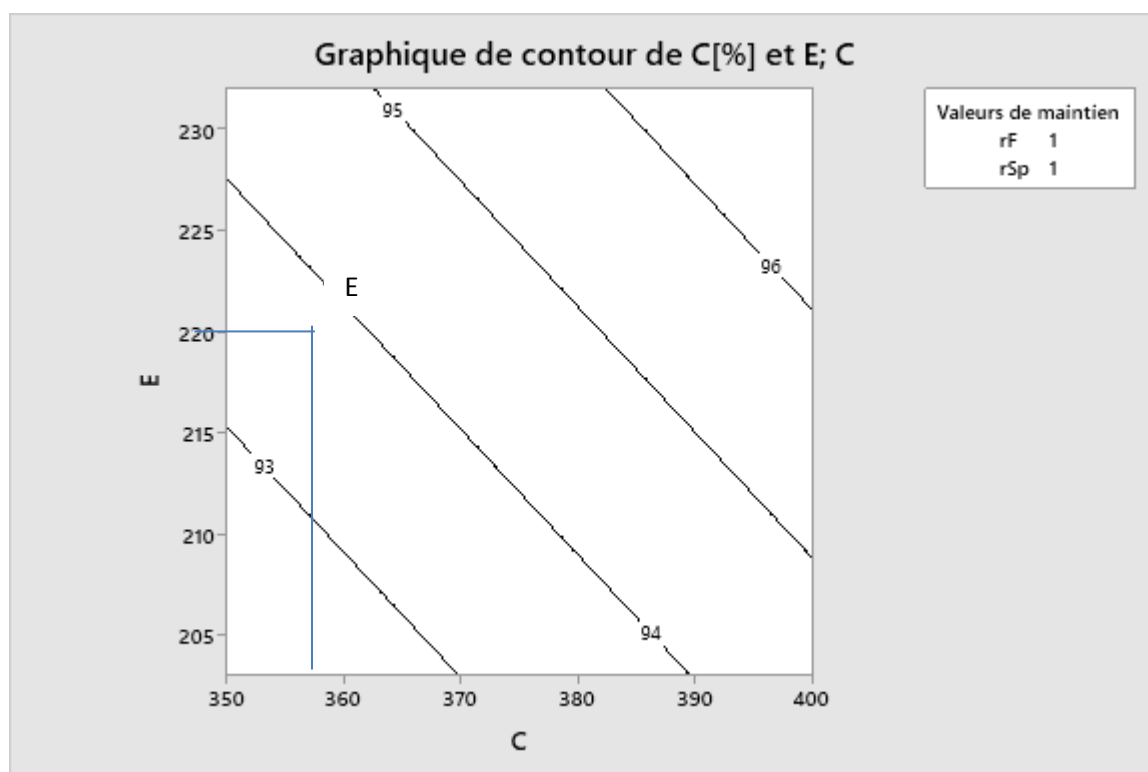


Figure 64: Iso-réponses de $C[\%]$ en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1$ et $rSp = 1$)

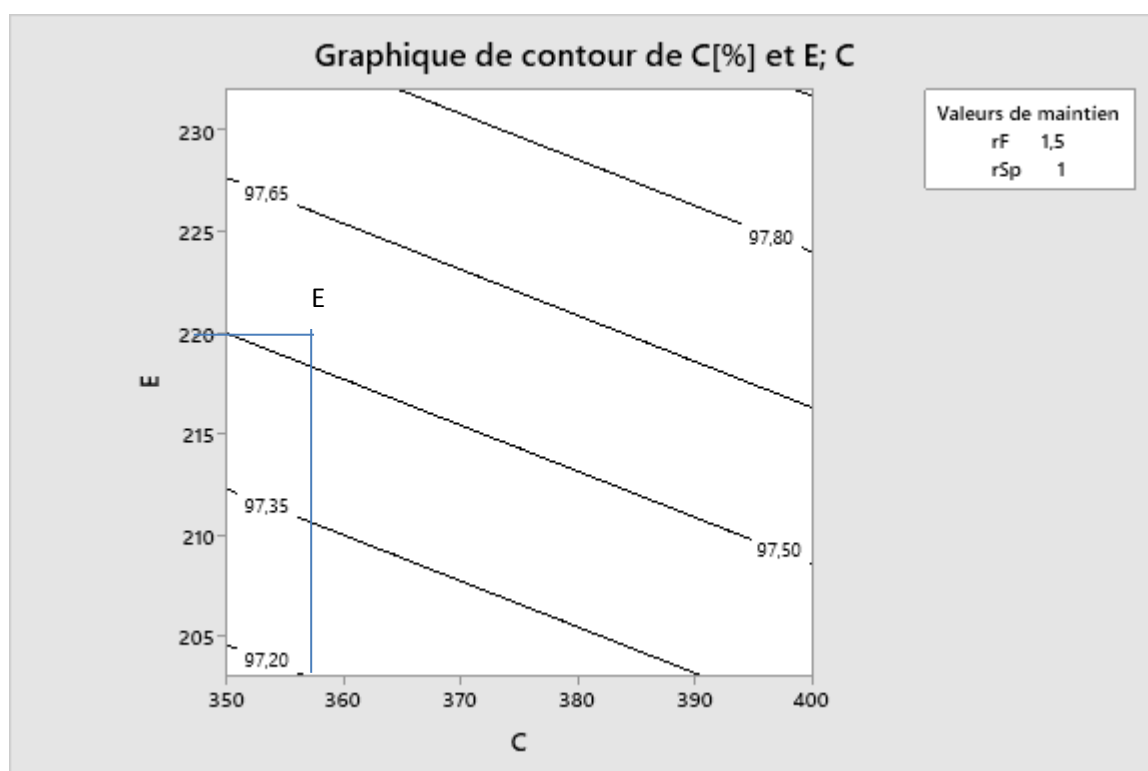


Figure 65: Iso-réponses de compacité $C[\%]$ en fonction du dosage en eau et en ciment ($rF = 1,5$ et $rSp = 1$)

Dans la figure 64, le béton obtenu sur le point E a un dosage de $C = 360$ Kg/m³, un dosage de d'eau $E = 220$ L/m³, un rapport $r_{Sp} = 1$, et un rapport $r_F = 1$. Et à partir de ces dosages, nous avons une compacité comprise entre 93 et 94[%]. Par contre dans la figure 65, nous avons les mêmes dosages de ciment, d'eau, de rapport r_{Sp} , mais la différence est de $r_F = 1,5$. Ces dosages dans la figure 66 nous permettent d'avoir une compacité élevée comprise entre 97,50% et 97,65%. Ainsi, la présence des fillers surtout le filler cipolin améliore fortement la compacité des bétons fluides.

- ***Influence des superplastifiants (augmentation de rapport r_{Sp})***

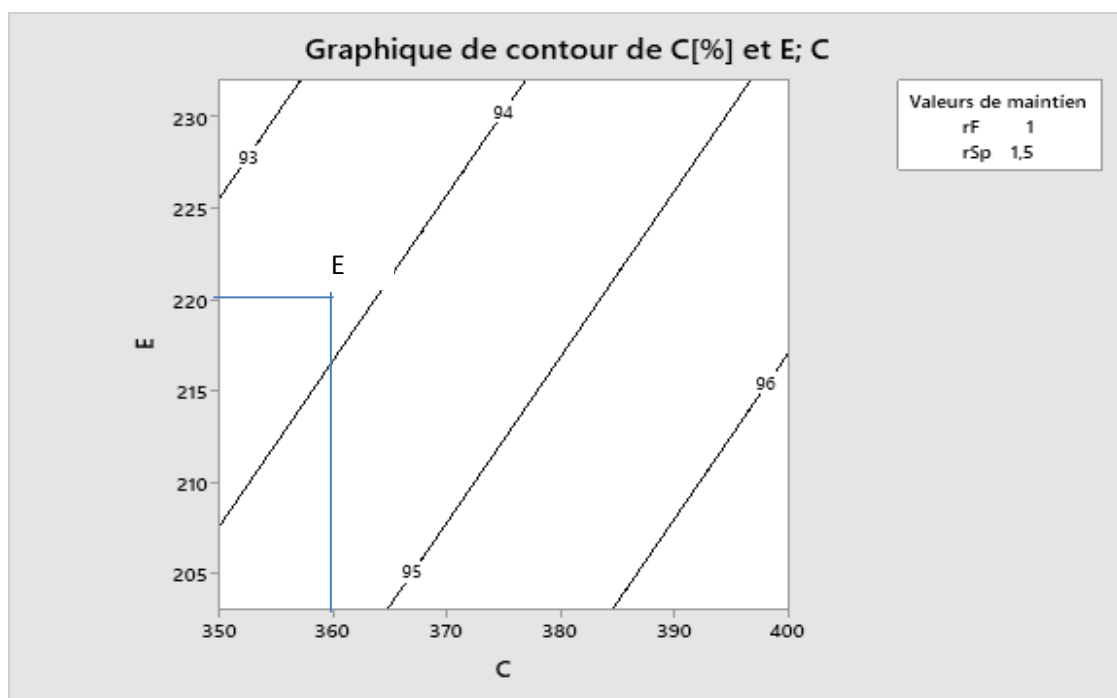


Figure 66: Iso-réponses de C [%] en fonction du dosage en eau et en ciment ($r_F = 1$ et $r_{Sp} = 1,5$)

Nous pouvons dire que l'augmentation de rapport $r_{Sp} = 1,5$ n'a aucune influence sur la compacité C [%] des bétons. Dans les figures 65 et 66, nous avons les mêmes compacités comprises entre 93 et 94%.

▪ ***Optimisation de réponse compacité C [%]***

L'optimisation de la réponse C [%] produit le graphique affiché ci-dessous

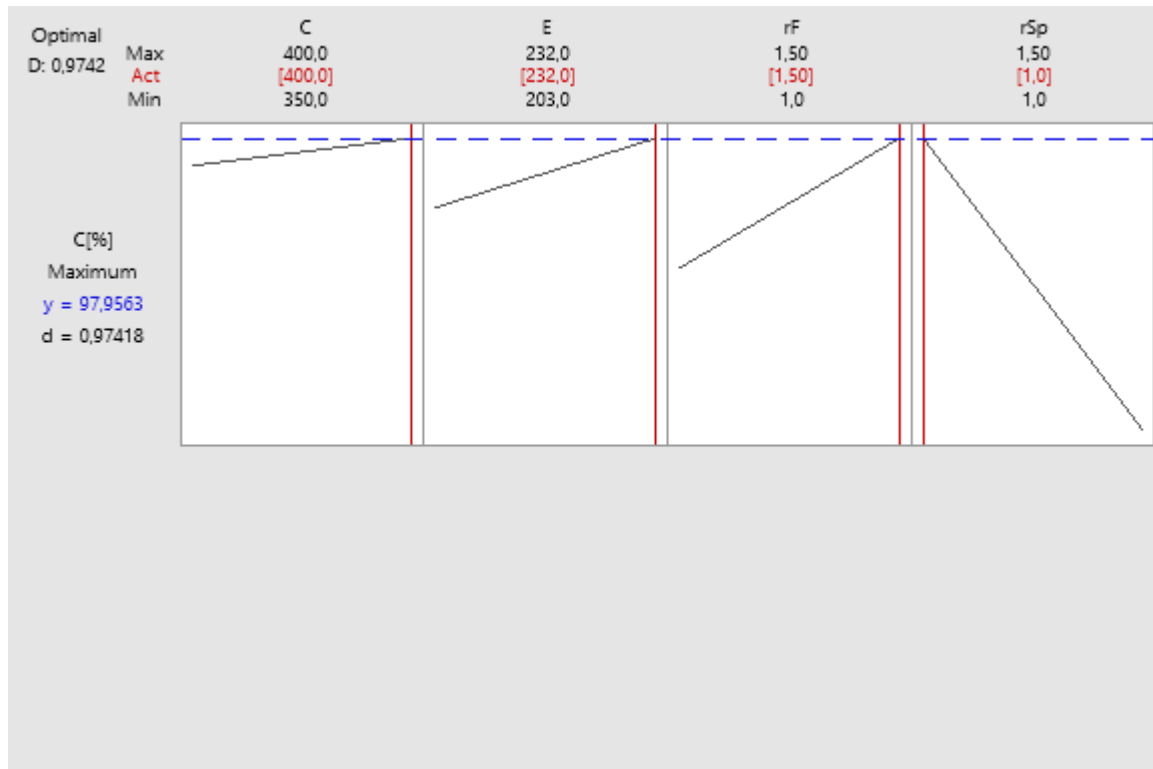


Figure 67: Optimisation des réponses compacité $C[\%]$

Pour avoir une compacité $C[\%]$ maximale, il suffit d'utiliser les dosages (coloré en rouge) de chaque constituant du béton dans un m^3 suivant :

- Un dosage en ciment de 400 Kg,
- Un dosage en eau de 232 L,
- Un rapport $rF = 1,5$ (dosage de $F_C = 115,8$ Kg et $F_D = 77,2$ Kg),
- Un rapport $rSp = 1$ (dosage de $Sp_1 = 4$ L et $Sp_2 = 4$ L),

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir une compacité optimale de $C[\%] = 97,96\%$.

5.2. Conclusion partielle

Pour un risque $\alpha = 0,1$; nous avons deux nouveaux modèles de compacité $C[\%]$ des valeurs codées et non codées suivantes :

- Pour les valeurs codées -1 et +1

$$C[\%] = 95,634 + 0,691 C + 0,073 E + 1,057 rF - 0,368 rSp - 0,579 C*rF - 0,114 E*rF - 0,659 E*rSp - 0,503 rF*rSp + 0,336 E*rF*rSp$$

- Pour les valeurs non codées

$$C[\%] = -159,2 + 0,1435 C + 0,851 E + 156,6 rF + 148,8 rSp - 0,0927 C*rF - 0,494 E*rF - 0,645 E*rSp - 88,6 rF*rSp + 0,370 E*rF*rSp$$

Le rapport rF et le ciment C sont les éléments les plus importants dans l'évolution de la compacité des bétons fluides. Notons que l'ajout en excès de filler cipolin par rapport au filler dolomie permet de nous donner une bonne compacité des bétons fluides.

PARTIE IV : APPROCHES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

Chapitre IX : ÉTUDES ET ANALYSE DES PRIX UNITAIRES DES BÉTONS

Pour mettre en valeur notre recherche, nous allons étudier les coûts des confections des différents bétons.

Nous étudions dans les tableaux suivants les prix unitaires des bétons en détaillant les coûts des matériaux et les coûts de main-d'œuvre et les couts des matériels de ces différents bétons (en Ariary).

I. PRIX UNITAIRES

Le prix unitaire d'un béton est donné par la relation :

$$\mathbf{PU} = \frac{\mathbf{D} \times \mathbf{K_1}}{\mathbf{R}} \quad (102)$$

D : les déboursés secs qui dérivent la combinaison des prix unitaires des matériaux, des matériels et de la main d'œuvre. C'est l'ensemble de toutes les dépenses pour l'achat des matériaux, pour le salaire des ouvriers exécutants et la location ou l'amortissement des matériels ou outillages.

K₁ : le coefficient de déboursé appelé traditionnellement coefficient d'adjudication "c". C'est le coefficient qui permet d'introduire aux prix unitaires l'influence des frais de chantier, les frais généraux et frais proportionnels au prix de vente et bien entendu le bénéfice et dont voici les détails.

Le coefficient de déboursé K₁ est défini par à la formule suivante :

$$K_1 = \frac{\left(\frac{1+A1}{100}\right)\left(\frac{1+A2}{100}\right)}{1 - \left(\frac{A3}{100} \times \left(1 + \frac{TVA}{100}\right)\right)} \quad (103)$$

Avec A1 : Frais généraux proportionnels aux déboursés :

$$A1 = a1 + a2 + a3$$

A2 : Bénéfice brut et frais financiers proportionnels au prix de revient de l'entreprise :

$$A2 = a5 + a6 + a7 + a8$$

A3 : Frais proportionnels au prix de règlement avec taxe :

$$A3 = a9$$

Le détail de calcul de K_1 est donné dans le tableau 114 suivant :

Tableau 114 : Détails de calcul de coefficient de déboursé K_1

ORIGINE DES FRAIS	DÉCOMPOSITIONS INTÉRIEURES	INDICE DE DÉCOMPOSITION
Frais généraux proportionnels aux déboursés	Frais d'agence et patente (a_1)	3%
	Frais de chantier (a_2)	10%
	Frais d'étude (a_3)	4%
	Assurance (a_4)	5%
SOUS - TOTAL "A1"		22%
Bénéfice brut et frais Financiers	Bénéfice net et impôt sur le bénéfice (a_5)	10%
	Aléas techniques (a_6)	4%
	Aléas de révision des prix (a_7)	3%
	Frais financiers (a_8)	2%
SOUS - TOTAL "A2"		19%
Frais proportionnels aux prix de règlement avec taxe	Frais de siège (a_9)	0
SOUS - TOTAL "A3"		0
K_1		1.45

Si l'entreprise de central à béton a son siège à Madagascar $a_9 = 0$

Les tableaux suivants montrent quelques prix unitaires des quelques bétons dosés à 350 Kg et à 400 Kg de ciment

Tableau 115: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BO₁(Q400)

BÉTON ORDINAIRE BO ₁							
DÉSIGNATION	U	QUANTI TES	PRIX UNITA IRES	MATÉRIA UX	MAIN D'ŒU VRE	MATE RIEL	TOTAL
À - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,22	1250	275			
Gravillon g ₁	m3	0,379	80000	30320			
Gravillon G	m3	-	-	-			
Sable Sr ₁	m3	0,514	44000	22616,54			
Sable Sc	Kg	-	-	-			
Filler Cipolin F _C	Kg	-	-	-			
Filler Dolomie F _D	Kg	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₁	L	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₂	L	-	-	-			
TOTAL MATÉRIAU							309211,54
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	2,5	2000		5000		
Maçon	h	5	1800		9000		
Manœuvre	h	16	1500		24000		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							38000,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	2,5	7000			17500	
Pervibrateur	h	2,5	7000			17500	
Outillage de maçon	h	5	3000			15000	
TOTAL MATÉRIEL							50000
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			397211,54
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			575957

Tableau 116: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BO₂ (Q350)

BÉTON ORDINAIRE BO ₂							
DÉSIGNATION	U	QUANTI TES	PRIX UNITA IRES	MATÉRIA UX	MAIN D'ŒU VRE	MATE RIEL	TOTAL
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,1117	65000	7263,68			
Gravillon G	m3	0,3125	80 000	25000			
Sable Sr ₂	m3	0,3356	44000	14766,91			
Sable Sc	Kg	0,1741	55 000	9574,75			
Filler Cipolin F _C	Kg	-	-	-			
Filler Dolomie F _D	Kg	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₁	L	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₂	L	-	-	-			
TOTAL MATÉRIAU							280859,10
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	2,5	2000		5000		
Maçon	h	5	1800		9000		
Manœuvre	h	16	1500		24000		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							38000,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	2,5	7000			17500	
Pervibrateur	h	2,5	7000			17500	
Outillage de maçon	h	5	3000			15000	
TOTAL MATÉRIEL							50000
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			368859,10
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			534 846

Tableau 117: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BO₃ (Q350)

BÉTON ORDINAIRE BO ₃							
DÉSIGNATION	U	QUANTI TES	PRIX UNITAI RES	MATÉRI AUX	MAIN D'ŒU VRE	MATE RIEL	TOTAL
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,17	1250	212,5			
Gravillon g ₂	m3	0,4	65000	26000			
Gravillon G	m3	0,4	80 000	32000			
Sable Sr ₂	m3	0,2	44000	8800			
Sable Sc	Kg	0,2	55 000	11000			
Filler Cipolin F _C	Kg	-	-	-			
Filler Dolomie F _D	Kg	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₁	L	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₂	L	-	-	-			
TOTAL MATÉRIAUX							302012,50
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	2,5	2000		5000		
Maçon	h	5	1800		9000		
Manœuvre	h	16	1500		24000		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							38000,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	2,5	7000			17500	
Pervibrateur	h	2,5	7000			17500	
Outillage de maçon	h	5	3000			15000	
TOTAL MATÉRIEL							50000
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			390012,50
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			565 518

Tableau 118: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BFL₁ (Q400)

BÉTON ORDINAIRE BFL1							
DÉSIGNATION	U	QUANTITES	PRIX UNITAIRES	MATÉRIAUX	MAIN D'ŒUVRE	MATERIEL	TOTAL
À - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,22	1250	275			
Gravillon g ₁	m3	0,264	80000	21120			
Gravillon G	m3	-	-	-			
Sable Sr ₁	m3	0,471	44000	20724			
Sable Sc	Kg	-	-	-			
Filler Cipolin F _C	Kg	180	400	72000			
Filler Dolomie F _D	Kg	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₁	L	7	650	4550			
Superplastifiant Sp ₂	L	-	-	-			
TOTAL MATÉRIAU							374669
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	-	-			-	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			390319
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			565 963

Tableau 119: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BFL₂ (Q350)

BÉTON ORDINAIRE BFL ₂							
DÉSIGNATION	U	QUANTITES	PRIX UNITAIRES	MATÉRIAUX	MAIN D'ŒUVRE	MATÉRIEL	TOTAL
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,1408	65000	9154,23			
Gravillon G	m3	0,1411	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,2515	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,2445	55 000	13448,51			
Filler Cipolin F _C	Kg	193	400	77200			
Filler Dolomie F _D	Kg	-	-	-			
Superplastifiant Sp ₁	L	6	650	3900			
Superplastifiant Sp ₂	L	-	-	-			
TOTAL MATÉRIAU							350312,50
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	-	-			-	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			365962,50
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			530 646

Tableau 120: Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BFL₆ (Q350)

BÉTON ORDINAIRE BFL ₆							
DÉSIGNATION	U	QUANTITES	PRIX UNITAIRES	MATÉRIAUX	MAIN D'ŒUVRE	MATÉRIEL	TOTAL
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m ³	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m ³	0,1408	65000	9154,23			
Gravillon G	m ³	0,1411	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m ³	0,2515	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,2445	55 000	13448,51			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAU							352542,50
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	-	-			-	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			368192,50
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 879

Tableau 121 : Calcul du prix pour confectionner 1m³ de BFL₁₉ (Q400)

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₉							
DÉSIGNATION	U	QUANTITES	PRIX UNITAIRES	MATÉRIAUX	MAIN D'ŒUVRE	MATÉRIEL	TOTAL
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,1408	65000	9154,23			
Gravillon G	m3	0,1411	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,2515	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,2445	55 000	13448,51			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,8	550	1540			
TOTAL MATÉRIAU							384226,50
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050,00
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	-	-			-	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			399876,50
RENDEMENT R =	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			579 821

Nous pouvons voir dans l'annexe 8, les tableaux des calculs des prix unitaires de chaque béton dans notre ouvrage. Ainsi, les prix unitaires de chaque béton sont récapitulés comme suit (tableau 152):

Tableau 122: Récapitulation des PU des bétons

TYPES	BÉTON	PU [Ar]
Q400	BO ₁	575 957
Q350	BO ₂	534 846
Q350	BO ₃	565 518
Q400	BFL ₁	565 963
Q350	BFL ₂	530 646
Q350	BFL ₃	536 243
Q350	BFL ₄	529 776
Q350	BFL ₅	535 373
Q350	BFL ₆	533 879
Q400	BFL ₇	580 279
Q350	BFL ₈	533 932
Q400	BFL ₉	580 332
Q350	BFL ₁₀	533 319
Q400	BFL ₁₁	579 719
Q350	BFL ₁₂	533 372
Q400	BFL ₁₃	579 772
Q350	BFL ₁₄	533 741
Q400	BFL ₁₅	580 141
Q350	BFL ₁₆	533 794
Q400	BFL ₁₇	580 194
Q350	BFL ₁₈	533 182
Q400	BFL ₁₉	579 821
Q350	BFL ₂₀	533 234
Q400	BFL ₂₁	579 634

II. ANALYSE DE PARETO

Le diagramme de PARETO permet de visualiser l'importance relative des différentes parties ou catégories d'un ensemble précédemment analysé et chiffré sous la forme d'un classement et d'une hiérarchisation.

L'analyse ABC ou analyse de PARETO permet de mettre en évidence les éléments les plus importants dans le modèle de R_{c07} afin d'orienter l'action. Le principe est présenté dans la figure 41 suivante.

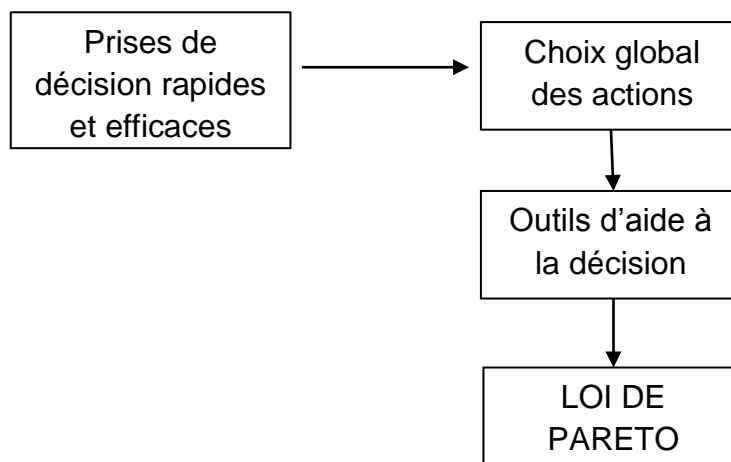


Figure 68: Prises de décision

Les éléments seront classés par ordre d'importance en indiquant les pourcentages pour un critère déterminé, ce qui nécessite une approche en trois étapes :

- Définir la nature des éléments à classer
- Choisir le critère de classement
- Définir les limites de l'étude et classer les éléments

En cumulant les valeurs décroissantes du critère étudié, la courbe ABC ou la courbe de PARETO fait apparaître trois zones d'où l'appellation de "courbe ABC" ;

- Zone A : 20% du nombre des éléments représentent 80% du critère étudié.
- Zone B : les 30% d'éléments en plus représentent 15% en plus du critère étudié ;
- Zone C : Les 50% d'éléments restants ne représentent plus que 5% du critère étudié.

Pour un secteur ou un système donné, l'application de la loi de Pareto impose plusieurs étapes :

- **Étape 1 :** Réaliser le tableau d'analyse qui se compose des 6 colonnes suivantes :
 - Colonne n°1 : n° d'ordre des produits étudiés ;
 - Colonne n°2 : noms ou références des produits étudiés (à remplir après la colonne n°3) ;
 - Colonne n°3 : valeurs du critère choisi par ordre décroissant ;
 - Colonne n°4 : valeurs du critère choisi cumulé croissantes ;
 - Colonne n°5 : valeurs du critère choisi cumulées croissantes en pourcentage ;
 - Colonne n°6 : pourcentages cumulés des produits étudiés.
- **Étape 2 :** Représenter graphiquement les données :
 - Dans un repère orthonormé, reporter les pourcentages cumulés des produits étudiés en abscisse, et les valeurs du critère choisi cumulé croissantes en pourcentage en ordonnée ;
 - Tracer la courbe reliant les points obtenus.
- **Étape 3 :** Tirer une conclusion et proposer une décision.

Le tableau de PARETO est alors représenté comme suit (Tableau 123)

Tableau 123 : Tableau de PARETO sur les prix unitaires des bétons

N° D'ORDRE	TYPE	Rc28	RÉFÉ- RENCES	PU DES BÉTONS	PU CUMULES CROISSANTS	PU CUMULES DES BÉTONS EN %	RÉFÉ- RENCES CUMULES EN %	ZONE
1	Q400	28,3	BFL ₉	580 332	580332	4,37%	4%	Zone A
2	Q400	29,1	BFL ₇	580 279	1160611	8,74%	8%	
3	Q400	27,9	BFL ₁₇	580 194	1740805	13,11%	13%	
4	Q400	28,3	BFL ₁₅	580 141	2320946	17,47%	17%	
5	Q400	40,9	BFL ₁₉	579821	2900767	21,84%	21%	
6	Q400	30,7	BFL ₁₃	579 772	3480539	26,20%	25%	Zone B
7	Q400	42,2	BFL ₁₁	579 719	4060258	30,57%	29%	
8	Q400	39,9	BFL ₂₁	579 634	4639892	34,93%	33%	
9	Q400	23,2	BO ₁	575957	5215849	39,27%	38%	

10	Q400	35,8	BFL ₁	565 963	5781812	43,53%	42%	Zone C
11	Q350	27,1	BO ₃	565 518	6347330	47,79%	46%	
12	Q350	29,6	BFL ₃	536243	6883573	51,82%	50%	
13	Q350	26,7	BFL ₅	535 373	7418946	55,85%	54%	
14	Q350	26,2	BO ₂	534846	7953792	59,88%	58%	
15	Q350	26,1	BFL ₈	533 932	8487724	63,90%	63%	
16	Q350	27,2	BFL ₆	533 879	9021603	67,92%	67%	
17	Q350	27,1	BFL ₁₆	533 794	9555397	71,94%	71%	
18	Q350	26,1	BFL ₁₄	533 741	10089138	75,96%	75%	
19	Q350	27,2	BFL ₁₂	533 372	10622510	79,97%	79%	
20	Q350	29,7	BFL ₁₀	533 319	11155829	83,99%	83%	
21	Q350	36,1	BFL ₂₀	533 234	11689063	88,00%	88%	
22	Q350	30,7	BFL ₁₈	533 182	12222245	92,02%	92%	
23	Q350	33,9	BFL ₂	530 646	12752891	96,01%	96%	
24	Q350	29,8	BFL ₄	529 776	13282667	100,00%	100%	

Ce qui nous donne la figure suivante (Figure 39)

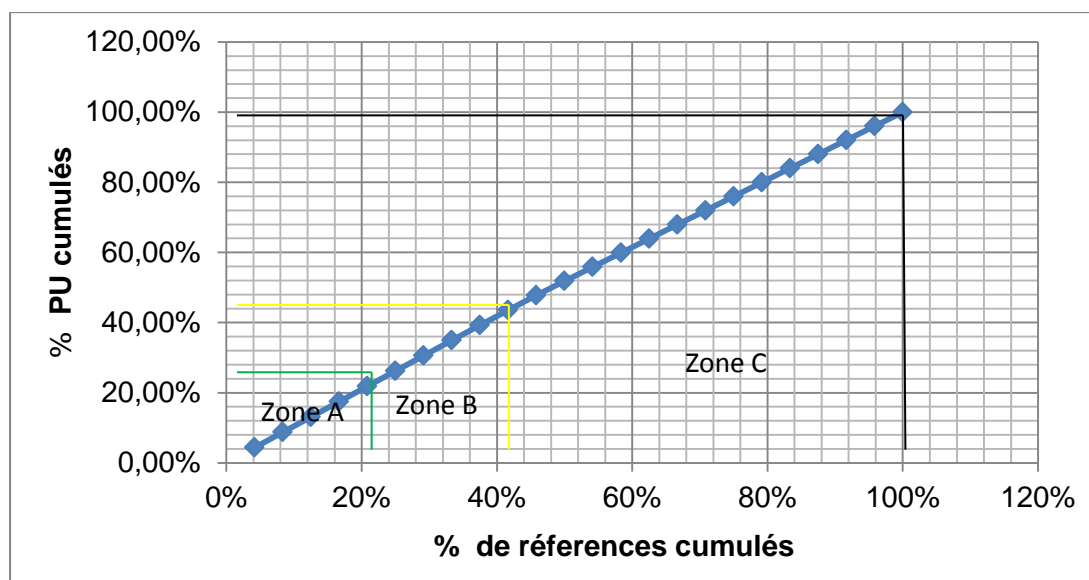


Figure 69 : Répartition des zones A, B et C des prix unitaires des bétons.

III. DISCUSSION

Les BFL apportent en général une économie de main d'œuvre : sans énergie de vibration et une réduction des nombres des ouvriers.

Les bétons qui se trouvent dans la zone A (BFL₉, BFL₇, BFL₁₇, BFL₁₅, BFL₁₉) et dans la zone B (BFL₁₃, BFL₁₁, BFL₂₁, BO₁, BFL₁) ont des coûts élevés. C'est normal puisqu'ils ont un dosage de ciment élevé de 400 Kg. Parmi ces bétons de type Q400, il est préférable de confectionner le béton fluide BFL₁₁ pour la construction d'un ouvrage d'art (pont en béton précontraint...). Ce béton formulé par des plans d'expériences présente un coût réduit, mais ayant une résistance en compression à 28 jours élevée.

Le BFL₁ et le BO₁ sont formulés avec un même type de matériaux. Le coût total pour confectionner un mètre cube de béton fluide BFL₁ diminue de 9994 Ar par rapport au BO₁. Le béton fluide BFL₁ apporte non seulement une bonne résistance en compression à 28 jours (35,8 MPa pour le BFL₁ et 23,2 MPa pour le BO₂), mais aussi une réduction du coût jusqu'à 1,73% par rapport au BO₁.

Les bétons qui se trouvent dans la zone C sont des bétons dosés à 350 Kg de ciment.

Ces bétons sont formulés à partir des matériaux identiques. Le béton cible est le béton fluide BFL₂₀ : il présente une résistance en compression à 28 jours qui s'élève à 36,1 MPa, mais un faible coût. Par rapport au BO₃, leur coût diminue de 32336 Ar dans un mètre cube. Donc, pour une structure de bâtiment qui nécessite 1000m³ de béton, il y aura une réduction de coût de 32 336 000 Ar, pour l'utilisation de BFL₂₀ au lieu d'utiliser le BO₃. La formule de BO3 est la formule, le plus utilisé sur chantier.

Mais n'oublions pas aussi que les BFL présentent de nombreux avantages sur la durabilité (plus compact), sur la maniabilité et sur les qualités physiques. Il est donc envisageable de confectionner un béton plus durable et plus facile à mettre en œuvre avec des coûts moins chers par rapport au BO.

Chapitre X : ENVIRONNEMENT ET BÉTONS FLUIDES

L'étude d'impact sur l'environnement consiste essentiellement à réduire au maximum l'ensemble des incidences physiques et socio-économiques d'une exploitation sur son environnement. La fabrication du béton n'a aucun impact grave sur le milieu humain.

I. DIVERS IMPACTS

1. L'Impact social

La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site,
- une diminution de la pénibilité des tâches,
- une réduction des risques d'accident.

L'analyse industrielle du matériau béton doit être complétée par les considérations sur le développement durable sous ses différents aspects :

2. Le bilan de CO₂

Le ciment est une source importante de gaz à effet de serre à cause de l'énergie nécessaire pour le fabriquer et aussi par le CO₂ libéré par le calcaire lorsqu'il est décomposé par calcination.

La fabrication du béton lui-même ne nécessite que peu d'énergie, car le malaxage se fait à froid. De plus, les matériaux utilisés étant, pour des raisons économiques, le plus possible des matériaux locaux, la réduction du transport de ces matériaux minimise l'impact sur les gaz à effet de serre. Enfin, l'utilisation d'additions peut aussi permettre de réduire le bilan de CO₂ du béton.

3. L'analyse du cycle de vie

Elle permet une vision globale de l'utilisation du matériau béton. Par exemple, pour un bâtiment, le bilan doit prendre en compte les matériaux utilisés pour le construire, mais aussi l'énergie nécessaire pour le chauffer, le climatiser, l'éclairer...

De plus, en fin de vie du bâtiment, les techniques de séparation des matériaux s'améliorant, le béton sera de plus en plus recyclé.

L'utilisation des BFL, diminue la pénibilité du travail et les dangers liés à la mise en place du béton, élimine le bruit pour les ouvriers et pour les riverains. Les eaux de lavage générées par la fabrication du béton sont recyclées. Enfin, le béton est lui-même un matériau permettant de confiner, d'enrober et de stocker les déchets.

II. MESURES D'ATTÉNUATION DES IMPACTS PROBABLES

Les mesures d'atténuation se définissent comme l'ensemble des moyens envisagés pour prévenir ou réduire l'importance des impacts sur l'environnement. L'étude doit fournir la liste des actions, ouvrages, dispositifs, correctifs ou modes de gestion alternatifs qui seront appliqués pour prévenir, atténuer ou éliminer les impacts négatifs du projet. Les mesures destinées à maximiser les retombées positives pourront aussi être mises en évidence. Les mesures peuvent être générales ou spécifiques. Les mesures générales seront destinées à atténuer les effets négatifs d'un projet pris dans son ensemble. Les mesures spécifiques viseront l'atténuation des impacts sur une composante de l'environnement en particulier. Des mesures typiques sont présentées au tableau 3. Les mesures générales et particulières doivent le cas échéant être intégrées au cahier des charges du projet et faire partie du plan de gestion environnemental.

Mesures générales

- Prévoir un mécanisme de concertation avec les populations locales pour favoriser l'insertion harmonieuse du projet dans l'environnement social et culturel ;
- Limiter le nombre de touristes pour respecter la capacité de charge des sites d'intérêt, des aires protégées et des aires historiques et patrimoniales importantes ;
- Former les guides et les tour-opérateurs pour concevoir des activités touristiques ayant le minimum d'impact sur l'environnement ;
- Respecter des périmètres de protection autour des zones sensibles ;

- Établir des calendriers de travail pour limiter les inconvénients dans et à proximité des zones sensibles pour la faune et les populations locales ;
- Favoriser les retombées économiques et l'embauche locales ;
- Compenser pour les impacts résiduels importants.

III. PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL

Le plan de gestion environnemental du projet comportant la surveillance et le suivi des sites affectés par le projet est une opération caractérisée d'abord par sa durée et par sa périodicité. Elle doit faire l'objet de propositions réalistes, notamment en regard des moyens disponibles, souvent limités. On doit s'appuyer sur les structures existantes, quitte à incorporer dans le coût des mesures d'atténuation les moyens adaptés à la tâche envisagée (formation du personnel, équipement).

Le programme de suivi doit définir les activités et les moyens prévus pour suivre les effets réels du projet sur certaines composantes environnementales dont les impacts n'ont pu être déterminés avec certitude, ou si des impacts importants sont attendus sur une composante particulièrement sensible. Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse doivent y être précisées.

Les dispositions qu'entend prendre le promoteur afin de protéger l'environnement, si cela s'avérait nécessaire en période d'exploitation du projet, doivent aussi être présentées.

Dans le cadre des projets touristiques, le programme de suivi doit, en particulier, mettre l'accent sur :

- Les effets attendus au pourtour ou dans les aires protégées et les zones sensibles ;
- La qualité des eaux de surface et souterraines ;
- L'efficacité des traitements des eaux usées et des dépôts de déchets solides et les risques de contamination du milieu ;
- L'évolution des phénomènes d'érosion et de sédimentation due au développement des infrastructures comme routes, ports, hôtels ;
- L'impact d'activités récréatives comme la plongée sous-marine, la pêche, l'usage des véhicules tout-terrain, l'accès aux lieux sacrés, etc. ;

Les effets sur l'économie (retombées et emplois) et la société locale et régionale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

À l'issue de cette recherche, des études sur les formulations et modélisations des résistances en compressions, des affaissements, des retraits et des compacités des bétons fluides à haute compacité nous ont été présentées.

Des essais en laboratoire sur les caractérisations des matières premières ont été effectués dans le but de connaître leur nature, leurs caractéristiques physiques et/ou chimiques.

Nous avons montré qu'un béton fluide à haute compacité avait une meilleure durabilité, une résistance mécanique plus élevée et une ouvrabilité plus aisée que le béton ordinaire. La diminution du dosage en ciment à $C = 350 \text{ Kg/m}^3$ nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants sur les résistances en compression des BFL, mais un peu plus faibles par rapport à celle du béton dosé à 400 Kg/m^3 de ciment (BFL₁).

En général, les BFL obtenus à partir de filler cipolin présentent des résistances en compression plus élevées par rapport aux BFL obtenues à partir de filler dolomie. Le superplastifiant rhéobuild 561, par rapport au sikaviscocrète tempo 12, permet d'obtenir une plus longue durée de maniabilité, mais est moins efficace du point de vue gain de résistance.

Cinq bétons fluides BFL₁, BFL₂, BFL₃, BFL₄ et BFL₅ ont été formulés par la méthode des volumes absolue. L'objectif est de connaître les paramètres de base nécessaires comme le rapport E/C, les dosages en granulats, les dosages en fillers et les dosages en superplastifiants. Ces derniers nous ont fourni une perception des fourchettes d'études des formulations des bétons fluides par des plans d'expériences.

Les plans factoriels complets à deux niveaux nous ont conduits à réaliser 16 essais de formulation dans un laboratoire pour pouvoir donner des informations très précises sur les BFLHC. Ces plans offrent également un cadre de modélisation rigoureux sur les caractéristiques des bétons, et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires. Des outils statistiques comme le test de Student et le test de Fischer Snedcor sont exploités pour valider ses modèles mathématiques.

Grâce à l'utilisation du logiciel Minitab 19.2, l'application DOA - plans factoriels complets à deux niveaux avec des valeurs codées et non codées nous a permis d'obtenir dix modèles mathématiques des comportements des bétons fluides à l'état frais et à l'état durci :

- deux modèles de résistance en compression à 7 jours

Pour les valeurs codées -1 et +1

$$R_{c07} = 19,755 + 2,215 C - 0,843 E + 0,590 rF + 1,656 rSp - 1,190 C^*E + 0,278 C^*rF + 0,190 E^*rF + 1,386 E^*rSp + 0,566 rF^*rSp - 0,830 C^*E^*rF$$

Pour les valeurs non codées

$$R_{c07} = 807 - 1,743 C - 3,66 E - 784 rF - 87,9 rSp + 0,00817 C^*E + 2,036 C^*rF + 3,487 E^*rF + 0,3824 E^*rSp + 9,06 rF^*rSp - 0,00916 C^*E^*rF$$

- deux modèles de résistance en compression à 28 jours

Pour les valeurs codées -1 et +1

$$R_{c28} = 31,098 + 2,313 C - 0,677 E + 3,584 rF + 1,032 rSp - 1,042 C^*E + 1,419 C^*rF - 0,518 E^*rF + 1,299 E^*rSp + 1,183 rF^*rSp - 0,878 C^*E^*rF + 0,988 E^*rF^*rSp$$

Pour les valeurs non codées

$$R_{c28} = 561 - 2,201 C - 2,077 E - 557 rF + 198,9 rSp + 0,00924 C^*E + 2,335 C^*rF + 2,128 E^*rF - 1,004 E^*rSp - 218,2 rF^*rSp - 0,00969 C^*E^*rF + 1,090 E^*rF^*rSp$$

- deux modèles d'affaissement

Pour les valeurs codées -1 et +1

$$ST = 18,7188 - 1,3437 C + 0,5938 E - 0,5938 rF - 1,2188 rSp + 0,9063 C^*E + 0,5937 C^*rSp - 0,0937 E^*rF - 0,4687 E^*rSp - 0,0312 rF^*rSp - 0,2813 C^*E^*rSp + 0,3438 E^*rF^*rSp$$

Pour les valeurs non codées

$$ST = 432 - 1,560 C - 1,565 E + 107,0 rF - 161,7 rSp + 0,00638 C^*E + 0,770 C^*rSp - 0,500 E^*rF + 0,560 E^*rSp - 83,0 rF^*rSp - 0,003103 C^*E^*rSp + 0,3793 E^*rF^*rSp$$

- deux modèles de retrait

Pour les valeurs codées -1 et +1

$$R[\%] = 0,10813 - 0,00313 C + 0,00437 E - 0,01688 rF - 0,00062 rSp + 0,00313 C^*E + 0,00188 C^*rF + 0,00938 E^*rF - 0,00687 E^*rSp -$$

$$0,00562 \text{ rF} \cdot \text{rSp} - 0,00688 \text{ C} \cdot \text{E} \cdot \text{rF} - 0,00688 \text{ E} \cdot \text{rF} \cdot \text{rSp}$$

Pour les valeurs non codées

$$\begin{aligned} \text{R}[\%] = & 11,38 - 0,02300 \text{ C} - 0,0512 \text{ E} - 8,88 \text{ rF} - 1,540 \text{ rSp} + 0,000103 \text{ C} \cdot \text{E} \\ & + 0,01680 \text{ C} \cdot \text{rF} + 0,0405 \text{ E} \cdot \text{rF} + 0,00759 \text{ E} \cdot \text{rSp} + 1,560 \text{ rF} \cdot \text{rSp} - \\ & 0,000076 \text{ C} \cdot \text{E} \cdot \text{rF} - 0,00759 \text{ E} \cdot \text{rF} \cdot \text{rSp} \end{aligned}$$

- Et deux modèles de compacité

Pour les valeurs codées -1 et +1

$$\begin{aligned} \text{C}[\%] = & 95,634 + 0,691 \text{ C} + 0,073 \text{ E} + 1,057 \text{ rF} - 0,368 \text{ rSp} - 0,579 \text{ C} \cdot \text{rF} - 0,114 \text{ E} \cdot \text{rF} \\ & - 0,659 \text{ E} \cdot \text{rSp} - 0,503 \text{ rF} \cdot \text{rSp} + 0,336 \text{ E} \cdot \text{rF} \cdot \text{rSp} \end{aligned}$$

Pour les valeurs non codées

$$\begin{aligned} \text{C}[\%] = & -159,2 + 0,1435 \text{ C} + 0,851 \text{ E} + 156,6 \text{ rF} + 148,8 \text{ rSp} - 0,0927 \text{ C} \cdot \text{rF} - 0,494 \text{ E} \cdot \text{rF} \\ & - 0,645 \text{ E} \cdot \text{rSp} - 88,6 \text{ rF} \cdot \text{rSp} + 0,370 \text{ E} \cdot \text{rF} \cdot \text{rSp} \end{aligned}$$

Le logiciel Minitab 19.2 permet de tracer la droite de Henry, le diagramme de PARETO, le diagramme factoriels, et le graphique de contours

Ces diagrammes permettent de mettre en évidence l'importance des constituants de béton dans les modèles. Il permet de dire que :

- La résistance en compression des bétons fluides à 7 jours s'évalue en utilisant le ciment et le mélange des superplastifiants Sp_1 et Sp_2 . Leurs présences améliorent la résistance en compression du béton ;
- Il faut tenir compte au ciment et aux fillers pour avoir des bétons plus résistants : l'augmentation de la résistance en compression des bétons fluides à 28 jours vient de ciment et d'utilisation en excès de filler cipolin par rapport au filler dolomie.
- Le ciment C, les superplastifiants (Sp_1 et Sp_2) sont les éléments le plus importants dans le modèle d'affaissement des bétons fluides.
- La présence des fillers (F_C et F_D) diminue le retrait du béton. L'ajout en excès de filler cipolin par rapport au filler dolomie permet de nous donner un faible retrait des bétons fluides.
- Les fillers surtout le filler cipolin et le ciment C sont les éléments les plus importants dans l'évolution de la compacité des bétons fluides

Les modèles développés peuvent être employés pour sélectionner les mélanges les plus économiques (bonne qualité de béton à faible coût), tout en évitant de réaliser un grand nombre d'essais pour un mélange optimal et qui répond aux cahiers de charges.

Ces modèles peuvent être développés et améliorés en prenant en considération d'autres paramètres comme l'influence du température et autre.

Bref, les résultats sur les nouvelles formulations des BFLHC que nous avons réalisés ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'optimisation des BFL et aident à leur diffusion auprès de tous les acteurs de la construction en béton.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Herman RAZAFINDRAVELO**, « les bétons auto plaçant : influence du type de granulat, d'adjuvant et d'ajout », Thèse de doctorat, Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; 2013. 32p ; 72p.
- [2] **DREUX G., FESTA J.**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, Paris, 1998, 3p.
- [3] **PAPADAKIS, Industrie de la Chaux du ciment et du plâtre; Dunod - 1970**
- [4] **RANJIVAHARIMANANA Lalao Évelyne**, « Étude comparative des méthodes de formulation de béton : les méthodes de Dreux–Gorisse et Baron-Ollivier », mémoire de fin d'études en vue de l'obtention de diplôme d'Ingénieur Matériaux, 2011, 75p
- [5] **ANDRIAMPARANY Flavien Razafiarison** ; informatisation de la formulation du béton inspiré de méthode de FAURY; Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; Université d'Antananarivo ; Octobre 2006, 60p.
- [6] **Faury J.** « Le béton », 2p.
- [7] **FARES Hanaa** ; Propriété mécanique et physico-chimique de bétons autoplaçants exposés à une température élevée " ; Thèse de Doctorat, Décembre 2009, 50p.
- [8] **RASOLOFOHARITIANA Rado Nantenaina** " Contribution à l'étude des Bétons autoplaçants"; Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; Université d'Antananarivo ; 2009. 40p.
- [9] **Béton et constituants du béton** ; Spécifications et méthodes d'essais du béton, tome 1 ; recueil de norme Françaises 1995. AFNOR. 4 è édition.
- [10] **ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain**, « Contribution à l'Étude de béton fluide à haute compacité : Utilisation de fine d'ajout de type calcaire », Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique, 2013, 44p.

- [11] **ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain**, « Contribution à l'étude des bétons fluides : Formulations et caractérisations » ; Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention de diplôme de'études approfondies en Sciences des Matériaux et Métallurgie, 2014, 67p.
- [12] **ANDRIANASOLOMAHEFA Rovatiana Salema**, Étude géotechnique en laboratoire: analyse,interprétation,et utilisations des résultats ; 2005 ; 21p,22p
- [13] **RAMANANTSOA Felix**, « Projet de rationalisation de l'exploitation de dolomie de Ihenikenina », Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Mines Écoles Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, 1988
- [14] **DAVID Lozach**, **Illustration de la couverture : Fiches Technique Tomes 2**, "Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre", CIMbeton (Centre d'information sur le ciment et ses applications), édition octobre 2006, 36p.
- [15] **YAMMINE Joumana**; "Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre Formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques"; Thèse de Doctorat, version 1 - 11 May 2010, 50p.
- [16]. **GOUPY JACQUES • CREIGHTON LEE (2006)** ; Introduction aux plans d'expériences, les mélanges, Dunod, Paris, 2001, 2006,304 p.
- [17]. **SADO G. et SADO M.C. (1991)** ; Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, Afnor Technique Ed., Paris.
- [18]. **GHOMARI Fouad**, « **Matériaux de construction** » ; université aboubekrbelk faculté de technologie de technologie ; départementde génie civil. 25p, 28p, 51p.
- [21] **BENAMARA Dalila & BOUZIDIMEZGHICHE**, "Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux « BHP »", Courrier du Savoir – N°10, Avril 2010, 14p.
- [23]. **AYAD MOHAMED et BARKA YASSINE**, Modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences, Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Ingénieries des structures, Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, faculté de technologie, département de Génie Civil.

[24] TALEB O., GHOMARI F., BOUKLI HACENE S.M.A., (2012) : Modélisation des bétons autoplaçants par les plans d'expérience, 1st International Conférence on Civil Engineering, 8 – 9 May 2012, Laghouat University, Algeria.

RÉFÉRENCE WEBOGRAPHIE

[22] <https://cours.etsmtl.ca/TCH025/Notes%20de%20cours/Hiver%202012/Cours-B%C3%A9tonETS.pdf>.

[24] http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_cinq.html.

[20] http://fsi.univ-tlemcen.dz/tp/los_angeles.pdf

[19] http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme13.html

[26] [Support .minitab.com/minitab/19](http://support.minitab.com/minitab/19)

[27] <http://www.minitab.com/support/>

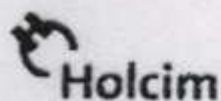
[28] <http://www.minitab.co.uk/>

[29] <http://www.minitab.fr/>



ANNEXES

Annexe 1: Fiche technique du ciment CEM II/A 42,5n Holcim



Holcim (Madagascar)
1 Bis Rue P. Lumumba
Tananarive
101 Antananarivo

Tél: + 261 20 22 239 78
Fax: + 261 20 22 563 98
holcim.mad@holcim.com

Fiche Produit

Manda

Fabriqué à Madagascar (Terminal Toamasina)

Mise à jour le 8/02/2013

Ciment composé CEM II/A-V 42,5 N

Composition (en %)

Constituant		Régulateur de prise	
Clinker (K).....	95 - 100	Gypse.....	4,5
Constituants secondaires.....	0 - 5		
Cendres volantes (V)	6 - 20		

Composition Chimique du ciment

(valeurs moyennes en%)

Usine de production Terminal Toamasina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	PaF	RI
	22,74	7,67	3,37	55,27	2,77	2,15	3,57	14,63
Valeurs exigées : NM 031-1 *						≤ 3,5%		1,46

Caractéristiques physiques

(valeurs moyennes)

Usine de production terminal Toamasina	Résistances mécaniques mortier (MPa)			Finesse	Début de prise (mn)	Stabilité (mm)
	2j	7j	28j	Blaine (cm ² /g)		
	19,80	31,95	47,05	3400	169	0
Valeurs exigées : NM 031-1 *	≥ 10		≥ 42,5 et ≤ 62,5		≥ 60	≤ 10

- *NM 031-1 Normes malagasy édition de janvier 2010
- Laboratoire Holcim (Madagascar) agréé par le LNTPH pour la période novembre 2012 - Novembre 2013

Annexe 2 : Carrière PK 18 RN4 de la société SCB S.A Madagascar



Annexe 3 :Site de prélèvement de cipolin



Annexe 4: Fiche technique de la dolomie D40 de Prochimad



Tel : 261 20 22 230 08

Fax : 261 20 22 550 45

E-mail : fdv.prochimad@blueline.mg

8, Rue Ranizanabololona Antanimena

B.P. 3145

Antananarivo 101

MADAGASCAR

FICHE TECHNIQUE

CARBONATE DOUBLE DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM (DOLOMIE)

Formule

$\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$

Caractéristiques physiques:

Aspect	:	Poudre fine
Couleur	:	Blanche
Densité	:	2,7
Refus au tamis 350	:	0,1 % (30/40 microns)
Granulométrie	:	40 microns, 20 microns, 10 microns, fine

Composition chimique :

Perte au feu	:	28 % dont
	:	CO ₂ : 20 %
Humidité	:	0,1 %
SiO ₂	:	15,6 %
Fe ₂ O ₃	:	0,2 %
TiO ₂	:	- traces
Al ₂ O ₃	:	1,6 %
MgO	:	22,6 %
CaO	:	30,8 %
P.H	:	9 – 9,2

Alcalinité : équivaut à 1,7g de NaOH par Kg de dolomie maximale.

Utilisation : Charge pour peinture

Conditionnement : Sac de 50 kg
(Marquage sac : D40, D20, D10, DF)

Annexe 5: Fiche technique du superplastifiant viscocrète tempo12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



Caractéristiques

Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	<p>Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.</p> <p>En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.</p>
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Minitel 3613, code SIKASECUR ou sur Internet www.sika.fr
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Annexe 6 : Fiche technique de superplastifiant rhéobuild 561

RHEOBUILD® 561

Superplastifiant, haut réducteur d'eau



EN 934.2

Marque NF
cf. Rp NF 085

Conforme à ASTM C 494 - 79 types B, D et G, UNI 7102, 7104-75 et 8145.

Description

Le RHEOBUILD 561 est composé de polymères synthétiques spécialement formulés pour conférer au béton des propriétés rhéoplastiques.

Un béton rhéoplastique est un béton fluide présentant à l'essai du cône d'Abrams un affaissement d'au moins 20 cm ; il s'écoule facilement sans ségrégation et son rapport eau/ciment est le même que celui d'un béton sec de 2,5 cm d'affaissement sans adjuvant.

Domaines d'applications

Le RHEOBUILD 561 améliore considérablement les propriétés du béton frais et du béton durci.

Le RHEOBUILD 561 a déjà été utilisé pour les ouvrages suivants :

- Radiers de fondation pour centrales nucléaires, turbogénérateurs, laminoirs, chantiers navals.
- Béton pour bétonnières portées quand le trajet dure plus d'une heure.
- Ouvrages et structures coulés quand le béton est pompé sur une distance supérieure à 200 m, ou à une grande hauteur.
- Ouvrages en béton armé et précontraint dans des régions où la température dépasse normalement 40°C, avec une humidité relative faible.

Propriétés

- Béton de masse.
 - Béton prêt-à-l'emploi.
 - Transport sur de longues distances.
 - Béton pompé.
 - Béton pompé sur de longues distances.
 - Mise en place dans les climats chauds.
- Permet d'obtenir :
- Des pointes thermiques minimales.
 - Un écoulement maximum du béton pendant de longues périodes.
 - Une grande facilité de pompage.

- Un retard de prise et une plus grande durée de maniabilité.
- Une grande fiabilité.
- Des résistances élevées à la rupture.
- Une bonne imperméabilité.
- Une bonne durabilité.

Caractéristiques

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| • Aspect | liquide |
| • Couleur | brun |
| • Masse volumique à + 20°C (MA 002) | 1,17 g/cm ³ ± 0,03 |
| • Teneur en chlorure (MA 004) | < 0,1 % |
| • pH (MA 003) | 8,5 ± 1,5 |
| • Point de congélation (ITM 3005) | - 5°C |

Maniabilité

Grâce au RHEOBUILD 561, le béton rhéoplastique reste maniable pendant environ 3 heures à 20° C et pendant 1 heure à 40°C. La durée exacte du maintien de la maniabilité dépend non seulement de la température, mais aussi du type de ciment utilisé, de la nature des granulats et de la méthode de transport. Pour ce qui concerne la cure du béton, il est recommandé de prévoir des méthodes appropriées, surtout dans les pays à climat sec.

Mode d'emploi

L'incorporation peut se faire :

- Soit au cours de la fabrication du béton, dans ce cas le RHEOBUILD 561 est introduit dans le malaxeur en même temps que l'eau de gâchage. L'effet réducteur d'eau ou fluidifiant est optimal si l'adjuvant est ajouté lorsque le béton est déjà mouillé avec 50 à 70% de l'eau de gâchage ;
- Soit sur le chantier, dans le cas d'un béton prêt-à-l'emploi : ajouter le RHEOBUILD 561 directement dans le camion malaxeur, avant déversement, et remalaxer à grande vitesse à raison d'une minute/m³ (avec un minimum de 5 mn).

RHEOBUILD® 561

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.
Proscrire l'agitation par air comprimé.

Dosage

Plage d'utilisation

0,4 % à 1,5 % du poids de ciment soit 0,34 L à 1,28 L pour 100 kg de ciment.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

Stockage

Conserver le RHEOBUILD 561 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

MBT France a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie GERLING FRANCE. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe V.I.A.G. souscrite auprès des sociétés suisses d'assurances WINTERTHUR et de GERLING KONZERN de Zürich.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences MBT France.

MBT France

Z.I. Petite Montagne Sud
10, rue des Cévennes
Lisses
91017 Evry Cedex

Tél. : 01 69 47 50 00
Fax : 01 60 86 06 32

Site Internet : <http://www.mbt.fr>

Pour toute information complémentaire, consulter notre fiche de données de sécurité sur :

- Minitel : 08 36 05 10 12

- ou sur notre site Internet



Annexe 7: Description des normes relatives au béton

NF P 18 – 305 décembre 1981	Béton prêt à l'emploi préparé en usine
XPP 18 – 305 août 1996	Béton (béton prêt à l'emploi)
NF 18 – 400 décembre 1981	Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques
NF 18 – 404 décembre 1981	Essais d'étude de convenance et de contrôle confection et conservations des éprouvettes.
NF 18 – 405 décembre 1981	Essais d'information confection et conservations des éprouvettes
NF 18 – 406 décembre 1981	Essais de compression
NF 18 – 407 décembre 1981	Essais de flexion
NF 18 – 408 décembre 1981	Essais de fendage
NF 18 – 421 décembre 1981	Mise en place par microtable vibrante
NF 18 – 422 décembre 1981	Mise en place par aiguille vibrante
NF 18 – 423 décembre 1981	Mise en place par piquage
NF 18 – 451 décembre 1981	Essai d'affaissement
NF 18 – 416 décembre 1981 cylindriques	Surfaçage au soufre des éprouvettes
P 18 – 416 septembre 1994	Surfaçage au soufre des éprouvettes
P 08 – 500 Mai 1982 verbal d'essai des matériaux	Condition générale minimale d'un procès-
P 18 – 417 Décembre 1989	Mesure de la dureté de surface par rebondissement à l'aide d'un scléromètre.
P 18 – 418 Décembre 1989	Auscultation sonique
P 18 – 415 Décembre 1994	Boite à sable pour essai de compression des éprouvettes cylindriques
XP P 18 – 303 Aout 1999	Eau de gâchage pour béton
XP P 18 – 303 Mai 1941	Eau de gâchage pour béton

Annexe 8 : Prix unitaires des bétons fluides

➤ Prix unitaire du BFL₃

BÉTON ORDINAIRE BFL ₃							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	0	400	0			
Filler Dolomie F _D	Kg	193	420	81060			
Superplastifiant Sp ₁	L	6	650	3900			
Superplastifiant Sp ₂	L	0	550	0			
TOTAL MATÉRIAUX							354172,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			369822,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			536 243

➤ Prix unitaire du BFL₄

BÉTON ORDINAIRE BFL ₄							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	193	400	77200			
Filler Dolomie F _D	Kg	0	420	0			
Superplastifiant Sp ₁	L	0	650	0			
Superplastifiant Sp ₂	L	6	550	3300			
TOTAL MATÉRIAUX							349712,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			365362,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			529 776

➤ Prix unitaire de BFL₅

BÉTON ORDINAIRE BFL ₅							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	0	400	0			
Filler Dolomie F _D	Kg	193	420	81060			
Superplastifiant Sp ₁	L	0	650	0			
Superplastifiant Sp ₂	L	6	550	3300			
TOTAL MATÉRIAUX							353572,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSES			369222,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			535 373

➤ Prix unitaire du BFL₇

BÉTON ORDINAIRE BFL ₇							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							384542,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			400192,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			580 279

➤ Prix unitaire du BFL₈

BÉTON ORDINAIRE BFL ₈							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							352578,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			368228,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			533 932

➤ Prix unitaire du BFL₉

BÉTON ORDINAIRE BFL ₉							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							384578,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			400228,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			580 332

➤ Prix unitaire du BFL₁₀

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₀							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							352156,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			367806,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			533 319

➤ Prix unitaire du BFL₁₁

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₁							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							384156,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K ₁	1,45			DÉBOURSE			399806,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K ₁ / R			579 719

➤ Prix unitaire du BFL₁₂

BÉTON ORDINAIRE BFL12							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							352192,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			367842,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 372

➤ Prix unitaire du BFL₁₃

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₃							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	3,5	650	2275			
Superplastifiant Sp ₂	L	3,5	550	1925			
TOTAL MATÉRIAUX							384192,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			399842,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			579 772

➤ Prix unitaire du BFL₁₄

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₄							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							352447,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			368097,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 741

➤ Prix unitaire du BFL₁₅

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₅							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							384447,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			400097,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			580 141

➤ Prix unitaire du BFL₁₆

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₆							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATE-RIVAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							352483,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			368133,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 794

➤ Prix unitaire du BFL₁₇

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₇							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	96,5	400	38600			
Filler Dolomie F _D	Kg	96,5	420	40530			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							384483,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			400133,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			580 194

➤ Prix unitaire du BFL₁₈

BÉTON ORDINAIRE BFL ₁₈							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATE-RIVAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,203	1250	253,75			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							352061,5
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			367711,5
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 182

➤ Prix unitaire du BFL₂₀

BÉTON ORDINAIRE BFL ₂₀							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	350	640	224000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							352097,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSE			367747,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			533 234

➤ Prix unitaire du BFL₂₁

BÉTON ORDINAIRE BFL ₂₁							
DÉSIGNATION	U	QUANTITÉS	PRIX UNITAIRE [Ar]	MATÉRIAUX [Ar]	MAIN D'ŒUVRE [Ar]	MATERIE [Ar]L	TOTAL [Ar]
A - MATÉRIAUX							
Ciment	Kg	400	640	256000			
Eau	m3	0,232	1250	290			
Gravillon g ₂	m3	0,141	65000	9154,229			
Gravillon G	m3	0,141	80 000	11288,34			
Sable Sr ₂	m3	0,252	44000	11067,67			
Sable Sc	Kg	0,245	55 000	13448,5			
Filler Cipolin F _C	Kg	115,8	400	46320			
Filler Dolomie F _D	Kg	77,2	420	32424			
Superplastifiant Sp ₁	L	4,2	650	2730			
Superplastifiant Sp ₂	L	2,5	550	1375			
TOTAL MATÉRIAUX							384097,7
B - MAIN D'ŒUVRE							
Chef d'équipe	h	0,5	2000		1000		
Maçon	h	1	1800		1800		
Manœuvre	h	1,5	1500		2250		
TOTALE MAIN D'ŒUVRE							5050
C - MATÉRIEL							
Bétonnière	h	1	7000			7000	
Pervibrateur	h	0	0			0	
Outillage de maçon	h	1,2	3000			3600	
TOTAL MATÉRIEL							10600
COEFFICIENT K1	1,45			DÉBOURSES			399747,7
RENDEMENT R	1			PRIX UNITAIRE = D * K1 / R			579 634

Annexe 9:Table de distribution de STUDENT

DL / P	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	10	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,929
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,263	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,961	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,137	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,649
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,656
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
80	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
Infini	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

Annexe 10:Table de FISHER Snedcor

*	DL1 = 1		DL1 = 2		DL1 = 3		DL1 = 4		DL1 = 5	
DL2	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01
1	161,4	4052,00	199,5	4999,00	213,7	3403,00	224,6	5625,00	230,2	5764,00
2	18,51	98,49	19,00	99,00	19,16	99,17	19,25	99,25	19,30	99,30
3	10,13	34,12	9,55	30,81	9,28	29,46	9,12	28,71	9,01	28,24
4	7,71	21,20	6,94	18,00	6,59	16,69	6,39	13,98	6,26	13,32
5	6,61	16,26	5,79	13,27	5,41	12,06	5,19	11,39	5,03	10,97
6	3,99	13,74	3,14	10,91	4,76	9,78	4,53	9,13	4,39	8,75
7	3,39	12,23	4,74	9,35	4,33	8,43	4,12	7,85	3,97	7,45
8	3,32	11,26	4,46	8,63	4,07	7,39	3,84	7,01	3,69	6,63
9	5,12	10,56	4,26	8,02	3,86	6,99	3,63	6,42	3,48	6,06
10	4,96	10,04	4,10	7,56	3,71	6,33	3,48	5,99	3,33	5,64
11	4,84	9,65	3,98	7,20	3,59	6,22	3,36	5,67	3,20	5,32
12	4,75	9,33	3,88	6,93	3,49	5,93	3,26	5,41	3,11	5,06
13	4,67	9,07	3,80	6,70	3,41	5,74	3,18	5,20	3,02	4,86
14	4,60	8,86	3,74	6,31	3,34	5,56	3,11	5,03	2,96	4,69
15	4,34	8,68	3,68	6,36	3,29	5,42	3,06	4,89	2,90	4,56
16	4,49	8,53	3,63	6,23	3,24	5,29	3,01	4,77	2,85	4,44
17	4,45	8,40	3,59	6,11	3,20	5,18	2,96	4,67	2,81	4,34
18	4,41	8,28	3,53	6,01	3,16	5,09	2,93	4,58	2,77	4,25
19	4,38	8,18	3,52	5,93	3,13	5,01	2,90	4,50	2,74	4,17
20	4,35	8,10	3,49	5,85	3,10	4,94	2,87	4,43	2,71	4,10
21	4,32	8,02	3,47	5,78	3,07	4,87	2,84	4,37	2,68	4,04
22	4,30	7,94	3,44	5,72	3,05	4,82	2,82	4,31	2,66	3,99
23	4,28	7,88	3,42	5,66	3,03	4,76	2,80	4,26	2,64	3,94
24	4,26	7,82	3,40	5,61	3,01	4,72	2,78	4,22	2,62	3,90
25	4,24	7,77	3,38	5,37	2,99	4,68	2,76	4,18	2,60	3,86
26	4,22	7,72	3,37	5,33	2,98	4,64	2,74	4,14	2,39	3,82
27	4,21	7,68	3,33	5,49	2,96	4,60	2,73	4,11	2,37	3,78
28	4,20	7,64	3,34	5,43	2,95	4,57	2,71	4,07	2,56	3,75
29	4,18	7,60	3,33	5,42	2,93	4,34	2,70	4,04	2,34	3,73
30	4,17	7,56	3,32	5,39	2,92	4,31	2,69	4,02	2,53	3,70
40	4,08	7,31	3,23	5,18	2,84	4,31	2,61	3,83	2,43	3,31
60	4,00	7,08	3,15	4,98	2,76	4,13	2,32	3,65	2,37	3,34
120	3,92	6,85	3,07	4,79	2,68	3,93	2,43	3,48	2,29	3,17
Infini	3,84	6,64	2,99	4,60	2,60	3,78	2,37	3,32	2,21	3,02

**Annexe 11: Extraits de la série des prix 1962 donnant les temps unitaires des
Ouvriers, des matériels et outillages à Madagascar**

N° DES PRIX	DÉSIGNATION	UNIT É	QUANTITÉ S	TU D'OUVRIE R	TU DE MANŒUVR E
3340+326 3	Béton dosé à 150kg/m3 (m3)				
	Chef d'équipe	h		0,95	
	Maçon	h		1,9	
	Manœuvre	h			9,5
	Bétonnière	h	0,8		
	Pervibrateur	h	0,8		
	Outillage de maçon	h	1,9		
3344+326 4	Béton dosé à 250kg (m3)				
	Chef d'équipe	h		1,95	
	Maçon	h		3,9	
	Manœuvre	h			9,5
	Bétonnière	h	1,95		
	Pervibrateur	h	1,95		
	Outillage de maçon	h	3,9		
3340+326 6	Béton dosé à 300kg/m3 (m3)				
	Chef d'équipe	h		0,8	
	Maçon	h		1,9	
	Manœuvre	h			9,5
	Bétonnière	h	0,8		
	Pervibrateur	h	0,8		
	Outillage de maçon	h	1,9		
3686+326 8	Béton dosé à 350kg/m3 (m3)				
	Chef d'équipe	h		2,5	
	Maçon	h		5	
	Manœuvre	h			16
	Bétonnière	h	2,5		
	Pervibrateur	h	2,5		
	Outillage de maçon	h	5		
3930+325 5	Béton dosé à 400 Kg (m3)				
	chef d'équipe	h		2,5	
	Maçon	h		2,5	
	Manœuvre	h			16
	Outillage de maçon	h	5		

Annexe 12: Article de publication sur la formulation des bétons fluides à haute Compacité

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF HIGH-COMPACT FLUID CONCRETES: FORMULATIONS AND CHARACTERIZATIONS

ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain¹, RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely²

1 PhD student, SMM, ED- INGE, Antananarivo, Madagascar

2 Thesis director and Laboratory Manager, SMM, ED- INGE, Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

A more ambitious study on the formulations of high-compact fluid concretes was shown to us. The use of other concrete components such as dolomite, cipolin, new aggregates and superplasticizers differentiates the fluid concretes in this study from those of conventional ordinary concrete.

The objective of this work was therefore to give clear answers to the search for the best composition of fluid concretes with the important presence of the two types of fines, the two types of sand and the two types of superplasticizers in this composition. The formulations of fluid concretes are distinguished by a greater volume of paste (related to the methodology used), the use of superplasticizers in greater quantities in relation to the cement. All these formulations are then characterised using specific tests to verify their ability to comply with the recommendation and standard for fluid concretes.

The determination of these characteristics of the raw materials also allowed us to choose the formulation methods. The DREUX GORISSE method was used for the formulation of ordinary concretes, which are control concretes. The method of absolute volumes is also carried out at first sight, in order to have a pre-formulation adapted to fluid concretes.

A characterization of fluidity and capacity of passage between reinforcements at the concrete scale provides physical bases for the phenomena involved in the transition between an ordinary consistency concrete and a fluid concrete, and brings a better understanding of the formulation modifications and their consequences.

Keyword: *Concretes, Superplasticizers, Cipolin, Dolomite, Fillers, Formulation, Compactness, Compressive strength, Compactness, Shrinkage, Workability, Durability.*

1. INTRODUCTION

Fluid concretes are concretes capable of flowing under their own weight, whatever the containment of the medium, and remain homogeneous during flow (absence of dynamic segregation) and in place (absence of static segregation). Fluid concretes have been developed over the last twenty years or so. They are still currently classified as new ranges of concretes because more and more attention is paid to their formulation [1].

The specificity of fluid concretes compared to traditional concretes lies in the fact that they are extremely fluid and do not require vibration to be used. Compacting under the effect of their own weight, they can be poured in areas with a high level of reinforcement or in areas of complex and difficult to access architecture [2].

Different formulations are adopted in order to be able to compare the fluidity, durability, mechanical performance and cost price of concrete.

The main objective of this work is to formulate fluid concretes using the absolute volume method. In this case, we tried to adopt new formulas with raw materials that will specify these fluid concretes

2. RAW MATERIAL CHARACTERIZATIONS [3][4]

2.1 Cement

Throughout the experiment, MANDA CEM II class 42.5 cement from HOLCIM Madagascar was used. It is sold in all hardware stores in a 50 Kg bag. Its relative density is 3,1 and its Blaine SSB surface is equal to 3400 [cm²/g] and a beginning of setting of 169 [mn]. Its Alumina Module (AM), Silica Module (SM) and Lime Module (LM) values are 1.70, 1.85 and 92.55 respectively.

2.2 Aggregates

The quarry sands Sc used, come from the quarry of the company SCB of the RAJABALY group which is located on the RN4 of the PK 18 located in Anosiala - District of Ambohidratrimo.

For the river sands, one comes from the Ikopa Sr1 river taken from Anosizato, near the Silver Star Hotel. The other comes from the Sisaony Sr2 river at the entrance of the Ambatofotsy bridge in the direction of Ampitatafika. Crushed gravel g1 class 5/12.5 from the Vontovorona artisanal quarry and crushed gravel g2 class 5/15, G class 5/25 from the open-cast quarry operated by the SCB company (PK18 RN4) are used. These pebbles have a more or less concave shape. They come from the crushing of a granitic rock. The g2 (5/15) and G (5/25) gravels have a coefficient of Los Angeles LA = 25 in granular class 10/25. They are respectively of the category 0.19 and 0.20 (volumetric coefficient). The shapes are therefore tolerable. The gravel from the Vontovorona g1 artisanal quarry has a coefficient of Los Angeles LA = 30, less resistant to shocks than the gravel from the SCB quarry.

The river sands Sr1 and Sr2 used have a modulus of fineness equal to 2.9 and 3.1 respectively. These are coarse sands. The modulus of fineness of the Sc quarry sand is 2.3; a little fine compared to the river sands. These are spread sands (Cu>2), tolerable in the formulation. The aggregates are characterized by their absolute densities σ [T/m³] and its sand equivalents ES [%] (table 1).

Table -1 : Absolute densities σ [T/m³] and ES sand equivalents [%] of aggregates

Sr 1		Sr 2		Sc		g1	g2	G
σ [T/m ³]	ES[%]	σ [T/m ³]	ES[%]	σ [T/m ³]	ES[%]	σ [T/m ³]	σ [T/m ³]	σ [T/m ³]
2,578	76	1,463	2,627	1,505	2,654	2,618	2,613	2,608

Their sieve size analysis is shown in figure

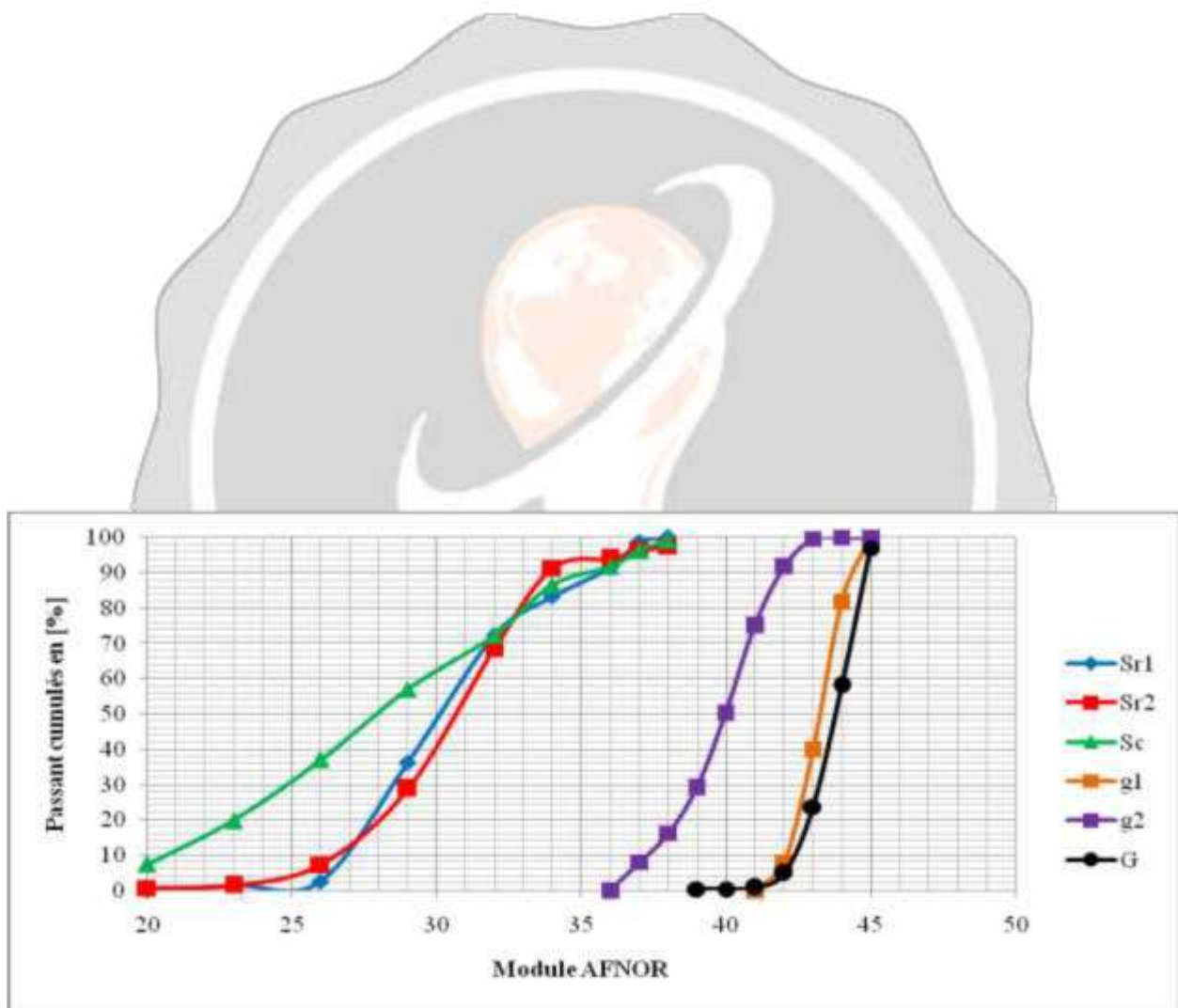


Fig - 1: Particle size curves of aggregates

2.3 Les fillers

2.3.1 Filler cipolin (F_{Cp})

The white cipolin rock from the HOLCIM quarry in IBITY is finely crushed by the ball mill for three days continuously in order to obtain great fineness. The mill used is the ball mill of the CNRIT laboratory.

The cipolin filler used as an additive in concrete is obtained by sieving on a 50 μm opening sieve. The cipolin filler has an absolute density of 2.846 [T/m³] and a Blaine SSB surface area of 3500 [cm²/g]. The major chemical elements in the cipolin filler are given in Table 2.

Table -2: Major chemical elements in cipolin

SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	SO ₃ [%]	P.F. [%]
10,75	0,1	0,69	50,38	0,53	0,2	0,13	0,11	35,23

2.3.2 Filler dolomie (F_D)

Dolomite is classified geologically as detrital rock and rocks of hydrothermal origin (precipitation from marine waters).

The already pulverized dolomite produced by PROCHIMAD from the Ihenikenina quarry is marketed in the form of 50 kg bags and is designated "Dolomite D40". ($D \leq 40 \mu\text{m}$). Its absolute density is 2.721 [T/m³] and its Blaine SSB surface area is 3300 [cm²/g]. The major chemical elements in the Dolomite filler are given in Table 3.

Table -3: Major Chemical Elements in Filler Dolomite (FD)

SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]
15,6	0,2	1,6	30,8	22,6

2.4 Water

JIRAMA tap water is used for mixing concrete. The water must be free of organic matter as this reduces the mechanical strength of the concrete. The characteristics of JIRAMA (JIRO SY RANO MALAGASY) water are given in the following table 4.

Table - 4 : Characteristics of JIRAMA water

Insoluble	Dissolved matter [mg/l]	Alkali carbonates + bicarbonates [%]	Sulphates SO ₃	Sulphites S [%]	Sugars [%]	P ₂ O ₃ [%]	NO ₃ [%]	Zn [%]
0	0,0004	0,0028	0	0	0	0	0	0

2.5 Superplasticizers

2.5.1 Sika®viscocrete®tempo12 (Sp₁)

Sika®ViscoCrete®Tempo 12 is a versatile, high water-reducing superplasticizer that improves stability, limits concrete segregation and makes formulations less susceptible to water and component variations.

The product has been supplied by MADECASSE who is the authorized distributor of Sika products in Madagascar and its characteristics and application conditions are shown in Tables 5 and 6 below.

Table -5: Characteristics of the superplasticizer sika ®viscocrete®tempo12

Aspect	Density	pH	Content Na ₂ O eq-	Dry extract	Content Cl-
Light brown liquid	1,06 ± 0,01	6 ± 1	≤ 1%	30,2 ± 1,3 %	≤0,1%

Table -6: Application conditions for sika ®viscocrete®tempo12 superplasticizer

Typical range of application	Recommended range of use
0.4 to 1.5% of the weight of the cement	0.2 to 3% of the weight of the cement depending on the fluidity and performance required

2.5.2 Le rhéobuild 561 (Sp₂)

Rheobuild 561 is also a water-reducing superplasticizer that significantly improves the properties of both fresh and hardened concrete. Rheobuild 561 superplasticizer was supplied by the company BATPRO which is the authorized distributor of BASF products in Madagascar.

The characteristics and application conditions of Rheobuild 561 are shown in tables 7 and 8 below.

Table -7: Characteristics of Rheobuild 561 superplasticizer

Aspect	Density	pH	Content Na ₂ O eq-	Dry extract	Content Cl-
Brown liquid	1,17 ± 0,03	8,5 ± 1,5	≤ 1%	-5°C	≤ 0,1%

Table -8: Application conditions for Rhéobuild superplasticizer

Typical range of application	Recommended range of use
0.4 to 1.5% of the weight of the cement (i.e. 0.34 L to 1.28 L per 100 Kg of cement)	In case of frost, heat the product to a temperature close to + 30°C and stir mechanically. Prohibit stirring with compressed air.

4. CONCRETE FORMULATIONS

4.1 Formulations for Ordinary Concrete (BO)

Ordinary concretes without the addition of fines and admixtures were first formulated so that these control concretes could be compared to fluid concretes. This is to show that fluid concrete will have easier workability, higher mechanical strength and better durability than regular concrete [5].

BO1 = Sr1 + g1 + E+C with a cement dosage fixed at 400 Kg/m³

BO2 = Sr2 + g2 + G+ Sc + E + C with a cement dosage fixed at 350 Kg/m³

When characterizing the materials, the sands Sr2 and Sc; the gravels g2 and G present more favorable characteristics compared to Sr1 and g1. For this reason, the cement dosage is reduced to 350 Kg/m³ for BO2.

The method used for the formulation of ordinary BO1 and BO2 concretes is the Dreux Gorisse method. The dosages of each constituent of BO1 and BO2 found by this method are given in table 9 below.

Table -9 : Doses of each constituent of BO1 and BO2 in one cubic metre

BO1				BO2					
C[Kg]	E[L]	Sr1[Kg]	g1[Kg]	C[Kg]	E[L]	Sc[Kg]	Sr2[Kg]	g2[Kg]	G[Kg]
400	220	752	992	350	203	262	491	292	815

4.2 Results of BO1 and BO2

The theoretical 28-day compressive strength of 25 MPa for BO1 is not achieved; although the cement dosage is high (Table 10). Many parameters can be attributed to the fact that the diameter of the chippings used is very small, and its Los Angeles coefficient is relatively low compared to chippings from the SCB quarry. The water dosage is also 220 litres per cubic metre (a high water dosage). In the case of the slump test, the excate value of 8 cm is reached.

Table -10 : Slump and compressive strength results of BO1 by the DREUX GORRISSE method

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
8,3	7	(1)	2,410	323,95	16,12	16,04
		(2)	2,408	320,13	15,93	
		(3)	2,431	322,94	16,07	
	28	(4)	2,421	486,52	24,21	23,2
		(5)	2,432	440,91	21,94	
		(6)	2,400	471,25	23,45	

For BO2, a greater dispersion of the compressive strength of concrete at young ages, at 7 days, was noted; however, at 28 days, this dispersion of strength is generally low. The resistance obtained experimentally at 28 days corresponds well to that predicted by the theoretical resistance of 26 MPa (Table 11).

The formulation adopted for BO2 is therefore acceptable. And, it has been proved that the materials used for BO2 formulation are good qualities even if the cement dosage is reduced to 350 kg in one m³ of concrete.

Table –11 : Results of slump and compressive strength of BO2 by the GORRISSE DRILL method

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
8,1	7	(1)	2,400	395,57	19,68	19,96
		(2)	2,407	408,23	20,31	
		(3)	2,411	399,59	19,88	
	28	(4)	2,398	517,58	25,75	26,22
		(5)	2,400	535,46	26,64	

		(6)	2,403	528,03	26,27	
--	--	-----	-------	--------	-------	--

4.3 Formulation of BFL1 fluid concretes by the absolute volume method

The absolute volume method is used to determine the composition of mixtures whose total volume is specified upstream. Its qualities give it a character that is both precise and random, and it is the most suitable for research work. Knowing that a mixture of fluid concretes is usually composed of water, cement, sand, gravel, superplasticizers, and fillers. This method includes the volume of air trapped in the mixture.

$$VSr1 + Vg1 + VE + VC + VSp1 + Va + VFcp = 1000 \text{ L (1m}^3 \text{ of concrete)}$$

The cement dosage is fixed at 400 Kg/m³ for BFL1. This aims to take as the reference the ordinary concrete BO1

BFL1 = g1+Sr1+C+E+ Sp1+ Fcp with a cement dosage of 400 Kg/m³.

For BFL1, W/C = 0.55, G/S = 1 and Dmax = 12.5 mm. The dosage of superplasticizer SP1 is tattooed by varying the Filler Cipolin /Cement ratio (FcP /C) according to the indications in the data sheet.

The air volume Va of the concrete is about 5% (AFGC recommendations),

so Va = 50 L

$$\frac{Sr_1}{\sigma(Sr_1)} + \frac{Sr_1}{\sigma(g_1)} + \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{Sp_1}{\sigma(Sp_1)} + \frac{F_{cp}}{\sigma(F_{cp})} + V_a = 1000$$

However, the volume of concrete pastes is

$$V_{pastes} = \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{Sp_1}{\sigma(Sp_1)} + \frac{FC_p}{\sigma(FC_p)} + V_a \quad [L/m^3]$$

The sand and gravel dosage is determined by

$$Sr_1 = g_1 = \frac{1000 - V_{pastes}}{\left(\frac{1}{\sigma(Sr_1)} + \frac{1}{\sigma(g_1)} \right)}$$

Therefore, following the absolute volume method for the determination of sand and gravel dosages with a ratio G/S =1, we have the following BFL1 formula presented in Table 12:

Table-12 : BFL1 fluid concrete formulas in 1 m³

SAND[Kg]	GRAVELS [Kg]	CEMENT CEM II- A-42,5 [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	WATER [L]
Sr1	g1	C	Fcp	Sp1	E
672	672	400	220	7	220

This formula gives the following results (Tables 13 and 14)

Table -13: shrinkage, porosity and compactness values of BFL1

BFL1		
shrinkage R [%]	Porosity P [%]	Compacity C [%]
0,17	4,34	95,66

Table-14: Results of slump and compressive strength of BFL1

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
18	7	(1)	2,356	373,58	18,59	20,98
		(2)	2,297	400,11	19,91	
		(3)	2,315	491,15	24,44	
	28	(4)	2,391	686,28	34,15	35,75
		(5)	2,386	739,53	36,8	
		(6)	2,351	729,48	36,3	

4.3 Formulation of BFL2 fluid concretes by the absolute volume method

BFL2 is obtained by mixing gavillons g2 class 5/15, G class 5/25, river sand Sr2, quarry sand Sc, cipolin filler Fcp, sika viscocrete superplasticizer tempo 12 (Sp1) and water. The cement dosage is reduced to 350 Kg/m³ following the BO2 reference.

BFL2 = g2+G+Sr2+Sc+C+E+ Sp1+ Fcp with cement dosage C = 350 Kg

The new formula of this concrete for the purpose of laboratory verification tests of the physical characteristics of the constituents is given in Table 15 below.

Table-15 : BFL2 fluid concrete formulas in 1 m3

SAND[Kg]		GRAVELS [Kg]		CEMENT CEM II- A-42,5 [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	WATER [L]
Sr2	Sc	g2	G	C	Fcp	Sp1	E
368	368	368	368	350	193	7	203

The results of this formula are set out in Tables 16 and 17 below:

Table-16: shrinkage, porosity and compactness values of BFL2

BFL2		
shrinkage R [%]	Porosity P [%]	Compacity C [%]
0,10	4,1	95,9

Table-17 : Results of slump and compressive strength of BFL2

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
16	7	(1)	2,298	399,39	19,87	19,86
		(2)	2,300	404,21	20,11	
		(3)	2,360	414,06	20,60	
	28	(4)	2,387	674,36	33,55	33,87
		(5)	2,395	690,23	34,34	
		(6)	2,295	677,97	33,73	

4.4 Formulation of BFL3 fluid concretes by the absolute volume method

For BFL3, the cipolin filler is replaced by the dolomite filler whose purpose is to compare the reaction of these fines in concrete. We have $BFL3 = g2+G+Sr2+Sc+C+E+ Sp1+ FD$. The formula is presented in the following table 18

Table-18 : BFL3 fluid concrete formulas in 1 m³

SAND[Kg]		GRAVELS [Kg]		CEMENT CEM II- A-42,5 [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	WATER [L]
Sr2	Sc	g2	G	C	FD	Sp1	E
368	368	368	368	350	193	7	203

The results obtained from this formula are presented in Tables 19 and 20 below.

Table-19 : shrinkage, porosity and compactness values of BFL3

BFL3

shrinkage R [%]	Porosity P [%]	Compacity C [%]
0,16	4,7	95,3

Table-20 : Results of slump and compressive strength of BFL3

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
19	7	(1)	2,277	363,61	18,09	18,88
		(2)	2,312	390,74	19,44	
		(3)	2,270	384,31	19,12	
	28	(4)	2,263	586,32	29,17	29,58
		(5)	2,299	614,26	30,56	
		(6)	2,303	583,50	29,03	

4.5 Formulation of BFL4 fluid concretes by the absolute volume method

The Sika viscocrete superplasticizer tempo 12 is replaced by Rheobuild 561 and the Cipolin filler, sand and gravel are still kept (BFL3 = g2+G+Sr2+Sc+C+E+ Sp2+ FCP) whose objective is to follow the reaction of Rheobuild 561 superplasticizer in terms of its fluidity and compressive strength.

The formula for BFL4 fluid concrete and the results are shown in the following tables

Table-21 : BFL4 fluid concrete formulas in 1 m3

SAND[Kg]		GRAVELS [Kg]		CEMENT CEM II- A-42,5 [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	WATER [L]
Sr2	Sc	g2	G	C	FCP	Sp1	E
368	368	368	368	350	193	7	203

Table-22 : shrinkage, porosity and compactness values of BFL4

BFL4		
shrinkage R [%]	Porosity P [%]	Compacity C [%]
0,07	3,6	96,4

Table-23 : Results of slump and compressive strength of BFL4

ST [cm]	AGES [Days]	N ° OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
18	7	(1)	2,383	384,71	19,14	19,67
		(2)	2,306	412,85	20,54	
		(3)	2,397	388,33	19,32	
	28	(4)	2,351	606,02	30,15	29,79
		(5)	2,349	596,97	29,70	
		(6)	2,311	593,55	29,53	

4.6 Formulation of BFL45 fluid concretes by the absolute volume method

In the case of BFL5, dolomite filler and the superplasticizer Reobuild 561 are used. BFL5= g2+G+Sr2+Sc+C+E+ Sp2+ FD and we have the following formula and results

Table-24: BFL5 fluid concrete formulas in 1 m³

SAND[Kg]		GRAVELS [Kg]		CEMENT CEM II- A-42,5 [Kg]	FILLER CIPOLIN [Kg]	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 [L]	WATER [L]
Sr2	Sc	g2	G	C	FCP	Sp1	E
366	366	366	366	350	193	7	203

Table-25 : shrinkage, porosity and compactness values of BFL5

BFL5		
shrinkage R [%]	Porosity P [%]	Compacity C [%]
0,17	3,8	95,2

Table-26: Results of slump and compressive strength of BFL5

ST [cm]	AGES [Days]	N°OF THE TEST	DENSITY	CHARGE [KN]	Rc en [MPa]	ARITHMETICAL AVERAGE OF Rc [MPa]
21	7	(1)	2,356	390,95	19,45	19,22
		(2)	2,297	384,51	19,13	
		(3)	2,315	383,31	19,07	
	28	(4)	2,391	526,82	26,21	26,71
		(5)	2,386	540,29	26,88	
		(6)	2,351	523,20	26,03	

4.7 Analysis and duscusion

The objective of the studies of BOs is only the mechanical resistance to compression, but the priority for the formulation study of BFLs is to give them a good behaviour in the fresh state (workability) and in the hardened state. At 28 days, these BFLs have high compressive strengths compared to BOs.

For BFL1. The use of a higher cement dosage ($C = 400 \text{ Kg/m}^3$) allowed us to obtain a fluid concrete with a slump of $ST = 18 \text{ cm}$ with a compressive strength $R_c = 35.75 \text{ MPa}$ at 28 days. During its formulation, the addition of Sika visocrete superplasticizer tempo 12 allows it to flow easily without segregation. BFL1 has good compactness. These results meet standards, but we found that the cement dosage is high. That is why we have formulated other BFLs with a cement dosage of $C = 350 \text{ Kg/m}^3$.

For the fluid concretes BFL2, BFL3, BFL4 and BFL5 with cement dosage $C = 350 \text{ Kg/m}^3$, the mechanical compression tests at 7 days and 28 days on the concrete specimens give satisfactory results but a little weak compared to that of BFL1. This is quite normal as the cement dosage is diminitive. The Abrams cone slump results of these concretes (BFL2, BFL3, BFL4, BFL5) are acceptable: these concretes are classified as S4() type concretes according to the NF EN 206-1 standard.

No air bubbles are found when the test specimens are immersed in cold water. These BFL are concretes with low porosity, low shrinkage and very high compactness.

The use of cipolin filler gives better results on compressive strength compared to dolomite filler. This is the case of BFL4 and BFL5: BFL4 has a good compressive strength compared to BFL5.

The superplasticizer rheobuild 561 only gives a high concrete workability time (BFL5). It acts as a water reducer but has very little effect on the mechanical strength of the concrete: the compressive strength of BFL2 obtained from cipolin filler and sika visocrete tempo 12 is higher than the compressive strength of BFL4 obtained from cipolin filler and rheobuild 561. On the other hand, BFL4 ($ST = 18 \text{ cm}$) has a better workability compared to BFL2 ($ST = 16 \text{ cm}$).

For fluid concretes with higher compressive strengths, it is therefore preferable to use Sika visocrete tempo 12 as a water-reducing superplasticizer and cipolin filler instead of dolomite filler as concrete admixture fines, because withthis admixture and filler, the concretes are workable and more resistant in compression (BFL1, BFL2, BFL3, BFL4).

5. CONCLUSION

Laboratory tests on the characterization of raw materials have been carried out in order to know their nature, their physical and/or chemical characteristics.

We have shown that a fluid concrete has a better durability, a higher mechanical resistance and an easier workability than BO.

The reduction of the cement dosage at $C = 350 \text{ Kg/m}^3$, allows to obtain satisfactory results on the compressive strengths of BFL but a little lower compared to that of BFL1.

In general, BFLs obtained from cipolin filler have higher compressive strengths compared to BFLs obtained from dolomite filler. The superplasticizer rheobuild 561, compared to sikaviscocrete tempo 12, provides a longer handling time but is less effective in terms of strength gain.

Moreover, the costs for the production of the new BFLs (BFL2, BFL3, BFL4) are lower compared to BO and BFL1. BFLs bring a saving in vibration energy and a reduction in the number of workers. In short, the results on the new BFL formulations we have achieved open a new window on the optimization of BFLs and help their diffusion to all the players in concrete construction.

6. REFERENCES

- [1]. http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_autopla%C3%A7ant
- [2]. <https://cours.etsmtl.ca/TCH025/Notes%20de%20cours/Hiver%202012/Cours-B%C3%A9tonETS.pdf>
- [3]. Béton et constituants du béton ; Spécifications et méthodes d'essais du béton, tome 1 ; Recueil de norme Françaises 1995. AFNOR. 4^e édition.
- [4]. Faury J. « Le béton », 2p
- [5]. DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, Paris, 1998, 3p

**Annexe 13: Publication de l'ouvrage de mémoire d'ingénieur dans le site
d'Edition Universitaire Européens**

Le travail s'inscrit dans le cadre d'études de formulation de béton fluide à haute compacité, en utilisant des fines de cipolin. Des essais nécessaires pour valider un béton fluide à haute compacité (BFLHC) ou un béton autoplaçant (BAP) selon le cahier de charge de l'AFGC ont été exposés.

La formulation de nos bétons fluides à haute compacité nécessite d'utiliser un dosage saturé de superplastifiant, une forte quantité de fines, un dosage de ciment plus élevé et un même dosage de sable et de gravillon. Il suffit donc de faire varier le dosage de chaque constituant par la méthode de volume absolue.

Les résultats obtenus lors des essais de compression montrent qu'il y a le gain de résistance intéressant pour le béton contenant un dosage de fines élevé. La présence majeure des fines de cipolin dans le béton permet d'obtenir un béton plus compact et plus résistance aux attaques chimique et à la corrosion. Par contre, cette dernière peut entraîner une diminution de maniabilité des bétons.

Les bétons fluides à haute compacité présentent aussi des atouts au niveau de sa résistance en compression, sa durabilité, sa maniabilité, et même au niveau environnemental et économique.



Doctorant en Sciences des Matériaux/ Ecole Supérieures Polytechnique d'Antananarivo/ Université d'Antananarivo Madagascar, Ingénieur en Génie Chimique, et Enseignant vacataire à l'Université Polytechnique d'Antananarivo- Matériaux- Université d'Antananarivo



International Book Market Service Ltd.
Brīvības gatve 197, LV-1039 Rīga, Latvia

International Book Market Service Ltd.
Brīvības gatve 197
LV-1039 Rīga, Latvia

Telefon: +371 673 6440 0
Telefax: +371 686 20455

info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com

Madame, Monsieur,

Par le présent document, on confirme la parution du livre intitulé:
"Contribution à l'étude des bétons fluides à haute compacité. Utilisation des fines d'ajout de type calcaire", de l'auteur **Alain Fanomezantsoa ANDRIANANDRASANA**.

Le livre a été publié au sein des Éditions universitaires européennes en 2020, avec le numéro **ISBN 978-620-2-54186-2**. L'évaluation sans engagement et confidentielle du manuscrit a été faite en considérant l'actualité des données, la qualité et le volume du texte.

Étant une filiale de OmniScriptum Groupe, *Éditions Universitaires Européennes* produit des publications de haute qualité, en fournissant tous les avantages en marketing, en production et en diffusion qu'une grande compagnie intercontinentale peut assurer. Les livres publiés chez Éditions Universitaires Européennes sont disponibles sur le marché international par l'intermédiaire de plus de 80,000 librairies et de 3,000 librairies en ligne.

OmniScriptum est membre associé de American Booksellers Association, The Booksellers Association of the UK, membre du Börsenverein des Deutschen Buchhandels, et membre du Centre allemand PEN. N'hésitez pas à nous contacter si vous avez besoin d'informations supplémentaires.

International
Book Market
Service



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
SOMMAIRE	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES PHOTOS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES	XIX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE I: APPROCHES THÉORIQUES SUR LES BÉTONS FLUIDES.....	3
Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS FLUIDES	4
I. PROPRIÉTÉ DES BÉTONS FLUIDES	4
II. INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LES PROPRIÉTÉS A L'ÉTAT FRAIS DU BÉTON FLUIDE.....	5
1. Influence des superplastifiants	5
2. Influence des fines d'ajout.....	5
3. Influence de volume de pâte élevé	7
4. Influence de volume de gravillons.....	7
III. MISE EN OEUVRE DES BÉTONS FLUIDES	7
IV. QUELQUES OUVRAGES RÉALISÉS AVEC DES BÉTONS FLUIDES A MADAGASCAR	8
Chapitre II : PROVENANCE DES MATÉRIAUX POUR LA FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES.....	10
I. GÉNÉRALITÉS [8]	10
II. CEMENTS [9][10]	12
III. GRANULATS [11][12]	14
1. Les sables.....	15
1.1. Sable de carrière.....	16
1.2. Sable de rivière	16
2. Les gravillons.....	17
IV. FILLERS [13]	18

1. Filler cipolin [13]	19
1.1. Propriétés des cipolins	19
1.1.1. Caractéristiques mécaniques.....	19
1.1.2. Constituants chimiques.....	19
1.2. Quelques gisements de cipolin à Madagascar	19
1.2.1. Gisement de cipolin dans la région d'Ambatondrazaka.....	19
1.2.2. Gisement des cipolins dans la région Vakinankaratra	20
2. Filler dolomie	21
V. ADJUVANTS [3].....	21
1. Types des adjuvants	22
1.1. Les Plastifiants	22
1.2. Super-plastifiants	22
1.3. Entraîneurs d'air	22
1.4. Retardateurs et accélérateurs de prise	23
2. Adjuvants produits par la compagnie MADECASSE	24
3. Adjuvants produits par la société BATPRO	25
PARTIE II : APPROCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES BÉTONS FLUIDES	26
Chapitre III : MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS	27
I. FORMULATION DES BÉTONS ORDINAIRES PAR LA MÉTHODE DREUX GORISSE	27
1. Données de base	27
1.1. Nature de l'ouvrage	27
1.2. Ouvrabilité désirée.....	27
1.3. Diamètre maximal des granulats (D_{max})	28
2. Dosage en ciment	28
2.1. Dosage en eau.....	30
2.2. Tracé de la courbe granulaire de référence	31
2.3. Coefficient de compacité (δ).....	32
2.4. Dosage des granulats	33
II. FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE BARON — OLIVIER [12]	
35	
1. Objectifs.....	35
1.1. Origine de la méthode.....	35
1.2. Principe.....	35

1.2.1.	Pâte liante	35
1.2.2.	Squelette granulaire	36
1.3.	Hypothèses de travail.....	36
1.3.1.	Hypothèses sur le béton	36
1.3.2.	Hypothèses sur les granulats.....	37
1.3.3.	Hypothèses sur le ciment	37
1.3.4.	Abaques et tableaux.....	37
1.4.	Mode opératoire (formulation de base)	37
1.4.1.	La pâte liante	37
1.4.2.	Le squelette granulaire.....	38
1.4.3.	Composition du béton :	38
1.5.	Résultats	39
III.	FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE BOLOMEY [2].....	41
IV.	FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE FAURY [2] [9]	42
V.	FORMULATIONS DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE D'ABRAMS [9].....	43
VI.	FORMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DE VALETTE [9]	43
VII.	FOMULATION DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES ABSOLUS [14]	44
VIII.	FORMULATIONS ET MODÉLISATIONS DES BÉTONS PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [15].....	45
IX.	CONCLUSION PARTIELLE	46
Chapitre IV : ESSAIS DE CARACTÉRISATION DES BÉTONS		47
I.	ESSAI DE CONSISTANCE	47
1.	Matériel utilisé.....	47
2.	Mode opératoire	48
II.	ESSAI DE RETRAIT	49
IV.	ESSAI DE RÉSISTANCES	50
1.	L'essai de compression simple.....	50
1.1.	Principe de l'essai	50
1.2.	Spécifications	50
1.2.1.	Éprouvettes.....	50
1.2.2.	Confection et conservation des éprouvettes	51
1.2.3.	Moulage et serrage.....	52
1.2.4.	Machine d'écrasement.....	54

1.3.	Opérations préparatoires.....	54
1.3.1.	Précautions contre la dessiccation.....	54
1.3.2.	Détermination du poids volumique de l'éprouvette.....	54
1.4.	Conduite de l'essai	54
2.	L'essai de traction	55
Chapitre V : CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES.....		56
INTRODUCTION		56
I.	CARACTÉRISTIQUES DU CIMENT CEM II/A 42,5 N	57
1.	Caractéristiques physiques	57
2.	Caractéristiques mécaniques.....	57
3.	Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	58
3.1.	Composition minéralogique.....	58
II.	CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS.....	60
1.	Méthode de caractérisation	60
1.1.	Détermination des caractéristiques physiques et mécaniques.....	60
1.1.1.	Détermination de lateneur en eau (%W).....	60
1.1.2.	Détermination de la masse volumique apparente (ρ)	61
1.1.3.	Détermination des masses volumiques absolues (σ)	62
1.1.3.1.	Masses volumiques absolues des sables	62
1.1.3.2.	Masse volumique absolue des gravillons	63
1.1.4.	Détermination de l'équivalent de sable.....	64
1.1.5.	Essai Los Angeles sur gravillon.....	66
1.1.6.	Essai d'usure micro – deval sur gravillon.....	67
1.2.	Détermination des caractéristiques géométriques [21][22]	70
1.2.1.	Analyses granulométriques	70
1.2.2.	Module de finesse pour le sable (Mf).....	72
1.2.3.	Coefficients de Hazen (coefficient d'uniformité) et coefficient de courbure	73
1.2.4.	Coefficients d'aplatissement (CA) et coefficients volumétriques (CV)	74
2.	Résultats	74
2.1.	Résultats sur les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats	74
2.2.	Résultats de l'analyse granulométrique des sables	75
2.3.	Résultats sur les modules de finesse des sables.....	76
2.4.	Résultats sur les coefficients Cu et Cc des sables.....	76

2.5.	Résultats de l'analyse granulométrique des gravillons.....	79
2.6.	Résultats sur le coefficient d'Aplatissement CA et le coefficient volumétrique CV	80
III.	LES FILLERS.....	80
1.	Filler cipolin (F_C).....	80
2.	Filler dolomie (F_D).....	81
IV.	L'EAU DE GÂCHAGE	82
V.	LES ADJUVANTS.....	82
1.	La Sika ®viscocrete®tempo12	82
2.	Le rhéobuild561	83
VI.	CONCLUSION PARTIELLE.....	84
Chapitre VI : FORMULATIONS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACITÉ PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES ABSOLUS.....		86
I.	FORMULATION DE BÉTON ORDINAIRE BO ₁ A PAR LA METHODE DREUX GORISSE	86
a)	Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO ₁	87
b)	Calcul de dosage des granulats (pour 1 m ³ de béton).....	87
1.1.	Détermination des proportions des granulats à partir de la courbe de référence....	87
1.2.	Calcul de dosage en Sr_1 et en g_1	88
c)	Résultats et interprétation.....	89
II.	FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES BFL ₁	89
1.	Dosage en Ciment.....	90
2.	Dosage en Eau.....	90
3.	Dosage en fines de cipolin	91
4.	Dosage en superplastifiant Sp_1	91
5.	Dosages en sable et en gravillon	91
6.	Études préliminaires.....	92
6.1.	Résultats et interprétations.....	92
6.2.	Conclusion	93
7.	Détermination d'une valeur optimum du BFL ₁ en faisant varier le rapport F_C/ C	93
7.1.	Dosages des chaque constituant du BFL ₁	93
7.2.	Résultats et interprétation.....	94
7.2.1.	Résultats sur les essais d'affaissement au cône d'Abrams	94
7.2.2.	Résultats sur les essais de mesure de porosité et de compacité	96
8.	Conclusion partielle	98

I. FORMULATION DE BÉTON ORDINAIRE BO ₂ PAR LA MÉTHODE DE DREUX GORISSE	98
d) Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO ₂	99
e) Calcul de dosage des granulats (pour 1 m ³ de béton).....	99
1.3. Détermination des proportions des granulats à partir de la courbe de référence....	99
1.4. Calcul de dosage en Sr ₂ , Sc, g ₂ et G.....	100
f) Résultats et interprétation.....	101
II. FORMULATION DES BÉTONS ORDINAIRES BO ₃ SELON LA NORME TBM ..	101
III. FORMULATION DES BÉTONS FLUIDES BFL ₂ , BFL ₃ , BFL ₄ ET BFL ₅	103
1. Paramètres des dosages.....	103
2. Formulation de béton fluide BFL ₂	105
3. Formulation du béton fluide BFL ₃	106
(BFL ₄ = Sr ₂ + Sc + G + g ₂ + F _C +Sp ₂ + C+ E).....	106
4. Formulation du béton fluide BFL ₄	106
(BFL ₅ = Sr ₂ + Sc + G + g ₂ + F _D +Sp ₂ + C+ E).....	107
5. Formulation du béton fluide BFL ₅	107
6. Discussion et interprétation.....	110
PARTIE III : MODÉLISATIONS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACTITÉ PAR DES PLANS D'EXPÉRIENCES	112
Chapitre VII : GÉNÉRALITÉS SUR LES PLANS D'EXPÉRIENCES	114
I. PRINCIPE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23]	114
II. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE [23]	114
III. CHOIX DE LA MÉTHODE D'EXPÉRIMENTATION	116
IV. ANALYSE DES RÉSULTATS	116
V. CONDITIONS D'APPLICATION DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23] [24].....	116
VI. VOCABULAIRE DE BASE DES PLANS D'EXPÉRIENCES [23] [24]	117
1- Facteurs.....	117
2- Réponse.....	119
VII. LES TYPES DE PLANS D'EXPÉRIENCES [23][24]	125
1- Plans factoriels complets.....	126
2-1- Plans factoriels complets à deux niveaux	127
2-1-1- Plans à deux facteurs.....	127
2-1-2- Plans factoriels à k facteurs	128
2-2- Plans factoriels complets à trois niveaux [23] [24].....	128

2- Plans fractionnaires	128
3- Plans de mélange	129
4- Les plans hybrides.....	130
VIII. STATISTIQUES APPLIQUES PAR LES PLANS D'EXPÉRIENCES [23][24] .	130
Chapitre VIII : APPLICATIONS DES PLANS D'EXPÉRIENCE SUR LES BÉTONS FLUIDES.....	134
I. PERSPECTIVES DE L'ESSAI	134
II. NIVEAUX DES FACTEURS	135
III. CHOIX DU PLAN D'EXPÉRIENCE POUR NOTRE ÉTUDE.....	136
IV. FORMULATIONS DES BETONS FLUIDES SUIVANT LES MATRICES DES EFFETS.....	137
V. RÉSULTATS DES ESSAIS ET MODÉLISATION	138
1. Résultats et modélisation de la résistance en compression des bétons fluides à 7 jours (Rc07)	138
1.1 Résultats des essais expérimentaux de Rc07 des bétons fluides	138
1.2 Conception des plans d'expériences par le logiciel minitab [25] [26]	139
1.2.1 Généralités.....	139
1.2.2 Création d'un plan d'expériences.....	140
1.2.3 Affichage d'un plan	145
1.2.4 Saisie de données	146
1.2.5 Analyse d'un plan.....	146
1.3 Modèles mathématiques des résistances en compression des bétons fluides à 7 jours.	149
1.3.1 Coefficients codés.....	149
1.3.2 Équation de régression préliminaire en unités codées de Rc07	150
1.3.3 Test de significatif	150
1.3.4 Réduction des modèles	151
1.4 Conclusion partielle	161
2. Résultats et modélisation de la résistance en compression des bétons fluides à 28 jours (Rc28)	162
2.1. Résultats des essais expérimentaux de Rc28 des bétons fluides	162
2.2. Modèles mathématiques des résistances en compression des bétons fluides à 28 jours.	164
2.2.1. Coefficients codés.....	164
2.2.2. Équation de régression préliminaire en unités non codées de Rc28	165
2.2.3. Réduction des modèles	165

2.3.	Conclusion partielle	172
3.	Résultats et modélisation des affaissements (Slump Test) des bétons fluides	173
3.1.	Résultats des essais expérimentaux des affaissements des bétons fluides.....	173
3.2.	Modèle mathématique des affaissements des bétons fluides	174
3.2.1.	Coefficients codés.....	174
3.2.2.	Équation de régression préliminaire en unités non codées de ST	175
3.2.3.	Réduction des modèles	175
3.3.	Conclusion partielle	182
4.	Résultats et modélisation des retraits des bétons fluides	183
4.1.	Résultats des retraits des bétons fluides	183
4.2.	Modèle mathématique des retraits des bétons fluides.....	184
4.2.1.	Calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1	184
4.2.2.	Calculs des coefficients A_i , A_{ij} et A_{ijk} des valeurs codées -1 et +1	185
4.2.3.	Coefficients codés.....	185
4.2.4.	Équation de régression préliminaire en unités non codées de ST	186
4.2.5.	Réduction des modèles	186
4.3.	Conclusion partielle	194
5.	Résultats et modélisation des compacités des bétons fluides	194
5.1.	Modèle mathématique des compacités des bétons fluides.....	195
5.1.1.	Coefficients codés.....	195
5.1.2.	Équation de régression préliminaire en unités non codées de compacité $C[\%]$	196
5.1.3.	Réduction des modèles	196
5.2.	Conclusion partielle	203
PARTIE IV : APPROCHES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES		205
Chapitre IX : ÉTUDES ET ANALYSE DES PRIX UNITAIRES DES BÉTONS.....		206
I.	PRIX UNITAIRES.....	206
II.	ANALYSE DE PARETO	216
III.	DISCUSSION.....	219
Chapitre X : ENVIRONNEMENT ET BÉTONS FLUIDES		220
I.	DIVERS IMPACTS	220
1.	L'Impact social.....	220
2.	Le bilan de CO_2	220
3.	L'analyse du cycle de vie.....	221
II.	MESURES D'ATTÉNUATION DES IMPACTS PROBABLES	221

III. PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL.....	222
CONCLUSION GÉNÉRALE	223
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE	227
RÉFÉRENCE WEBOGRAPHIE.....	229
ANNEXES.....	A
TABLE DES MATIÈRES.....	AAA

AUTEUR : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain

TITRE : «FORMULATIONS ET MODÉLISATIONS MATHÉMATIQUES DES COMPORTEMENTS DES BÉTONS FLUIDES A HAUTE COMPACITES PAR DES PLANS D'EXPÉRIENCE»

Nombre de pages : 229

Nombre de tableaux :123

Nombre de figures : 69

Nombre de photos : 10

Nombre d'annexes : 11



RÉSUMÉ

La démarche classique des formulations des bétons consiste souvent à faire varier les paramètres du mélange et mesurer ses effets sur les comportements du béton à l'état frais et à l'état durci.

Cette démarche est très longue et résulte des renseignements un peu plus limités sur les bétons. Pour cela, un modèle expérimental a été envisagé pour donner des informations très précises sur les bétons fluides. Ce modèle est basé sur les plans d'expériences dont le but est de les modéliser mathématiquement afin d'évaluer l'influence de ses paramètres et ses interactions.

Les fourchettes d'études des différents paramètres comme le rapport G/S, E/C et le dosage en superplastifiant ont été déjà déterminés à partir des nos travaux de mémoire d'Ingénieur et de DEA (Diplôme d'Études approfondies). Des formulations à partir d'une matrice d'expérience ont été effectuées dans le but d'estimer l'affaissement et la résistance mécanique à la compression des bétons.

Le dosage en eau (E), le dosage en ciment (C), les dosages des superplastifiants (Sika Viscocrete Tempo 12 et Rhéobuild 561) et les dosages des fillers (Filler Cipolin et Filler Dolomie), le tout par unité de volume du mélange à l'état frais sont les facteurs considérés.

Grâce au logiciel Minitab version19.2, nous avons l'occasion de faire les analyses pour mieux comprendre l'influence des facteurs et interactions dans les modèles et aussi pour prendre une décision sur les formulations et sur nos hypothèses des modèles mathématiques des bétons fluides à haute compacité.

Mots clés : Bétons fluides, Formulations, Plans d'expériences, plans factoriels, Facteurs, interactions, modélisation mathématique .

ABSTRACT

The classical approach to concrete formulations often consists of varying the parameters of the mixture and measuring its effects on the behavior of the concrete in both fresh and hardened states.

This is a very time-consuming process and is the result of somewhat more limited information on concrete. For this purpose, an experimental model has been envisaged to give very precise information on fluid concretes. This model is based on experimental designs whose aim is to model them mathematically in order to evaluate the influence of its parameters and interactions.

The study ranges of the different parameters such as G/S ratio, W/C ratios and superplasticizer dosing have already been determined from our engineering thesis and DEA (Diploma of Advanced Studies) work. Formulations from an experiment matrix or HADAMARD matrix have been carried out in order to estimate the slump and the mechanical compressive strength of concrete.

Water dosage (E), cement dosage (C), superplasticizer dosages (Sika Viscocrete Tempo 12 and Rheobuild 561) and filler dosages (Filler Cipolin and Filler Dolomite), all per unit volume of the mixture in the fresh state are the factors considered.

Keys World : Fluid concretes, Formulations, Experimental designs, Factor designs, Factors, Interactions, Modeling Mathematics.

ADRESSE DE L'AUTEUR : Lot VM 38 Ter Andronrakely

TEL : 0341577236

E-mail : alaintsoa@yahoo.fr

Directeur de thèse: Professeur titulaire RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely