

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I: Généralités sur les bétons

Chapitre II: Fabrication industrielle du béton

Chapitre III: Les différentes caractéristiques et normalisation du béton

Chapitre IV: Les fines d'ajout

Chapitre V: Quelques méthodes de formulation du béton

Chapitre VI: Généralités sur les bétons fluides

PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre VII: Caractéristiques des matières premières

Chapitre VIII: Les essais de caractérisation du béton fluide à haute compacité

Chapitre IX: Etude de formulation du béton fluide à haute compacité

Chapitre X: Avantages et applications des bétons fluides à hautes compacités

Chapitre XI: Etude d'impact socio- économique

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES WEBOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les Comportements et la déformation de chaque constituant de clinker	6
Tableau 2: Caractéristiques physiques du ciment Portland	9
Tableau 3: Classification des granulats par grosseur	12
Tableau 4: Quelques paramètres géométriques des granulats	15
Tableau 5: Correspondance de module, maille de tamis et diamètre de passoires. ...	17
Tableau 6: Impuretés acceptables dans l'eau de gâchage.....	18
Tableau 7: Types et utilisation des différents adjuvants	20
Tableau 8: Tolérances respectés selon la norme EN 206-1	22
Tableau 9: Resistances en compressions selon la loi de Fétet, Bolomey et Abrams..	25
Tableau 10: Norme NF P 18 305 pour les BCN	28
Tableau 11: Dosage en ciment et dimensions maximales D des granulats.....	34
Tableau 12: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône d'Abrams ou au test d'ouvrabilité C.E.S.	36
Tableau 13: Diamètre maximale du granulat en fonction du ferrailage et de l'enrobage	37
Tableau 14: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	38
Tableau 15: Corrections en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats.....	39
Tableau 16: Valeurs du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats	40
Tableau 17: Valeurs de coefficient de compacité δ	42
Tableau 18: Caractéristiques physiques du ciment Manda CEM II/A de la société Holcim Madagascar.....	50
Tableau 19: Resistance en compression du ciment Manda CEM IIA-V 42,5 de la société Holcim	51
Tableau 20: Compositions chimique moyenne des constituants du ciment Manda CEM II/A-V 42,5N en % massique.	52
Tableau 21: Compositions chimique du ciment Manda CEM II/A-V 42,5N en % massique.	52
Tableau 22: Valeurs requises du ciment Manda CEM II /A -V 42,5N de la société Holcim Madagascar.....	53
Tableau 23: Résultats de la teneur en eau des granulats et du cipolin	57
Tableau 24: Masses volumiques apparentes des matériaux.....	58
Tableau 25: Valeurs de Vo (volume) du pycnomètre.....	59
Tableau 26: Résultats obtenues de la masse volumique absolue de sable	61
Tableau 27: Résultats de la masse volumique absolue de cipolin	61
Tableau 28: Résultats de la masse volumique absolue de gravillon 5/12,5	62
Tableau 29: Valeurs des compacités de granulats et du cipolin	63
Tableau 30: Résultats d'équivalente de sable	65
Tableau 31: Résultats de coefficient de Los Angeles du gravillon.....	67

Tableau 32: Récapitulation de l'analyse granulométrique du sable en pourcentage des refus cumulés et passant cumulés.	70
Tableau 33: Récapitulation de l'analyse granulométrique du gravillon 5/12,5 en pourcentage des refus et des passants cumulés	71
Tableau 34: Récapitulation de l'analyse granulométrique cipolin broyé en pourcentage des refus et des passants cumulés	73
Tableau 35: Eléments chimiques majeurs dans le sable et dans le cipolin	75
Tableau 36: Caractéristiques de l'eau de JIRAMA	75
Tableau 37: Caractéristiques du superplastifiant sika ®viscocrete®tempo12	76
Tableau 38: Condition d'application du superplastifiant sika ®viscocrete®tempo12 ...	76
Tableau 39: Classe d'étalement selon la norme ENV 206	79
Tableau 40: Classe d'affaissement selon la norme NF EN 206-1	83
Tableau 41: Composition du BO selon la méthode de Dreux Gorisse	91
Tableau 42: Affaissement du BO.....	91
Tableau 43: Résistance en compression du BO	92
Tableau 44: Composition préliminaire du BFLHC selon la recommandation de l'AFGC.	95
Tableau 45: Résultat sur l'essai de la résistance en compression lors de l'étude préliminaire.....	96
Tableau 46: Composition du BFLHC en faisant varier le pourcentage de fine de cipolin par rapport au ciment	97
Tableau 47: Valeurs d'affaissement des 6 essais effectués.....	97
Tableau 48 : Résultats de la mesure de retrait des BFLHC	99
Tableau 49: Résultat sur la mesure de la porosité et de la compacité des 6 essais effectués.....	99
Tableau 50: Valeur des résistances en compression des 6 essais effectués.....	100
Tableau 51: Résultats sur le test à la carbonatation des BFLHC	101
Tableau 52: Résultats à l'attaque de sulfate de magnésium concentré des bétons pendant un cycle de 17 h.	102
Tableau 53: Calcul du prix pour avoir 1m3 de BO.....	105
Tableau 54: Calcul du prix pour avoir 1m3 de BFLHC	106

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma du Structure minéralogique du Clinker	7
Figure 2: Développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.....	7
Figure 3: Additions des autres constituants du ciment portland	9
Figure 4: Diagramme schématique de la fabrication du béton	21
Figure 5: Abaque permettant de déterminer C en fonction de l'affaissement et du rapport C/E	38
Figure 6: Exemple de tracé de courbe de référence et de détermination des proportions des granulats	41
Figure 7: Composition du Béton Ordinaire et du Béton Fluide	44
Figure 8: Effet de filer calcaire dans le béton	45
Figure 9: Mécanisme d'action du superplastifiant type acrylique.....	46
Figure 10: Représentation de l'essai d'équivalent de sable.....	63
Figure 11: Courbe granulométrique de sable	70
Figure 12: Courbe granulométrique de gravillon 5/12,5.....	72
Figure 13: Courbe granulométrique de cipolin broyé ($d < 50 \mu\text{m}$)	73
Figure 14: Conduite d'essai d'étalement	79
Figure 15: Conduite de l'essai d'affaissement.....	81
Figure 16: Essai de traction par flexion	85
Figure 17: Courbe granulométrique des granulats et courbe de référence – Détermination des pourcentages volumiques des granulats	90
Figure 18: Résistance en compression du BO en fonction des jours	92
Figure 19: Valeurs d'affaissement des BFLHC en fonction de la proportion de fines d'ajout.....	98
Figure 20: Résistances en compression des BFLHC en fonction du Temps.....	100

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Sables utilisés pour béton	13
Photo 2: Gravier de diamètre 10 mm.....	14
Photo 3 : Gravier de diamètre 5mm.....	14
Photo 5: Poudre des Verres broyés.....	31
Photo 4: Déchets des Verres.....	31
Photo 6: Tamisage de gravillon sur un tamis de 12,5 mm.....	55
Photo 7: Tamisage de gravillon sur un tamis de 5 mm.....	55
Photo 8: Gravillon 6,3/14 dans la machine de Los Angeles avant l'essai.....	67
Photo 9: Gravillon 6,3/14 après l'essai de Los Angeles.....	68
Photo 11: Tamisage par de tamis vibrant.....	68
Photo 10: Série des tamis	68
Photo 12: Broyeur de laboratoire CNRIT	74
Photo 13: Tamisage du Cipolin broyé par pinceau.....	74
Photo 14: Cipolin broyés de diamètre $d < 50 \mu\text{m}$	74
Photo 15: Etalement du Béton autoplacant(BAP).....	79
Photo 16: Essai de la boîte en L.....	80
Photo 17: Malaxage du BFLHC dans la burette	82
Photo 18: Mise en place et Arasement du BFLHC dans le cône d'Abrams.....	82
Photo 19: Vérification de la valeur de l'affaissement	82
Photo 20: Mesure de l'affaissement du BFL par une règle métallique	82
Photo 21: Machine à compression du laboratoire LNTPB.....	84
Photo 22: Essai de traction par flexion	85

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: FICHE TECHNIQUE DU CIMENT CEM II/A 42,5N HOLCIM	A
ANNEXE 2: CARRIERE VONTOVORONA	B
ANNEXE 3: SITE DE PRELEVEMENT DE CIPOLIN.....	C
ANNEXE 4: ESSAI DE LOS ANGELES	D
ANNEXE 5: FICHE TECHNIQUE DU SUPERPLASTIFIANT VISCOCRÈTE TEMPO12	E
ANNEXE 6: PROTOCOLE D'ESSAI D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE.....	G
ANNEXE 7: PROTOCOLE DE MESURE DE SSB.....	I

LISTE DES ABREVIATIONS

AFGC :	Association Française de Génie Civil
BAN :	Bétons AutoNivelants
BAP :	Béton AutoPlaçants
BCN :	Béton Caractères Normalisés
BCS :	Bétons Caractères Spécifiques
BEFUP :	Béton à Ultra- Hautes Performances
BFL :	Bétons Fluides
BFLHC :	Béton Fluides à Hautes Compacité
BHP :	Béton à Haute Performance
BO :	Bétons Ordinaires
CES	Centre d'Essais des Structures
BPE :	Béton Prêt à l'Emploi
CNRRIT :	Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques
LNTPB :	Laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiments
JIRAMA:	Jiro sy Rano Malagasy
SSB:	Surface Spécifique de la Blaine

NOTATIONS ET SYMBOLES

C	Dosage en ciment pour 1 m ³ de béton
C	<i>Compacité</i>
C ₃ A	Alite
C ₄ AF	Aluminoferrite
C _{LA}	Coefficient de Los Angeles
C ₂ S	Bélite
C _p	Cipolin
D _{max}	Diamètre maximal des granulats
E	Dosage en eau pour 1m ³ de béton
ES	Equivalent du sable
F	Filler
FC _p	Filler Cipolin
FI	Coefficient d'aplatissement
G	Dosage en gravillons pour 1m ³ de béton
K	Clinker
MA	Module d'alumine
MPa	MegaPascal
MC	Module de chaux
M _f	Module de finesse
M _{fs}	Module de finesse de sable
MS	Module de silice
MS	<i>Résistance au sulfate de Magnésium</i>
m ³	Mètre cube
N	Newton
P	<i>Porosité</i>

R	Retrait du béton
R _c	Résistance en Compression
S	Dosage en sable pour 1 m ³ de béton
Sp	Superplastifiant
V _a	Volume d'air
V _{pâte}	Volume absolu de la pate du béton
V _t	Volume totale
V _{vide}	Volume du vide
W	Teneur en eau
δ	Coefficient de compacité
Φ	Vide
ρ	Masse volumique apparente
σ	Masse volumique absolu

INTRODUCTION GENERALE

Le béton fait partie des matériaux composites les plus utilisés à travers le monde, autant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement. Du béton traditionnel à quatre constituants (ciment, eau, sable et gravillon), on en est venu à formuler des bétons complexes dont les constituants sont aujourd'hui de taille et de nature très variables, grâce aux progrès de la formulation.

Le béton sous sa forme actuelle est le fruit de plusieurs décennies d'étude et d'expérimentation. Sa fabrication s'évolue de plus en plus selon le progrès de la chimie du béton ainsi que l'amélioration des outils de production. L'évolution des bétons a été notamment permise par des progrès considérables dans l'industrie des constituants.

En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité et sa contribution à la protection de l'environnement ont contribué à accroître son emploi pour tous les ouvrages du Génie Civil.


La découverte des superplastifiants très puissants dans les années 1970 a constitué un véritable tournant. L'utilisation de ces adjuvants comme réducteur d'eau, des additions minérales, des ciments de qualité contrôlée... permet d'optimiser la composition du béton, et de résoudre les problèmes de conflits au niveau de ses propriétés et peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Ce constat nous a conduit choisir ce mémoire qui est intitulé : " Contribution à l'étude du Béton fluide à haute compacité : utilisation des fines d'ajout de type calcaire.


Le principal objectif de ce travail est d'étudier à partir d'essais expérimentaux, l'influence des différents paramètres de formulation sur la fluidité du béton, qui font intervenir des modifications du squelette granulaire global, des particules de la taille du ciment jusqu'aux granulats.



Par ailleurs, une étude portant sur l'évolution physico-chimique des pâtes et des micro-bétons met en évidence l'effet des modifications sur l'évolution de la consistance du mélange, afin d'obtenir la planéité de la structure sans opération de surfacage, conduisant à la suppression de la vibration et du ragréage.

L'étude comprend deux parties :

 **Une première partie** qui débute par une étude théorique sur le béton en général. Cette étude sert de base pour les discussions et analyses qui seront données pour la compréhension des phénomènes expérimentaux observés dans les différentes études mécaniques et physico-chimiques du béton.

 **Une deuxième partie** qui concerne les essais expérimentaux effectués. Cette partie s'intéresse au comportement du béton fluide à haute compacité. On le compare ainsi au béton traditionnel de granulats de mêmes tailles et de même nature que ce dernier. Sur ces bétons, des essais de caractérisation mécanique et physico-chimique ainsi que des essais chimiques ont été réalisés. Ces suppléments d'étude ont pour but d'observer l'influence des granulats, des fines de cipolins, des super-plastifiants sur le comportement de ce béton fluide à haute compacité en termes de fluidité et de maniabilité et de durabilité. Cette partie se termine par une étude économique suivie d'étude d'impact environnemental.

Et enfin une conclusion de ces travaux, mettant en lumière les fruits de la recherche.



PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS

I. GÉNÉRALITÉ ET DEFINITIONS [1]

Le béton est en général un matériau fabriqué à partir du mélange du gravier, du sable, de l'eau et d'un liant. Le liant peut être qualifié « hydrique », lorsque sa prise se fait par hydratation. Ce liant est généralement le ciment; on obtient dans ce cas un « béton de ciment » un des plus souvent utilisés.

On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné ou bitume, ce qui conduit à la préparation du « béton bitumineux ».

Le mélange très fluide de ciment et d'eau est appelé « coulis ». Et lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de « mortier ». On peut optimiser la courbe granulaire du sable, auquel cas on parlera de « béton de sable ». Le béton frais associé à de l'acier permet d'obtenir le « béton armé », un matériau de construction courant. Le béton frais associé à des fibres permet d'obtenir des « bétons fibrés ».

En résumé, les quatre ingrédients essentiels de tout béton sont le sable, la pierre concassée, le ciment et l'eau. Le béton est le deuxième matériau de construction le plus utilisé mondialement, après l'eau potable.

II. HISTORIQUE DU BETON [2][3][4][5]

L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparaient l'avènement du béton.

Louis Vicat commença à caractériser les propriétés des différents ciments en fonction de leur proportion calcaire / argile. Et à partir de là, tout alla très vite.

C'est au XIXème siècle que le béton connu les plus grandes avancées. L'évolution du béton est amorcée par John Smeaton.



John Smeaton découvre en 1756 que les chaux effectuant les meilleures prises sont obtenues à partir de calcaire et d'argile et pas seulement de calcaire comme on le pensait jusqu'alors. De nombreux scientifiques s'intéressèrent à ce nouveau matériau.

Le pont du Jardin des plantes de Grenoble, premier ouvrage au monde en béton coulé, est construit en 1855 par Joseph et Louis Vicat.

Le mariage ciment-métal, appelé ciment armé est fait, puis le béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot (1848), le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898). En 1892, François Hennebique dépose le brevet qui fait de lui l'inventeur du béton armé. L'Exposition Universelle de 1900 le consacre comme « le plus important entrepreneur des travaux publics en béton armé ». Dès 1897, le béton armé entre à l'École des Ponts et Chaussées et sa technique est enseignée aux futurs ingénieurs...dont Eugène Freyssinet, le « père » du béton précontraint qui dépose un brevet en 1929.

Après la seconde guerre mondiale, les besoins de logements développent la «préfabri-cation » en France. De 1950 à 1965, le nombre de logements construits chaque année passe de 50000 à plus de 550000. Le béton est à l'honneur.

Durant les années 70, on a vu apparaître aux Etats-Unis des bétons ayant des résistances à la compression comprises entre 50 et 60 MPa pour construire les colonnes de gratteciel. Ces bétons étaient fabriqués en sélectionnant avec soin les ingrédients entrant dans la composition du béton ainsi que le réducteur d'eau utilisé et en remplaçant une certaine quantité de ciment Portland par une cendre volante performante qui est inventé par Aitcin P.C en 2001.

La fin des années 1980 voit l'arrivée des bétons à hautes performances (B.H.P.) , le béton fibré à ultra-hautes performances (B.E.F.U.P.) ainsi que les bétons fluides (BFL), les bétons autoplaçants (B.A.P.) et autonivelants (B.A.N.) .

III. LES COMPOSANTS DU BETON

Le béton est composé du ciment, des granulats, de l'eau et éventuellement des adjuvants.



1. Les ciments [6][7][8][9]

1.1. Définitions

Les ciments sont des liants hydrauliques : ils se combinent à l'eau en donnant des composés stables qui leurs confèrent une résistance mécanique.

Ils sont constitués essentiellement de silicates et aluminates de calcium. Ils sont obtenus par la cuisson à haute température (1400°C-1450°C) de mélanges dosés de calcaire et d'argile et se présente sous forme de poudres inodores, grises en général.

1.2. Les constituants du ciment Portland

1.2.1. Le constituant principal du ciment Portland

1.2.1.1. Le clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)
(Ferro-aluminate tétracalcique) (5-15% du clinker). (Ferrite)

Le tableau 1 suivant illustre le comportement et la déformation de chaque constituant de clinker.

Tableau 1: Les Comportements et la déformation de chaque constituant de clinker

CONSTITUANTS	COMPORTEMENTS DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DEGAGEE
C_3S	<ul style="list-style-type: none"> ○ Fait prise et durcit rapidement ○ Résistance à court terme élevé 	120 Cal/ g
C_2S	<ul style="list-style-type: none"> ○ Réagit lentement ○ Résistance à court terme élevé 	62 Cal/g
C_3A	<ul style="list-style-type: none"> ○ Prise de façon très désordonnée et rapide ○ Résistance faible 	207 Cal/ g
C_4AF	<ul style="list-style-type: none"> ○ Résistance faible 	100 Cal/ g

Source : LNTPB



Le clinker indiqué dans la figure 1 contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), diverses traces de métaux.

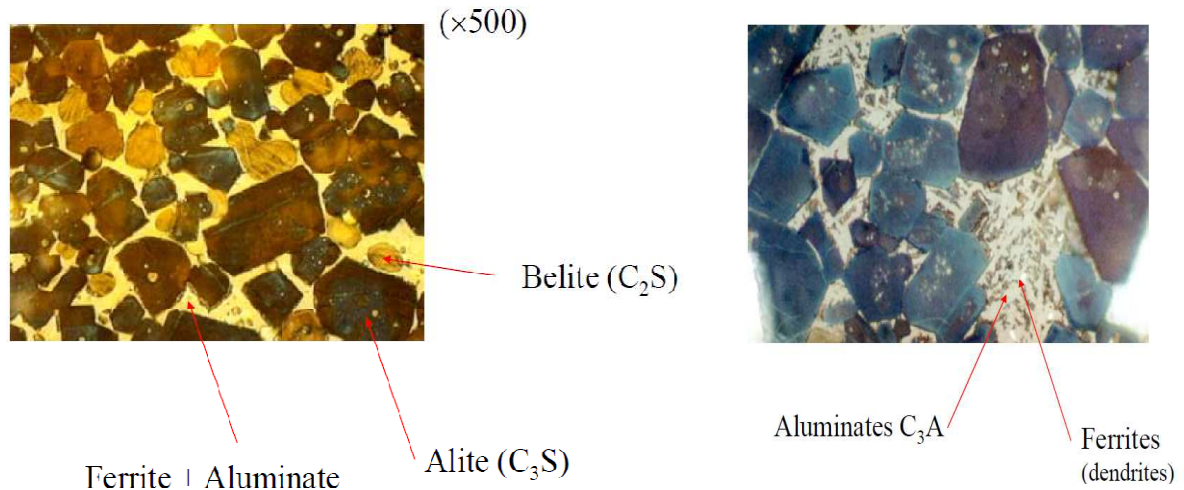


Figure 1: Schéma de la Structure minéralogique du Clinker

Source : Holcim Madagascar

La figure 2 ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du clinker portland.

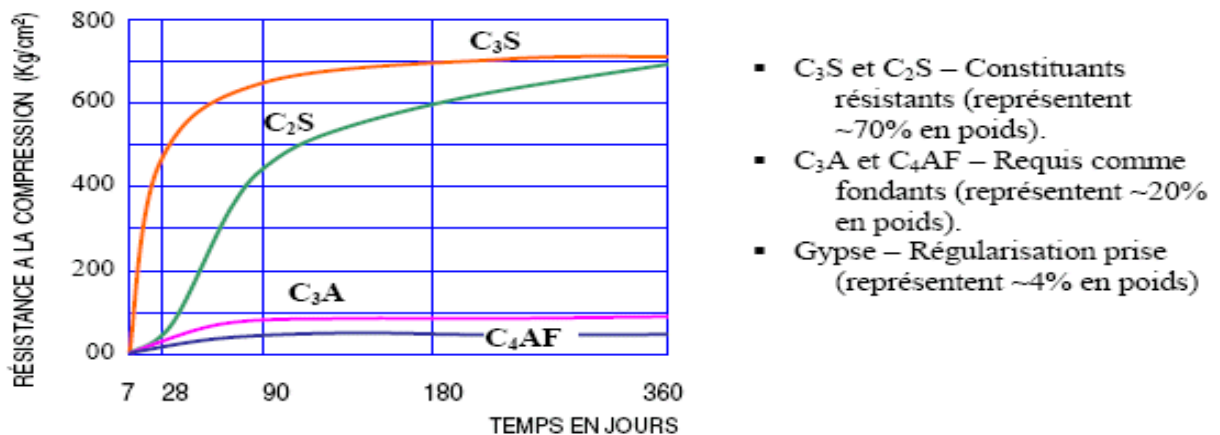


Figure 2: Développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland

Source : LNTPB



1.2.2. Les ajouts

Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les constituants les plus utilisés sont:

- **Calcaires (L)**

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. 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). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour moins de 10 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.



● Fillers (F)

Ce sont des “constituants secondaires” des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. 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).

La figure 3 suivant représente les constituants de ciment portland



Figure 3: Additions des autres constituants du ciment portland

1.3. Les caractéristiques du ciment

1.3.1. Caractéristiques physiques

Le tableau 2 suivant illustre les caractéristiques physiques de ciment portland en générale.

Tableau 2: Caractéristiques physiques du ciment Portland

PARAMETRES PHYSIQUES	CARACTERISTIQUES
Forme	sous forme de poudre
Couleur	Grise
pH en solution aqueuse	11 et 13,5 (basique)
Odeur	Inodore
Point de fusion	1610°C
Solubilité (miscibilité) dans l’eau	1,5 g/l à 20°C
Diamètre moyen des particules	5 à 30 µm
Masse volumique apparente	800 à 1300 kg/m ³ (1kg/l en moyenne)
Surface Spécifique Blaine (SSB)	2800 à 5000 cm ² /g

Source : LNTPB



La masse volumique apparente indique la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle est différente d'un ciment à un autre.

La surface spécifique est la surface développée par tous les grains solides contenus dans un gramme de poudre.

1.3.2. Composition chimique élémentaire

On distingue :

- Les 4 principaux oxydes : CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 ;
- Les éléments secondaires : MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , Cl^-

1.3.3. Compositions minéralogiques

Alite : 3 CaO , SiO_2 ou C_3S

Bélite : 2 CaO , SiO_2 ou C_2S

Célite : 3 CaO , Al_2O_3 ou C_3A

Aluminoferrite : 4 CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ou C_4AF

1.4. Rôle du ciment dans le béton

Le ciment remplit deux fonctions essentielles dans le béton :

- **La fonction liant** : Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature de ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.
- **La fonction filler** : Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Et le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notamment sa durabilité.

1.5. Choix de ciment pour le béton

Pour un béton courant, on peut utiliser presque tous les types de ciment : les CEM I, CEM II/A, CEM II/B, CEM III/A, CEM III/C, ou encore CEM V. Pour les bétons armés, la classe 32,5 est au minimum retenue, généralement, on utilise la classe 42,5.



2. Les granulats [11][12][13][14]

2.1. Définition

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 de la carrière ou extraits du lit de rivières.

2.2. Classe granulaire

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. Cette classe granulaire est représentée par le tableau 3.

D'après la norme NFP 18-304, un granulat est dit du type d/D lorsque le rapport D/d étant supérieur à 2, on a :

- refus sur la passoire des trous D ... < 10 % ;
- tamisât sur la passoire de trous d ... <10 % ;
- tamisât sur la passoire de trous ... < 3 %.

Concernant la définition de filler (grain très fin), le passant au tamis de 2 mm doit être ≥ 99 %, celui au tamis de 0,125 mm ≥ 80 %, le passant au tamis de 0,063 mm est ≥ 70 %



Tableau 3: Classification des granulats par grosseur

Granulats		Diamètre des passoires [mm]	Mailles 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 gallets		>100	-

Source : LNTPB

2.3. Les types de granulats

Selon la norme XP P 18-545, laquelle reprend les normes européennes, trois classes de granulats sont distinctible :

- **Le sable** : c'est un granulat pour lequel la dimension la plus grande (D) est inférieure ou égale à 4 mm, et dont la dimension la plus petite (d) est égale à 0.
- **Le gravillon** : c'est un granulat pour lequel la dimension la plus grande (D) est supérieure ou égale à 5 mm, la dimension la plus petite (d) est supérieure ou égale à 2 mm.
- **La grave** : la grave désigne quant à elle tous les granulats de dimension (d) égale à 0, et dont la dimension la plus grande (D) est supérieure à la limite désignant les sables, c'est-à-dire supérieure à 4 mm (6mm dans le cas de la norme NF EN 13-242) et ce jusqu'à 90 mm.

2.3.1. 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 80µm à 316µm ;



- sables moyens dont les diamètres des grains variant de 316 μ m à 1,25mm ;
- sables gros dont les diamètres des grains variant de 1,25mm à 5mm.

La photo 1 suivante montre la photo des sables utilisés pour la formulation de béton



Photo 1 : Sables utilisés pour béton

2.3.2. Les gravillons

Les gravions sont les éléments passant au travers des trous ronds des passoirs de 25 mm de diamètre.

On distingue :

- les petits graviers dont les diamètres des grains variant de 5 mm à 10mm ;
- les graviers moyens dont les diamètres des grains variant de 10 mm à 16 mm ;
- les gros graviers dont les diamètres des grains variant de 16 mm à 25mm.

Les photos 2 et 3 suivantes représentent les graviers des diamètres respectifs 10 mm et de 5 mm.





Photo 2: Gravier de diamètre 10 mm



Photo 3 : Gravier de diamètre 5mm

2.3.3. Le grave

Un grave est un granulat composé d'un mélange de sable et de gravillons. Celui-ci est utilisé principalement dans l'exécution des corps de chaussées,... Les graves peuvent être naturelles, reconstituées en centrale, traitées aux liants hydrauliques (ciment, laitier...) ou à la chaux, ou encore traitées aux liants hydrocarbonés (bitume).

Selon la norme Française, les granularités typiques des graves sont : 0/14 mm, 0/20 mm, 0/31.5 mm et 0/63 mm, voire 0/80 et 0/150 mm.

2.4. Caractéristiques géométriques des granulats

La connaissance des caractéristiques des granulats joue un rôle majeur sur la propriété du béton. .

Quelques paramètres des granulats sont indiqués par le tableau 4 suivant.



Tableau 4: Quelques paramètres géométriques des granulats

PARAMETRE PHYSIQUE	CARACTERISTIQUE
Forme	sous forme des gravillons ou granularités
Le coefficient d'aplatissement (FI)	compris entre 0 et 3
L'indice de forme (SI)	(SI)= E/G > 1,58
Diamètre	inférieure à 125 mm

2.5. Caractéristiques physiques des granulats

2.5.1. Masse volumique apparente

C'est la masse qu'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains (volume apparent).

2.5.2. Masse spécifique

Le poids spécifique désigne la masse d'un objet par unité de volume de substance pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu).

2.5.3. Densité absolue

C'est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un égal volume d'eau à 4 °C. La densité absolue est donc égale au millième de la masse spécifique. C'est une grandeur sans dimension.

2.5.4. Densité apparente

La densité apparente des granulats est définie comme le rapport entre leur masse volumique apparente et leur masse d'un égal volume d'eau à 4 °C, elle est égale au millième de la masse volumique. Elle n'a pas d'unité

2.5.5. Compacité C

La compacité C est définie par la relation suivante :

$$C = \frac{V_t - V_{vide}}{V_t} = 1 - \frac{V_{vide}}{V_t} \quad (1)$$



Avec $V = V_t - V_{vide}$, le volume de matière pleine

V_t , le volume total et V_{vide} , le volume du vide

La compacité est alors le rapport du volume de matière pleine au volume total

2.5.6. Porosité P

La porosité indique l'importance des vides dans un matériau, elle peut-être en fonction de volume total V_t , de volume du vide V_{vide} , de la compacité C, et d'indice de vide Φ .

$$P = \frac{V_{vide}}{V_t} \quad (2)$$

$$\text{Or l'indice de vide est } \phi = \frac{V_{vide}}{V_t - V_{vide}} \Leftrightarrow \phi V_t = (1 + \phi) V_{vide} \Leftrightarrow \frac{V_{vide}}{V_t} = P = \frac{\phi}{1 + \phi} \quad (3)$$

$$\text{De plus (1) } C = 1 - \frac{V_{vide}}{V_t} = 1 - P \Leftrightarrow P = 1 - C \quad (4)$$

$$\text{Et encore, } \frac{P}{C} = \frac{V_{vide}}{V_t} \cdot \frac{V_t}{V_t - V_{vide}} = \frac{V_{vide}}{V_t - V_{vide}} = \phi \Leftrightarrow P = \phi C \quad (5)$$

2.5.7. Module de finesse Mf

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué au sable (0/5), dont elle est une caractéristique très importante. C'est une grandeur qui permet d'évaluer la finesse relative d'un granulat dans son ensemble. Le module de finesse est égal au 1/100 des refus exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série. 5 mm ; 2,5 mm ; 1,25 mm ; 0,630mm ; 0,315mm ; 0,160mm.

Un bon sable à béton doit avoir un Mf = 2,2 à 2,8. Un Module de finesse faible indique une majorité d'élément fin dans le sable, tandis qu'un module de finesse élevé marque la présence d'élément grossier dans le sable.



Le tableau 5 suivant renseigne la correspondance entre ouverture et module AFNOR des différents tamis.

Tableau 5: Correspondance de module, maille de tamis et diamètre de passoires.

MODULE DE TAMIS	MAILLE DES TAMIS d [mm]
20	0,08
23	0,16
26	0,315
29	0,625
31	1
32	1,25
34	2
35	2,5
36	3,15
37	4
38	5
41	10
42	12,5
43	16
44	20

Source : Laboratoire chimie minérale de l'ESPA

3. L'eau de gâchage [15]

On remarque que l'eau utilisée pour le gâchage du béton est généralement supérieure à celle nécessaire pour l'hydratation du ciment.

L'eau de gâchage entrant dans la composition du béton influe, d'une part sur la qualité du béton, et d'autre part sur la facilité de mise en œuvre.

L'eau de gâchage doit être pure et exempte d'odeur, de matière en suspension et d'alcali.

Voici le tableau 6 qui représente les impuretés acceptables de l'eau de gâchage pour le béton.



Tableau 6: Impuretés acceptables dans l'eau de gâchage

IMPURETES	BETONS	
	BETONS DE QUALITES	AUTRES BETONS
Matières en suspension	2g/L	5g/L
Matières dissoute	15 g/L	30g/L

Source : LNTPB

4. Les adjuvants [16]

Les adjuvants sont des produits liquides ou pulverulants qui s'additionnent en faibles quantité au mélange de ciment, de sable et de gravier et d'eau pour optimiser selectivement les caracteristiques du beton confectionné.

Dans la formulation de beton, elles permettent en l'occurrence de reduire la quantité de l'eau de gachage et d'ameliorer l'étanchéité du beton en lui conservant une bonne ouvrabilité. Les adjuvants influencent la prise et le durcissement du ciment.

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

4.1. Plastifiants

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

4.2. Superplastifiants

Elles peuvent être aussi utilisés 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 superplastifiants les plus utilisés sont ceux à base de dérivés de naphthalène ou de mélamines, ainsi que de polyacrylates et de polycarboxylates.

Les superplastifiants 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.

4.3. 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.

4.4. Retardateurs et accélérateurs de prise

Ce sont des adjuvants destinés à être intégrés dans la masse du béton et pas des retardateurs de prise qui sont appliqués en surface pour dénuder celle-ci. 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 7 suivant représente les différents types d'adjuvants avec leurs utilisations

Tableau 7: Types et utilisation des différents adjuvants

ADJUVANTS	UTILISATIONS
Superplastifiants	Nécessité d'une bonne ouvrabilité
	Préfabrication
	Bétons à hautes performances
Plastifiants	Transports pneumatique 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
Retardateurs	Temps chaud
	Injection à grande profondeur (élévation de température)
	Voile d'étanchéité
	Transport de béton sur longue distance
	Reprise de bétonnage – confection de béton avec granulats apparents (parement lavées)
	Parois moulées dans les sols
	Coulage en continue
Entraîneurs d'air	Route, barrage, ponts, travaux
	Ouvrage exposé à l'action des eaux agressives
	Bétons extrudés



CHAPITRE II: FABRICATION INDUSTRIELLE DU BETON

I. PROCESSUS DE FABRICATION INDUSTRIELLE DU BETON

Pour fabriquer le béton, il faut tout d'abord doser les constituants, en référence à une formule sélectionnée, puis assurer un mélange aussi homogène que possible. La chaîne de fabrication du béton passe par trois étapes: le stockage, le dosage et le malaxage.

La fabrication de béton peut être faite en série continu ou discontinu. Pour une production à très forte cadence et sur des périodes de plusieurs heures, comme pour les barrages et les chaussées, des centrales continues sont souvent utilisées.

La figure 4 suivant illustre de façon simplifiée le diagramme schématique de fabrication industrielle du béton.

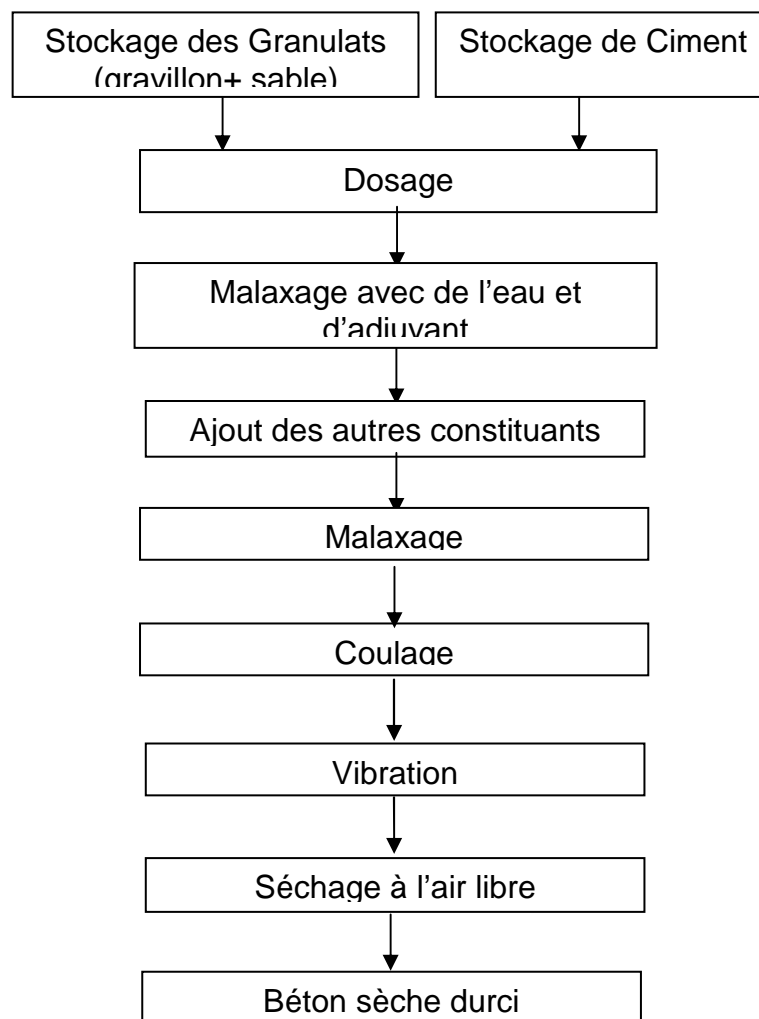


Figure 4: Diagramme schématique de la fabrication du béton



1. Stockage

Sur la plupart des chantiers, les granulats sont stockés à l'air libre.

Mais souvent dans les centrales à béton et dans les usines de préfabrication, les granulats sont souvent stockés en silos, ce qui présente l'avantage d'une teneur en eau plus régulière mais qui n'en exclut pas complètement le contrôle.

Il faut protéger aussi le ciment de l'humidité. Il faut organiser l'entrée et la sortie des sacs de façon que certains d'entre eux ne risquent pas de trop vieillir.

2. Dosage

Le dosage est l'ensemble des opérations permettant de remplir les constituants dans le malaxeur de sorte que ses proportions fixées par les formules nominales soient respectées.

Le dosage se fait en référence à des consignes qui sont déterminées à partir de la formulation théorique, et par les paramètres d'état des constituants (teneur en eau, absorption d'eau des granulats...). Dans la pratique, les quantités de matériaux effectivement utilisées dans une gâchée changent en plus ou en moins, par rapport aux formules théoriques à fabriquer.

Les Tolérances respectés lors de dosage sont définit sur le tableau 8.

Tableau 8: Tolérances respectés selon la norme EN 206-1

COMPOSANTS	TOLERANCES
Ciment	± 3 % de la quantité requise
Eau	
Ensembles des granulats	
Additions utilisées en quantités > 5% de la masse de ciment	
Adjuvant et additions utilisées en quantités ≤ 5 % de la masse de ciment	± 5 % de la quantité requise



3. Malaxage

Le malaxage des matériaux se fait en général à l'aide d'appareils mécaniques : malaxeurs et bétonnières.

Les bétonnières sont des cuves basculantes pour les plus petites ou des cuves à axe « horizontal » pour les plus grandes. Les cuves sont pourvues de palettes qui assurent le mélangeage des différents constituants pour les cuves basculantes : 50-200 L, et peut atteindre 1 m³ pour les bétonnières à axe horizontal.

4. Mise en œuvre

Les coffrages doivent être stables, suffisamment rigides pour pouvoir supporter la poussée du béton. Ils doivent aussi être étanches pour éviter la fuite. S'ils sont en bois, ils doivent être mouillés pour éviter une absorption d'une partie de l'eau de gâchage.

Les armatures doivent être aussi correctement positionnées et bien callées.

5. Coulage

Les précautions à prendre lors du coulage sont :

- limiter les hauteurs de chute libre du béton ;
- prévoir des couches successives de 60 à 80 cm ;
- maintenir une vitesse de bétonnage aussi constante que possible ;
- vérifier le bon enrobage des armatures ;
- éviter la mise en place lors de trop forte pluie.

6. Vibration

La vibration est le moyen le plus courant pour donner au béton sa compacité maximale par diminution des vides d'air et un parfait remplissage des moules.

On ne doit pas faire une vibration trop prolongée (il existe un temps optimal) car on risquera une ségrégation.



CHAPITRE III: LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES ET NORMALISATION DU BETON

I. LES CARACTERISTIQUES MECANQUES [6][20]

Les propriétés mécaniques du béton dépendent de plusieurs paramètres liés à la répartition du système granulaire comme à la propriété physico-chimique de la matrice cimentaire.

Toutefois, toutes les corrélations entre les résistances peuvent varier dépendamment de la composition du béton.

1. Resistance en compression en 28 jours (R_{c28})

La résistance (contrainte) maximale en compression du béton, R_c , donnée en MPa est l'une des propriétés les plus importantes du béton. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur le béton à 28 jours d'âge tel que spécifié par la norme CAN/CSA A23.2-9C afin de vérifier la qualité du béton produit. La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton.

Plusieurs lois existent pour relier les résistances mécaniques du béton à la porosité capillaire dans le béton qui provient essentiellement de l'ajout d'eau. Les relations fondamentales les plus utilisées, qui lient la résistance à la compression R_c d'un béton aux volumes de ciment C , d'eau E et de vides V contenus dans un mètre cube de béton durci, sont celles de René Féret (1892), de Bolomey (1935) et d'Abrams (1919). La relation de Féret est toujours employée, pour prévoir les résistances en compression des mortiers et des bétons. Cette relation a depuis été ajustée à des paramètres de formulation qui prennent en compte les ajouts éventuels de minéraux. C et E sont les masses respectives de ciment et d'eau par unité de volume de béton.

Ces lois de Féret, de Bolomey et d'Abrams sont résumées dans le tableau 9 suivant



Tableau 9: Resistances en compressions selon la loi de Féret, Bolomey et Abrams

LOI	RESISTANCE MECANIQUE	REMARQUES
Féret	$f_{cb} = R_{c28} \left(\frac{C}{(C + E + V)} \right)^2$	Rc28, la classe vraie du ciment mesurée à 28 jours
Bolomey	$f_{cb} = K \cdot R_{c28} \left(\frac{C}{E - 0,5} \right)$	Rc28, la classe vraie du ciment mesurée à 28 jours, K un coefficient qualitatif qui dépend de la qualité des granulats (nature minéralogique, adhérence, forme, propriété)
Abrams	$f_{cb} = ab \left(\frac{E}{C} \right)$	Equation exponentielle toujours utilisée en Amérique du Nord comportant deux paramètres ajustables a et b (respectivement ≈ 147 et $0,0779$ MPa)

2. Résistance à la traction

Selon la norme CSA A23.2-13C, la résistance en traction du béton est comprise entre 8 et 12% fois à la résistance en compression. Elle est estimée à environ $0,4\sqrt{R_c}$ à $0,7\sqrt{R_c}$.

3. Resistance en cisaillement et module d'élasticité

La résistance en cisaillement du béton est d'environ 5% fois à celle de compression. Le module d'élasticité (E_c) est défini par le rapport de la contrainte normale (σ_c) et la déformation générée (ε_c) dans le domaine linéaire élastique.

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad (6)$$

Suivant la norme, le module d'élasticité du béton varie de 14000 à 41 000 MPa ou à $5000\sqrt{R_c}$.

4. Résistance à la flexion ou module de rupture

La connaissance de la résistance à la flexion est importante lors de la conception des chaussées et d'autres dalles ou béton de pavages. La résistance à la flexion d'un béton de masse volumique normale est comprise entre $0,7\sqrt{R_c}$ et $0,8\sqrt{R_c}$.



II. LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES [5][6][21]

1. Masse volumique

En générale, Les bétons ont une masse volumique comprise entre 2000 et 2400 kg/m³.

Pour les bétons à haute compacité, cette masse volumique atteint jusqu'au 2500 à 2800kg/m³. Ceci est dû à la modalité de mise en œuvre et, avec une forte vibration.

2. Coefficient de dilatation

Le coefficient de dilatation du béton varie avec le dosage en ciment. Il est d'autant plus grand que le dosage est plus élevé.

En moyenne, les bétons doit avoir un coefficient de dilatation environ 10^{-5} qui est voisine de l'acier. Le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de sa composition et de la température. Ce dernier est compris, entre 9 et 12 10^{-6} à la condition normale de température (T= 25°C).

3. Les retraits

3.1. La contraction de Chatelier et retrait endogène

Le volume absolu d'un liant hydraulique en cours d'hydratation diminue, indépendamment de la variation du volume apparent (macroscopique) sans échange avec l'extérieur. Powers et Paulini ont mesuré les contractions de Chatelier sur des phases pures. Au cours de l'hydratation du C3S, la phase solide augmente en volume par la formation des hydrates. Cette augmentation de volume d'environ 110% traduit la structuration de la pâte de ciment au cours de l'hydratation et dépend fortement de la densité des C-S-H formés. Cependant, le volume total des produits finaux décroît de 10% par rapport au volume initial des réactifs. Cette contraction de 7 à 10 % est du même ordre de grandeur que la contraction de Chatelier mesurée sur un ciment Portland (Buil, 1979).

Le retrait endogène, conséquence physique de la contraction de Chatelier, est un phénomène bien connu de l'industrie bétonnière. Cependant, pour des bétons dont le rapport E/C est supérieur à 0,5, les effets du retrait sont relativement faibles.



3.2. Le retrait hydraulique avant prise et en cours de prise

Il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation (rapport élevé surface/volume des pièces, en atmosphère sèche, par temps chaud ou vent violent), soit par absorption (coffrage, granulats poreux). Une surface de béton frais peut évaporer plus d'un litre d'eau par m² et par heure. Ce retrait sera limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure (film freinant l'évaporation).

3.3. Le retrait hydraulique à long terme

Il est dû à un départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il varie suivant les ciments (nature, finesse) et il est proportionnel au dosage en volume absolu de la pâte pure.

3.4. Le retrait thermique

Il est dû à des baisses rapides de température provenant:

- soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges, qui provoque une élévation de température, suivie de son refroidissement;
- soit des variations climatiques du milieu.

Ces deux causes additionnent parfois leurs effets. Les effets de la première peuvent être réduits en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation. L'ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 300µm/m pour un béton usuel.

Le retrait de séchage ou retrait de dessiccation se développe si l'humidité relative du béton est supérieure à l'humidité de l'air ambiant dans lequel se trouve le béton. Un gradient d'humidité se crée en fonction de la finesse de la porosité du béton et peut entraîner une fissuration de peau plus ou moins importante. Un exemple couramment rencontré sur chantier est celui du gradient d'humidité qui se développe lors du décoffrage du béton.

III. NORMALISATION DU BETON (Norme NF P 18 305) [13]

La présente norme a pour but de définir les bétons préparés en usine, d'en préciser les conditions de fabrication et d'en fixer les caractéristiques.



1. Bétons Prêts à l'Emploi (BPE)

Les bétons prêts à l'emploi visés doivent préparer à partir d'un mélange de liant hydraulique, de granulats courants naturels ou artificiels, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Tous les composants sont dosés dans une installation fixe appelée «centrale», puis malaxés pour être livrés prêts à être mis en place sans autres traitements.

2. Bétons à Caractères Normalisés (BCN)

Les BCN doivent recourir à la norme qui est indiquée sur le tableau 10 suivant.

Tableau 10: Norme NF P 18 305 pour les BCN

AFFAISSEMENT	CLASSE DE CONSISTANCE DES BETONS
0 à 4 cm	Ferme
5 à 9 cm	Plastique
10 à 15 cm	Très plastiques
≥ 16 cm	Fluide

La valeur de la résistance à la compression à 28 jours de ces bétons garantie pour chaque lot, est désignée par la lettre B suivi de la valeur de la résistance exprimée en MPa. On utilise souvent la norme B 16,0 ; B 20,0 ; B 25,0 ; B 30,0 ; B 35,0 ; B 40,0. (Exemple BCN : CPA 55 - F - B 33,0 - 0/25 sans adjuvant - NF P 18 305).

3. Bétons à caractères spécifiques (BCS)

A la commande, ces bétons BCS sont définis expressément par toutes les données précisant leur composition et le cas échéant, les caractères particuliers demandés.

Le dosage en ciment est celui fixé à la commande. Les granulats doivent répondre aux conditions de normes NF P 18 301 (granulats pour bétons de construction), NF P 18 302 (laitier concassé) ou NF P 18 306 (laitier granulé) et NF P 18 304 (granulométrie des granulats).



CHAPITRE IV: LES FINES D'AJOUT

Pour modifier les propriétés mécaniques du béton, on peut ajouter dans sa composition des éléments fins comme le cipolin broyé, la cendre de balles de riz, les déchets de verre broyés,...

I. CIPOLINS BROYES [18]

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 cipolin (FCp) 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. Propriétés des cipolins

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.

1.2. 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 présenter aussi comme des teintes de jaune, gris ou brun.

2. Quelques gisements de cipolin à Madagascar [18][19]

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 $255\,000\text{ m}^3$. 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 $300\,000\text{ m}^3$. 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 $100\,000\text{ m}^3$
- 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 m^3

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.

2.1. 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° à 80° Sud.
- Ibity centre, situé dans la partie centrale. Ce secteur renferme des lentilles de pegmatites.
- Collines des Aloès, situé 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.



II. CENDRE DE BALLES DE RIZ [20]

La Cendre de Balle de riz a une forte teneur en SiO_2 (81 %), ce qui est prévisible, la combustion de balles de riz donnant des cendres à haut pourcentage en silice amorphe.

Dans la formulation de béton, elle est utilisée comme filler siliceux ou FS.

III. DECHETS DE VERRE BROYE

Les déchets de verre concassés sont utilisés en guise de granulats pour la confection des bétons, leurs propriétés sont comparables à celles des autres granulats du point de vue constitution, résistance et durabilité. L'ajout des déchets de verre dans le béton a pour but d'améliorer la résistance mécanique du béton et aussi de recycler les déchets pour préserver l'environnement.

Les verres renferment plusieurs variétés chimiques les alcalis ; les silicates binaires, borosilicates et les soudes ; les chaux ; silicates ternaires, fabriqués en différentes couleurs.

Dans la formulation des bétons, les déchets de verre utilisés sont souvent les verres de vitrage brisés, les bouteilles rejetées broyées à une finesse environ de $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$, qui sont représentés sur les photos 4 et 5.



Photo 5: Déchets des Verres

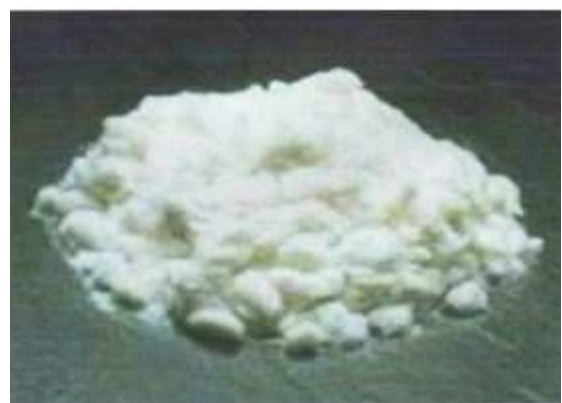


Photo 4: Poudre des Verres broyés

CHAPITRE V: QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON

Généralement, il existe deux sortes de méthodes qui sont dites : « à granulométrie continue » et « à granulométrie discontinue » mais nous allons, citer les méthodes les plus connus et les plus utilisés dans la formulation de béton.

I. METHODE DE BOLOMEY [22]

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

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (7)$$

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.



II. METHODE DE FAURY [22][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 :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{r}{D} - 0,75} \quad (8)$$

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 à $\sqrt[5]{d}$ pour le traçage de la courbe de référence de Faury.

III. METHODE 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 11 suivant montre le dosage en ciment et les dimensions maximales D des granulats utilisées par ces méthodes.



Tableau 11: 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 : $\% S = \frac{M_{f_2} - M_f}{M_{f_2} - M_f}$ (9) Et $\% G = \frac{M_f - M_{f_1}}{M_{f_2} - M_f}$ (10)

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

IV. METHODE 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.

On calcule 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.

On ajoute 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.

V. METHODE DE JOISEL [9]

A. Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{d}$, m varie de 3 à 10 et dépend de la compacité et du moyen de serrage. Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses n'est plus systématiquement proportionnelle à $\sqrt[5]{d}$ (Faury) mais à $\sqrt[m]{d}$.

On aboutit à une granularité continue et pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $\frac{D}{2}$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2}/D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite. C'est par une méthode graphique que se déterminent les pourcentages des divers granulats.

VI. METHODE DE DREUX GORISSE [11][13]

Cette méthode est la méthode la plus utilisée 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 ferrailé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferrillées : 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 ferrailé), 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 indiqué le tableau 12 suivant

Tableau 12: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône d'Abrams ou au test d'ouvrabilité C.E.S.

Plasticité	Serrage	Affaissement A 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 maximale des granulats (D_{max})

Le diamètre maximal des granulats (D_{max}) est choisi suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir. Le tableau 13 suivant montre les règles à suivre, en général. Ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis qu'une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuées de 20% environ.



Tableau 13: Diamètre maximale du granulat en fonction du ferrailage et de l'enrobage

Caractéristiques de la pièce à béton	Dimension D des granulats	
	Roulés	Concassés
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	$D \leq 0.2 \text{ hm}$	

2. Dosage en ciment

Le ciment doit être de classe 42,5 selon les hypothèses de la théorie de Dreux.

On commencera par évaluer approximativement le rapport Ciment / Eau (C/E) en fonction de la résistance moyenne désirée R_{c28} .

$$R_{c28} = G \times F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (11)$$

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/ m3)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en l/m3)



Le tableau 14 suivant renseigne les valeurs approximatives du coefficient granulaire G en fonction de diamètres D_{\max}

Tableau 14: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

QUALITES DES GRANULATS	DIAMETRES D DES GRANULATS		
	Fins ($D_{\max} < 16\text{mm}$)	Moyens ($25 < D_{\max} < 40\text{mm}$)	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

On peut fixer arbitrairement le dosage en ciment à l'aide de l'abaque de la figure 6 suivant, en fonction de la valeur de l'affaissement correspondant à l'ouvrabilité désirée et de la valeur du rapport C/E trouvée.

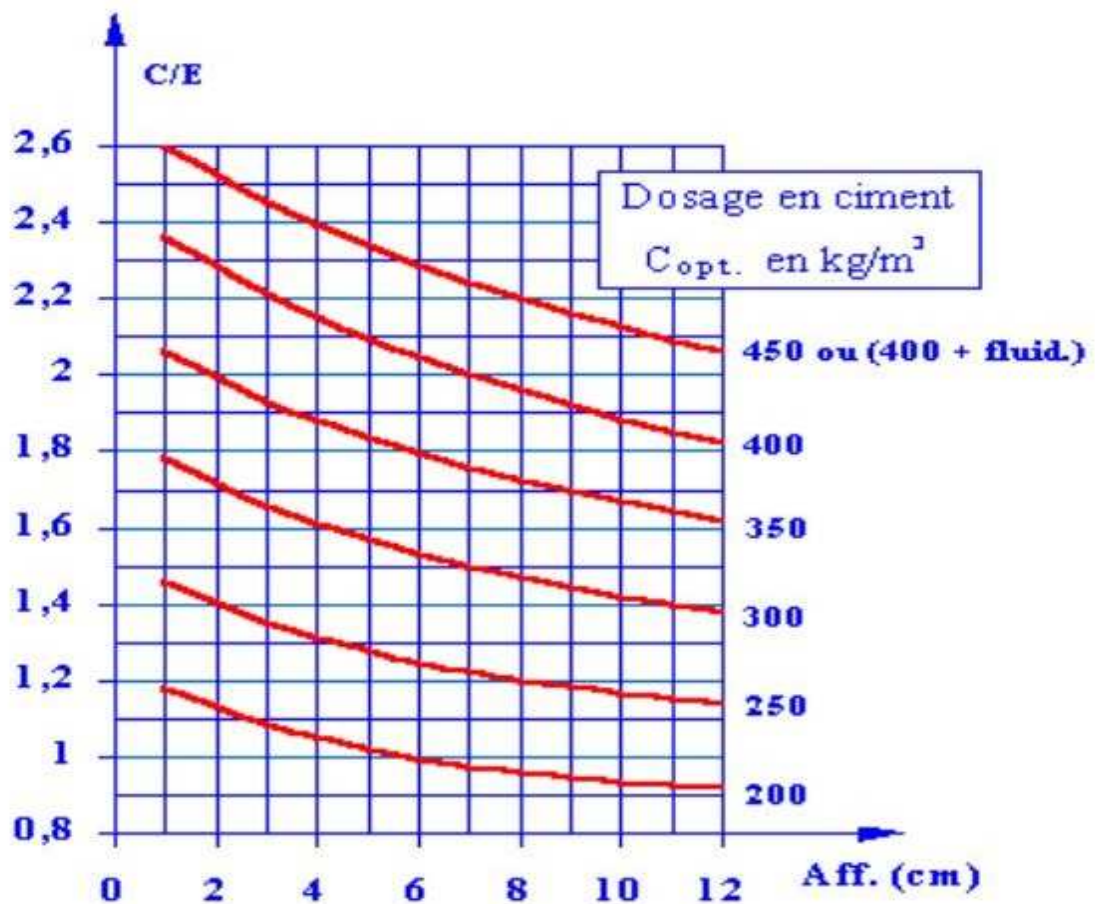


Figure 5: Abaque permettant de déterminer C en fonction de l'affaissement et du rapport C/E



3. 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 maximale des granulats est d'environ $D_{\max} = 25$ mm (diamètre la plus courante). 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 évaluée d'après les valeurs du tableau 15 suivant en fonction de D_{\max} .

Tableau 15: Corrections en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats

Diamètre maximales 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 :

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

4. 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 $[\text{mod}(D_{\max}) ; 100\%]$
- point de brisure A à pour coordonnées :

- en abscisse : si $D_{\max} \leq 25 \text{ mm}$; $X = \frac{D_{\max}}{2}$ (12)

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

- en ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p$ (13)

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 est données dans le tableau 16

Tableau 16: 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+fluidif	-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 effectué 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 $K_s = 6M_f - 15$. (14)



Si la quantité du béton est précisée « 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.

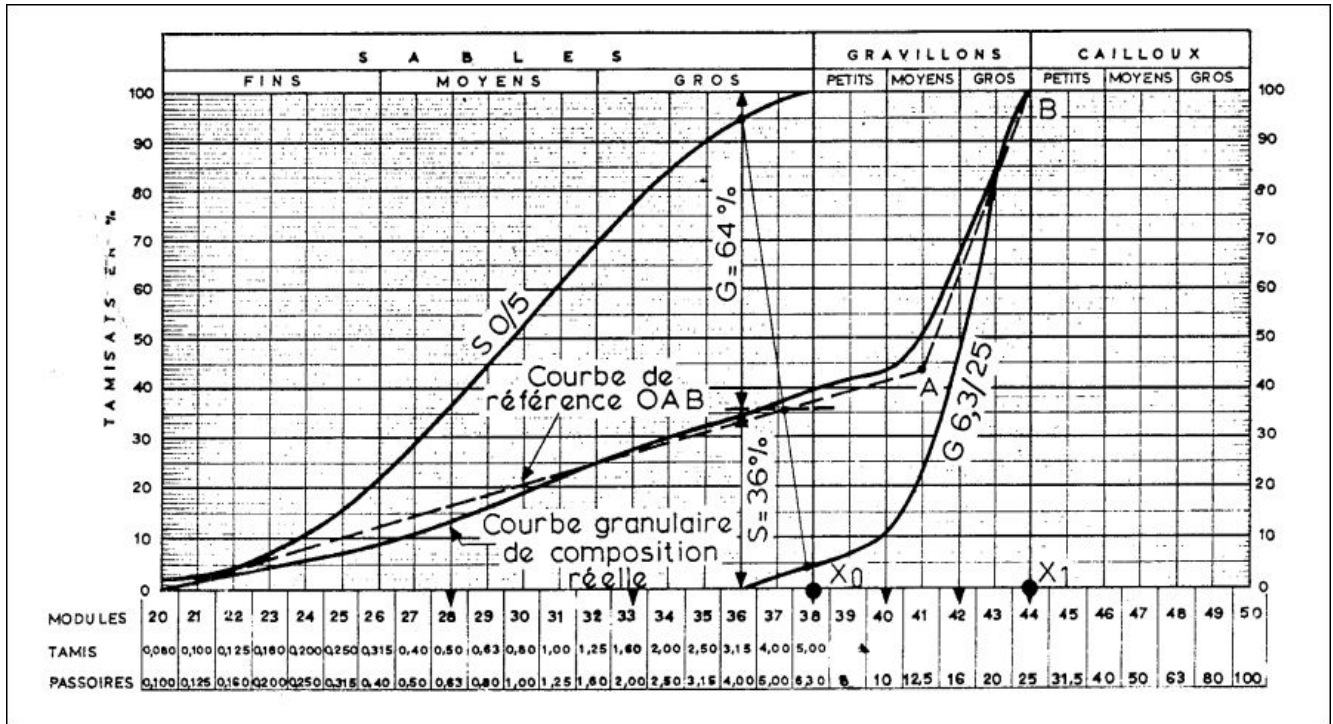


Figure 6: Exemple de tracé de courbe de référence et de détermination des proportions des granulats

5. 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 17



Tableau 17: Valeurs de coefficient de compacité δ

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		Dmax						
		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 si non il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0.01 ;
- sable et gravier = - 0.03
- pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de δ qui correspondant ici à des granulats denses ordinaires.

6. Dosage des granulats

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



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

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

$$\text{Dosage de granulat } i \text{ en [Kg]} = (\%G_i) \times \sigma_i \left(1000\delta - \frac{C}{\sigma_c} \right) \quad (15)$$

Avec :

σ_i est les masses volumiques absolues de chacun des granulats ;

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

$\%G$, le 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).

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



CHAPITRE VI: GENERALITE SUR LES BETONS FLUIDES

I. DEFINITION [23] [24]

Les bétons fluides sont des bétons capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et reste homogène au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et en place (absence de ségrégation statique). Ce béton doit être apte à passer à travers les armatures serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange.

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. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la formulation choisie.

La figure 8 suivante montre la différence de la composition de béton ordinaire d'un béton fluide .

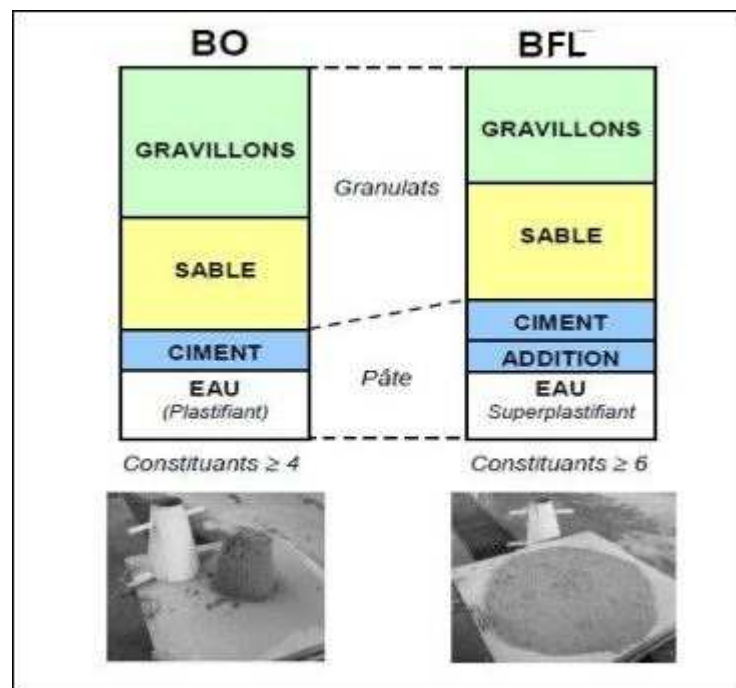


Figure 7: Composition du Béton Ordinaire et du Béton Fluide



Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences de cahiers des charges, la composition d'un béton fluide doit avoir un certain nombre de caractéristiques :

- Grande proportion en fines ;
- Volume de pâte important ;
- Ajouts de superplastifiant et rétenteurs d'eau (agent de viscosité);
- Faible volume en gravillons.

II. ROLES DES FINES DANS LE BETON FLUIDE

Le but dans l'augmentation de la quantité de fines de cipolin dans notre béton, est d'assurer la maniabilité comme indique la figure 9. Les fillers calcaires ajoutés à un ciment peuvent jouer plusieurs rôles:

- un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau) ;
- un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle ;
- un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes decristallisation et points d'ancrage des hydrates ;
- un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

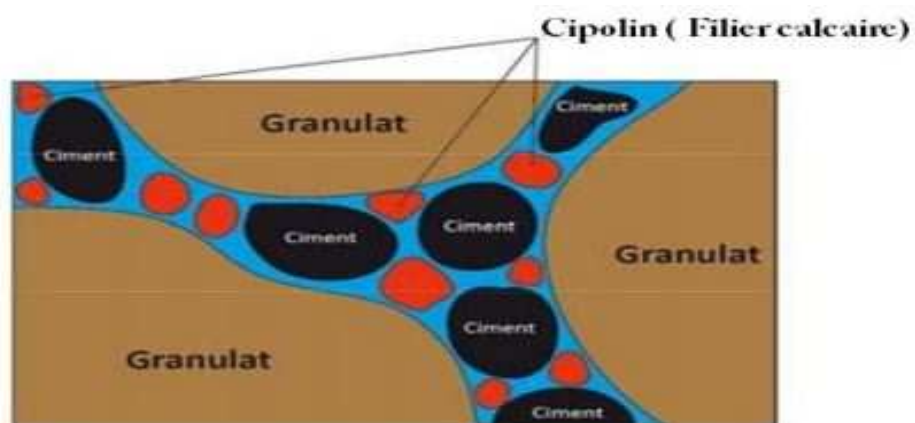


Figure 8: Effet de filer calcaire dans le béton



III. ROLE ET ACTION DU SUPERPLASTIFIANT DANS LE BETON FLUIDE

Ce qui caractérise la composition du béton fluide est l'utilisation de superplastifiant.

Le superplastifiant interagit avec les particules du mortier (ciment et additions) en s'absorbant à leurs surfaces comme indique la figure 10, ce qui permet d'éviter le phénomène de floculation d'eau et de formation d'agréats.

Les particules sont alors dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques, l'eau piégée entre les particules est dégagée, la proportion d'eau libre est donc plus importante.

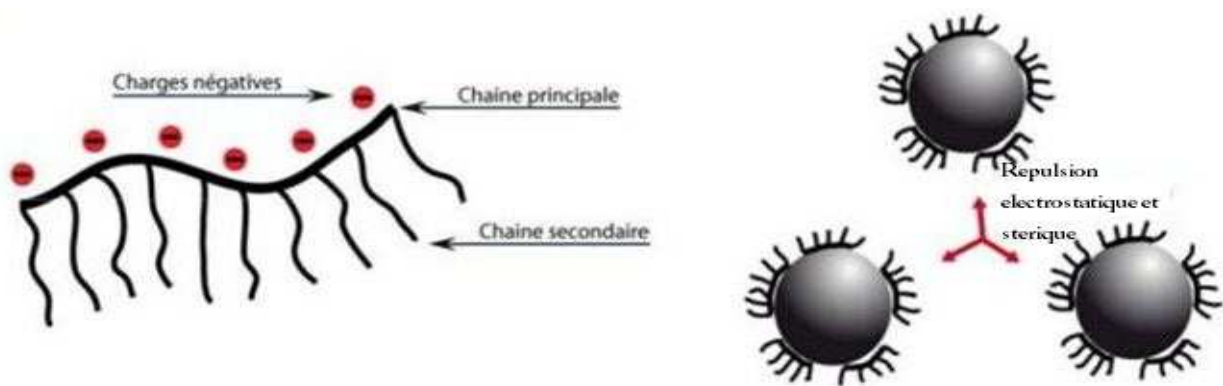


Figure 9: Mécanisme d'action du superplastifiant type acrylique

IV. MISE EN ŒUVRE

La principale différence, entre un BFL 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 BFL 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 BFL et les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BFL, qu'on parle également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.



La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau.

La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de l'AFGC, quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important.



PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES



INTRODUCTION

La durabilité, le retrait et la fissuration du béton nous amène à nous fabriquer un béton plus fluide, plus performant, et plus stable.

Dans le cadre de cette étude nous nous attacherons à produire un référentiel d'exploitation permettant de comparer le BFLHC (Béton Fluide à Haute Compacité) par rapport au béton ordinaire classique

Des généralités sur les bétons fluides ont été exposées dans la partie bibliographique, afin de comprendre leurs spécifications.



CHAPITRE VII: CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES

Pour pouvoir contribuer à l'étude de béton fluide à haute compacité ; les matières premières sont classées dans trois catégories :

- Les matériaux de base : Le ciment, les granulats et l'eau
- La fine d'ajout : Le cipolin broyé
- L'adjuvant : le super plastifiant

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

I. LE CIMENT CEM II/A –V- 42,5

Dans toute l'expérience, le ciment Manda CEM IIA-V 42,5 provenant de la société HOLCIM Madagascar est utilisé. Il est vendu dans tous les quincailleries dans un sac de 50 Kg.

1. Les caractéristiques physiques

Le tableau 18 suivant montre les caractéristiques physiques de ciment CEM II/A-V 42,5N de la société Holcim.

Tableau 18: Caractéristiques physiques du ciment Manda CEM II/A de la société Holcim Madagascar.

PARAMETRES PHYSIQUES	CARACTERISTIQUES
Forme	poudre
Couleur	grise
Odeur	inodore
Densité apparente	1
Densité absolue	3,1
SSB [cm ² /g]	3400
Début de prise [mn]	169
Stabilité [mm]	0

Source : Société Holcim Madagascar



2. Caractéristiques mécaniques

La résistance en compression de mortier normale du ciment CEM IIA-V 42,5 est donnée dans le tableau 19 suivant

Tableau 19: Resistance en compression du ciment Manda CEM IIA-V 42,5 de la société Holcim

RESISTANCES EN COMPRESSION DE MORTIER NORMALE	VALEURS en [MPa]
R_{c_2}	19,80
R_{c_7}	31,95
$R_{c_{28}}$	47,05

Source : Société Holcim Madagascar

La classe vraie du ciment CEM II/A-V- 42,5 est de 47,05 MPa, il appartient bien à la classe de résistance 42,5.

3. Caractéristiques chimiques

3.1. Composition

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 20 :



Tableau 20: Compositions chimique moyenne des constituants du ciment Manda CEM II/A-V 42,5N en % massique.

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	4,1	4,1	—	—

Source : Société Holcim Madagascar

3.2. Composition chimique

La composition chimique du ciment Manda CEM II/A – V 42,5N est présentée par le tableau 21 suivant.

Tableau 21: Compositions chimique du ciment Manda CEM II/A-V 42,5N en % massique.

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

3.3. Modules

– Module d'Alumine MA

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

- En général

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (16)$$

- Pour un ciment composé

$$MA = \frac{Al_2O_3^*}{Fe_2O_3^*} \quad (17)$$

$$Al_2O_3^* = Al_2O_3(\text{ciment}) - Al_2O_3(\text{gypse}) - Al_2O_3(\text{cendres}) \quad (18)$$

$$Fe_2O_3^* = Fe_2O_3(\text{ciment}) - Al_2O_3(\text{gypse}) - Al_2O_3(\text{cendres}) \quad (19)$$



– **Module de Silice MS**

- En général,

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (20)$$

- Pour un ciment composé,

$$MS = \frac{SiO_2^*}{Al_2O_3^* + Fe_2O_3^*} \quad (21)$$

$$SiO_2^* = SiO_2(ciment) - SiO_2(gypse) - SiO_2(cendre) \quad (22)$$

– **Module de Chaux MC**

- En général,

$$MS = \frac{CaO}{CaO_{sat}} \times 100 = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3} \quad (23)$$

- Pour un ciment composé,

$$MS = \frac{CaO_{combinée}}{2,8SiO_2^{**} + 1,65Al_2O_3^* + 0,35Fe_2O_3^*} \quad (24)$$

Avec :

$$CaO_{combinée} = CaO(ciment) - CaO(gypse) - CaO(cendres) - CaO_L \quad (25)$$

$$SiO_2^{**} = SiO_2^* - RI \quad (26)$$

Le tableau 22 renseigne les valeurs requises du ciment CEM II/A-V-42,5N Holcim.

Tableau 22: Valeurs requises du ciment Manda CEM II /A -V 42,5N de la société Holcim Madagascar

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).

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad (27)$$

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

II. LES GRANULATS ET LA FILLER CIPOLIN

1. Critère de choix de granulats et de cipolin

1.1. Choix des granulats

Le sable que nous utilisons lors de l'expérience est le sable de la rivière d'Ikopa. Le site de prélèvement est à Anosizato à côté de l'hôtel Silver Star.

L'absence des industries qui déversent des eaux polluées dans la rivière détermine le choix de site de prélèvement.

Le gravillon concassé artisanal est choisi car il est plus dur. Il provient de la carrière vontovorona –CR Alakamisy Fenoarivo. Cette carrière est représentée dans l'annexe2

Le diamètre maximal du gravillon pour formuler notre béton est choisi suivant les dimensions de moule que nous utilisons. Nous utilisons une petite moule cylindrique 6*12 cm (élancement 2). En se référant au tableau 13 précédent, la relation entre l'épaisseur minimale de ce moule et la dimension maximale de granulats est :

$$D_{\max} \leq 0,2hm \quad (21)$$

D_{\max} , le diamètre maximal de granulats

hm, l'épaisseur minimale de la moule

Dans notre formulation, le diamètre de gravillon ne peut pas donc dépasser de 12,5mm



Les gravillons sont tamisé sur un tamis de maille 12,5 mm puis sur un tamis de 5mm, ce qui permet d'obtenir le gravillon de classe granulaire 5/12,5 comme l'indique les photos 6 et 7 suivantes.



Photo 6: Tamisage de gravillon sur un tamis de 12,5 mm



Photo 7: Tamisage de gravillon sur un tamis de 5 mm

1.2. Choix de cipolin

Le cipolin blanc situé auprès de l'installation de l'usine de fabrication de ciment de la société HOLCIM, a été choisi. Le site de prélèvement est représenté dans l'annexe3.



2. Caractérisations physiques des granulats et cipolin broyé [1][23][26]

Les caractéristiques physiques des granulats et de cipolin aident à formuler les dosages nécessaires pour confectionner un mètre cube de béton et aussi permettent de prévoir les conséquences qu'ils peuvent apporter au béton.

2.1. Teneur en eau

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

$$\% W = 100 \left(\frac{m - m^*}{m} \right) \quad (29)$$

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

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

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.

- **Matériels utilisés**
 - Bac métallique
 - Balance de précision
 - Etuve
- **Matériaux**
 - Échantillonnage
- **Description des essais**
 - peser une masse m de sable, débarrassé de toute matière organique, dans le bac métallique
 - mettre dans l'étuve à 105°C et sécher pendant 3 jours pour éliminer l'eau
 - peser (m^*) ensuite après refroidissement ;



- **Résultats**

Après plusieurs essais, on obtient les teneurs en eau des granulats et du cipolin, représentés par le tableau 23 :

Tableau 23: Résultats de la teneur en eau des granulats et du cipolin

ECHANTILLONS	MASSE m [g]	MASSE m* [g]	TENEUR EN EAU [%]
Sable	200	192	4
Gravillon	200	198	1
Cipolin	220	220	0

2.2. Masses volumiques apparentes (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 :

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (30)$$

Avec :

m_s , la masse de matériau

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

- **Matériels**

- Balance de précision
- Etuve
- 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

$$V = V_e = \frac{m_e}{\rho_e}$$

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 (30).

• Résultats

On refait 3 fois l'essai et on obtient les masses volumiques de chaque échantillon qui sont illustrées dans le tableau 24 suivant.

Tableau 24: Masses volumiques apparentes des matériaux

ECHANTILLONS	VOLUME V[ml]	MASSE m_s [g]	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ρ [g/ml]
Sable	144	206,8	1,436
Gravillon	144	227,5	1,580
Cipolin	144	177,3	1,231

2.3. 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 :

$$\sigma = \frac{m_s}{V_s} \quad (31)$$

2.3.1. Masses volumiques absolues de sable et de cipolin

- **Matériels**

- Pycnomètre de 25 ml (au trait de jauge) ;
- Balance électronique de précision ;
- Pissette ;
- Pipette gradué de 10 ml ;
- Echantillon de sable ou de cipolin (cipolin broyé de 1mm mais pas de fine).

- **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 $m_1 = m_0 + V_0$ (32)
- Calculer le volume $V_0 = m_1 - m_0$

Le volume V_0 est représenté dans le tableau 25 suivante :

Tableau 25: Valeurs de V_0 (volume) du pycnomètre

ESSAIS	m_0	m_1	V_0
1 ^{er} essai	15,6115	42,6431	27,0316
2 ^e essai	15,6115	42,5877	26,9762
3 ^e essai	15,6115	42,5333	26,9218

La moyenne arithmétique de $V_0 = 26,9765 \text{ ml} \approx 27 \text{ ml}$. Le volume de 1/3 du pycnomètre est donc $V_{0(1/3)} = 9 \text{ ml}$.



Détermination de la masse volumique absolue

- Verser 9ml ($V_{0(1/3)}$) d'eau distillé dans le pycnomètre de volume V_0 , déterminé précédemment et peser. Soit m_2 ce masse. $m_2 = m_0 + \frac{V_0}{3}$ (33)

- Verser une masse m_s du sable dans ce pycnomètre contenant d'eau jusqu'à son tierce de volume et le peser. On note m_3 ce masse.

$$m_3 = m_2 + m_s \Rightarrow m_s = m_3 - m_2 \quad (34)$$

- Remplir de l'eau le pycnomètre contenant de sable jusqu'au volume V_0 et peser. On note m_4 ce masse $m_4 = m_0 + m_s + V_0 + V'$ (35). V' est le volume d'eau versé jusqu'au remplissage de pycnomètre

$$V' = V_0 - V_s - \frac{V_0}{3} \quad (36)$$

- Déterminer les relations qui relient ces équations pour calculer la masse volumique absolue.

◦ (36) dans (35), $m_4 = m_0 + V_0 - V_s + m_s$ (37)

◦ (32) dans (37), $m_4 = m_1 - V_s + m_s$ (38)

◦ (31) dans (38),

$$m_4 = m_1 - \frac{m_s}{\sigma} + m_s \Leftrightarrow m_s \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) = m_4 - m_1 \Leftrightarrow \sigma = \frac{m_3 - m_2}{(m_3 + m_1) - (m_4 + m_2)} \quad (39).$$

- Calculer la masse volumique absolue à partir de la relation (39)

• Résultats

Les résultats obtenus à partir des essais de détermination de masse volumique de sable et de cipolin sont présentés dans les tableaux 26 et 27 suivants.



– **Sable**

Tableau 26: Résultats obtenues de la masse volumique absolue de sable

ESSAIS	$m_s[g]$	$m_1[g]$	$m_2[g]$	$m_3[g]$	$m_4[g]$	$\sigma[g/ml]$
1 ^{er} essai	20,7560	42,6431	24,6220	45,3780	55,2129	2,5354
2 ^e essai	12,5601	42,5877	24,6035	37,1636	50,2516	2,5652
3 ^e essai	11,7741	42,5533	24,5854	36,3595	49,8581	2,6344

La moyenne arithmétique est $\sigma_s = 2,578 g / ml$

– **Cipolin**

Tableau 27: Résultats de la masse volumique absolue de cipolin

ESSAIS	m_s	m_1	m_2	m_3	m_4	σ
1 ^{er} essai	8,0737	42,6431	24,6220	32,6957	47,8092	2,7767
2 ^e essai	14,3912	42,5533	24,5854	38,9766	51,9905	2,9160

La moyenne arithmétique est donc $\sigma_{CP} = 2,846 g / ml$

2.3.2. Masse volumique absolue de gravillon 5/12,5

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

- **Matériels**

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

- **Matériau**

- Echantillons de gravillons représentatifs préalablement séchés par étuvage.

- **Description des essais**

- Peser 300g de gravillon. Soit M ce 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 (31).

• Résultats

Les résultats des deux essais renouvelés sont exposés au tableau 28 suivant

Tableau 28: Résultats de la masse volumique absolue de gravillon 5/12,5

ESSAIS	M [g]	V_1 [ml]	V_2 [ml]	V_s [ml]	σ [g/ml]
Essai 1	300	500	386,32	113,68	2,639
Essai 2	300	500	364,48	115,52	2,597

La moyenne arithmétique de ces résultats est $\sigma_G = 2,618 \text{ g/ml}$

2.4. Compacité et le Vide

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total ou volume des pleins par unité de volume apparent. Elle est calculée par la relation suivante :

$$C[\%] = \frac{\rho}{\sigma} \times 100 \quad (40)$$

Par contre, le vide est en général, le rapport du volume des vides au volume apparent. C'est le complément à l'unité de la compacité. Il est donné par :

$$\Phi [\%] = 100 - C \quad (41)$$

Le tableau 29 précédent nous donne les valeurs de la compacité et du vide de sable, de gravillon et de cipolin.

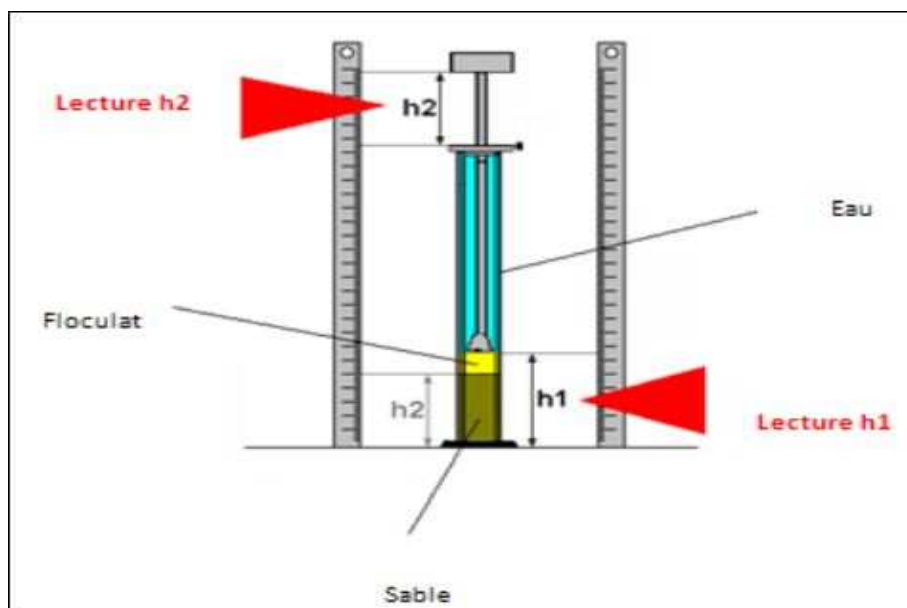


Tableau 29: Valeurs des compacités de granulats et du cipolin

ECHANTILLONS	C[%]	Φ [%]
Sable	55,7	44,3
Cipolin	43,25	56,75
Gravillon 5 /12,5	60,65	39,35

2.5. Equivalent de sable

L'essai d'équivalence de sable indiqué par la figure 11 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 10: Représentation de l'essai d'équivalent de sable**

• Matériels

- Tamis ;
- Entonnoir ;
- Eprouvette gradué ;
- Règle gradué ;



- 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 les 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 floculat de l'eau ;
- Lire les valeurs de h₁ et h₂ à l'aide du réglet gradué ;
- Calculer ES par la relation suivante :

$$ES(\%) = 100 \times \frac{h_2}{h_1} \quad (42)$$

h₂: sable propre + élément fin.

h₁: 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.

• **Résultats**

Les résultats lors de l'essai d'équivalente de sable sont présentés dans le tableau 30 suivante

Tableau 30: Résultats d'équivalente de sable

h_1[cm]	h_2[cm]	ES[%]	Spécification
11,3	8,6	76,11	$70 \leq ES < 80$, sable propre

2.6. Coefficient de Los Angeles du gravillon

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques 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 choisie 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 comme l'indique l'annexe 4.

Notre gravillon est de type de classe granulaire 6,3 /10 mm.



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 supérieur à 1,6 mm ; la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :

$$C_{LA} = 100 \times \frac{m}{M} = 100 \times \frac{M - m'}{M} \quad (43)$$

Spécifications :

- $C_{LA} < 15$: Très bon à bon ;
- $15 < C_{LA} < 30$: Bon à moyen ;
- $30 < C_{LA} < 45$: Moyen à faible ;
- $C_{LA} > 45$ Médiocre et non recommandé.

• **Matériel 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 (43) ci-dessus.

• Résultats

Les résultats lors de l'essai de Los Angeles de notre gravillon sont donnés dans le tableau 31 suivant.

Tableau 31: Résultats de coefficient de Los Angeles du gravillon

CLASSE GRANULAIRE	MASSE PRISE D'ESSAI [g]	MASSE DES ELEMENTS APRES L'ESSAI		COEFFICIENT DE LOS ANGELES C_{LA}	SPECIFICATION
		>1,6mm m'	<1,6mm m		
Gravillon 6,3/10	5000	3496,1	1503,9	30	moyen

Les photos 8 et 9 suivantes représentent respectivement le gravillon de classe 6,3/14 avant et après de l'essai de Los Angeles.

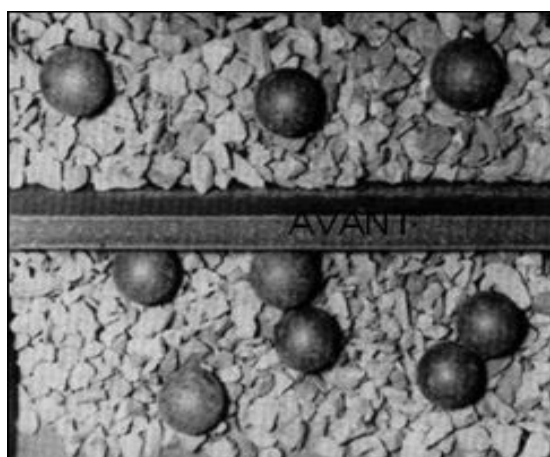


Photo 8: Gravillon 6,3/14 dans la machine de Los Angeles avant l'essai

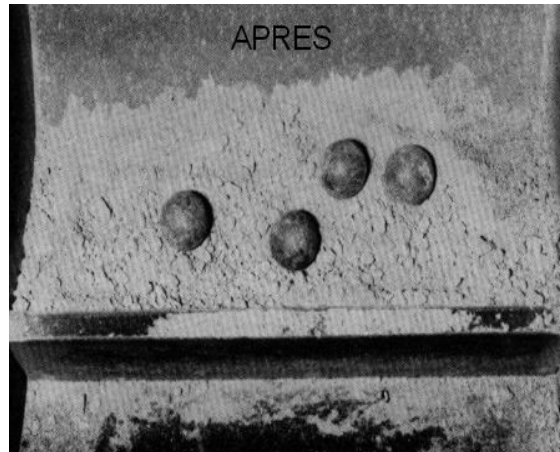


Photo 9: Gravillon 6,3/14 après l'essai de Los Angeles

2.7. Analyses granulométriques [24]

2.7.1. Analyses granulométriques des granulats par tamisage

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

Les relations suivantes sont utilisées :

$$\% Refus = \frac{Refus\ cumulé}{\sum Refus\ cumulé} * 100 \quad (44)$$

$$\% Passant = 100 - \% Refus \quad (45)$$

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. La photo 11 indique le tamisage d'un matériau par un tamis vibrant.



A

Photo 11: Série des tamis



lin

Photo 10: Tamisage par de 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**

- Echantillon de masse en kg

- **Description des essais**

- Prélever 3 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 fillers) ;
- 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 rapportés à la masse totale de l'échantillon ;
- Calculer ensuite le pourcentage des refus cumulés ainsi obtenus à partir de la relation (44) ;
- Déduire le pourcentage des passants cumulés à partir de la relation (45) ;
- Tracer la courbe granulométrique.



- **Résultats**

- **Sable**

Le tableau 32 suivante donne les masses des différents refus de tamis cumulés de sable et leur pourcentage.

Tableau 32: Récapitulation de l'analyse granulométrique du sable en pourcentage des refus cumulés et passant cumulés.

DIAMETRES DES TAMIS en [mm]	MODULE AFNOR	REFUS CUMULES en [%]	PASSANT CUMULES en [%]
5	38	0	100
3,15	36	1,1	98,9
2	34	8,5	91,5
1,25	32	16,7	83,3
1	31	27,7	72,3
0,630	29	63,8	36,2
0,315	26	97,5	2,5
0,160	23	98,6	1,4
0,080	20	100	0

La courbe granulométrique du sable est montrée par la figure 12 suivant

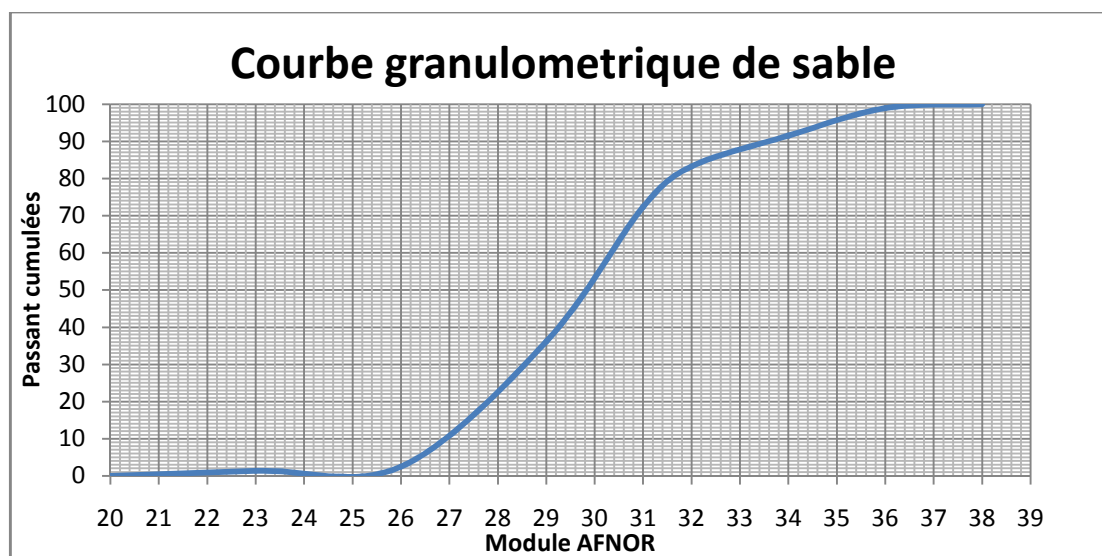


Figure 11: Courbe granulométrique de sable



Module de finesse

La norme française NFP 18 - 540 définit que la module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\} \quad (46)$$

Le sable a une module de finesse **Mf_s = 2,851**

On peut dire par ce module de finesse que le sable que nous utilisons est un peu plus grossier. Il permet de donner des bétons résistants, au dépend de l'ouvrabilité.

- **Gravillon 5/12,5**

L'analyse granulométrique de gravillon 5/12,5 est présentée dans le tableau 33 suivante.

Tableau 33: Récapitulation de l'analyse granulométrique du gravillon 5/12,5 en pourcentage des refus et des passants cumulés

DIAMETRES DES TAMIS en [mm]	MODULE AFNOR	REFUS CUMULES en [%]	PASSANT CUMULES en [%]
12,5	42	0	100
10	41	18,06	81,94
8	40	60,07	39,93
5	38	100	0



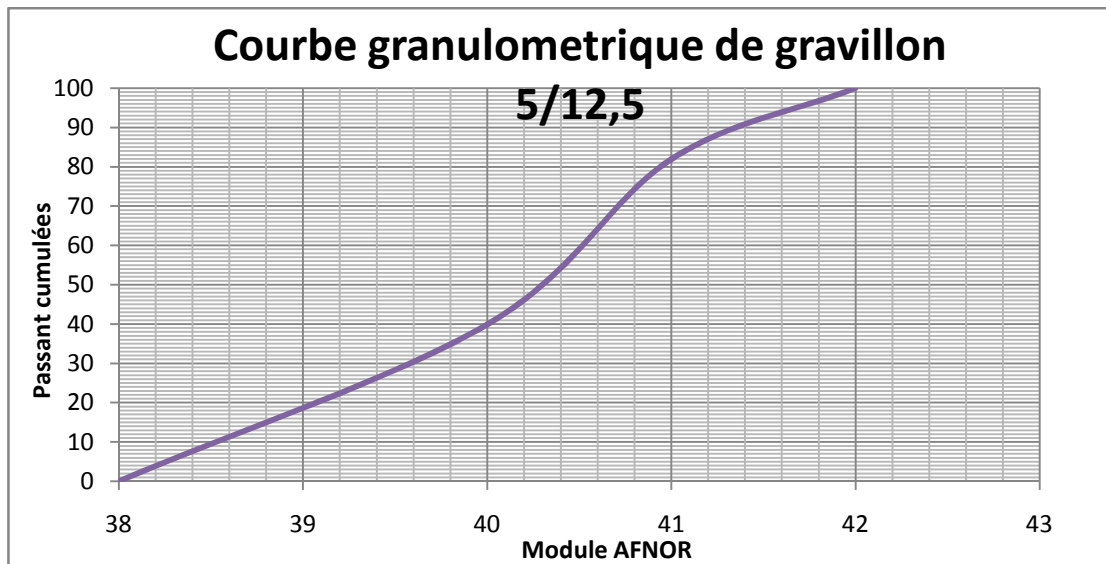


Figure 12: Courbe granulométrique de gravillon 5/12,5

2.7.2. Analyse granulométrique de cipolin broyé par sédimentométrie

Avant de passer à l'analyse granulométrique de cipolin, le cipolin doit être broyé finement par le broyeur à boulet pendant 3 jours en continue afin d'obtenir une grande finesse.

Le broyeur utilisé est celui de laboratoire CNRIT indiqué sur la photo 12.

Nous intéressons seulement la partie inférieure à 50 μm de cipolin broyé.

L'analyse granulométrique par sédimentométrie s'applique donc aux éléments de diamètre inférieur à 50 μm de cipolin broyé.

Le principe de la sédimentométrie est basé sur la loi de Stokes qui mesure la vitesse (v) de décantation des particules sphériques dans un milieu visqueux sous l'influence de la force de gravitation et de la résistance du milieu. Le protocole d'essai que nous utilisons est représenté dans l'annexe 6.

Les photos 13 et 14 représentent respectivement le tamisage du cipolin broyé par un pinceau et le cipolin broyés de diamètre $d < 50 \mu\text{m}$.

• Résultat

L'analyse granulométrique par sédimentométrie de cipolin broyé de diamètre inférieur à 50 μm est présentée dans le tableau 34 suivante

ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain



Tableau 34: Récapitulation de l'analyse granulométrique cipolin broyé en pourcentage des refus et des passants cumulés

DIAMETRES [μm]	MODULE AFNOR	GRAINS [%]
40	17	95,2
32	16	75,6
25	15	63,2
20	14	58,4
16	13	48,7
12,5	12	46,5
10	11	43
8	10	41,02
6,3	9	40,2
5	8	38,7
4	7	35,3
3,15	6	32
2,5	5	29,4
2	4	26,1
1,60	3	21

La courbe granulométrique de cipolin broyé de $d < 50 \mu\text{m}$ est représentée par la figure 13.

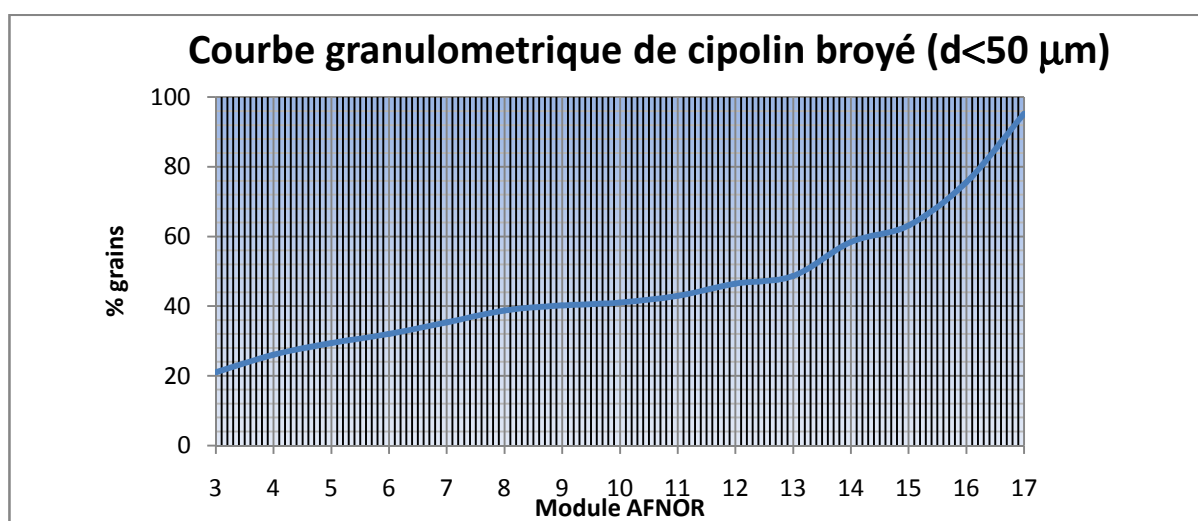


Figure 13: Courbe granulométrique de cipolin broyé ($d < 50 \mu\text{m}$)



Cette courbe granulométrique nous renseigne que le cipolin broyé que nous utilisons présente des éléments très fins.



Photo 12: Broyeur de laboratoire CNRIT



Photo 13: Tamisage du Cipolin broyé par pinceau



Photo 14: Cipolin broyés de diamètre $d < 50 \mu\text{m}$

2.8. Surface Spécifique Blaine de cipolin broyé de diamètre $d \leq 50 \mu\text{m}$.

Le cipolin broyé de diamètre $d \leq 50 \mu\text{m}$ a une SSB égale à $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le protocole d'essai de mesure de SSB est représenté dans l'annexe 7.

3. Caractéristiques chimiques des granulats et du cipolin

Pour les caractéristiques chimiques des granulats, on s'intéresse tout simplement sur le sable car le gravillon forme seulement le squelette du béton.

Les données chimiques concernant le cipolin et le sable que nous utilisons sont exposés sur le tableau 35 suivant.



Tableau 35: Eléments chimiques majeurs dans le sable et dans le cipolin

ELEMENTS MAJEURS [%]	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.F.
Sable	87,5	2,58	1,74	3,95	0,46	0,09	0,4	0,07	2,41
Cipolin	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 en %) est de 91,4%.

III. L'EAU DE GACHAGE

L'eau du robinet de la JIRAMA est l'eau 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 36 suivant.

Tableau 36: Caractéristiques de l'eau de JIRAMA

CONSTITUANTS	CARACTERISTIQUES
Insolubles	0
Matières dissoutes [mg/l]	0,0004
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0,0028
Sulfates en SO ₃	0
Sulfites en S [%]	0
Sucres [%]	0
Sucres [%]	0
P2O3 [%]	0
NO3 [%]	0
Zinc [%]	0
Acidité en pH	7,20
Acidité humis	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/l]	3,55
Ions soufre [%]	0

A Source : JIRAMA

ezantsoa Alain



IV. LE SUPERPLASTIFIANT : SIKA®VISCOCRETE®TEMPO12

Le Sika®ViscoCrete®Tempo 12 est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique, utilisé 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 37 et 38 ci-après.

Tableau 37: Caractéristiques du superplastifiant sika®viscocrete®tempo12

PARAMETRES PHYSIQUE	CARACTERISTIQUES
Aspect	Liquide brun clair
Densité	$1,06 \pm 0,01$
pH	6 ± 1
Teneur en $\text{Na}_2\text{O eq}^-$	$\leq 1\%$
Extrait sec	$30,2 \pm 1,3 \%$
Teneur en ion Cl^-	$\leq 0,1 \%$

Source : Société MADECASSE

Tableau 38: Condition d'application du superplastifiant sika®viscocrete®tempo12

CONDITIONS D'APPLICATION	DOSAGE
Plage d'utilisation usuelle	0,4 à 1,5% 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



CONCLUSION

On a donc caractérisé les matières premières que nous utiliserons lors des essais. On a pu juger à partir des résultats qu'on peut obtenir un béton à résistance et ouvrabilité convenable à partir de ces matériaux.

La suite de notre travail concerne les essais de caractérisation du béton fluide à l'état frais et à l'état durci.



CHAPITRE VIII: LES ESSAIS DE CARACTERISATION DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE

INTRODUCTION [1][25]

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil.

Le cahier de charges préconisé pour approuver un béton fluide et ou béton autoplaçant par l'AFCG demande de valider les trois essais suivants à l'état frais :

- L'essai d'étalement au cône d'Abrams;
- L'essai d'écoulement à la boîte en L ;
- L'essai de stabilité au tamis.

Le but de notre recherche est de formuler un béton fluide à haute compacité mais pas de béton autoplaçant donc on tient beaucoup à l'essai de l'affaissement même si nous utilisons la recommandation de l'AFCG. Cet essai est très important pour qualifier le type de béton, soit il est fluide ou plastique ou autres.

I. L'ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS (FLOW- TEST)

Cet essai est particulièrement adapté au béton auto plaçant, fortement dosé en superplastifiant.

La consistance est appréciée dans cet essai par l'étalement que connaît un cône de béton soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé autoplaçant.

Pour les BAP, cet essai permet de mesurer la mobilité du béton en milieu non confiné. Il consiste à mesurer le diamètre d'une galette de béton comme indique les photos 15. Après soulèvement du cône, les valeurs cibles de l'étalement se placent dans une fourchette de 60 à 75 cm pour un béton autoplaçant.



La figure 14 suivante montre la conduite d'essai à l'étalement du béton autoplacant

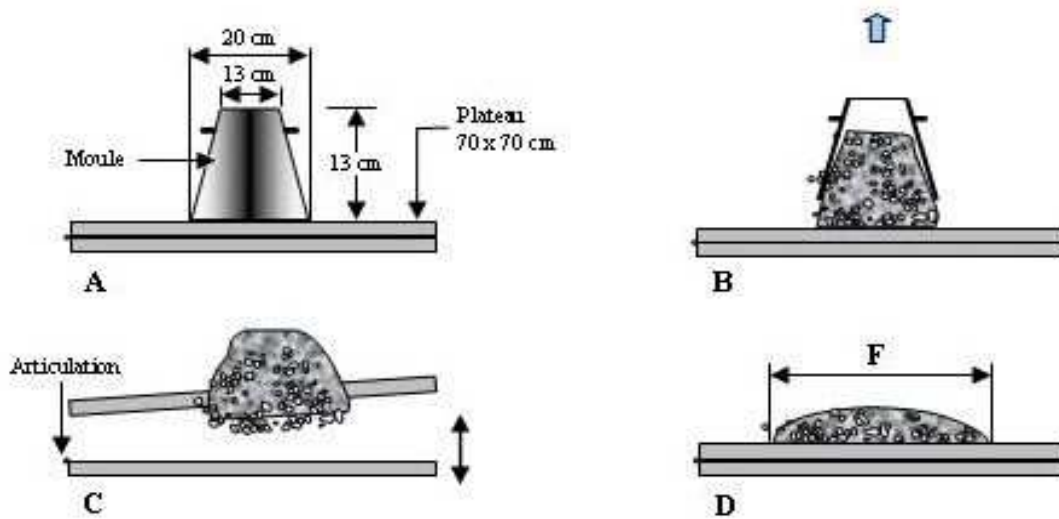


Figure 14: Conduite d'essai d'étalement



Photo 15: Etalement du Béton autoplacant(BAP)

La norme ENV 206 définit quatre classes d'étalement sur table pour les BO selon le tableau 39 suivante.

Tableau 39: Classe d'étalement selon la norme ENV 206

CLASSE D'ETALEMENT	F1	F2	F3	F3
Diamètre en cm	≤ 34	35 à 41	42 à 48	49 à 60



II. ESSAI D'ÉCOULEMENT DE LA BOÎTE EN L

L'essai de la boîte en L, selon la photo 16, ne nous intéresse pas car elle est effectuée pour les bétons autoplaçants seulement. Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné. La partie verticale de la boîte est remplie du BAP, après soulèvement de la trappe en acier, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs du BAP dans la partie verticale. Pour un BAP, H_2/H_1 doit être supérieur à 0,8.



Photo 16: Essai de la boîte en L

III. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump- test)

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus l'affaissement sera grand, plus le béton sera réputé fluide. Toutefois les résultats obtenus ne sont pas très fiables pour les bétons trop fermes et ou trop fluides.

• Matériel nécessaire

L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure 15.



Il se compose de quatre éléments:

- un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure;
- une plaque d'appui ;
- une tige de piquage ;
- un portique de mesure ;

• Description de l'essai

- La plaque d'appui est légèrement humidifiée et le moule légèrement huilé y est fixé.
- Introduire le béton dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure).
- Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieure du moule, s'opérer le démoulage en soulevant le moule avec précaution.
- Quand Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté A, mesurer à partir du portique et arrondi du centimètre le plus proche l'affaissement du béton. Cette mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

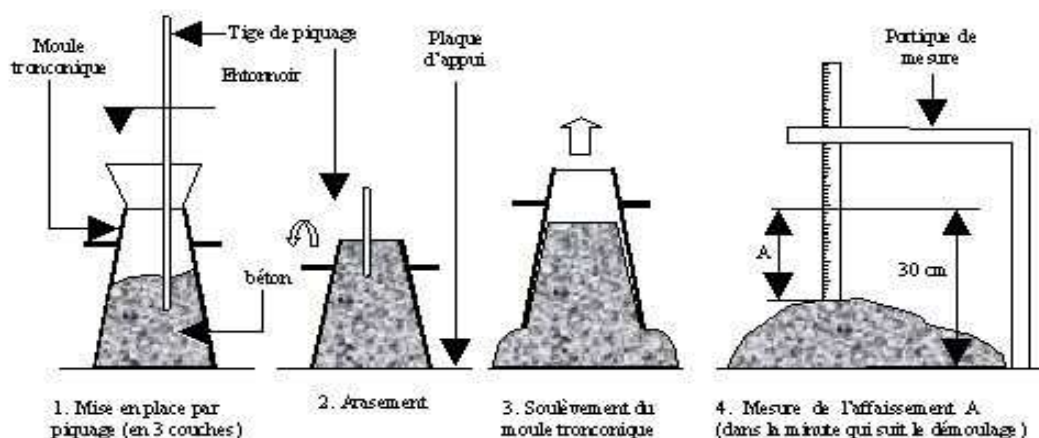


Figure 15: Conduite de l'essai d'affaissement



Les photos 17, photo 18, photo 19 et photo 20 suivantes montrent les déroulements de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams de notre béton BFLHC.



Photo 17: Malaxage du BFLHC dans la burette



Photo 18: Mise en place et Arasement du BFLHC dans le cône d'Abrams



Photo 20: Mesure de l'affaissement du BFL par une règle métallique








Photo 19: Vérification de la valeur de l'affaissement



La norme NF EN 206-1 définit quatre classes de consistance, en fonction de l'affaissement mesuré. Elles sont indiquées sur le tableau 40. Les classes sont notées S1 (béton ferme), S2 (béton plastique), S3 (béton très plastiques), S4 (béton fluide), S5 (béton autoplaçant) et appelées classes d'affaissement.

S rappelle ici l'initiale du nom de l'essai en anglais: slump test.

Tableau 40: Classe d'affaissement selon la norme NF EN 206-1

CLASSE D'AFFAISSEMENT	S1	S2	S3	S4	S5
	De 10 à 40 mm	De 50 à 90 mm	De 100 à 150 mm	De 160 à 210 mm	≥ 220 mm
AFFAISSEMENT AU CÔNE D'ABRAMS					
EXEMPLES INDICATIFS	Ouvrages avec forte pente ou demandant une mise en place immédiate (garage avec forte pente)	Ouvrages avec faible pente (accès, dalle pleine vibrée)	Ouvrages sans pente demandant une mise en place simplifiée (fondations, voiles)	Ouvrages sans pente (fondations, dalles, voiles avec forte densité d'armatures)	Ouvrages demandant une éventuelle planéité ou dans le cas d'un coffrage, etc. sans vibration (voiles complexes, fondations)

IV. RESISTANCE EN COMPRESSION

Elle se mesure en général par compression axiale des cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre (élancement 2).

Dans notre cas on utilise le tube en PVC de diamètre 6 cm pour former une éprouvette cylindrique de diamètre de 6 cm et de hauteur 12 cm. Notre éprouvette a donc une section de 2826 mm².

La machine à compression du laboratoire LNTPB indiquée par la photo 21 a été utilisée pour mesurer la résistance en compression. Elle peut provoquer jusqu'à 200 KN et est graduée par division de 1 KN. Le calcul de la résistance à la compression est obtenu par la relation (47):

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (47)$$



Avec R_c en MPa

F en N

S en mm^2



**Photo 21: Machine à compression
du laboratoire LNTPB**

V. ESSAI DE TRACTION

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 f_{t28} .

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 (comme indique la figure 16) :

- 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 $4 \times 4 \times 16$, à partir de la machine à traction du laboratoire selon la photo 22.



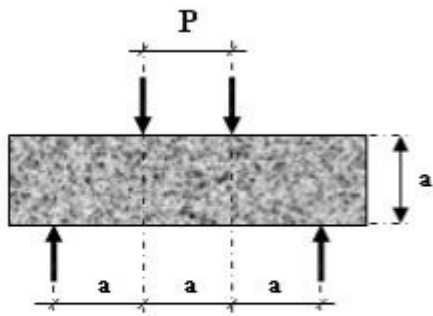


Figure 16: Essai de traction par flexion



Photo 22: Essai de traction par flexion

VI. ESSAI SUR LA MESURE DU RETRAIT DU BETON

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

On s'attache 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 par le pied à coulins.

Le retrait est calculé à partir de la relation suivante :

$$R[\%] = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1} \times 100 \quad (48)$$

h_1 est la hauteur du moule contenant du béton frais

h_2 , la hauteur du béton durci sortie de l'éprouvette.

VII. ESSAI SUR LA MESURE DE LA POROSITE ET DE LA COMPACITE DU BETON

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, par contre plus la compacité est élevée, plus cette résistance l'est aussi.

La porosité est calculée par la relation (2)



$$P\% = \frac{V_{vide}}{V_t} \times 100 \quad (2)$$

La compacité et la porosité sont liées par la relation(4) : $P = 1 - C$ (4)

- **Matériels**

- Balance de précision
- Echantillon du béton
- Chiffon jaune

- **Description de l'essai**

- Prélever l'échantillon du béton très sec durci à l'âge de 28 jours (mètre 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. Peser le ensuite. Soit m_1 ;
- Calculer le volume de l'eau contenu dans les pores du béton à partir de la relation : $V_{eau} = V_{vide} = (m_0 - m_1)\rho_e$ (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 (2) et (4).

VIII. ESSAIS DE DURABILITE DU BETON

1. Test à la carbonatation du béton [27]

La carbonatation atmosphérique dégrade les bétons armés et est notamment responsable de la mise à nu de leurs armatures en acier. La carbonatation entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur les structures en béton armé.

La carbonatation est la réaction chimique entre le CO_2 de l'air et la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ou chaux libre) issue de l'hydratation du ciment.



Cette réaction ne peut s'opérer qu'en milieu aqueux. Le produit de cette réaction, le carbonate de calcium CaCO_3 , agit comme 'bouche-pores'



Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphtaléine.

La couleur que prend la phénolphthaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.

2. Resistance aux l'attaques chimiques [28]

On distingue différents éléments chimiques qui peuvent détruire le béton mais nous intéressons seulement l'attaque aux sulfates.

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court. Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle.

Ce test est important pour évaluer le comportement des bétons lorsqu'il est soumis à l'action cyclique d'immersion dans du sulfate de magnésium, suivi d'un étuvage.

- **Matériau**

- Bloc de béton durci

- **Préparation de la solution de sulfate de magnésium très concentré**

- Préparer la solution en ajoutant lentement 1500g de sel cristallin à chaque litre d'eau. Au moins 3 L sont nécessaires pour chaque essai.
- Durant la préparation, maintenir la température de la solution entre 25°C et 30°C et mélanger vigoureusement pendant l'addition des cristaux de sel. Après la préparation, abaisser la température à 20°C et maintenir cette température pendant 48 h.



- Avant d'utiliser, vérifier que la solution a atteint une masse volumique de $1,292 \pm 0,008$ g/ml, en décantant une partie de la solution dans un flacon à gaz, en mesurant la masse volumique avec le densimètre, et en remettant la solution dans le récipient.

- **Description de l'essai**

- Mettre à l'étuve à 105°C le béton pour éliminer toute forme de l'eau
- Peser le béton. Soit M_1
- Immerger totalement le béton dans un récipient contenant de la solution saturée de sulfate de magnésium à 20 °C pendant une période de 17 h (cycle1).
- Couvrir le récipient pour éviter l'évaporation et les impuretés
- Après immersion, sortir le béton de la solution, et le sécher à l'étuve à 105°C et laisser refroidir dans le dessiccateur jusqu'à la température du laboratoire. Peser ensuite le béton, soit M_2
- Calculer la résistance au sulfate de magnésium MS en pourcentage en masse de béton conformément à l'équation suivante, en enregistrant chaque valeur à un décimal près :

$$MS = 100 \times \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \quad (42)$$

Si MS est faible, le béton résiste aux sulfates de magnésium et il a une bonne durabilité.



CHAPITRE IX: ETUDE DE FORMULATION DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE

C'est dans ce chapitre que nous présentons les recherches sur le béton que nous avons effectué. Nous avons tout d'abord formulé un béton témoin qui est le béton ordinaire ; ensuite, nous abordons l'étude du béton fluide à haute compacité, plus résistant par rapport au béton ordinaire.

I. FORMULATION DE BETON ORDINAIRE A PARTIR DE LA METHODE DREUX GORISSE

Le principal but de ce travail est de montrer qu'un béton fluide à haute compacité aura une meilleure durabilité, une résistance mécanique plus élevée et une ouvrabilité plus aisée que le BO.

Dans toute la suite nous fixerons le dosage en ciment à 400 kg/m³.

D'après la lecture de l'abaque (figure 5), Pour un béton normale d'affaissement aff = 8 cm et de dosage en ciment fixé à C = 400 kg/m³, on a trouvé le rapport C/E = 1,8 ; plus précisément E/C = 0,55.

1. Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO

Nous pouvons alors estimer la résistance à 28 jours en MPa du béton ordinaire par la relation(11) vue de l'étude bibliographique.

$$R_C = G \times F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (43)$$

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

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

$$R_{c28} = 24,57 \approx 25 \text{ MPa}$$

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



2. Calcul de dosage des granulats (pour 1 m³ de béton)

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

On a trouvé d'après la relation (21), le diamètre maximal des granulats $D_{\max} = 12,5\text{mm}$

D'après les relations (12) et (13), le point de brisure **A** a pour coordonnées :

$$\begin{cases} x = \frac{D_{\max}}{2} & (12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p & (13) \end{cases}$$

La valeur de K est obtenue par la lecture de tableau 16 précédent.

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

De plus, la quantité de béton n'est pas pompable donc $K_p = 0$

K_s est déterminé par la relation (14)

$$K_s = 6Mf_{\text{sable}} - 15 \quad (14)$$

Le point de brisure a pour coordonnée A (6,3 ; 48,57) en module A [39 ; 48,57]

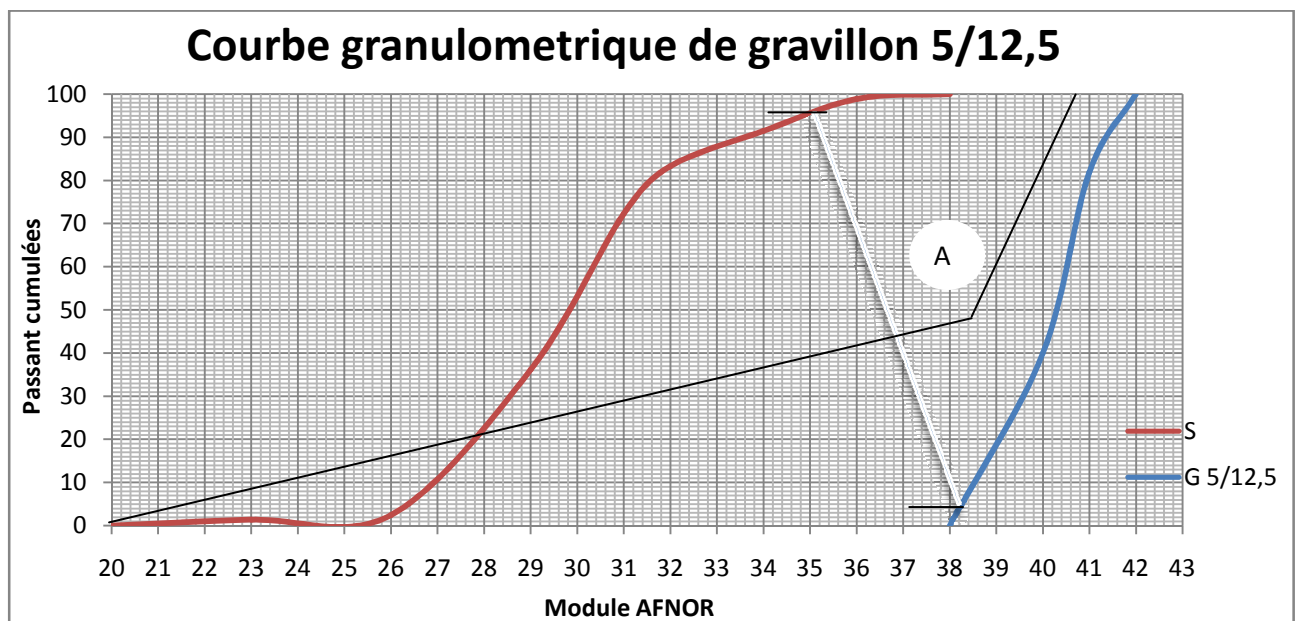


Figure 17: Courbe granulométrique des granulats et courbe de référence – Détermination des pourcentages volumiques des granulats



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

2.2. Calcul de dosage en S et en G

On utilise la vibration normale pour formuler le BO. D'après la lecture de tableau 17 précédent, on trouve la valeur de la compacité $\delta = 0,800$ (D_{\max} proche de 10 mm avec une vibration normale).

On calcul alors le dosage de chaque granulats à partir de la relation (15)

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

Les dosages de chaque constituant du BO sont donc donnés dans le tableau 41 suivante

Tableau 41: Composition du BO selon la méthode de Dreux Gorisse

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

3. Résultats et interprétation

Les résultats à l'état frais et à l'état durci du BO sont montrés dans les tableaux 42 et 43.

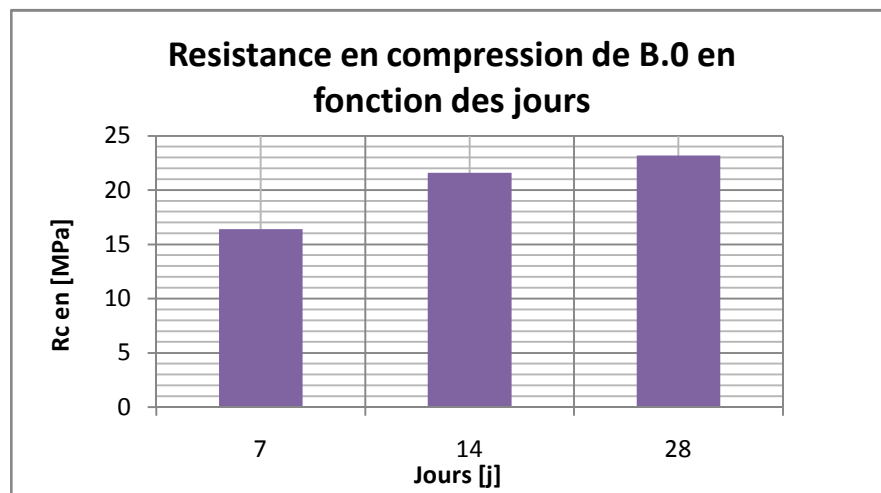
Tableau 42: Affaissement du BO

TEST A L'ETAT FRAIS	VALEUR en [cm]
Affaissement	8,3



Tableau 43: Résistance en compression du BO

TEST A L'ETAT DURCI	VALEURS en MPa
Rc 7	16,4
Rc14	21,6
Rc28	23,2

**Figure 18: Resistance en compression du BO en fonction des jours**

4. Conclusion

On n'a pas pu atteindre la résistance en compression envisagée 25 MPa du béton ordinaire ; on a que 23,2 MPa mais l'importance est de garder ce résultat pour pouvoir la comparer à celle du béton fluide à haute compacité.

Par contre, la valeur d'affaissement de ce BO est conforme à la norme

II. FORMULATION DE BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE A PARTIR DE LA RECOMMANDATION DE L'AFGC

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 BFLHC.



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

- Un rapport Gravillon / Sable (G/S) égale 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% ;

Dans toute l'étude, on garde 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 selon les indications de la fiche technique ainsi que le rapport Filler Cipolin /Ciment (FC_P/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 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 5.

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 $E = 220 \text{ L/m}^3$.



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 FC_p/C . On le fait varier jusqu'à l'obtention d'une résistance en compression optimale.

4. Dosage en superplastifiant

Le superplastifiant viscocrete 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 pas trouvés qu'après le dosage 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 :

$$V_S + V_G + V_E + V_C + V_{Sp} + V_a + V_{FC_p} = 1000 \text{ L (1m}^3\text{) du béton (44).}$$

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

donc $V_a = 50 \text{ L}$

On connaît que $V_i = \frac{m_i}{\rho_i}$ donc l'équation (44) devient

$$\frac{S}{\sigma(S)} + \frac{S}{\sigma(G)} + \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{S_p}{\sigma(S_p)} + \frac{FC_p}{\sigma(FC_p)} + V_a = 1000$$

Or le volume des pates de béton est

$$V_{pates} = \frac{E}{\sigma(E)} + \frac{C}{\sigma(C)} + \frac{S_p}{\sigma(S_p)} + \frac{FC_p}{\sigma(FC_p)} + V_a \quad (45)$$

en $[L/m^3]$

donc

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



Le dosage en sable et en gravillon est déterminé par

$$S = G = \frac{1000 - V_{pates}}{\left(\frac{1}{\sigma(S)} + \frac{1}{\sigma(G)} \right)} \quad (46)$$

6. Etude préliminaire

Pour l'étude préliminaire, les dosages de chaque constituant sont donnés sur le tableau 44 suivante.

Tableau 44: Composition préliminaire du BFLHC selon la recommandation de l'AFGC.

S _p /C en [%]	1,25	1,5	1,75	2
E/C	0,55	0,55	0,55	0,55
G/S	1	1	1	1
FC _P /C	0,25	0,25	0,25	0,25
DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT en [Kg/m ³]				
C	400	400	400	400
E	220	220	220	220
S	729	728	726	725
G	729	728	726	725
FC _P	100	100	100	100
Sp	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**

On a 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 45: Résultat sur l'essai de la résistance en compression lors de l'étude préliminaire

RESISTANCE EN COMPRESSION	Sp /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

On peut conclure que pour un béton fluide à haute compacité, les résultats sont mauvais. Les résultats trouvés ne sont pas aussi conforme à la norme pour un béton fluide.

Pour remédier à cela, on garde la valeur de 1,75% de ciment de super plastifiant et on fait varier la valeur de F/C de 0,25 à 0,75. Ce dernier à pour but de déterminer le dosage en fines F. De plus, on fixe le diamètre des fines passant à 50 µm pour que les réactions se passent bien.

7. Influence de la variation des fines de cipolin par rapport au ciment

L'augmentation des fines de cipolin par rapport au ciment nous permet d'avoir des changements de dosage de chaque constituant du béton.

Ce dosage de chaque constituant est représenté par le tableau 46 suivant.



Tableau 46: Composition du BFLHC en faisant varier le pourcentage de fine de cipolin par rapport au ciment

ESSAIS	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai5	Essai6
S_p/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/S	1	1	1	1	1	1
FCp/C	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
DOSAGE DE CHAQUE CONSTITUANT en [Kg/m³]						
C	400	400	400	400	400	400
E	220	220	220	220	220	220
S	726	708	690	672	653	635
G	726	708	690	672	653	635
FCp	100	140	180	220	260	300
Sp	7	7	7	7	7	7

7.1. Résultats et interprétation

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

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

Les valeurs d'affaissement sont données dans le tableau 47 suivante.

Tableau 47: Valeurs d'affaissement des 6 essais effectués

ESSAIS	Essai1	Essai2	Essai3	Essai4	Essai5	Essai6
FCp/C	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75
AFFAISSEMENT en cm	15,5	14	15	18	21,8	22

On peut présenter ces valeurs d'affaissement par la figure 19 suivante



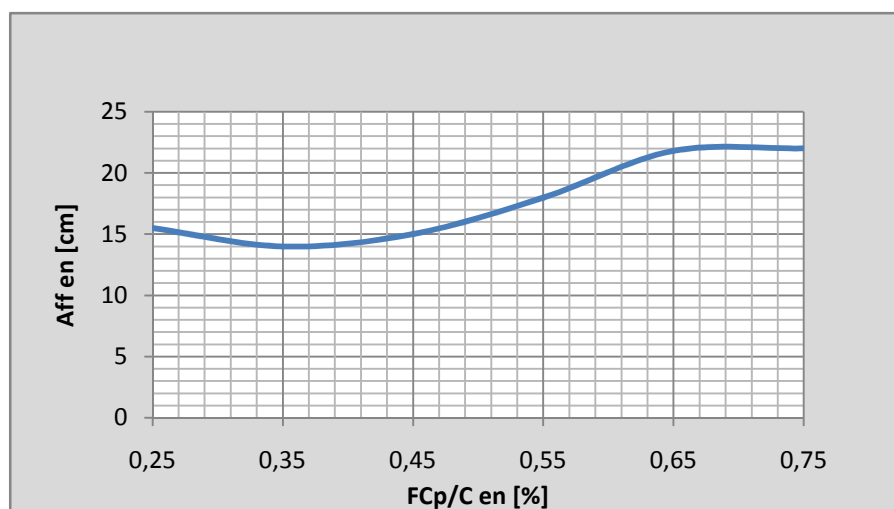


Figure 19: Valeurs d'affaissement des BFLHC en fonction de la proportion de fines d'ajout

Interprétation

Le point cible pour un béton fluide S₄ qui est conforme à la norme NF EN 206-1, est la valeur d'affaissement 18 cm de l'essai 4. Cette valeur est obtenue par le dosage de super plastifiant 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 de chaque constituant est un peu plus visqueux.

On peut obtenir des bétons autoplaçant à partir de l'essai 5 et de l'essai 6 qui ont des valeurs d'affaissement respectives 21,8 et 22 cm. Ils sont classés de béton de type S₅ selon la norme NF EN 206-1.

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. Pour les bétons autoplaçants, ce test est non recommandé. On utilise pour ce type de béton le test d'étalement.

Pour l'essai 1, l'essai 2 et l'essai 3 ; les valeurs d'affaissement sont respectivement 15,5 ; 14 et 15. Les bétons obtenus à partir de ces essais sont des bétons très plastiques. Selon la norme NF EN 206-1, ces bétons sont classés de béton de type S₃.

- **Résultats sur l'essai de la mesure de retrait du béton**

Le tableau 48 suivant présente les résultats sur la mesure de retrait des BFLHC.

ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain



Tableau 48 : Résultats de la mesure de retrait des BFLHC

ESSAIS	$\Delta l = l_1 - l_2$ [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

Interprétation

Les valeurs de retrait des bétons sont très faibles. On a donc formulés des bétons de faibles retraits. Ceci est expliqué par le faible de volume de vides dans nos bétons.

- **Résultats sur l'essai de la mesure de porosité et de compacité**

Le résultat de cet essai est indiqué dans le tableau 49 suivant.

Tableau 49: Résultat sur la mesure de la porosité et de la compacité des 6 essais effectués

ESSAIS	$V_{\text{vide}} = M_0 - M_1$ [cm ³]	V [cm ³]	POROSITE $P[\%] = \frac{V_{\text{vide}}}{V} \times 100$	COMPACITE $C[\%] = 1 - P[\%]$
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. Quand 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.

On constate donc que plus la porosité de béton est faible, plus le béton est compact

La porosité est proportionnelle aussi au retrait du béton : quand le béton est moins poreux, le retrait est faible.

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

Les résultats sont présentés dans le tableau 50 et dans la figure 20 suivantes

Tableau 50: Valeur des résistances en compression des 6 essais effectués

RESISTANCE EN COMPRESSION	Essai1	Essai 2	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

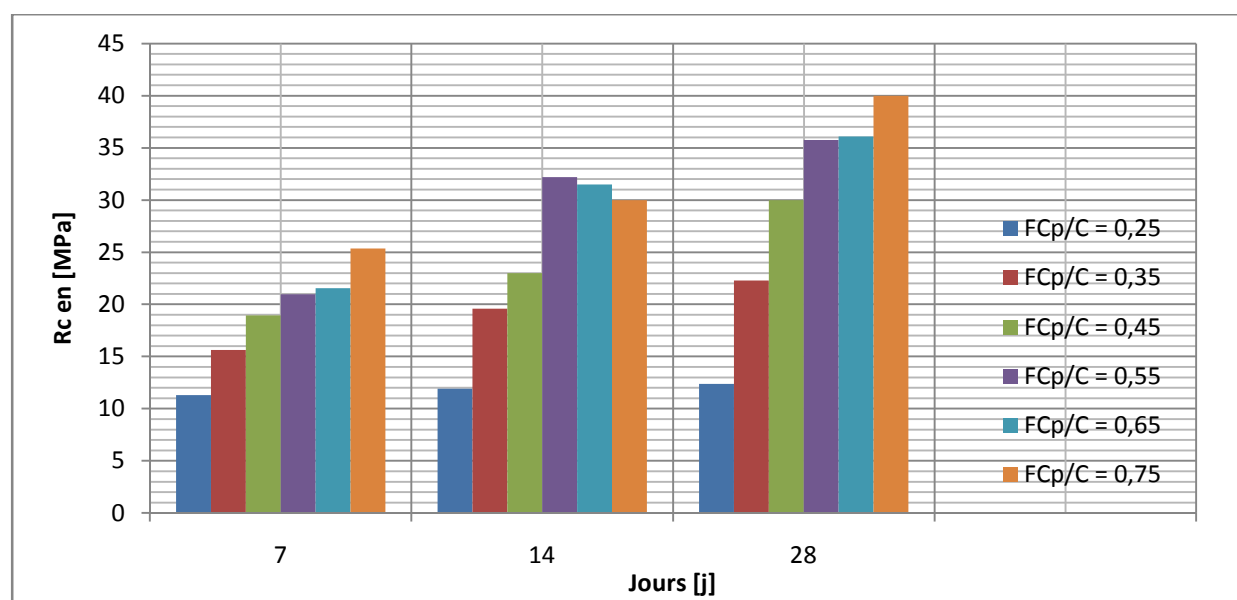


Figure 20: Resistances en compression des BFLHC en fonction du Temps



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 élevée par rapport au béton ordinaire témoin (figure 18); 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. L'essai 6 montre une valeur assez grande qui atteint jusqu'à 40 MPa à 28 jours.

- **Résultats sur le test à la carbonatation de béton**

Le tableau 51 suivante montre les résultats sur le test à la carbonatation des bétons

Tableau 51: Résultats sur le test à la carbonatation des BFLHC

ESSAIS	VIRAGE PAR LA PHENOLPHTALEINE	SPECIFICATION
Essai 1	incolore	Zone carbonaté
Essai 2	incolore	Zone carbonaté
Essai 3	incolore	Zone carbonaté
Essai 4	incolore	Zone carbonaté
Essai 5	incolore	Zone carbonaté
Essai 6	incolore	Zone carbonaté

Interprétation

Lors de la pulvérisation de la phénophtaléine sur chaque éprouvette en béton, on n'observe pas de variation de couleur : le couleur des bétons reste incolore.

Cette couleur incolore indique que les bétons sont de faibles pH. C'est-à-dire pour les zones carbonatées. On en déduit donc que la probabilité de corrosion des armatures de ces bétons est très faible.

- **Résultats sur le test au sulfate de magnésium concentré**

Le test au sulfate de magnésium concentré de chaque béton des 6 essais différents est présenté dans le tableau 52 suivant.



Tableau 52: Résultats à l'attaque de sulfate de magnésium concentré des bétons pendant un cycle de 17 h.

ESSAIS	MODIFICATION DE SURFACE	RESISTANCE AU SULFATE DE MAGNESIUM (<i>MS</i>) en %
Essai 1	Apparition de trace de pourri	0,5
Essai 2	Aucune	0
Essai 3	Aucune	0
Essai 4	Aucune	0
Essai 5	Aucune	0
Essai 6	Aucune	0

Interprétation

Lors de l'immersion de chaque éprouvettes en béton dans la solution de sulfate de magnésium très concentré pendant 17 h (cycle 1), On remarque que seul l'essai 1 a trouvé une déformation de surface : il y a apparition de trace de pourri dans le béton. Quand aux autres bétons, on observe aucune modification de surface et aucune diminution de masse du béton.

Nos bétons résistent donc au sulfate de magnésium concentré sauf le béton obtenu à partir de l'essai 1. On a formulé du béton plus compact, plus solide et plus durable.

7.2. Conclusion

Nous avons fait le maximum des essais de caractérisation de béton fluide à haute compacité possible. On peut tirer d'après ces essais que l'essai 4 consiste à utiliser un dosage d'eau 220 L/m³ (E/C = 0,55), des fines de cipolin 220 Kg/m³ (55% de ciment) et un dosage de Sp de 1,75% de ciment, convient à formuler un BFLHC. Lors de cet essai, on atteint une résistance en compression jusqu'à 35,75 MPa et une valeur d'affaissement au cône d'Abrams de 18 cm. Ces valeurs sont conforme à la norme NF EN 206-1.



CHAPITRE IV: AVANTAGES ET APPLICATIONS DES BETONS FLUIDES A HAUTES COMPACITES

INTRODUCTION

Pour mettre en valeur notre recherche, Il est temps de donner les avantages et les applications des bétons fluides à hautes compacités.

I. LES AVANTAGES DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE

Ces bétons présentent beaucoup d'avantages sur :

1. L'ouvrabilité

. Voici ce qui suit les atouts du BFLHC :

- Il permet de gagner du temps sur chantier : plus facile à mettre en place
- il garantit un bon enrobage des aciers, même si le ferrailage est très dense ou très compliqué, et même quand la vibration est impossible ou inopérante.

2. La qualité d'apparence

On peut obtenir facilement avec le BFLHC des effets architectoniques aussi variés que fabuleux et attirants. On peut avoir :

- un béton d'aspect plus lisse par rapport au béton ordinaire
- un béton qui a des arêtes parfaitement définies;
- un béton d'absence de défauts d'aspect, notamment dus à la ségrégation.

3. La qualité physique et chimique

Les qualités physiques et chimiques des bétons sont très importantes.

- Les BFLHC résistent aux agents chimiques. Ils sont plus imperméables et ont une bonne structure avec de durée de vie élevée.
- Ces bétons sont des bétons de très faible retrait. Donc la chance de la fissure de béton est très faible.



- Ils offrent une très bonne résistance mécanique (flexion et compression) et une meilleure tenue aux chocs par rapport au béton ordinaire.
- Ils sont aussi plus malléable, plus solide, plus compacte et permettent ainsi de construire des édifices aux formes plus audacieuses et plus vertigineuses.
- La probabilité de la corrosion des armatures de ce béton sont faible.

II. LES APPLICATIONS PRIVILEGIEES

Parmi les applications usuelles, on peut citer :

- les sols industriels ;
- La réalisation de dallages auto-compactants ;
- les travaux routiers ;
- les fondations, les radiers généraux ;
- les poutres présentant une grande densité d'armatures ;
- les voiles minces, les poteaux fortement armés;
- La fabrication des pieux forés;

Ces bétons fluides à hautes compacités se sont révélés aussi particulièrement intéressant, techniquement et économiquement, pour :

- la réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- la stabilisation de parois ou talus;



CHAPITRE XI: APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

I. COMPARAISON DU COUT DE 1m³ DE BFLHC ET DE BO

Si nous entrons d'une manière plus détaillé le cout de 1m³ de BFLHC, on découvre que le BFLHC est plus abordable par rapport au BO témoins.

Nous étudions dans les tableaux 53 et 54 suivants le cout du BO et de BFLHC. Nous prenons la formule de BFLHC de l'essai 4 qui consiste à utiliser un dosage en eau 220 L/m³, un dosage en fines de cipolin 220 Kg/m³ (55% de ciment), un même dosage en sable et en gravillon qui est de 672 Kg/m³ (G/S = 1) et un dosage en superplastifiant 7 L/m³ (1,75% de ciment).

Tableau 53: Calcul du prix pour avoir 1m³ de BO

COUT DES MATIERES PREMIERES					
Désignation	unité	Prix unitaire	Poids spécifique [kg/m ³]	quantité	Sous total [ar]
Ciment CEM II/A 42,5 N HOLCIM	Sac de 50kg	26000	400	8	208000
Sable de rivière	m ³	22000	725	0,725	15950
Gravillon concassé (5/12,5)	m ³	30000	992	0,992	29760
Total					253710
COUT DE MAIN D'ŒUVRE ET D'ENERGIE					
Ouvriers	1	55000		3	165000
Energie de vibration		50000			50000
Total					215000
COUT TOTAL POUR CONFECTIONNER 1m ³ DU BETON					
Total cout de matière première					253710
Total cout de main d'œuvre					200000
TOTAL					468710



Tableau 54: Calcul du prix pour avoir 1m³ de BFLHC

COUT DE MATIERE PREMIERE					
Désignation	unité	Prix unitaire [ar]	Poids spécifique [kg/m³]	quantité	Sous total [ar]
Ciment CEM II/A 42,5 N HOLCIM	Sac de 50kg	26000	400	8	208000
Sable de rivière	m³	22000	672	0,672	13440
Gravillon concassé (5/12,5)	m³	30000	672	0,672	20160
Superplastifiant VISCOCRETE Tempo12	L	9000	7	7	63000
Total					304600
COUTS DE MAIN D'OUVRE					
Cout du Cipolin	5kg	1250	220		55000
Broyage de cipolin	10Kg	2400	220		52800
Ouvriers	1	55000		1	55000
Total					162800
COUT TOTAL POUR CONFECTIONNER 1m³ DU BETON					
Total cout de matière première					304600
Total cout de main d'œuvre					162800
TOTAL					467400

Le cout de matière première pour confectionner un BFLHC est élevé de 20 % seulement par rapport au BO. Pour le cout de la main d'œuvre, le BFLHC apporte une économie d'énergie de vibration et une réduction de nombre d'ouvrier. Le cout de main d'œuvre diminue jusqu'à 24 % de celle de BO. Donc, Pour confectionner 1 m³ de béton ; le cout total de BFLHC est réduit de 0,3 % par rapport au cout de BO.



Mais n'oublions pas aussi que le BFLHC présente des nombreux avantages sur les résistances mécaniques, sur la durabilité et sur les qualités physiques.

D'après tous ce qu'on a exposé dans le tableau 53 et 54 ; on peut tirer une conclusion que notre projet est rentable. Il est donc envisageable de confectionner un béton plus durable et plus facile en mettre en œuvre avec des couts moins cher par rapport au béton classique.

II. ENVIRONNEMENT ET BETON

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

1. L'Impact sociaux

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 chauffé.

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 BFLHC, 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.



CONCLUSION GENERALE

Pour conclure, une vue plus en détail sur la fabrication de béton fluide à haute compacité nous a montré dans cette ouvrage.

En effet, Les choix des matières premières et ses caractéristiques sont des éléments primordiaux pour l'obtention des résultats intéressants non seulement sur la résistance mécanique du béton mais aussi sur sa durabilité.

Les essais nécessaires pour valider un BFLHC ou un BAP selon le cahier de charge de l'AFGC ont été exposés. Ce dernier renseigne qu'on a besoin de 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 varié le dosage de chaque constituant.

Pour atteindre cela, Nous avons gardé le dosage de ciment à 400 kg/m^3 dont le but est d'avoir un béton plus solide et plus compact. On a gardé aussi le dosage en eau à 220 L/m^3 ($E/C = 0,55$) et le diamètre maximale de granulat pas plus de 12,5 mm. Le dosage en superplastifiant 1,75% de ciment a été vu à partir de l'étude préliminaire. Le dosage en fines de cipolin de 220 L/m^3 (55% de ciment) nous permet d'avoir un béton fluide à haute compacité.

A partir de ces dosages, on a obtenu un résultat d'affaissement au cône d'Abrams de 18cm et une résistance en compression plus élevé qui atteint jusqu'à 35,75 Mpa. En se référant à la norme NF EN 206-1, ces valeurs qualifient qu'on a de béton fluide de type S4. Les résultats nous ont montré aussi que notre béton fluide est de faible porosité, de faible retrait et une compacité élevée.

Notre béton résiste aussi à l'attaque chimique comme l'attaque au sulfate de magnésium. Et la probabilité de corrosion des armatures est faible.

Il est évident d'après les deux dernières parties que le béton fluide à haute compacité présente des avantages techniques et socioéconomiques par rapport au béton ordinaire. Enfin, il est faisable de construire les ouvrages publics à la forme plus vertigineuse par le BFLHC.



REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [3] **BENAMARA Dalila & BOUZIDIMEZGHICHE**, "Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux « BHP »", Courrier du Savoir – N°10, Avril 2010, 14p.
- [5] **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.
- [6] **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.
- [7] **RANAIVONIRIVO Velomanantsoa Gabriely**, « Contribution à l'étude d'élaboration de ciments à haute résistance à Madagascar. Actions sur le mélange cru » ; Thèse de doctorat, Science et Ingénierie des Matériaux, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Octobre 2005, 65p, 79p.
- [8] **ANDRIARINONY Faniry Rosas**, « Contribution à l'étude de ciment écologique avec polyadditions minérales », Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Science des matériaux, 2008, 8p.
- [9] **RASOLOFOHARITIANA Rado Nantenaina**, " Contribution à l'étude des Bétons autoplaçants"; Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; Université d'Antananarivo ; 2009. 80p.
- [10] **PAPADAKIS**, Industrie de la Chaux du ciment et du plâtre; Dunod - 1970
- [11] **DREUX G., FESTA J.**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, Paris, 1998, 3p



[13] ANDRIAMPARANY Flavien Razafiarison ; Informatisation de la formulation du béton inspiré de méthode de FAURY; Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; Université d'Antananarivo ; Octobre 2006, 60p.

[15] Faury J. « Le béton », 2p.

[16] Groupe de Travail CRR (Centre de Recherche Routier) présidé par Luc Rens ; « Code de bonne pratique pour les revêtements industriels extérieurs en béton », janvier 1947, 4p.

[17] LE Ngoc-Dong, « Amélioration de la régularité du béton en production », Thèse de l'école nationale des ponts et chaussées ; 2007. 12p.

[18] RABIBISOA (D.H.) « Conception et réalisation d'un system de gestion de base de données de matières premières pour céramique à Madagascar » ; Thèse doctorat, Science et Ingénieur des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. 2005. 51p.

[19] RABE Christian et RATSIMBAZAFY (H.M.) ; « Etude de production d'un ciment à partir de chaux et de cendre de balles de paddy » ; Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention de diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; Université d'Antananarivo ; 1987. 27p.

[21] RAKOTONIAINA Volasolo ; « Contribution a l'étude du béton de sable – applications » ; Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'études approfondies en Sciences des matériaux ; 2006. 12p ,18p.

[22] GHOMARI Fouad, « Matériaux de construction » ; université aboubekr belkaid ; faculté de technologie de technologie ; département de génie civil. 25p, 28p, 51p.

[23] Herman RAZAFINDRAVELO, « les bétons auto plaçant : influence du types de granulat, d'adjuvant et d'ajout », Thèse de doctorat, Science des Matériaux ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ; 2013. 32p ; 72p.

[24] M. GHOMARI F. « Travaux pratique de science des matériaux de construction » ; Université de ABOUBEKR BELKAID. 2008. 3p.



[28] ISO 5725-2 :1994, Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure – Partie 2 : Méthode de base pour la détermination de la répétabilité et de reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée. 6p.

REFERENCE WEBOGRAPHIE

[1] <http://beton Wikipedia>

[2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_du_b%C3%A9ton

[4] <http://www.lafarge.mg>

[12] fr.wikipedia.org/wiki/Granulat

[14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Grave_\(granulat\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grave_(granulat))

[20] <https://cours.etsmtl.ca/TCH025/Notes%20de%20cours/Hiver%202012/Cours-B%C3%A9tonETS.pdf>.

[24] http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_autopla%C3%A7ant

[25] http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_cinq.html.

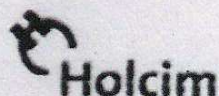
[26] http://fsi.univ-tlemcen.dz/tp/los_angeles.pdf

[27] http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme13.html



ANNEXES



ANNEXE 1: FICHE TECHNIQUE DU CIMENT CEM II/A 42,5N HOLCIM

Holcim (Madagascar)
1 Bis Rue P. Lumumba
Tsaralalana
101 Antananarivo

Tél: + 261 20 22 239 78
Fax: + 261 20 22 563 98
holcim.mad@holcim.com

Fiche Produit**Manda**

Fabriqu    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	14,68
Valeurs exigées : NM 031-1 *						à 3,5%		1,46

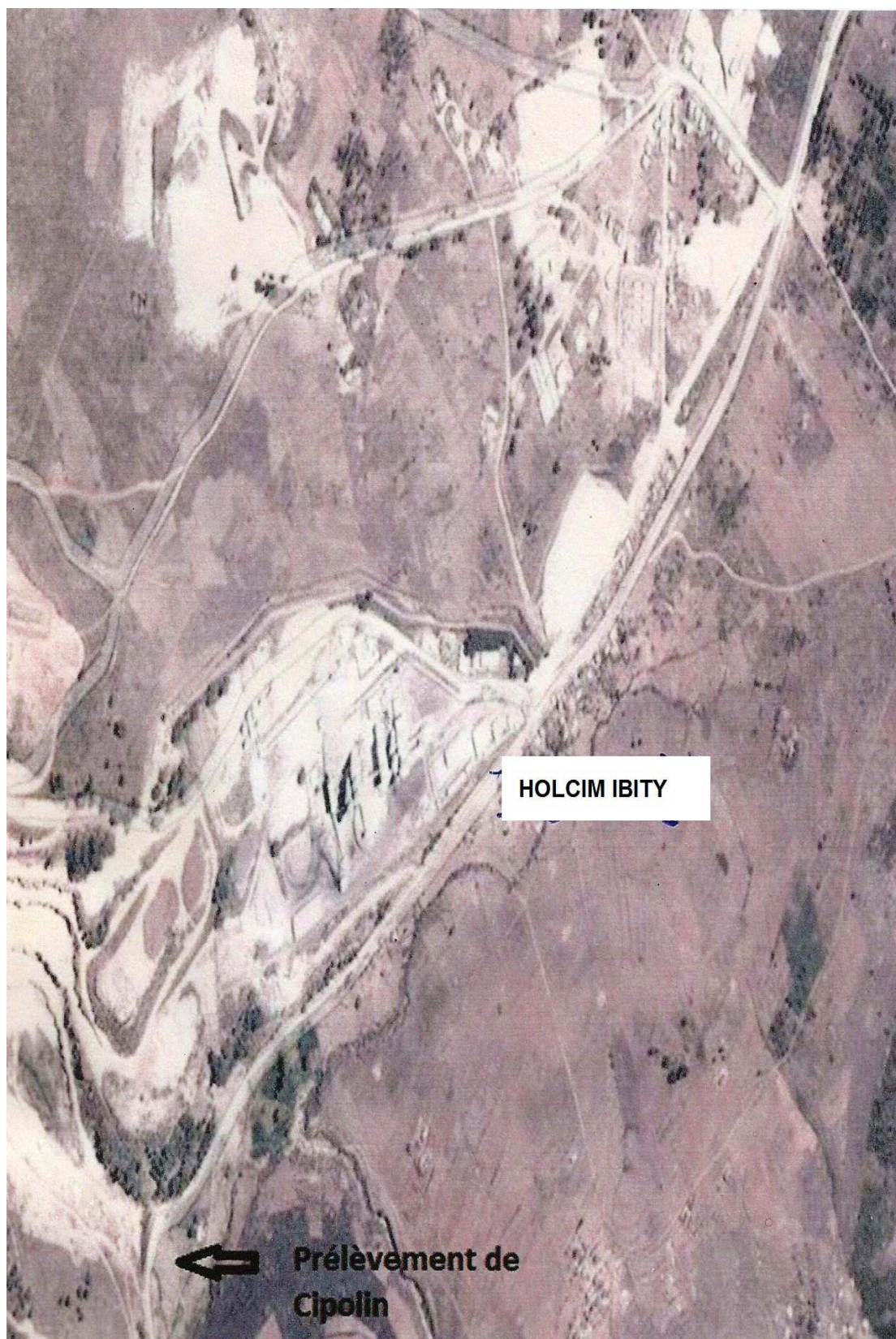
Caractéristiques physiques

(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	à 10

- *NM 031-1 Normes malagasy édition de janvier 2010
- Laboratoire Holcim (Madagascar) agréé par le LNTPB pour la période novembre 2012 - Novembre 2013

ANNEXE 2: CARRIERE VONTOVORONA

ANNEXE 3: SITE DE PRELEVEMENT DE CIPOLIN

ANNEXE 4: ESSAI DE LOS ANGELES

 <h1>ESSAI LOS ANGELES</h1>										DOSSIER n° _____									
										CLIENT : _____									
										RECEPTION : _____									
CHANTIER : _____				Nature de la roche : _____		Structure : _____		Compositions minéralogiques : _____											
ECHANTILLON : _____																			
OPERATEUR : _____				DATE : _____		Unité de mesure utilisée : gramme (g)													
Classe granulière	Nombre rotations	Nombre boulets	Masses limites des boulets	Masses limites	Classe granulière	Nombre rotations	Nombre boulets	Masses limites des boulets	Masses limites										
(1)	500	7	2530 - 3100		(1)	4/6,3 5000	(2)	6,3/10 5000	(3)	10/14 5000	(4)	10/16 2000 10/25 5000	(5)	16/25 2000 16/31,5 5000	(6)	25/30 2000 25/50 5000	prise d'essai (M)	Après essai masse des éléments >1,6mm m'	Los Anglais 100 m 5000
(2)	500	9	3310 - 3980		(2)														
(3)	500	11	4060 - 4960		(3)														
(4)	500	11	4680 - 4960		(4)														
(5)	500	12	5130 - 5300		(5)														
(6)	1000	12	5130 - 5300		(6)														

ANNEXE 5: FICHE TECHNIQUE DU SUPERPLASTIFIANT VISCOCRETE 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

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

Stockage 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. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été destabilisé.

Conservation 1 an en emballage intact

Données techniques

densité 1,06 ± 0,01

pH 6 ± 1

Teneur en Na₂O Eq. ≤ 1 %

Extrait sec 30,2 ± 1,3 %

Construction

Sika®

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: PROTOCOLE D'ESSAI D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

Matériels

- Un densimètre gradué de 0,995 à 1,030 g/ cm³ de forme torpille avec des graduations tous les 0,0005 g/ cm³
- Des éprouvettes de 2 litres de contenance
- Agitateur ;
- Balance ;
- Tamis de 50 µm;
- Etuve ;
- Spatules ;
- Bac
- Mortier avec Pilon de caoutchouc

Réactifs

- Eau distillée
- un defloculant : hexametaphosphate de sodium ;

Description de l'essai

- L'échantillon est tamisé par voie humide au tamis 50 µm
- Recueillir dans un bac l'eau de lavage contenant les éléments inférieurs à 50 µm ;
- Laisser décanter puis siphonner au maximum l'eau devenue claire, sans entraîner des fins.
- Porter ensuite le bac dans une étuve de dessiccation pour éliminer l'eau par évaporation ;
- Une fois le matériau sec ; le recueillir soigneusement et le désagréger au pilon de caoutchouc dans le mortier. Homogénéiser l'ensemble avant de prélever la quantité nécessaire pour réaliser l'essai (80 g de matériau sec pour une éprouvette de 2 litres).

- Mettre imbiber pendant, le 80 g de matériau sec dans un récipient. On utilise dans ce cas environ 500 cm³ d'eau distillée de la quantité de defloculant prescrite, soit :
60 cm³ d'une solution à 5% d'hexametaphosphate de sodium.
- Agiter pendant 3 mn le mélange ;
- Verser la suspension dispersée dans l'éprouvette de 2 litres et rincer soigneusement le récipient. Compléter par de l'eau distillée à 2 litres exactement.
- Avant de plonger le densimètre ; agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette ;
- Retirer l'agitateur, puis plonger lentement le densimètre
- Faire la lecture au sommet du ménisque. Noter le R. C'est à dire le nombre de division à partir de la graduation 1000 affecté du signe + pour la lecture supérieurs à 1000.
- Calculer la pourcentage p des grains pour les différents diamètres équivalents à partir de la formule $p = 4 R$.

ANNEXE 7: PROTOCOLE DE MESURE DE SSB

Mesure de surface spécifique

1. Méthode

La surface spécifique d'une poudre est estimée à partir de la quantité d'azote adsorbée en relation avec sa pression à la température d'ébullition de l'azote liquide et sous une pression atmosphérique normale. Les informations sont interprétées selon le modèle de Brunauer, Emmett et Teller (méthode BET).

2. Equipement

- Instrument: Gemini 2375 de Micromeritics;
- Stand de conditionnement d'échantillons Micromeritics FlowPrep 060, réglée à une température adaptée à la nature de l'échantillon. (Attention, elle est par défaut fixée à 200 [°C]);
- Balance d'analyse (précision de 0.1 [mg]);
- Spatule les échantillons de poudre;
- Tube de test adapté à l'instrument ;
- Bouchon pour le tube de test;
- Support pour le tube de test.

3. Protocole

Préparation des échantillons

- S'il s'agit des premières mesures de la journée, placer 3 tubes de test vides (avec leur bouchon) dans l'appareil de conditionnement d'échantillons sous flux de gaz et les laisser sécher sous un flux d'azote pendant 1 [h] ou jusqu'à un poids constant. Sortir les tubes du four et les laisser refroidir durant 5 [min]. Un tube de test sera utilisé pour l'analyse et les deux autres pour calibrer le P_0 ;
- Au moyen de la balance analytique (précision de 0.1 [mg]), peser un tube de test vide avec son support et son bouchon. Noter soigneusement le résultat W_T [g];

- A l'aide de la spatule ajouter une quantité suffisante de poudre dans le tube de test. (La surface totale devrait être comprise entre 5 et 10 [m²]);
- Peser le tube de test contenant la poudre avec son support et son bouchon (précision de 0.1 [mg]). Noter soigneusement le résultat W_B [g];
- Placer le tube de test avec son bouchon posé sur le tube sur le stand de conditionnement d'échantillons avec flux de gaz pour la durée nécessaire en fonction de la nature de l'échantillon. Sortir le tube de test du four et le laisser refroidir 5 [min]. Placer le tube de test (avec bouchon) sur son support et peser (précision de 0.1 [mg]). Noter soigneusement le résultat W_C [g];
- La masse de poudre à insérer dans le système de mesure peut être calculée à partir de : $W_P = W_C - W_T$ [g]

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES PHOTOS	vii
LISTE DES ANNEXES	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
NOTATIONS ET SYMBOLES	x
INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LES BÉTONS	4
I. GÉNÉRALITÉ ET DEFINITIONS	4
II. HISTORIQUE DU BETON	4
III. LES COMPOSANTS DU BETON	5
1. Les ciments	6
1.1. Définitions	6
1.2. Les constituants du ciment Portland	6
1.2.1. Le constituant principal du ciment Portland	6
1.2.1.1. Le clinker	6
1.2.2. Les ajouts	8
1.3. Les caractéristiques du ciment	9
1.3.1. Caractéristiques physiques	9
1.3.2. Composition chimique élémentaire	10
1.3.3. Compositions minéralogiques	10
1.4. Rôle du ciment dans le béton	10
1.5. Choix de ciment pour le béton	10
2. Les granulats	11
2.1. Définition	11
2.2. Classe granulaire	11
2.3. Les types de granulats	12

2.3.1.	Les sables	12
2.3.2.	Les gravillons	13
2.3.3.	Le grave.....	14
2.4.	Caractéristiques géométriques des granulats	14
2.5.	Caractéristiques physiques des granulats	15
2.5.1.	Masse volumique apparente	15
2.5.2.	Masse spécifique.....	15
2.5.3.	Densité absolue.....	15
2.5.4.	Densité apparente.....	15
2.5.5.	Compacité C	15
2.5.6.	Porosité P	16
2.5.7.	Module de finesse M_f	16
3.	L'eau de gâchage.....	17
4.	Les adjuvants.....	18
4.1.	Plastifiants	18
4.2.	Superplastifiants.....	18
4.3.	Entraîneurs d'air	19
4.4.	Retardateurs et accélérateurs de prise.....	19
CHAPITRE II: FABRICATION INDUSTRIELLE DU BETON		21
I.	PROCESSUS DE FABRICATION INDUSTRIELLE DU BETON	21
1.	Stockage.....	22
2.	Dosage.....	22
3.	Malaxage	23
4.	Mise en œuvre.....	23
5.	Coulage	23
6.	Vibration.....	23
CHAPITRE III: LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES ET NORMALISATION DU BETON		24
I.	LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES	24
1.	Resistance en compression en 28 jours (R_{c28}).....	24
2.	Résistance à la traction.....	25
3.	Resistance en cisaillement et module d'élasticité.....	25
4.	Résistance à la flexion ou module de rupture	25
II.	LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES.....	26

1. Masse volumique	26
2. Coefficient de dilatation	26
3. Les retraits.....	26
3.1. La contraction de Chatelier et retrait endogène	26
3.2. Le retrait hydraulique avant prise et en cours de prise	27
3.3. Le retrait hydraulique à long terme.....	27
3.4. Le retrait thermique.....	27
III. NORMALISATION DU BETON (Norme NF P 18 305)	27
1. Bétons Prêts à l'Emploi (BPE)	28
2. Bétons à Caractères Normalisés (BCN).....	28
3. Bétons à caractères spécifiques (BCS).....	28
CHAPITRE IV: LES FINES D'AJOUT.....	29
I. CIPOLINS BROYES	29
1. Propriétés des cipolins	29
1.1. Caractéristiques mécaniques	29
1.2. Constituants chimiques	29
2. Quelques gisements de cipolin à Madagascar.....	29
2.1. Gisement de cipolin dans la région d'Ambatondrazaka.....	29
2.1. Gisement des cipolins dans la région Vakinakaratra.....	30
II. CENDRE DE BALLES DE RIZ	31
III. DECHETS DE VERRE BROYE.....	31
CHAPITRE V: QUELQUES METHODES DE FORMULATION DU BETON.....	32
I. METHODE DE BOLOMEY	32
II. METHODE DE FAURY	33
III. METHODE D'ABRAMS.....	33
IV. METHODE DE VALETTE.....	34
V. METHODE DE JOISEL.....	35
VI. METHODE DE DREUX GORISSE	35
1. Données de base	35
1.1. Nature de l'ouvrage.....	36
1.2. Ouvrabilité désirée	36
1.3. Diamètre maximale des granulats (D_{max}).....	36
2. Dosage en ciment	37
3. Dosage en eau	39

4. Tracé de la courbe granulaire de référence.....	39
5. Coefficient de compacité (δ).....	41
6. Dosage des granulats.....	42
CHAPITRE VI: GENERALITE SUR LES BETONS FLUIDES	44
I. DEFINITION.....	44
II. ROLES DES FINES DANS LE BETON FLUIDE	45
III. ROLE ET ACTION DU SUPERPLASTIFIANT DANS LE BETON FLUIDE	46
IV. MISE EN ŒUVRE	46
PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES.....	48
INTRODUCTION.....	49
CHAPITRE VII: CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES	50
I. LE CIMENT CEM II/A –V- 42,5.....	50
1. Les caractéristiques physiques.....	50
2. Caractéristiques mécaniques.....	51
3. Caractéristiques chimiques	51
3.1. Composition	51
II. LES GRANULATS ET LA FILLER CIPOLIN	54
1. Critère de choix de granulat et de cipolin	54
1.1. Choix des granulats	54
1.2. Choix de cipolin	55
2. Caractérisations physiques des granulats et cipolin broyé	56
2.1. Teneur en eau	56
2.2. Masses volumiques apparentes (ρ)	57
2.3. Masses volumiques absolues (σ).....	58
2.4. Compacité et le Vide.....	62
2.6. Coefficient de Los Angeles du gravillon	65
2.7. Analyses granulométriques	68
2.7.1. Analyses granulométriques des granulats par tamisage	68
2.7.2. Analyse granulométrique de cipolin broyé par sédimentométrie.....	72
2.8. Surface Spécifique Blaine de cipolin broyé de diamètre $d \leq 50 \mu\text{m}$	74
3. Caractéristiques chimiques des granulats et du cipolin	74
III. L'EAU DE GACHAGE	75
IV. LE SUPERPLASTIFIANT : SIKA®VISCOCRETE®TEMPO12	76

CHAPITRE VIII: LES ESSAIS DE CARACTERISATION DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE 78

I.	L'ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS (FLOW- TEST).....	78
II.	ESSAI D'ECOULEMENT DE LA BOITE EN L	80
III.	Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump- test).....	80
IV.	RESISTANCE EN COMPRESSION	83
V.	ESSAI DE TRACTION	84
VI.	ESSAI SUR LA MESURE DU RETRAIT DU BETON	85
VII.	ESSAI SUR LA MESURE DE LA POROSITE ET DE LA COMPACITE DU BETON	85
VIII.	ESSAIS DE DURABILITE DU BETON.....	86
1.	Test à la carbonatation du béton	86
2.	Resistance aux l'attaques chimiques.....	87
CHAPITRE IX: ETUDE DE FORMULATION DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE....		89
I.	FORMULATION DE BETON ORDINAIRE A PARTIR DE LA METHODE DREUX GORISSE	89
1.	Estimation de la résistance en compression à 28 jours du BO	89
2.	Calcul de dosage des granulats (pour 1 m ³ de béton).....	90
2.1.	Détermination des proportions des granulats à partir de la courbe de référence...	90
2.2.	Calcul de dosage en S et en G	91
3.	Résultats et interprétation.....	91
4.	Conclusion.....	92
II.	FORMULATION DE BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE A PARTIR DE LA RECOMMANDATION DE L'AFGC.....	92
1.	Dosage en Ciment	93
2.	Dosage en Eau.....	93
3.	Dosage en fines de cipolin.....	94
4.	Dosage en superplastifiant	94
5.	Dosages en sable et en gravillon	94
6.	Etude préliminaire	95
6.1.	Résultats et interprétations.....	95
6.2.	Conclusion.....	96
7.	Influence de la variation des fines de cipolin par rapport au ciment.....	96
7.1.	Résultats et interprétation.....	97
CHAPITRE IV: AVANTAGES ET APPLICATIONS DES BETONS FLUIDES A HAUTES COMPACITES.....		103

I. LES AVANTAGES DU BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE	103
1. L'ouvrabilité	103
2. La qualité d'apparence	103
3. La qualité physique et chimique	103
II. LES APPLICATIONS PRIVILEGIEES	104
CHAPITRE XI: APROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	105
I. COMPARAISON DU COUT DE 1m ³ DE BFLHC ET DE BO	105
II. ENVIRONNEMENT ET BETON	107
1. L'Impact sociaux	107
2. Le bilan de CO2	107
3. L'analyse du cycle de vie	108
CONCLUSION GENERALE	109
REFERENCE BIBLIOGRAPHIE	110
REFERENCE WEBOGRAPHIE	112
ANNEXES	A

AUTEUR : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain

TITRE : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE BETON FLUIDE A HAUTE COMPACITE :
UTILISATION DE FINE D'AJOUT DE TYPE CALCAIRE »

Nombre de pages : 112

Nombre de tableaux : 54

Nombre de figures : 20

Nombre de photos : 21

RESUME

Les bétons fluides à haute compacité sont des bétons faciles à mettre en œuvre. Ils ont une bonne résistance mécanique, et une compacité à long terme très élevée par rapport au béton ordinaire classique.

L'ajout des fines de cipolins comme filler calcaire, ainsi que l'utilisation de superplastifiant différencient les bétons à haute compacité au béton ordinaire. La stabilité et la thixotropie engendrée par la partie ou coexistent ciment, fines des cipolins et superplastifiants, jouent un rôle important sur la fluidité et la stabilité du béton.

Les bétons fluides à haute compacité présentent des atouts au niveau de sa résistance en compression, sa durabilité, sa maniabilité, et même au niveau environnemental et économique.

Mots clés : Superplastifiants, Calcaire, Cipolin, Fillers, béton, béton fluide, Formulation, Resistance en compression, Compacité, Retrait, Maniabilité, Durabilité.

SUMMARY

Fluid concretes high compactness are easy to implement concrete. They have good mechanical strength, compactness and long-term very high compared to conventional plain, concrete.

The addition of fine limestone filler as marbles, and the use of concrete superplasticizer differentiate high compactness in ordinary concrete. Stability and thixotropy generated by the party or coexist cement, fine marbles of superplasticizers and play an important role on the fluidity and stability of concrete.

Fluid concretes high compactness have advantages in terms of its compressive strength, durability, maneuverability, and even environmental and economic level.

Keywords : Superplastizer, Limestone, marbles, Fillers, concrete, fluid concrete, Formulation, compressive strength, compactness, withdrawal, maneuverability, durability.

ADRESSE DE L'AUTEUR : Lot VM 38 Ter Androndrakely

TEL : 0327444477 / 0330182951

e-mail : alaintsoa@yahoo.fr

RAPPORTEUR : Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely