



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention de
Diplôme de Maitrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée
Option : Géotechnique et Environnement**

METHODES DE FORMULATION DE BETON HYDRAULIQUE

Soutenu publiquement par :

DASY Kellyo

Le 08 octobre 2013

Devant la commission d'examen composé de :

- Président** : Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël (Professeur Titulaire)
Rapporteur : Monsieur RAKOTO Heritiana (Maître de conférences)
Encadreur technique : Monsieur Patrick POLVERELLI (Directeur du Service Technique et Laboratoire)
Examineur : Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala (Professeur Titulaire)



Année Universitaire 2009-2010





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention de

Diplôme de Maitrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée

Option : Géotechnique et Environnement

METHODES DE FORMULATION DU BETON HYDRAULIQUE



Présenté par :

DASY Kellyo

Devant la commission d'examen composé de :

- Président** : Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël (Professeur Titulaire)
Rapporteur : Monsieur RAKOTO Heritiana (Maître de conférences)
Encadreur technique : Monsieur Patrick POLVERELLI (Directeur du Service Technique et Laboratoire)
Examineur : Monsieur RASOLOMANANA Eddy (Professeur Titulaire)

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire de fin d'étude et en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences et techniques en géophysique appliquée, je voudrais remercier l'Unique, Le Très-Haut et toutes les personnes qui ont de loin ou de près m'aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier :

-Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Doyen de la Faculté des sciences à l'Université d'Antananarivo qui m'a toujours accepté d'être un étudiant dans ladite faculté.

-Monsieur RAKOTONDRAMANANA Heritiana, Chef de département de physique à l'Université d'Antananarivo qui m'a accordé la poursuite de mes études dans son département.

-Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard, Professeur titulaire, Directeur de l'IOGA pour les conseils, les informations, les prêts de matérielles géophysiques pour nos travaux pratiques.

-Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien Noël, Professeur titulaire, Responsable pédagogique de notre formation, pour les guides pratiques dans la vie et pour la recherche de la qualité de l'enseignement.

-Monsieur RAKOTO Heritiana, Docteur, qui a accepté d'être mon encadreur pédagogique et qui m'a dirigé tout au long de ce mémoire

-Monsieur RATSIMBAZAFY Jean Bruno, Professeur titulaire, pour les conseils qu'il m'a fourni

-Monsieur Patrick POLVERELLI, Directeur du Service Technique et Laboratoire (STL) de la Société Colas Madagascar, mon encadreur professionnel, qui m'a autorisé à effectuer mon stage de mémoire au sein de son département avec ses équipes.

-Monsieur Thibaut SERVANT, Directeur du chantier Tour Orange 786 Akoronrano qui m'a autorisé à poursuivre mon stage sur chantier avec M^{me} Henitsoa Angéla RAZAKAFALY, Ingénieur d'Assurance Qualité (IAQ).

-Mes remerciements s'adressent aussi au corps enseignants, personnels de l'IOGA, de STL, mes collègues étudiants qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire, et à tous les membres de ma famille qui m'ont encouragé tout au long de mes études.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON	2
I.1. Caractéristiques et contrôle de la performance des bétons : frais et durci	2
I.2. Les différentes spécifications des bétons hydrauliques.....	8
I.3. Les constituants des bétons	14
I.4. Notions sur les éventuels défauts des bétons	15
I.5. Validation d'une formulation du béton	17
I.6. Fabrication	17
I.7. Contrôles	19
CHAPITRE II. METHODOLOGIE	20
II.1. CRITERES DE SELECTION DES CONSTITUANTS DE BETONS	20
II.2. METHODE DE FORMULATION	35
CHAPITRE III. ETUDES EXPERIMENTALES ET RESULTATS	54
III.1. EXEMPLE D'APPLICATION	54
III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	55
CONCLUSION	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUE	71

GLOSSAIRE

Béton hydraulique : Matériau céramique composite généralement à base d'eau, d'un liant (liant hydraulique : ciment, liant hydrocarboné : bitume,...), des granulats tels que des graviers ou du sable et éventuellement des adjuvants et autres additifs. Dans le cas où le diamètre des granulats est inférieur à 8mm, on parle de mortier.

Eau effectif : différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais au moment du malaxage et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Elle se déduit du coefficient d'absorption des granulats qui est mesuré selon la norme NF EN 1097-6.

Eau totale : l'eau d'apport plus l'eau déjà contenue dans et à la surface des granulats plus l'eau des adjuvants et des additions utilisée sous la forme de suspension et toute eau résultant de l'ajout de glace ou de chauffage à la vapeur.

Essai d'étude : essai exécuté entièrement en laboratoire avec les constituants susceptibles d'être utilisés sur le chantier, dans le but de vérifier l'aptitude de la composition à satisfaire les exigences.

Essai de convenance : essai ayant pour but de vérifier qu'avec les moyens du chantier, on peut réaliser le béton proposé. Il a également pour but de vérifier que les quantités de constituants prévues par mètre cube de béton donnent bien 1 m³ de béton en œuvre.

Essai de contrôle : essai ayant pour but de vérifier le respect des spécifications.

Granulat courant : granulat ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique supérieure à 2 000 kg/m³ et inférieure à 3 000 kg/m³ déterminée selon l'EN 1097-6.

Granulat léger : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique inférieure ou égale à 2 000 kg/m³ déterminée selon l'EN 1097-6, ou une masse volumique en vrac inférieure ou égale à 1 200 kg/m³, déterminée selon l'EN 1097-3.

Granulat lourd : granulat ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique supérieure ou égale à 3 000 kg/m³ déterminée selon l'EN 1097-6

Gâchée : quantité de béton frais produite en un seul cycle par un malaxeur discontinu, ou quantité déversée pendant 1 min d'un malaxeur continu.

Rapport eau/ciment : rapport en masse de la teneur en eau efficace à la teneur en ciment dans le béton frais.

Résistance caractéristique : valeur de résistance en dessous de laquelle peuvent se situer 5 % de la population de tous les résultats des mesures de résistance possibles effectués pour le volume de béton considéré.

LISTE DES ACRONYMES

MSTGA	: Maîtrise des sciences et Techniques en Géophysique Appliqué
IOGA	: Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
COLAS	: Cold Asphalt
NF	: Norme Française
AFNOR	: Association Française de Normalisation
ASTM	: American Standard Test Method
BPE	: Béton Prêt à l'Emploi

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Essai de consistance par la méthode de cône d'Abrams	2
Figure 2: Echantonnage du béton frais.....	3
Figure 3: Matériels d'essais de consistance.....	3
Figure 4: Presse béton manuelle.....	4
Figure 5: Presse béton électronique.....	4
Figure 7: Essai de traction par flexion.....	5
Figure 6: Essai de traction par fendage	4
Figure 8: Essai au scléromètre.....	5
Figure 9: Variation de la résistance en fonction de l'indice sclérométrique	6
Figure 10: La mesure de la vitesse des ondes dans le béton.....	7
Figure 11: Appareil d'auscultation dynamique, type PUNDIT	7
Figure 12: Relation approximative entre la vitesse de son (m/s) et la résistance en compression (MPa).....	8
Figure 13: Quelques classifications sur le lieu d'utilisation du béton.....	12
Figure 14: Quelques classifications sur le lieu d'utilisation du béton.....	12
Figure 15: Centrale BPE.....	17
Figure 16: Pompage du béton	18
Figure 17: Chargement du béton frais au camion toupie	18
Figure 18: Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement	44
Figure 19: Utilisation des abaques	45
Figure 20: Abaque de détermination de la composition de béton, D = 12.5 mm.....	45
Figure 21: Abaque de détermination de la composition de béton, D = 20 mm.....	46
Figure 22: Variation de la quantité d'eau pour un béton courant.	52
Figure 23: Histogramme de la formule F8	64
Figure 24: Courbe de résistance moyenne à la compression de la formule F8	65
Figure 25: Courbe de la composition théorique et expérimentale de F8.....	65
Figure 26: Histogramme sur la formule F9	67
Figure 27: Courbe de résistance moyenne à la compression de la formule F9	68
Figure 28: Courbe de la composition théorique et expérimentale de F9.....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Appréciation de la qualité du béton en fonction de la vitesse du son.....	8
Tableau 2: Classes de résistance à la compression pour les bétons de masse	9
Tableau 3: Classes de résistance pour les bétons légers.....	10
Tableau 4: Classes de consistance.....	10
Tableau 5: Classe de chlorure	11
Tableau 6: Classes d'expositions	13
Tableau 7: Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines.....	14
Tableau 8: Famille des granulats et leurs caractéristiques	20
Tableau 9: Caractéristiques intrinsèques.....	21
Tableau 10: Caractéristiques de fabrication	22
Tableau 11: Nature et la qualité du sable	23
Tableau 12: Choix des granulats	23
Tableau 13: Adéquation granulats béton.....	24
Tableau 14: Types du ciment courant	26
Tableau 15: Autres types du ciment.....	27
Tableau 16: Ciments résistants aux eaux à haute teneur en sulfate.....	29
Tableau 17: Spécifications mécaniques et physiques.....	30
Tableau 18: Spécifications chimiques	30
Tableau 19: Types d'adjuvants suivant la norme NF EN 934-2	31
Tableau 20: Spécification selon la norme NF EN 934-2.....	32
Tableau 21: Spécification de l'eau de gâchage	34
Tableau 22: Liste des essais d'identifications des granulats	38
Tableau 23: Liste des essais d'identifications du ciment	38
Tableau 24: Liste des essais d'identifications des Adjuvants.....	38
Tableau 25: Liste courante des essais d'études et de convenances d'une formule de composition d'un béton.....	39
Tableau 26: Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.....	41
Tableau 27: Valeurs de l'affaissement du béton dans la méthode FAURY	42
Tableau 28: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	43
Tableau 29: Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire.....	46

Tableau 30: Correcteur K.....	47
Tableau 31: Coefficient de compacité.....	48
Tableau 32: Pourcentage d'eau (en poids) selon le degré d'humidité.....	51
Tableau 33: Classe d'exposition et critères de formulation	53
Tableau 34: Résultat des contrôles qualité Physico - Mécaniques du Ciment	55
Tableau 37: Résultat sur les essais géotechniques des granulats.....	56
Tableau 38: Résultats d'analyses granulométriques.....	57
Tableau 39: Résultat du contrôle qualité de l'adjuvant	58
Tableau 40: Résultat des essais d'étude et de convenance pour la formule F8.....	60
Tableau 41: Vérification de la formule	60
Tableau 42: Résultat des essais d'étude et de convenance pour une autre formule	61
Tableau 43: Essai d'étude et de convenance pour la formule F9	61
Tableau 44: Vérification de la formule F9	62
Tableau 45: Un autre essai d'étude et de convenance pour le plancher	62
Tableau 46: Résultats de la composition théorique et expérimentale des constituants	63
Tableau 47: Résultats des essais de résistance en compression et écarts des constituants.....	63
Tableau 48: Analyse statistique des résistances en compression sur la formule F8.....	64
Tableau 49: Résultats de la composition théorique et expérimentale des constituants sur F9	66
Tableau 50: Résultats des essais de résistance en compression et écarts des constituants de F9.....	66
Tableau 51: Analyse statistique des résistances en compression sur la formule F9.....	67
Tableau 52: Spécification du béton utilisé dans l'ouvrage : Voile (formule F8)	69
Tableau 53: Spécification du béton utilisé dans l'ouvrage : Plancher (Formule F9)	69

INTRODUCTION

Madagascar dispose des matériaux locaux naturels : des roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires utilisées tels quels ou destinés à la confection des autres matériaux artificiels comme les ciments, les bétons hydrauliques ou hydrocarbonés, les briques. Ces matériaux servent à toute construction d'ouvrages du génie civil (bâtiments, ponts, route, barrage, ...).

L'évolution du béton amène aujourd'hui à une production annuelle mondiale de plus de 6 milliards de mètres cubes soit un mètre cube de béton pour chaque habitant de la planète. Cela fait du béton le produit manufacturé le plus consommé sur la planète après l'eau.

Pour éviter les dépenses inutiles des matériaux locaux et maintenir la durabilité d'un ouvrage, la confection de ces matériaux dérivés nécessite des études normalisées au préalable. Dans le cas des bétons, il est nécessaire de bien identifier, de formuler les matériaux à utiliser selon le type d'ouvrage. L'application de ces études est aussi l'un des moyens pour la gestion intégrée des ressources naturelles.

C'est ainsi que ce présent stage de mémoire, effectué au sein de Service Technique et Laboratoire (STL) de la Société Colas Madagascar s'intitule « Méthodes de formulation du béton hydraulique ».

Ce stage a pour objectif de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au besoin encourus pour un mètre cube de béton selon une méthode bien déterminée.

Le premier chapitre de ce mémoire se consacre aux généralités sur le béton, le deuxième développe les critères de sélection de ses constituants. Le troisième aborde les méthodes de formulation. L'application de ces méthodes se trouve développé dans le quatrième chapitre et les résultats de la méthode choisie et interprétations sont avancés dans le cinquième et dernier chapitre de ce travail.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON

I.1. Caractéristiques et contrôle de la performance des bétons : frais et durci

I.1.1. Bétons frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton ou nécessitent un apport d'énergie extérieur.

- **L'ouvrabilité du béton frais**

Les essais et tests les plus couramment utilisés dans la pratique sont les essais de l'affaissement au cône d'ABRAMS pour l'état de consistance très molle à plus ferme et par l'essai vété pour les bétons très sec.

- **Résistance du béton frais**

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série. La résistance en compression peut atteindre une valeur plus élevée que celle en traction.

La méthode et technique de contrôle du béton frais est :

- **Essai de consistance par la méthode de cône d'ABRAMS**

Faisant l'objet de la norme NF EN 12 350-2 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève en suite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement à l'aide de la règle graduée.

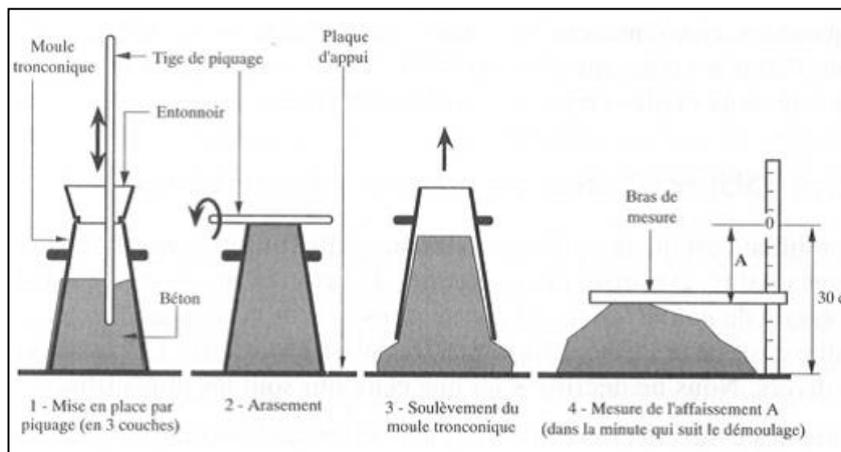


Figure 1: Essai de consistance par la méthode de cône d'Abrams



Figure 2: Echantillonnage du béton frais

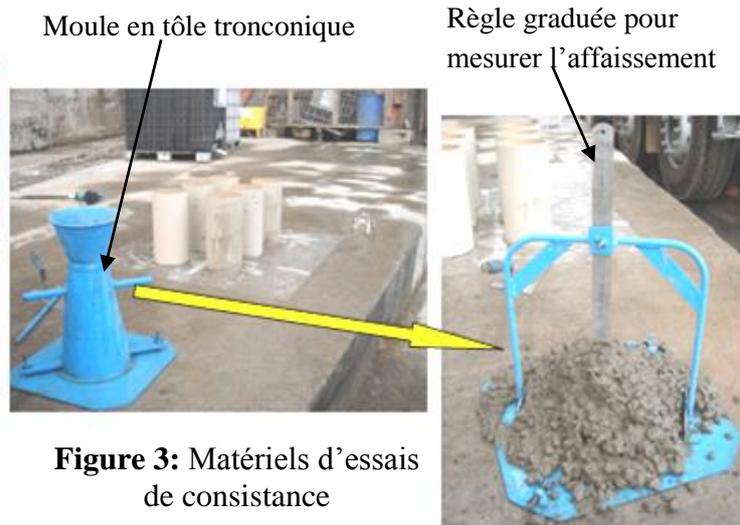


Figure 3: Matériels d'essais de consistance

I.1.2. Bétons durcis

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

La résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation.

Par ailleurs, la résistance du béton est fonction d'une quantité de facteurs autres que la classe de ciment et qui sont à contrôler et à surveiller dès le choix de la qualité des granulats et tout au long de la chaîne de bétonnage.

A part de la résistance en compression ; le béton est caractérisé aussi par la résistance en traction, en flexion, au cisaillement.

I.1.2.1. Méthode et technique de contrôle courante du béton durci par la méthode destructive

- **Résistance à la compression**

Les éprouvettes conservées dans l'eau à 20°C sont essuyées et pesées, chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4 à une vitesse constante. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression

calculée. Leurs extrémités sont rectifiées (surfaçage à l'aide de souffre) .On mesure généralement à 7 jours et 28 jours la résistance à la compression qui est le rapport entre la charge maximale appliquée et la surface de l'éprouvette. L'éprouvette le plus couramment employés est le cylindre de 16 x 32 cm dont la section est de 200 cm².



Figure 4: Presse béton manuelle



Figure 5: Presse béton électronique

- **Traction par fendage**

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton couché suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si « P » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétrale verticale, « D » diamètre et « L » longueur du cylindre, la résistance en traction est égale à :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \quad (\text{http://www.univ-msila.dz})$$

Avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D : diamètre du cylindre (m)

L = longueur du cylindre (m)

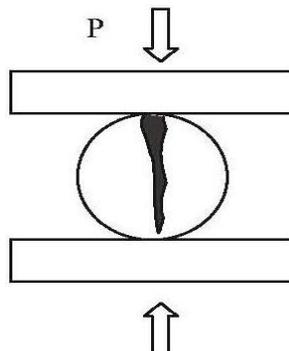


Figure 6: Essai de traction par fendage

- **Traction par flexion**

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de longueur «4 a » et de côté « a » sous une flexion à quatre points et une charge totale « P ». Le moment M étant constant entre les deux points d'application de la charge :

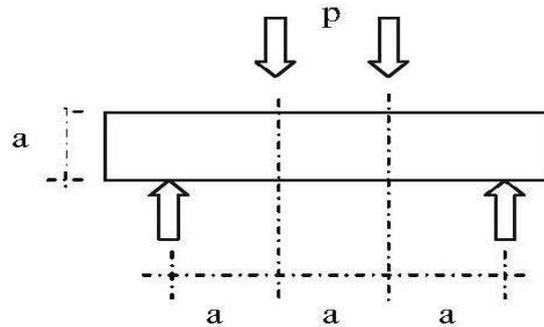


Figure 7: Essai de traction par flexion

La résistance à la traction par flexion: $f_{tj} = \frac{MV}{I} = \frac{6M}{a^3}$ avec $M = \frac{Pa}{2}$
 $\frac{I}{V}$: Module d'inertie = $\frac{a^3}{6}$ e la section
 (<http://www.univ-msila.dz>)

1.1.2.2. Méthode et technique de contrôle courante du béton durci par la méthode semi-destructive

- **Le scléromètre**

L'essai au scléromètre consiste à mesurer le rebondissement d'une petite masselotte composée de bille métallique projetée violemment par un ressort qui comprime lors de l'application de l'appareil contre la surface d'un matériau (béton) à mesurer.

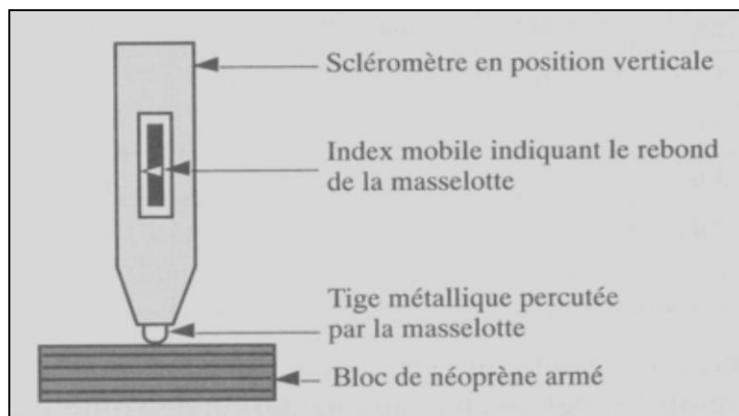


Figure 8: Essai au scléromètre

A une pression suffisante, le ressort serait brusquement libéré. La hauteur de rebondissement de la masselotte est d'autant plus importante que le béton est plus résistant. Et l'indice sclérométrique est mesuré sur une échelle graduée. L'augmentation de la teneur en eau du béton diminue les valeurs de cet indice. La surface sur laquelle l'essai est effectué peut être horizontale, verticale ou à tout autre angle, mais l'appareil doit être étalonné à la position où il sera utilisé. Il existe une corrélation empirique entre la dureté superficielle du béton, la résistance f_c et l'indice sclérométrique I . Donc, la formule suivante permet d'évaluer approximativement la résistance du béton auscultée :

$$f_c = \frac{I^2}{32} \quad (\text{G. DREUX et J. FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES mai 1998}).$$

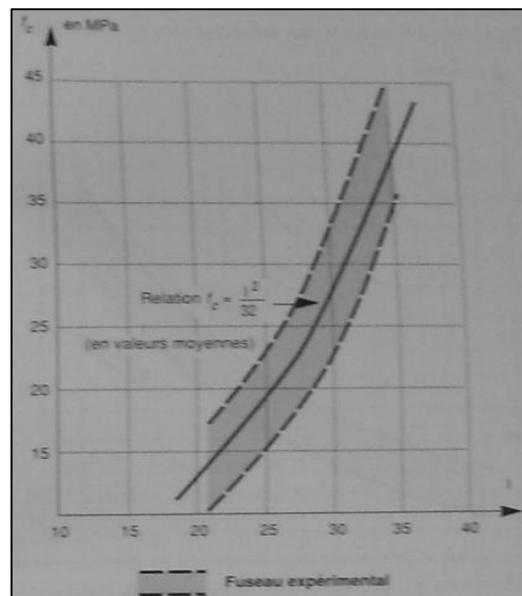


Figure 9: Variation de la résistance en fonction de l'indice sclérométrique

1.1.2.3. Apport de la géophysique sur les essais et mesures des résistances mécaniques du béton : la méthode non destructive

- **L'auscultation dynamique**

La mesure de la vitesse des ondes dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages. Cette méthode est également normalisée par les normes Françaises [NF-EN-12504-4, 2005] et américaines [ASTM-C597-02, 2003], et il existe des appareils commerciaux complets permettant de réaliser ce type de mesures (type PUNDIT).

Le principe général est de mesurer la vitesse de l'onde mécanique se propageant dans le béton en transmission, en réflexion, ou à la surface. On utilise pour cela une paire de transducteurs, l'un servant de source et l'autre le récepteur.

Cette méthode permet principalement de détecter entre autres choses un non uniformité des propriétés de la structure, des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de “nids de cailloux”. Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des structures.

Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup d'autres paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures, etc., les valeurs obtenues peuvent être très différentes de celles obtenues par tests quasi-statiques de compression en laboratoire.

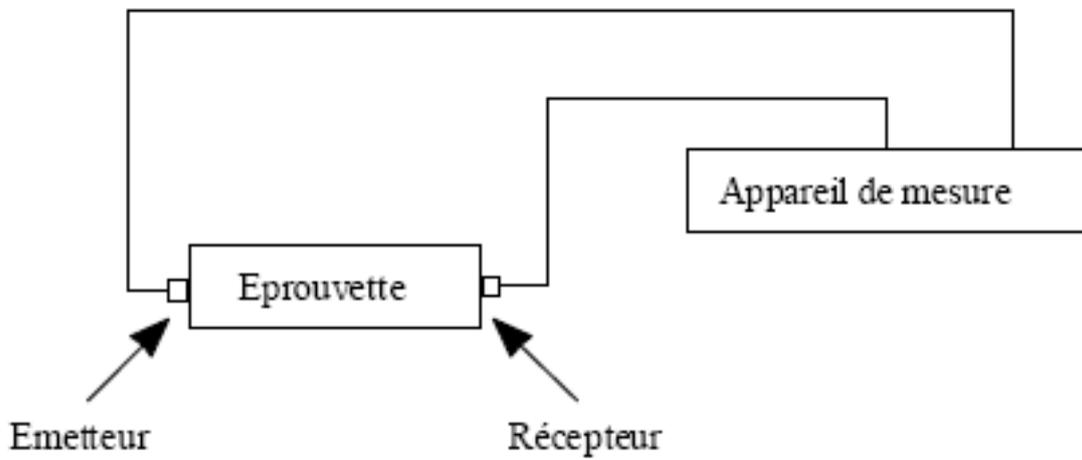


Figure 10: La mesure de la vitesse des ondes dans le béton

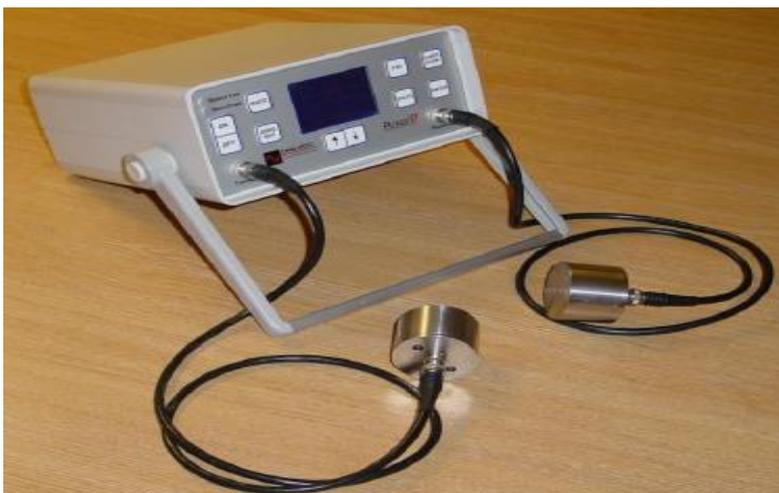


Figure 11: Appareil d'auscultation dynamique, type PUNDIT

Certes, la courbe suivante montre une relation entre cette vitesse de propagation du son et la résistance en compression du béton.

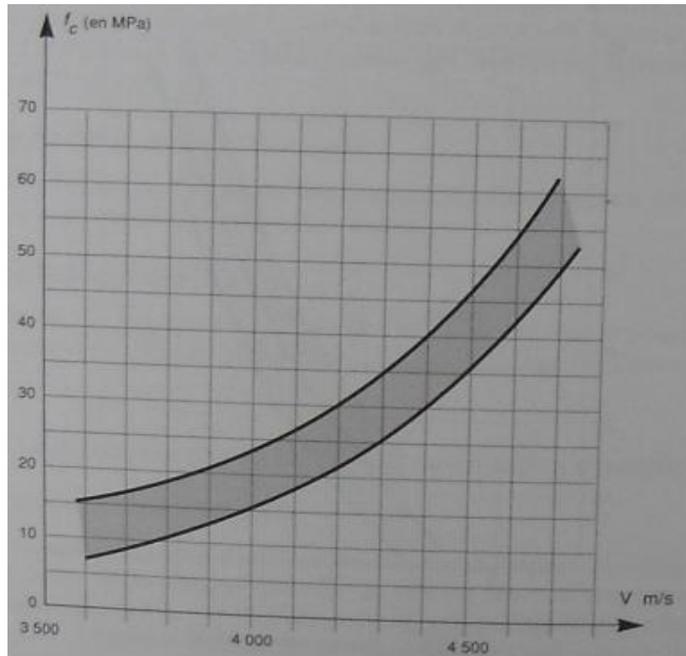


Figure 12: Relation approximative entre la vitesse de son (m/s) et la résistance en compression (MPa)

Des appréciations à ces valeurs sont montrées dans le tableau qui suit.

Tableau 1: Appréciation de la qualité du béton en fonction de la vitesse du son

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

I.2. Les différentes spécifications des bétons hydrauliques

Généralement, le béton peut être spécifié par :

- les classes de résistance ;
- les classes de consistance ;
- les classes de chlorure ;
- la dimension des granulats ;
- les classes d'expositions

I.2.1. Classes de résistances

La classe de résistance à la compression des bétons à 28 jours est désignée par la lettre C “concrete” suivi de deux nombres correspondant aux résistances mesurées respectivement sur éprouvettes cylindriques et cubiques (par exemple C 40/50 ; C45/55).

Dans ce cas, pour C40/50 nous indique que le béton atteint une résistance en compression 40Mpa sur une éprouvette cylindrique à 28 jours d’imbibition dans l’eau et 50Mpa sur une éprouvette cubique.

Dans certains cas particuliers, il est possible d'utiliser des niveaux de résistance intermédiaires par rapport aux valeurs indiquées dans les Tableaux 2 et 3, si ceci est permis par les normes de calcul correspondantes.

Tableau 2: Classes de résistance à la compression pour les bétons de masse volumique normale et les bétons lourds

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale sur cubes
	f_{ck-cyl} N/mm ²	$f_{ck-cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tableau 3: Classes de résistance pour les bétons légers

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres	Résistance caractéristique minimale sur cubes ^{a)}
	f_{ck-cyl} N/mm ²	$f_{ck-cube}$ N/mm ²
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

I.2.2. Classes de consistance

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5). elles sont affichées dans le tableau 4 suivant.

Tableau 4: Classes de consistance

Affaissement (mm)	Normes XP P18 - 305	NF EN 206-1
De 10 à 40	Béton ferme F	S1
De 50 à 90	Béton plastique P	S2
De 100 à 150	Béton très plastique TP	S3
De 160 à 210	Béton fluide Fl	S4
>220	Béton très fluide	S5

I.2.3. Classes de chlorures

Quatre classes de chlorures sont définies dans la norme NF EN 206-1 (0,20, 0,40, 0,65 et 1,0).

Le tableau suivant montre ces classes de chlorures :

Tableau 5: Classe de chlorure

Classes de teneur en chlorures	<ul style="list-style-type: none">▪ CL 0,20 = Pour le béton précontraint (un peu trop permissive),▪ CL 0,40 = Pour le béton armé courant,▪ CL 0,65 = Pour le béton avec ciment CEM III,▪ CL 1,00 = Pour le béton non armé. <p>Où 0,20 correspond au % de chlorures autorisés par rapport au poids de ciment</p>
--------------------------------	--

Commentaire :

La classe CL 0,20 est utilisée dans le béton contenant des armatures de précontrainte en acier ou des pièces métalliques noyées. Le rapport (0,20, 0,40, 0,65 et 1,0) correspond à la teneur maximale en ions Cl⁻ rapportée à la masse de ciment. Pour un usage spécifique du béton, la classe à utiliser dépend des dispositions valides sur le lieu d'utilisation du béton.

I.2.4. Classes d'exposition

Les classes d'exposition tiennent en compte de la situation du béton (intérieur, extérieur) et des agressions auxquelles il risque d'être soumis. La prise en compte des environnements climatiques (secs, humides) et des environnements agressifs (marins ou chimiques) permet d'obtenir des bétons adaptés à l'ouvrage et donc d'accroître sa durabilité. Le choix de cette classe d'exposition est important pour la durabilité du béton. Ainsi le client prescripteur est responsable de la détermination de la classe d'exposition en fonction des paramètres liés au chantier.

La classe d'exposition caractérise donc, le type de corrosion auquel est soumis le béton:

X0 : Absence de risque de corrosion ou d'attaque, elle ne peut concerner que les bétons protégés non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm (milieu très sec)

XC : carbonatation

XS : Correspondant aux cas des bétons au contact des chlorures présent dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin.

XD : Corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre que marine (sels divers)

XF : Correspondant aux cas où le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gèle et dégel

XA : Correspondant aux bétons exposés aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface, les eaux souterraines. La classification de l'eau de mer dépend de la localisation géographique, par conséquent la classification valide sur le lieu d'utilisation du béton.

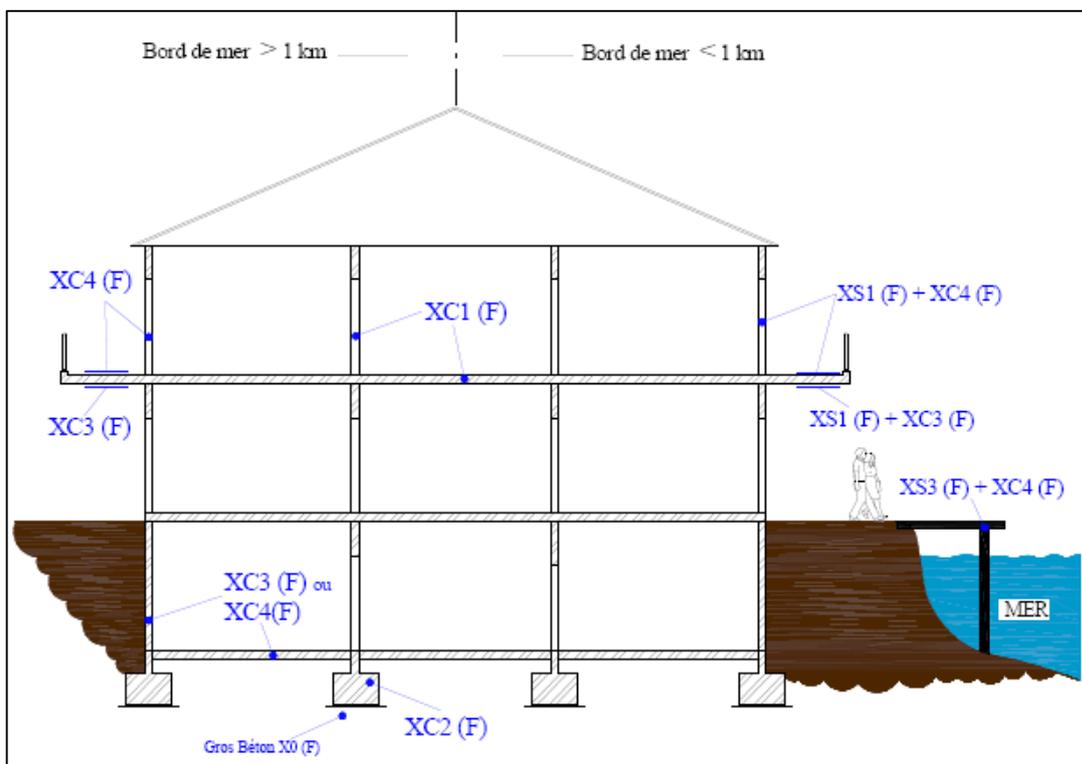


Figure 13: Quelques classifications sur le lieu d'utilisation du béton

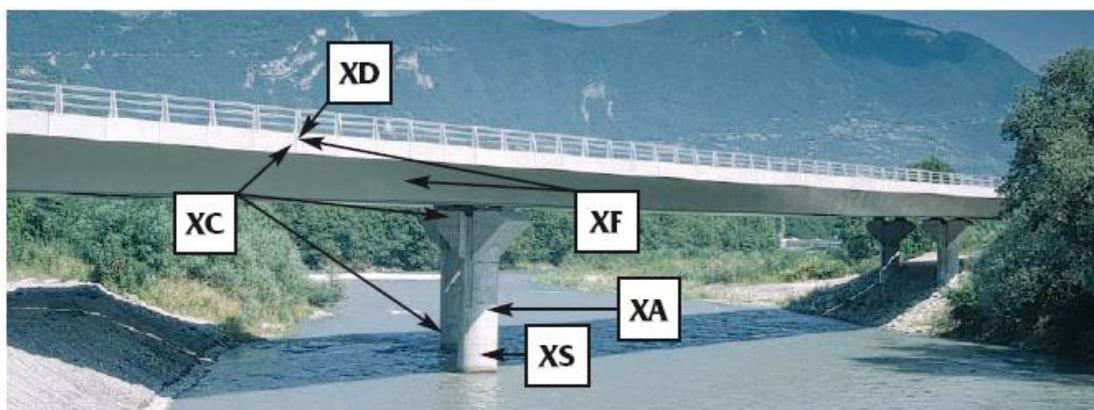


Figure 14: Quelques classifications sur le lieu d'utilisation du béton

Remarque :

Un revêtement assurant une protection du béton peut changer la classe d'exposition. Alors, voici le tableau définissant ces classes d'expositions

Tableau 6: Classes d'expositions

Types d'exposition	Classes	Description de l'environnement
Aucun risque de corrosion ou d'attaque	XO	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaques chimiques.
Corrosion induite par carbonatation	XC1	Sec ou humide en permanence
	XC2	Humide, rarement sec
	XC3	Humidité modérée
	XC4	Alternance d'humidité et de séchage
Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer
	XS2	Immergé en permanence
	XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns
Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine	XD1	Humidité modérée
	XD2	Humide, rarement sec
	XD3	Alternance d'humidité et de séchage
Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage
	XF2	Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage
	XF3	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage
	XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.
Attaques chimiques	XA1	Environnement à faible agressivité chimique,
	XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique

Le choix des classes d'exposition dépend des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé. Cette classification des expositions n'exclut pas la prise en compte des conditions particulières existant là où le béton est utilisé, ni l'application de mesures de protection telles que l'utilisation d'acier inoxydable ou de tout autre métal résistant à la corrosion, ni l'utilisation de revêtements protecteurs du béton ou des armatures.

Tableau 7: Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
Eaux de surfaces et souterraines				
SO ₄ ²⁻ en mg/l	EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
CO ₂ agressif, en mg/l	prEN 13577:1999	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH ₄ ⁺ , en mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ²⁺ , en mg/l	ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 jusqu'à saturation
Sol				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^{a)} total	EN 196-2 ^{b)}	≥ 2 000 et ≤ 3 000 ^{c)}	> 3 000 ^{c)} et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	N'est pas rencontré dans la pratique	
<p>a) Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10⁻⁵ m/s peuvent être classés dans une classe inférieure. b) La méthode d'essai prescrit l'extraction du SO₄²⁻ à l'acide chlorhydrique ; alternativement il est possible de procéder à cette extraction à l'eau si c'est l'usage sur le lieu d'utilisation du béton. c) La limite doit être ramenée de 3 000 mg/kg à 2 000 mg/kg, en cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton due à l'alternance de périodes sèches et de périodes humides, ou par remontée capillaire.</p>				

I.3. Les constituants des bétons

I.3.1. Les granulats

Généralement, les bétons sont constitués par des granulats, du liant hydraulique comme le ciment, de l'eau et éventuellement d'adjuvant et les additifs. Ces constituants doivent répondre à certaines exigences pour avoir la qualité du béton souhaité et normalisé. Ils ne doivent pas contenir donc des substances nocives (matières organiques, hydrocarbure, gangue argileuse, les chlorures, etc...) qui pourraient diminuer la durabilité du béton ou entraîner la corrosion des armatures.

Les granulats sont des matériaux roulés, concassés obtenus par, criblage, concassage lavage, par transformation thermique et à la fois mécanique, par recyclage des matériaux déjà utilisés ; à partir des matériaux alluvionnaire ou à partir des roches éruptives, sédimentaires et métamorphiques. Donc, ils sont d'origine naturelle et artificielle. Ils forment le squelette du béton dont la dimension de ses grains varie de 0 à 125mm selon la norme XP P 18-540.

Les granulats convenables à la formulation et à la fabrication des bétons hydrauliques doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine ; comme mentionnée dans les normes XP P 18-540 et NF EN 12620.

Ces granulats se caractérisent donc par les comportements géométriques (classe granulaire, Granularité, formes des gravillons, qualité et teneur en fine), physiques (résistance à la fragmentation, résistance à l'usure, masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau, masse volumique en vrac durabilité) et chimiques (ions chlorures, composé contenant du soufre, constituants réduisant le temps de prise et la résistance).

I.3.2. Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits ayant la propriété de durcir au contact de l'eau et qui après durcissement conservent leur résistance et leur stabilité même sous l'eau. Ce sont des matériaux qui font l'objet de fabrications industrielles et de contrôles garantissant leur conformité sur normes. Les ciments sont parmi ces liants et la norme de référence de ce produit est la norme Européenne EN 197-1 publiée par AFNOR (Association Française de Normalisation). Il est fabriqué à partir de calcaire, de l'argile, des cendres volcaniques, du Gypse et d'autres additifs par traitement thermique. Il est utilisé selon le type et la nature d'ouvrage ; selon la condition climatique (bétonnage en temps chaud, en temps froid) et l'environnement du milieu (milieux agressifs).

Sur le plan chimique, le ciment est constitué de silicates et aluminates de calcium dont les deux principaux oxydes sont la chaux (CaO) et la silice (SiO₂). Tels quels, ces oxydes n'ont aucune propriété hydraulique, c'est à dire qu'ils n'ont pas d'aptitude à durcir en présence d'eau. C'est le traitement thermique qui, d'une part provoque la décarbonatation du carbonate de calcium à 900 °C, et d'autre part permet aux oxydes de se combiner entre eux dans le clinker à 1 450 °C pour former de nouveaux composants qui eux, seront hydrauliques (silicates).

I.4. Notions sur les éventuels défauts des bétons

Les défauts sur les bétons sont multiples mais nous ne prendrions que quelques exemples courants.

I.4.1. Le gonflement dû au sulfate

Les sulfates contenus dans certaines eaux (par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses) peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. L'alumine tricalcique du ciment et la sulfate de calcium dans l'eau se combinent pour donner un tri- sulfate « étringite » hydraté qui constitue un sel gonflant par suite de fixation d'un

grand nombre de molécule d'eau. L'augmentation de volume du béton s'accompagne alors, de fissures, écaillage, désintégration.

I.4.2. Phénomène de fissuration

Le phénomène de retrait étire le béton de telle façon que l'allongement résultant compense le raccordement imposé par le retrait, si l'élément était libre de se déformer. Le retrait et la tension interne augmentent avec le temps. Si cette tension dépasse la limite de rupture du béton, la fissuration se produit.

D'autre phénomène causant ce défaut c'est la réaction alcalis-granulats. Dans ce cas, certains constituants amorphes et mal cristallisés de la silice (SiO_2) des granulats sont sensibles aux alcalis et peuvent en présence d'humidité réagir avec hydroxyde alcalin provenant du ciment (NaOH , Ca(OH)^2), il se forme des silicates alcalins hydratés plus volumineux entraînant la déségrégation du béton en présence d'humidité, qui se traduit par des fissurations.

I.4.3. Défaut dû à la Carbonatation

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. La combinaison de l'hydrate de chaux (contenu dans le ciment) et de l'acide carbonique de l'air forme du calcaire en libérant de l'eau, le pH du béton baisse et la corrosion des aciers commence. A partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton, il n'y a plus d'échange gazeux grâce aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment. Le pH reste stable et la corrosion ne se manifeste pas. Compte tenu de l'absence d'échanges gazeux, les bétons immergés ne carbonatent pas. Il est à remarquer que des manifestations de carbonatation peuvent survenir sur des faces intérieures de béton lors de climatisation et d'humidification de l'air ambiant.

La carbonatation se manifeste donc sous trois formes :

- 1) Formation d'une peau sous l'effet de l'atmosphère ambiante (égout, ambiance chargée en CO_2 ,...) sur éléments porteurs, ceintures...
- 2) Apparition de traces blanches (voir efflorescence) sur une surface diffuse.
- 3) Apparition de traces blanches et coulures localisées.

Tous ces défauts ont pour conséquence d'altérer les propriétés mécaniques du béton. Ils sont donc principalement d'origines chimiques, physiques, ou thermiques.

I.5. Validation d'une formulation du béton

La validation d'une formule de béton s'effectue par les essais :

- d'études,
- de convenances
- et de contrôles.

Les essais d'études se basent surtout sur la formulation théorique et sur la vérification des dosages déterminés en laboratoire. Mais les essais de convenances s'effectuent au moyen du chantier d'application pour obtenir les vraies formules bien adaptés.

Les essais de contrôles sont suivis de la vérification de la performance qui s'effectue par les essais de résistances mécaniques des éprouvettes cylindriques en respectant les relations suivantes :

$$f_{cm} \geq f_{c28} - 4 \text{ et}$$

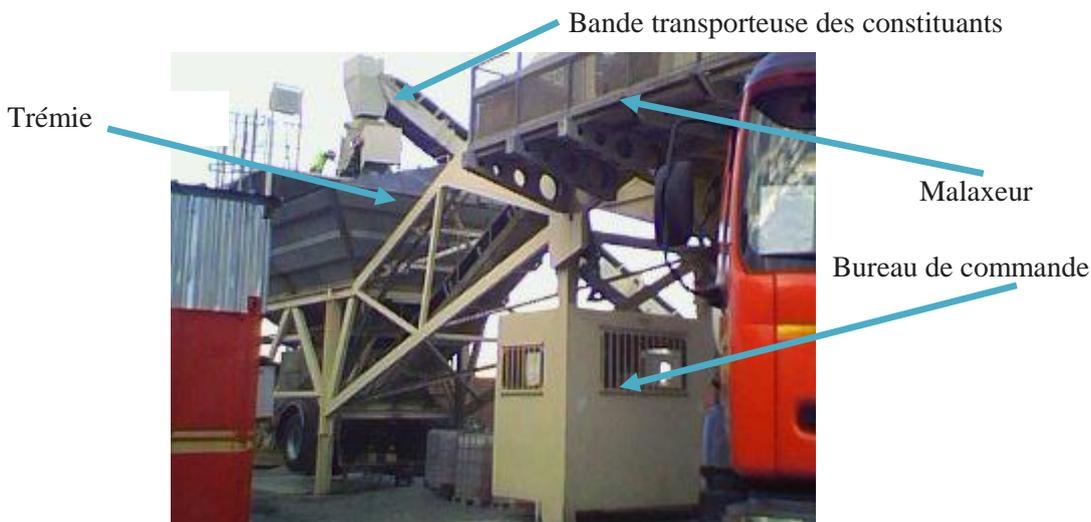
$$f_{mini} \geq f_{c28} + 4$$

Avec f_{cm} : résistance moyenne obtenue à 28j

f_{mini} : résistance minimale obtenue à 28j

I.6. Fabrication

Les méthodes de fabrication sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de Béton Prêt à l'Emploi (BPE), dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.



I.6.1. Approvisionnement et stockage des constituants

Le choix des constituants qui vont être utilisés pour réaliser un béton déterminé repose sur deux exigences principales : l'une, d'ordre technique, dépend des caractéristiques visées (résistance, granulométrie, coloration, etc.) ; l'autre, d'ordre économique, tient compte en particulier de la proximité des fournisseurs par rapport au chantier, des coûts compétitifs. Approvisionnés par route, rail ou voie d'eau, les constituants du béton doivent faire l'objet d'un stockage compatible avec les besoins du chantier, en évitant aussi bien les ruptures de stock que les sur stockages. Les constituants utilisés doivent toujours être de qualité et conformes aux normes en vigueur.

I.6.2. Dosage des constituants

Les constituants sont dosés selon l'étude de convenance des formules de composition trouvées théoriquement. Selon la norme NF EN-206 ; lors de la fabrication, une différence de $\pm 5\%$ par rapport aux formules convenus est acceptable.

I.6.3. Malaxage des constituants

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant.

I.6.4. Transport

Après avoir mélangé les constituants, on obtient du béton frais qui serait transporté vers le lieu de coulage avec du camion toupie ou l'aide d'une pompe à béton pour maintenir l'homogénéité pendant le transport.

Camion toupie



Figure 17: Chargement du béton frais au camion toupie

Pompe à béton



Figure 16: Pompage du béton

I.7. Contrôles

Les contrôles des bétons permettent de vérifier la régularité de la fabrication et de contrôler si les caractéristiques prescrites sont bien atteintes.

Ils concernent :

Le contrôle des matériaux, l'optimisation de la formulation en vérifiant la teneur en eau de ces matériaux avant la production et le contrôle de la production par les essais de consistances du béton frais et de la résistance en compression du béton durci.

- **Contrôle de la teneur en eau des matériaux**

Ce contrôle s'effectue au niveau des granulats (sables, gravillons) à utiliser.

- **Essais de contrôle à la livraison**

Ces essais ont pour but de contrôler la conformité du béton d'un lot aux définitions, aux spécifications et aux prescriptions complémentaires éventuelles du béton concerné. Ils sont exécutés à l'initiative de l'utilisateur et sont contradictoires, le producteur étant tenu informé de tout contrôle pour qu'il puisse assister, s'il le désire, aux prélèvements, aux essais sur béton frais et à la confection d'éprouvettes, qui sont effectués par un personnel qualifié, conformément aux normes en vigueur.

CHAPITRE II. METHODOLOGIE

II.1. CRITERES DE SELECTION DES CONSTITUANTS DE BETONS

II.1.1 Granulat

Rappelons que les granulats sont les principaux composants du béton, ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Les grandes familles de granulats et leurs caractéristiques géométriques sont affichées dans le tableau 8 suivant.

Tableau 8: Familles des granulats et leurs caractéristiques

<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
<i>Fillers</i>	O/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	O/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
<i>Graves</i>	O/D	D ≥ 6,3 mm
<i>Gravillons</i>	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
<i>Ballasts</i>	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Le granulat est désigné par le couple **d/D** et les intervalles **d/D** et **O/D** sont appelés classes granulaires avec :

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

II.1.1.1. Spécification

Les granulats sont spécifiés par deux types de caractéristiques :

➤ Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement. Quelques exemples de ces caractéristiques sont présentés dans le tableau qui suit.

Tableau 9: Caractéristiques intrinsèques

Caractéristiques intrinsèques	Catégories usuelles	Définition et Principes
Masse volumique réelle NF EN 1097-6 (sable, graves, gravillons)		La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse/volume. La masse se détermine en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.
Absorption d'eau NF EN 1097-6 (sable, graves, gravillons)	V _{ss 2.5} V _{ss 5} V _{ss 6}	Capacité des granulats à absorber de l'eau, donc c'est le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de ce même échantillon.
Teneur en élément coquillier des gravillons NF EN933-7	≤10 ou SC ₁₀ >10 ou SC _{Déclaré}	L'essai consiste à trier manuellement les coquilles et les fragments de coquilles sur une prise d'essai de gravillons et cailloux. La teneur en éléments coquilliers est déterminée comme étant le rapport de la masse de coquilles et de fragments de coquilles sur la masse de l'ensemble de la prise d'essai. La teneur en éléments coquilliers, SC, s'exprime en pourcentage.
Résistance à la fragmentation des gravillons (LA) NF EN1097-2	LA ₂₀ --LA ₂₅ LA ₃₀ – LA ₄₀ – LA ₅₀	L'essai est réalisé sur un échantillon de « M1= 5000+ 2g » et d'une granulométrie comprise entre 4 mm et 25 mm. Après lavage et passage à l'étuve l'échantillon est introduit dans l'appareil Los- Angeles avec les 11 boulets normalisés. Après 500 rotations, l'échantillon est lavé puis tamiser (tamis 1.6 mm) et peser à nouveau, soit « M2 ».
Résistance à l'usure des Gravillons par l'essai Micro-Deval (M.D.E.) NF EN 1097-1	MDE ₁₅ MDE ₂₀ MDE ₂₅	L'essai détermine le coefficient micro-Deval qui est le pourcentage de l'échantillon d'origine réduit à une dimension inférieure à 1,6 mm par rotation dans un cylindre. L'essai consiste à mesurer l'usure produite dans des conditions définies par frottements réciproques des granulats dans un cylindre en rotation avec une charge abrasive. Lorsque la rotation est achevée, on calcule le coefficient micro-Deval à partir du pourcentage de granulats retenu sur un tamis de 1,6 mm.

➤ Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier : la granularité, la forme, la propreté des sables...

Tableau 10: Caractéristiques de fabrication

Caractéristiques intrinsèques	Catégories usuelles	Définition et Principes
La granularité NF EN 933-1	Pour les Gravillons : $G_C 80/20$ - $G_C 90/15$ $G_{T 17.5}$, $G_{T 15}$ Pour les sables : $G_A 85$ Pour les graves : $G_A 90$ et $G_A 85$ si $d > 4\text{mm}$	Distribution des dimensions de grains par l'analyse granulométrique. L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise. Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi du tamisage à sec. Lorsque le lavage peut altérer les caractéristiques physiques d'un granulat léger, il faut utiliser le tamisage à sec. Les masses de grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages cumulés passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme numérique et si nécessaire sous forme graphique.
La forme des gravillons (aplatissement) NF EN 933-3	$A \leq 15$ ou Fl_{15} $A \leq 20$ ou Fl_{20} $A \leq 35$ ou Fl_{35} $A \leq 50$ ou Fl_{50} $A > 50$ ou $Fl_{\text{Déclaré}}$	L'essai consiste à effectuer un double tamisage. Tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d_i/D_i . Chacun des granulats élémentaires d_i / D_i est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement $D_i/2$. Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grilles à fentes, exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai. Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulat élémentaire d_i/D_i correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondante, exprimé en pourcentage de la masse de ce granulat élémentaire.
la propreté des sables NF EN 933-8		Verser une prise d'essai de sable et une petite quantité de solution floculante dans un cylindre gradué et agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de la prise d'essai. «Irriguer» alors le sable en utilisant le reste de solution floculante afin de faire remonter les particules de fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 mn de repos, on mesure au mm la hauteur du niveau supérieur du floculat et celle de la partie sédimentée en se repérant sur la base d'un piston taré déposé à sa surface. L'équivalent de sable est le rapport de ces deux hauteurs en pourcentage.
Module de finesse (MF) en %	CF : 2.4 à 4, sable à gros grains MF : 1.5 à 2.8, sable à grains moyen FF : 0.6 à 2.1, sable à grains fins	Le module de finesse est défini comme la somme des pourcentages cumulés des refus en masse sur la série de tamis (4 - 2 - 1 - 0,5 - 0,25 et 0,125 mm ou 5 - 2.5 - 1.25 - 0.63 - 0.315 - 0.16).

Remarque sur la nature et la qualité du sable

La durabilité d'un béton dépend de la propreté du sable à utiliser. Le tableau suivant nous renseigne la nature et la qualité du sable.

Tableau 11: Nature et la qualité du sable

PS	Nature et qualité du sable
ES < 60	<i>Sable argileux</i> : risque de retrait ou de gonflement. A rejeter pour des bétons de qualité.
60 ≤ ES < 70	<i>Sable légèrement argileux</i> de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
70 ≤ ES < 80	<i>Sable propre</i> à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour bétons de haute qualité.
80 ≤ ES	<i>Sable très propre</i> : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.1.1.2. Choix des granulats

Le tableau suivant donne une idée au choix des granulats selon la fonction du béton.

Tableau 12: Choix des granulats

Nature des bétons ou de l'ouvrage		Nature des granulats	Masse volumique des bétons
Bétons classiques pour chantier ou usine de préfabrication		Tous granulats roulés ou concassés avec préférence pour les siliceux, les calcaires ou les silico-calcaires	2 200 à 2 400 kg/m ³
Bétons apparents, architectoniques		Les mêmes mais aussi les porphyres, basaltes, granites, diorites, qui offrent une palette très riche d'aspects et de teintes	2 200 à 2 400 kg/m ³
Usages routiers		Toutes origines roulés ou concassés	2 200 à 2 300 kg/m ³
Bétons légers	pour structure	Argile ou schiste expansé, laitier expansé	1 500 à 1 800 kg/m ³
	semi-isolant semi-porteur	Argile expansée, pouzzolane, ponce	1 000 à 1 500 kg/m ³
	isolant	Vermiculite, liège, bois, polystyrène expansé, verre expansé	300 à 800 kg/m ³
Bétons lourds		Corindon, barytine, magnétite	3 000 à 5 000 kg/m ³
Bétons réfractaires		Corindon, déchets de produits réfractaires, granulats spéciaux	2 200 à 2 500 kg/m ³
Bétons ou chapes pour dallages industriels (soumis à une abrasion importante)		Corindon, carborundum, granulats métalliques	2 400 à 3 000 kg/m ³

II.1.1.3. Adéquation granulats béton

Les granulats présentent des caractéristiques très différentes selon leur origine. Ces caractéristiques influant sur celles du béton, il importe de bien les connaître et de veiller au respect des spécifications. Le tableau ci-contre synthétise l'influence que peuvent avoir sur le béton un certain nombre de caractéristiques géométriques et physiques des granulats.

Tableau 13: Adéquation granulats béton

Caractère du granulat	Influence sur les bétons
Nature minéralogique	La plupart des granulats conviennent pour les bétons. Influence défavorable des argiles, des calcaires marneux (gonflement et altération à terme)
Présence des matières organiques	Influence défavorable sur la prise et le durcissement, chute de résistances.
Teneur élevée en sulfates, sulfures, chlorures.	Réaction avec le ciment, fissuration, corrosion des armatures
Propriétés des granulats	Critères importants. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence granulat/pâte.
Forme des grains, angularité	Généralement peu importante : certains sables concassés peuvent parfois être défavorables à la mise en œuvre du béton et à sa compacité finale.
Granularité	Importance pour la bonne composition du béton

II.1.2. Le ciment

II.1.2.1. Les objectives qualités du ciment

Le ciment doit :

- Avoir une bonne résistance mécanique à 28 jours : ils résistent donc à la compression et à la traction. Le silicate tricalcique (C3S) agit principalement sur les résistances aux jeunes âges : plus le taux sera élevé, plus les résistances aux jeunes âges seront importantes. Par contre le silicate bicalcique (C2S) agit à son tour sur les résistances à long terme.

- Avoir une chaleur d'hydratation convenable au climat de l'endroit de fabrication du béton : le temps froid ralentit les réactions du ciment d'où le temps de prise et de durcissement seront diminués ; l'utilisation d'un adjuvant accélérateur de prise ou d'un ciment à forte chaleur d'hydratation serait envisagé. Par contre, le temps chaud accélère ces phénomènes et nécessite un ciment à faible chaleur d'hydratation ou un adjuvant retardateur de prise. Le composé minéral responsable de cette chaleur d'hydratation est l'Aluminate tricalcique (C₃A).

- Résister aux milieux agressifs : certains milieux sont susceptibles d'entraîner la désagrégation du béton ; comme le cas des ouvrages dans l'eau de mer et dans de l'eau très riche en sulfate. Ainsi, le ciment a une meilleure résistance chimique quand l'indice d'hydraulicité I est élevé. Cette indice se calcul dans l'expression ci-dessous.

$$I = \frac{\text{fraction acide (SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)}{\text{fraction basique (CaO + MgO)}}$$

(G. DREUX et J. FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES mai 1998).

$I > 0,5$ le ciment est dit "Basique" (Portland)

$I < 0,5$ le ciment est dit "neutre" (riche en laitier)

Conventionnellement I#1 le ciment est acide,

Actuellement on préconise les règles suivantes :

$$1.40 < \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} < 1.45$$

$$0.45 < \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 0.50$$

- Avoir un temps de prise bien déterminé pour prévoir le transport du béton frais et le type d'adjuvant à utiliser.

- Être stable : à cause de l'hydratation des oxydes de calcium ou de magnésium dans certains ciments, le béton présente un risque d'expansion. Cette dernière provoque à son tour des désordres importants par dislocation des maçonneries.

II.1.2.2. Types du ciment

Le tableau suivant montre les types du ciment courant et la teneur en clinker correspondante.

Tableau 14: Types du ciment courant

Désignation	Notation	Teneur en clinker (%)
Ciment Portland	CPA-CEM I	95 à 100
Ciment Portland composé*	CPJ-CEM II/A	80 à 94
	CPJ-CEM II/B	65 à 79
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 à 64 et 36 à 65% de laitier de haut-fourneau
	CHF-CEM III/B	20 à 34 et 66 à 80 de laitier de haut-fourneau
	CLK-CEM III/C	5 à 19 et 81 à 95 de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 à 90 et 10 à 35% de pouzzolane dont moins de 10% de cendres siliceuses ou fumées de silice.
	CPZ-CEM IV/B	45 à 64 et 36 à 55% de pouzzolane
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 à 64 avec 18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolane
	CLC-CEM V/B	20 à 39 et 31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus

Remarque :

Les ciments Portland composés concernent 6 ciments contenant un constituant autre que le clinker précisé par un symbole D,L,P,S,T,V (ou W) selon la nature du constituant : fumée de silice, calcaire, pouzzolane, laitier, schistes calcinés ou cendres volantes. Dans ce type de ciment figure également un ciment contenant plusieurs des constituants ci-dessus. Les lettres A, B, C fournissent une information sur la proportion des constituants autre que le clinker.

Les autres types de ciment sont affichés dans le tableau suivant :

Tableau 15: Autres types du ciment

Désignation	Notation	Caractéristiques
Ciment Prompt Naturel	CNP	Le ciment prompt naturel, à prise et durcissement rapides, est caractérisé par la présence de silicate de calcium, essentiellement sous forme de silicate bicalcique actif, d'aluminate de calcium riche en alumine et de sulfo-aluminate de calcium qui est une spécificité du produit.
Ciment Alumineux fondu	CA	La composition du ciment alumineux fondu est définie par : <ul style="list-style-type: none"> • La nature des constituants minéralogiques, qui sont principalement : aluminates de calcium : CaO, Al_2O_3 (CA), essentiellement ; silicates et silico-aluminates de calcium : 2CaO, SiO_2 (C2S) ; 2CaO, Al_2O_3, SiO_2 (C₂AS) ; Aluminoferrites de calcium ;
Ciment à maçonner	CM	Il contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment Portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ceux de ce ciment, mais ses résistances sont moins élevées que celles de ce produit.

II.1.2.3. Choix du ciment en fonction de la condition climatique

II.1.2.3.1. En temps froid

Le temps froid ralentit les réactions d'hydratations du ciment d'où une augmentation du temps de prise et de durcissement. En cas de non utilisation d'adjuvant accélérateur de prise, il est nécessaire de choisir les ciments suivant :

CPA-CEM I 42.5 R, CPA-CEM I 52.5 et 52.5 R

CPI-CEM II/A 52.5 et 52.5 R

CA, CNP

Ces ciments sont à forte chaleur d'hydratation. Le phénomène du temps de prise s'arrête même lorsque la température du béton est en dessous de 0°C. Un problème de prise serait donc rencontré entre -5°C et +5°C.

II.1.2.3.2. En temps chaud

Dans ce cas, le temps chaud accélère la réaction d'hydratation du ciment d'où une diminution de temps de prise et de durcissement. A titre d'exemple, pour une température de 20°C, on a un temps de prise de 3 heures, à 35°C ce temps sera d'environ moitié. On choisit donc le ciment ayant une faible réaction exothermique, soit en incorporant un adjuvant retardateur.

Les ciments adaptés à cette condition climatique sont :

- CPA-CEM I 42.5 CP1 ou CP2, CPA-CEM I 52.5 et 52.5 R ;
- CPJ-CEM II/A ou B 32.5 et 42.5 ;
- CHF-CEM III/A ou B 32.5 ou 42.5

En climat tropicale, il est avantageux d'utiliser les ciments suivants s'ils sont disponibles :

- CPJ-CEM II/A et B 32.5 UT ;
- CPZ-CEM IV/B 22.5 UT;

Une précaution serait prise dès que la température ambiante atteint 25°C.

II.1.2.4. Choix du ciment en fonction de l'agressivité de l'environnement

La prise en compte des environnements climatiques (secs, humides) et des environnements agressifs (marins ou chimiques) permet d'obtenir des bétons adaptés à l'ouvrage et donc d'accroître sa durabilité.

II.1.2.4.1. Les ciments résistants aux eaux à haute teneur en sulfate (ES)

Les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates présentent des teneurs limitées en aluminates tricalciques (C3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

Ces ciments sont des produits dont les caractéristiques sont complémentaires de celles des CPA-CEM I, CPJ-CEM II, CHF-CEM III, CLK-CEM III/C, CLC-CEM V, des ciments aluminés fondus (CA), ayant présenté un bon comportement, soit lors d'essais de longue durée, soit en ouvrages dans le milieu considéré. Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 16: Ciments résistants aux eaux à haute teneur en sulfate

Agressivité	Teneur en mg/l SO ₄ (sulfate)	Choix des ciments
Agressivité nulle	0-150	Tout ciment
Faible agressivité	150- 1000	Ciments prise mer
Forte agressivité	1000-2000	Ciments pour travaux à haute teneur en sulfates (ciments riche en laitier)*
Très forte agressivité	> 2000	

*Les ciments riches en laitiers :

CHF -CEM III / B

CLK -CEM III / C

Il est possible d'utiliser également des CPA / CEM I et CPJ CEM II, à condition que :

$$C3A \leq 5 \%$$

$$2 C3A + C4AF \leq 20 \%$$

$$SO_3 < 2,3 \%$$

$$MgO < 4,0 \%$$

Ces ciments sont dénommés ES.

II.1.2.4.2. Les ciments résistants à l'eau de mer (PM)

Ces ciments présentent aussi des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C3A) qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement. Les ciments pour travaux à la mer sont des produits CPA-CEM I, CPJ-CEM II, CHF-CEM III, CLK-CEM III/C, CLC-CEM V possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires ; ce sont aussi des ciments prompts naturels (CNP) et des ciments alumineux fondus (CA). En règle générale, les ciments CPA / CEM I et CPJ / CEM II doivent répondre simultanément aux deux conditions suivantes:

$$\% C3A \leq 10 \%$$

$$\% (C3A + 0,27 C3S) \leq 23,5 \text{ (formule de Sadran)}$$

Limitation également du SO₃, MgO.

Ces ciments sont dénommés PM.

On retrouve également des ciments PM ES qui remplissent les deux conditions.

Ainsi, pour le choix du ciment, il faut mettre en considération :

- ✓ l'exécution de l'ouvrage ;
- ✓ l'utilisation finale du béton ;
- ✓ les conditions de cure (par exemple chauffage) ;
- ✓ les dimensions de la structure (développement de chaleur) ;
- ✓ les agressions environnementales auxquelles la structure est exposée ;
- ✓ la réactivité potentielle des granulats aux alcalins des constituants.

Quelques spécification du ciment sont affichés dans les tableaux 17 et 18

Tableau 17: Spécifications mécaniques et physiques

Classe	Résistance à la compression (N/mm ²)				Retrait des CPA-CEM I CPJ-CEM II	Temps de début de prise	Stabilité
	Résistance au jeune âge		Résistance normale				
	2 jours	7 jours	28 jours		28 jours (µm/m)	(min)	(mm)
	Li	Li	Li	Ls			
32,5	—	—	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5 R	≥ 13,5	—					
42,5	≥ 12,5	—	≥ 42,5	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60	
42,5 R	≥ 20	—					
52,5	≥ 20	—	≥ 52,5	—	—		
52,5 R	≥ 30	—					

Tableau 18: Spécifications chimiques

1	2	3	4	5
Propriété	Essai de référence	Type de ciment	Classe de résistance	Exigence (%) ¹⁾
Perte au feu	NF EN 196-2	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤ 5,0
Oxyde de magnésium (MgO)	NF EN 196-2	CPA-CEM I	toutes classes	≤ 5,0
Résidu insoluble	NF EN 196-2	CPA-CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	toutes classes	≤ 5,0
Sulfates (SO ₃)	NF EN 196-2	CPA-CEM I CPJ-CEM II ²⁾	32,5 32,5 R 42,5	≤ 3,5
Limite supérieure			CPZ-CEM IV CLC-CEM V	42,5 R 52,5 52,5 R
		CHF-CEM III ³⁾	toutes classes	
Chlorures	NF EN 196-21	tous types ⁴⁾	toutes classes sauf 52,5R	≤ 0,10
			52,5R	≤ 0,05
Pozzolanicité	NF EN 196-5	CPZ-CEM IV	toutes classes	satisfait à l'essai

1) Les exigences sont données en pourcentage en masse.
2) Cette indication couvre tous les types de ciments CPJ-CEM II/A et CPJ-CEM II/B, à l'exception des ciments ne contenant que des schistes calcinés (T) comme constituant principal autre que le clinker pour lesquels la limite supérieure est 4,5 % de SO₃ pour toutes les classes de résistance.
3) Le type CLK-CEM III/C peut contenir un maximum de 4,5 % de SO₃.
4) Les ciments de type CHF-CEM III/A et B et CLK-CEM III/C peuvent contenir plus de 0,10 % de chlorures mais, dans ce cas, la teneur réelle en chlorures doit être déclarée.

II.1.3. Adjuvant : Types, objectif qualité, normes, spécification

II.1.3.1. Définitions

L'adjuvant pour bétons est un produit incorporé au moment du malaxage du béton ; dont sa teneur est liée à la masse du ciment utilisé, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci. Il peut donc présenter une ou plusieurs fonctions secondaires selon le type.

II.1.3.2. Types d'adjuvants

Tableau 19: Types d'adjuvants suivant la norme NF EN 934-2 et de leur appellation abrégée

Type d'adjuvant suivant la norme NF EN 934-2	Code abrégé pour le type d'adjuvant pour la mention sur le BL
Plastifiant / réducteur d'eau	PRE
Super plastifiant / haut réducteur d'eau	SPHRE
Rétenteur d'eau	RETE
Entraîneur d'air	EA
Accélérateur de prise	AP
Accélérateur de durcissement	AD
Retardateur de prise	RP
Hydrofuge de masse	HM
Plastifiant /réducteur d'eau/ retardateur de prise	PRERP
Super plastifiant / haut réducteur d'eau / retardateur de prise	SPHRERP
Plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise	PREAP

II.1.3.3. Objectif qualité

La qualité d'adjuvant doit être plus ou moins similaire à celle marquée par le fabricant, à savoir : l'homogénéité, la couleur, le composant actif, la densité relative, l'extrait sec conventionnel, la valeur du pH, la teneur en chlore total, la teneur en alcalins,...

Lorsque plusieurs adjuvants sont utilisés, leur compatibilité doit être vérifiée lors des essais initiaux.

L'adjuvant ne doit pas contenir des éléments nocifs. A titre d'exemple il ne doit pas favoriser la corrosion de l'acier enrobé dans du béton. Il permet de faciliter la mise en œuvre et de modifier la propriété du béton voulu. Il faut faire attention à la date de péremption pour éviter le phénomène de retard de prise et reprise de bétonnage.

II.1.3.4. Spécification

Les spécifications de l'adjuvant selon la norme NF EN 934-2 sont affichées dans le tableau suivant.

Tableau 20: Spécification selon la norme NF EN 934-2

Propriété	Méthode d'essai	Prescriptions et spécification
Homogénéité	Examen visuel	Homogène au moment de l'utilisation. Une ségrégation éventuelle ne doit pas dépasser les limites fixées par le fabricant.
Couleur	Examen visuel	Uniforme et similaire à la description fournie par le fabricant.
Composant actif	EN 480-6	Le spectre infrarouge ne doit pas présenter de variation en ce qui concerne le composant actif par rapport au spectre de référence fourni par le fabricant.
Densité relative	ISO 758	<ul style="list-style-type: none"> • $D \pm 0,03$, si $D > 1,10$ • $D \pm 0,02$, si $D \leq 1,10$ où D correspond à la valeur indiquée par le fabricant.
Extrait sec conventionnel	EN 480-81	<ul style="list-style-type: none"> • $0,95 T \leq X < 1,05 T$, pour $T \geq 20\%$ • $0,90 T \leq X < 1,10 T$, pour $T < 20\%$ T correspond à la valeur fixée par le fabricant en % en masse ; X est le résultat de l'essai en % en masse.
Valeur du pH	ISO 4316	<ul style="list-style-type: none"> • Valeur indiquée par le fabricant ± 1, ou • à l'intérieur des limites indiquées par le fabricant.
Teneur en chlore total 2)	ISO 1158	<ul style="list-style-type: none"> • $\leq 0,10$ % en masse, ou • inférieure ou égale à la valeur indiquée par le fabricant. Teneur en chlorure soluble dans l'eau (Cl-) EN 480-10 <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 0,10$ % en masse, ou • inférieure ou égale à la valeur indiquée par le fabricant.
Teneur en alcalins (Na ₂ O équivalent)	EN 480-12	Inférieure ou égale à la limite supérieure indiquée par le fabricant.

Note :

- 1) Si la méthode décrite dans l'EN 480-8 ne convient pas, le fabricant doit recommander une autre méthode d'essai.
- 2) S'il n'y a pas de différence significative entre la teneur en chlore total et la teneur en chlorure soluble dans l'eau, il est permis de déterminer seulement cette dernière lors des essais ultérieurs sur l'adjuvant concerné.

II.1.4. Eau : Types, objectif qualité, normes, spécification

II.1.4.1. Définition

L'eau de gâchage est une eau utilisée lors de la confection d'un béton. Elle sert à hydrater le ciment et fluidifier la pâte. Ainsi pour la formulation du béton, il convient donc d'y apporter une attention particulière surtout lors de l'emploi d'eau de rejet ou de lavage. La raison c'est que, la qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci.

II.1.4.2. Types d'eaux

En général, l'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine. Les types suivants peuvent être distingués :

- **Eau potable** : Cette eau est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai.
- **Eau récupérée de la fabrication de bétons** : Cette eau est normalement appropriée pour la fabrication du béton, mais doit satisfaire certaines exigences.
- **Eaux d'origine souterraine** : Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais.
- **Eaux naturelles de surface et eaux de rejet industrielles** : Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais.
- **Eau de mer et eaux saumâtres** : Ces eaux peuvent être utilisées pour la production de béton non armé, mais ne conviennent pas en général à la production de béton armé ou précontraint. Pour le béton contenant des armatures en acier ou des inserts, la teneur totale permise en chlorure est le facteur déterminant.
- **Eaux usées** : Ces eaux ne conviennent pas pour la fabrication du béton.

II.1.4.3. Objectif qualité

- L'eau potable du réseau publique est favorable
- Les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats, les armatures, ni particules en suspension.
- Limitation de la concentration des certains éléments chimiques (Chlorures, sulfates, alcalins, sucres, phosphates, nitrates, plombs, zinc) en cas de doute sur l'origine de l'eau.
- Les résultats d'essais du début de prise et de la fin de prise ne devant pas excéder $\pm 25\%$ par rapport au béton gâché avec de l'eau distillée.
- De même pour la résistance mécanique sur mortier ou béton à 7 jours devrait $\geq 90\%$ à celle obtenue avec l'eau normale (potable, distillée).
- $\text{pH} \geq 4$

II.4.4. Spécification

L'eau de gâchage devrait respecter les spécifications mentionnées dans la norme NF EN 1008 comme présentée dans le tableau suivant :

Tableau 21: Spécification de l'eau de gâchage

Constituants	Concentration maximale des constituants (mg/l)		
	Béton précontraint ou coulis	Béton armé ou avec insert	Béton non armé ou sans insert
Chlorures (Cl^-)	500	1000	4500
Sulfates (SO_4^{2-})	2000	2000	2000
Alcalins (en équivalence de Na_2O)	1500	1500	1500
Sucres	100	100	100
Phosphates (P_2O_5)	100	100	100
Nitrates (NO_3^-)	500	500	500
Plomb (Pb^{2+})	100	100	100
Zinc (Zn^{2+})	100	100	100

Après avoir identifié, analyser, spécifier les constituants, on assiste à faire une formulation de béton à l'aide des certains méthodes. Ce dernier seront traité dans le chapitre suivant.

II.2. METHODE DE FORMULATION

Le choix et le dosage des différents constituants doivent conférer aux bétons une compacité convenable et leur permettre :

- d'atteindre les niveaux de performances requis, soit au titre des spécifications, soit au titre des conditions particulières résultant notamment des choix relatifs aux conditions de transport et de mise en œuvre
- de respecter les exigences relatives aux parements ;
- de satisfaire aux conditions liées à l'environnement et au type du béton.

II.2.1. Contraintes des normes

Par rapport aux anciens documents réglementaires et normatifs, la nouvelle norme des bétons NF EN 206-1 présente des évolutions. A titre d'exemple, par rapport à la norme XP P 18-305 ; cette nouvelle norme présente une évolution sur :

- Le type de béton : Conservation des notions de béton à la résistance et de béton à la composition.

Béton à Caractères Normalisés (BCN) —————> Béton à Propriété Spécifiée (BPS)

Béton à Caractères Spécifiés (BCS) —————> Béton à Composition Prescrite (BCP)

- Classes d'exposition : 11 classes d'environnement de la norme XP P 18-305
18 classes d'exposition pour la norme NF EN 206-1

Les appellations Non-armé, Armé et précontraint de la XP P 18-305 sont abandonnées car le type d'armatures est implicite dans les classes d'exposition.

- Résistance caractéristique en compression à 28 jours :

Dans la norme XP P 18-305, 10% de résultats en dessous de la résistance caractéristique spécifiée jusqu'à 30 MPa et 5% au-dessus de cette valeur (pour un nombre infini de prélèvements), mais dans celle de NF EN 206-1, la résistance caractéristique définie avec une différence de 5% quelle que soit la résistance.

- Classes de résistance à la compression : Les désignations B25, B30 deviennent C25/30, C30/35 ...dans la nouvelle norme en indiquant respectivement la résistance en compression de l'éprouvette cylindrique et cubique.

- Classes de consistance

A l'essai d'affaissement (cône d'ABRAMS) nous avons :

XP P 18-305 : 4 classes de consistance : F, P, TP, FI

NF EN 206-1 : 5 classes de consistance : S1 à S5

Ainsi, la formulation des bétons de qualités dans ce présent mémoire se base sur la nouvelle norme Européenne NF EN 206-1. Elle apporte aussi des évolutions sur les constituants.

II.2.2. Les paramètres incontournables pour une formulation de bétons

II.2.2.1. La nature de l'ouvrage

Avant toutes formulations, il est nécessaire de bien connaître la nature de l'ouvrage. Cet ouvrage peut être massif, élancé, de faible épaisseur, ferrailé ou non. Il peut être exposé à un environnement agressif qui va modifier sa durabilité et les propriétés désirées.

II.2.2.2. La résistance souhaitée

Pour avancer la formulation, il est nécessaire de connaître la résistance en compression souhaitée à 28 jours (f_{c28}) sur un ouvrage donné. Compte tenu des dispersions et des écarts de cette résistance en compression, il faudra viser une résistance moyenne f_c à 28j. Certes, on pourra adopter la règle approximative pour f_c : $f_c \approx f_{c28} + 15\%$. Il faut noter que f_c est toujours un peu plus élevée que celle demandée (f_{c28}).

C'est à partir de la résistance visée que les différents dosages des constituants du béton vont naître.

II.2.2.3. La consistance désirée

C'est une qualité essentielle du béton qui facilite la mise en œuvre de remplissage parfait du coffrage et du ferrailage. On la définit à partir des classes de consistances S1 à S5 (norme NF EN 206-1) en fonction de l'affaissement A exprimé en mm. Cette consistance est aussi liée aux moyens de serrages.

II.2.2.4. Le dosage minimum en ciment

Le dosage en ciment est aussi parmi les éléments essentiels pour la formulation des bétons. Il est fonction de l'ouvrage et de son environnement, de la dimension maximale D des granulats, du rapport Ciment/Eau (C/E) mais en même temps du dosage en eau nécessaire pour obtenir une plasticité et une ouvrabilité convenables. Ce dosage a donc une influence sur la résistance à la compression visée, à l'ouvrabilité, étanchéité et d'autres caractéristiques données. Un dosage minimal est à prévoir pour de raison économique tout en gardant les caractéristiques désirées.

Selon les classes d'expositions, le dosage minimum (C) en ciment est :

- $C \geq 550/\sqrt[5]{D}$, pour le béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière.

- $C \geq 600/\sqrt[5]{D}$, pour le béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière mais comportant un parement fin.
- $C \geq 550/\sqrt[5]{D}$, pour le béton armé exposé à des conditions agressives sévères ou coulé sous l'eau, ainsi qu'en béton précontraint.

Et le dosage approximatif du ciment est déterminé dans un abaque (**fig.7**) en fonction du C/E et de l'ouvrabilité.

II.2.2.5. Le rapport Eau effectif-Ciment (E/C ou C/E)

Le rapport Eau C/E est un facteur global à prendre en compte intervenant dans la résistance du béton. Cette résistance croît en même temps que le dosage du ciment C, et elle décroît en fonction du dosage en eau E. Le facteur inverse E/C pourrait être aussi adopté lors d'une formulation du béton. Le rapport C/E varie de 1.5 à 2.5 et E/C ne varie que de 0.35 à 0.55. De préférence, le rapport E/C est inférieur à 0.45 et ne dépassant pas 0.57.

L'eau effectif se calcul par la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais au moment du malaxage et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Elle se déduit du coefficient d'absorption des granulats qui est mesuré selon la norme NF EN 1097-6.

II.2.2.6. Le rapport G/S

Le rapport Gravier/Sable correspond au volume absolu ou au rapport des poids de même masse spécifique. Ce rapport a une influence sur l'ouvrabilité, la résistance en compression, compacité, densité et autres :

- Pour $G/S > 2.2$, on a une ouvrabilité moins bonne et une compacité, densité légèrement plus élevée.
- Pour $G/S \geq 2.2$, on aura une meilleure résistance en compression

Mais généralement, on fixe G/S de 1.5 à 1.6 pour un léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité. Dans le cas des conditions de mise en place difficiles, il pourrait être inférieur à 1.5 compte tenu de la présence d'un ferrailage dense et/ou d'un effet de paroi important.

II.2.2.7. Importance des résultats des essais d'identification

Autres éléments incontournables pour une formulation de bétons sont les résultats des essais d'identifications des matériaux constitutifs et les essais d'études et de convenances pour la validation d'une formule de composition des bétons.

La liste de ces essais d'identifications des matériaux est présentée dans les tableaux (22, 23 et 24) suivants.

Tableau 22: Liste des essais d'identifications des granulats

Essais	Normes	Types de granulats
Teneur en eau (étuve, séchage directe)	EN 1097-5	Sables, gravillons
Analyse granulométrique		Sables, gravillons
Module de finesse	EN 12620 annexes B, EN 13139 annexes A	Sable
Coefficient d'aplatissement	EN 933-3	Gravillons
Teneur en fine	EN 933-1	Sables, gravillons
Essai au bleu de méthylène	EN 933-9	Sable
Masse volumique réelle	EN 1097-6	Sables, gravillons
Masse volumique réelle imbibée		Sables, gravillons
Masse volumique apparente	P 18-554/5	Sables, gravillons
Absorption d'eau	EN 1097-6 article 7.8 ou 9	Sables, gravillons
Evaluation des fines – Equivalent de sable	EN 933-8	Sables
Propreté des sables	P 18-597	Gravillons

Tableau 23: Liste des essais d'identifications du ciment

Essais	Normes
Mesure du poids spécifique	
Mesure de la densité apparente	
Détermination du temps de prise et de la stabilité	EN 196-3
Détermination de la finesse – méthode par tamisage	EN 196-6
Détermination de la résistance mécanique	EN 196-1

Tableau 24: Liste des essais d'identifications des Adjuvants

Essais	Norme de référence
Détermination du pH	NF EN 934-2
Extrait sec	
Couleur	

Liste des essais d'identifications de l'eau de gâchage

Les essais d'aptitude comprennent :

- Une inspection visuelle (matières en suspension, débris végétaux, films d'huile, couleur anormale...).
- Une vérification olfactive afin de s'assurer de l'absence des matières organiques en décomposition qui rendraient l'eau malodorante ;

- Des essais de résistance mécanique sur mortier ou béton à 7 jours, les résultats devant être $\geq 90\%$ à ceux obtenus sur témoin gâché avec de l'eau potable;
- Des essais de début et de fin de prise, les résultats ne devant pas excéder $\pm 25\%$ par rapport au témoin ;
- Des analyses chimiques portant sur les teneurs en différents constituants (chlorure, sulfate, alcalins, phosphates, nitrate, plomb, zinc)

Les normes de références de ces essais sont : XP P 18-303 et la nouvelle norme NF EN 1008.

Tableau 25: Liste courante des essais d'études et de convenances d'une formule de composition d'un béton.

Essais	Normes	Etat du béton
Affaissement au cône d'Abrams	NF P18-451	Frais
Résistance à la compression	NF EN 12390-3	Durci
Masse volumique		Frais et durci
Rhéologie*		Frais

La rhéologie c'est la détermination de la durée de transport minimale et maximale du béton frais pour qu'il soit utilisable.

II.2.3. Méthodes de formulation et notions de base

Les méthodes de la formulation des bétons consistent à déterminer le mélange optimal des différents constituants (granulats, ciment, eau, adjuvant...), afin d'obtenir un béton avec les caractéristiques adaptées à l'ouvrage ou à la partie d'ouvrage.

Les méthodes de composition se subdivisent en deux types

- Les méthodes à « granularité continue », si la courbe sur le graphique granulométrique s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment de dimension donc $\approx 6.3\mu\text{m}$ au plus gros grain D des graviers. Toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

Exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et deux graviers 5/10 mm et 10/20 mm.

- Les méthodes à « granularité discontinue », lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'élément intermédiaire

Ex : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50.

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ; Par contre la granularité discontinue conduit à des bétons présentant en général,

des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité ; il semble toutefois que la plus part des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue ; comme le cas de ce présent mémoire.

Pour cela, il existe plusieurs méthodes de calculs permettant de déterminer la composition des bétons, parmi ces méthodes ; il y a celle de **BOLOMEY**, **d'ABRAMS**, de **FAURY** et la méthode **Dreux-Gorisse ...**

II.2.3.1. Méthode de BOLOMEY

Pour avoir une compacité maximum du mélange sec, Bolomey propose une courbe granulométrique de référence, et qui répond à la formule :

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D}$$

(G. DREUX et J. FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES mai 1998)

d : Diamètre passoire.

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

D : Diamètre du plus gros granulat.

A : Varie de 8 à 16, sa valeur est d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Le principe est de construire une composition granulaire à partir des classes de granulats disponibles et dont la courbe granulométrique soit la plus proche que possible de la courbe de référence.

Cette méthode aboutit généralement à une granularité continue.

II.2.3.2. Méthode D'ABRAMS

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global 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 manière que les vides dans ce mélange soient en principe, réduits au minimum ; les modules optimaux pour béton de granulat roulés, déterminés expérimentalement par ABRAMS, sont indiqués dans le tableau en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau 26: Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.

Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale D des granulats						
	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	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

La règle de mélange d'ABRAMS, permet de calculer les pourcentages relatifs des granulats de module de finesse Mf1 et Mf2, choisi pour obtenir un module de finesse Mf choisi pour le mélange.

II.2.3.3. Méthode de FAURY

La courbe de référence proposée par FAURY favorise une loi de granulation de type continue. Il s'inspira d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

Loi fonction de $\sqrt[5]{D}$, FAURY adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$ pour avoir une courbure linéaire, puis adopta un point de brisure pour distinguer les grains fins et moyens des gros. Ce point aura pour abscisse (D/2) et pour ordonnée la valeur Y qui se calcul par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

(G. DREUX et J. FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES mai 1998)

B : Varie entre 1 et 2 selon que le béton est ferme (consistance de 10 à 40mm) ou mou (consistance supérieure à 160mm).

R : Rayon moyen du moule R= surface / périmètre

A : valeurs données par le tableau suivant :

Les valeurs de l'affaissement du béton en fonction des matériaux sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 27: Valeurs de l'affaissement du béton dans la méthode FAURY

	Sables et graviers roulés usuels	sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	Au dessous de 22 (à déterminer)	Au dessous de 24 (à déterminer)	Au dessous de 28 (à déterminer)

II.2.3.4. Méthode Dreux-Gorisse

Cette méthode est la plus pratique permettant de déterminer la composition des bétons. Elle permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Afin d'obtenir la meilleure formule, il sera nécessaire de réaliser des essais d'affaissement et de résistance. A la suite de ces essais il sera éventuellement nécessaire d'effectuer certaines modifications. Il est à rappeler qu'elle combine les autres méthodes citées précédemment.

II.2.3.4.1. Processus de la méthode Dreux-Gorisse

- **Résistance visée**

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance souhaitée.

Ainsi la résistance visée, $f_c = f_{c28} + 15\%$

- **Dosage en ciment**

En fonction de la résistance moyenne souhaitée f_c , on évalue approximativement le rapport C/E en utilisant la formule de Bolomey suivantes :

$$f_c = \sigma_c \cdot G \cdot \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

(G. DREUX et J. FESTA. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES mai 1998)

f_c : Résistance visée à 28 jours (Mpa)

σ_c : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa

C : dosage minimum en ciment (en kg/m³)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³)

G : coefficient granulaire

Les valeurs approximatives du coefficient granulaire G , dans la bonne condition de serrage du béton (par vibration en principe) sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 28: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D		
	Fins ($D < 16\text{mm}$)	Moyens ($25 < D < 40\text{mm}$)	Gros ($D < 63\text{mm}$)
Excellentes	0.55	0.50	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage minimum en ciment C est déterminé préalablement en fonction des classes d'expositions. Ainsi, on pourra obtenir le rapport C/E à l'aide de l'expression suivante :

$$C/E = f_c / (\sigma_c \cdot G) + 0,5$$

Connaissant le rapport C/E , on peut fixer arbitrairement le dosage approximatif du ciment en fonction de ce rapport et de l'ouvrabilité désirée à l'aide de l'abaque suivant :

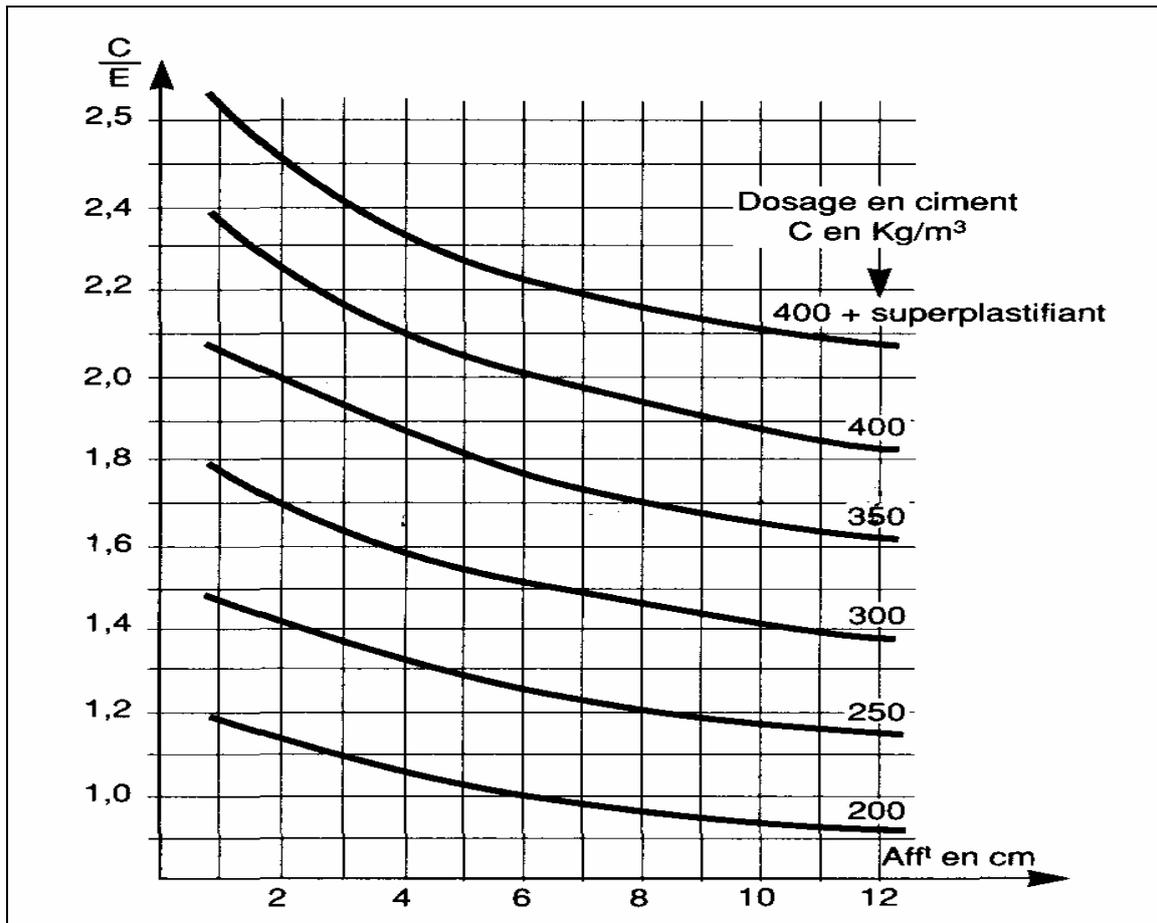


Figure 18: Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement

Commentaire de l'abaque

Il s'agit d'un abaque à double entrée ; l'intersection des deux entrées indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg. Dans le cas contraire la courbe du dosage en ciment est obtenue par extrapolation de celles connues.

Le dosage en ciment est limité à 400 kg/m³ de béton en place pour éviter les fissures de retrait due à la forte concentration du ciment et de l'eau. Cette limite serait gardée même si on trouve une valeur supérieure lors de l'étude de la formulation. Dans ce cas on utilise des fluidifiants pour avoir les qualités désirées.

Autres abaques pour la détermination de la composition de béton

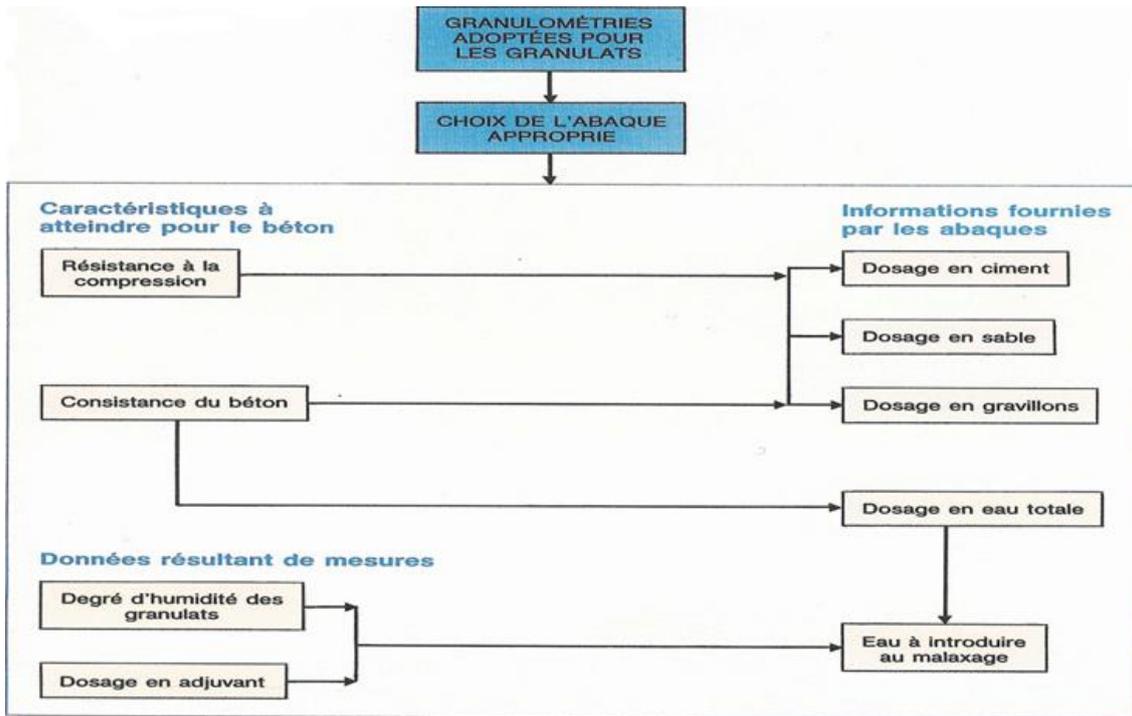


Figure 19: Utilisation des abaques

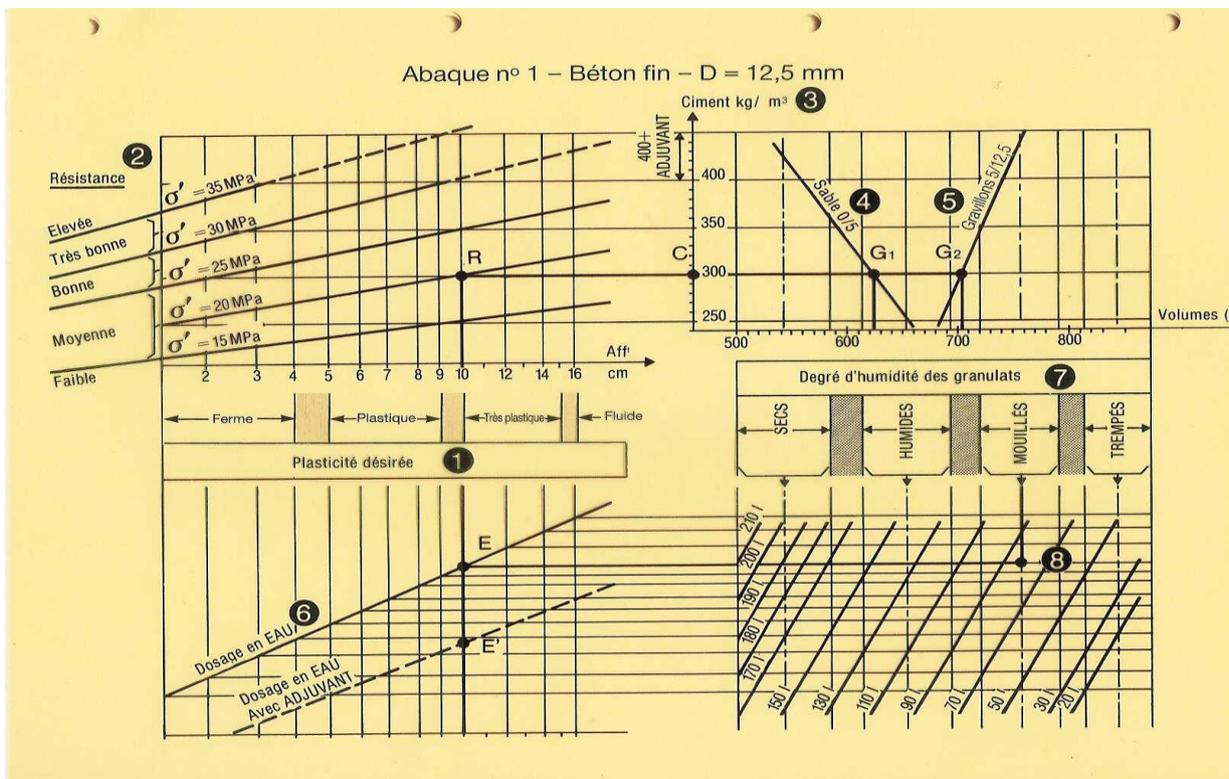


Figure 20: Abaque de détermination de la composition de béton, D = 12.5 mm

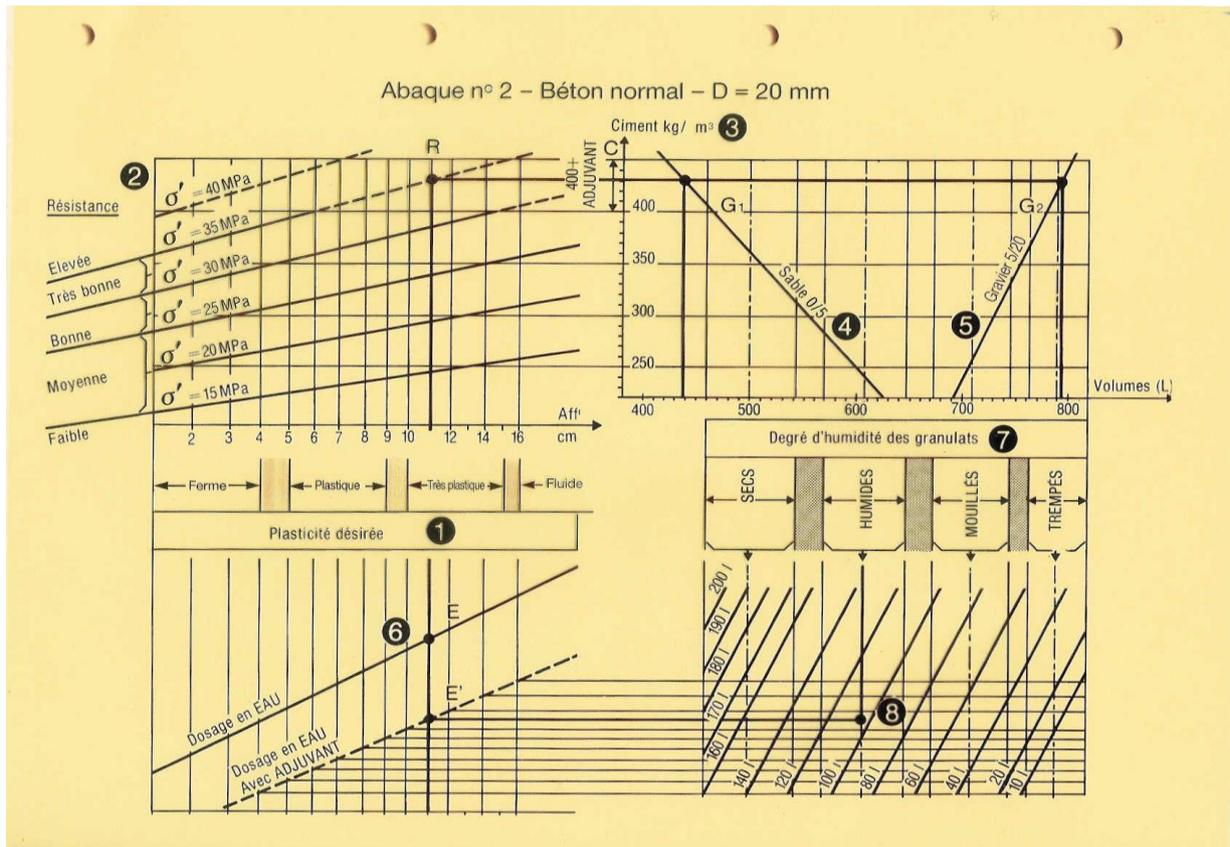


Figure 21: Abaque de détermination de la composition de béton, D = 20 mm

Dosage approximatif en eau

Ayant C et C/E il est facile de connaître approximativement le dosage en eau totale E. En fonction de la dimension maximale D des granulats il sera bon d'appliquer une correction sur le dosage en eau totale, donnée par le tableau suivant :

Tableau 29: Correction du dosage en eau selon le diamètre, D du mélange granulaire

Diamètre en mm	10	12.5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en %	+9	+6	+4	+2	0	- 2	- 4	-6

Commentaire :

L'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange. Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, D=25mm. Pour les autres diamètres D≠25, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre, D.

Dosage des granulats

Après avoir spécifié et déterminé les qualités des granulats, on procède à la quantification des différentes classes granulaires afin d'obtenir une meilleure compacité (le minimum de vide).

Pour ce faire, à partir des courbes d'analyse granulométriques de type AFNOR, on trace une composition granulaire de référence O A B qui peut être schématisé par une droite brisée.

Tracé de la droite de référence (Cf. fig.12)

- O étant le point d'origine fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis, donc O (tamis 0.063 ; 0%)
- Le point B se situe à l'axe des ordonnées à 100% de tamisât et à l'abscisse sur la plus grande taille D. sa coordonnée est donc : extrémité B (tamis D ; 100%).
- A (XA ; YA%) est le point de brisure :
 - $XA = D/2$ si $D \leq 20\text{mm}$
 - $XA = \text{milieu de l'intervalle } [5 ; D]$ si $D > 20\text{mm}$
 - $YA = 50 - \sqrt{D} + K + Ks + Kp$

Avec K : terme correcteur dépendant de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton par une pompe à béton sur la compacité du béton et sa facilité de mise en œuvre.

Tableau 30: Correcteur K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400+f	-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

Ks : correcteur de la granularité du sable en fonction du module de finesse.

Si $Mf \geq 2,15$; alors $Ks = 6 * Mf - 15$

Kp : correcteur du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

$Kp = 0$ si béton non pompable

$5 \leq Kp \leq 10$ si béton pompable.

D : dimension maximale des grains

II.2.3.4.2. Détermination des pourcentages en volumes absolus des granulats par la ligne de partage

Ayant tracé la courbe de mélange optimum OAB, une méthode graphique appelée « la ligne de partage » (Cf.fig.12) permet de déterminer les proportions S% de sable et de G% du gravier nécessaire à obtenir cette courbe.

Pour ce faire, la ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.

a. Dosage en masse des granulats

La masse des granulats correspondant aux proportions du mélange granulaire s'obtient par la connaissance de la compacité γ et de la masse volumique absolue des matériaux. Cette compacité représente le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment, granulat) réellement contenues dans un mètre cube de béton et elle dépend du diamètre D des granulats, de la consistance, des conditions et moyens de vibration mise en œuvre.

Alors, on choisira une valeur approximative de compacité dans le tableau suivant :

Tableau 31: Coefficient de compacité

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

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

- sable roulé et gravier concassé :-0,01
- sable et gravier concassé : -0,03.
- Si $C \geq 350 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_0 = \gamma + \frac{C-350}{5000}$

b. Détermination des volumes absolus des granulats

- Le volume absolu V_G de l'ensemble des granulats est :

$$V_G = 1000\gamma - V_c \text{ (litre), avec}$$

γ : coefficient de compacité

$V_c = C/\rho_c$ (volume absolu du ciment), dont C (en kg) est le dosage choisi et ρ_c (kg/m^3) représente la masse volumique absolue du ciment utilisé.

- Si g_1, g_2, g_3 sont les pourcentages en volume absolu des granulats. Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$V_1 = g_1 V_G$$

$$V_2 = g_2 V_G$$

$$V_3 = g_3 V_G$$

- Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ρ_1, ρ_2, ρ_3 les masses (kg) de chacun d'eux sont :

$$P_1 = V_1 \rho_1$$

$$P_2 = V_2 \rho_2$$

$$P_3 = V_3 \rho_3$$

$$\Sigma (P_1 + P_2 + P_3) = G \text{ (masse totale du granulat sec).}$$

Et la densité théorique du béton frais serait :

$$\Delta_0 = (G + C + E + P_A) / 1000$$

Après avoir obtenu les résultats du calcul on fera les essais d'études en préparant des gâchées d'essais et en confectionnant des éprouvettes afin de vérifier la consistance et la résistance du béton.

II.2.3.4.3. Corrections de la formulation théorique de béton

En fonction des observations, des mesures faites lors de l'essai de gâchage et des résistances mécaniques obtenues, il sera nécessaire d'effectuer des corrections.

a) **Quantité du granulat** : la correction apportée au dosage des granulats dépend de la densité théorique Δ_0 et celle du béton frais Δ (densité réelle).

La correction apportée sur la masse totale des granulats est alors : $X = 1000 (\Delta - \Delta_0)$ (en kg)

Si $\Delta - \Delta_0 < 0$, correction à déduire car la formule proposée fait plus du mètre cube.

Si $\Delta - \Delta_0 > 0$, correction à ajouter car la formule proposée fait moins du mètre cube.

Sur la masse de chacun des granulats, la correction à apporter est :

$\pm X P1/G, \pm X P2/G, \pm X P3/G.$

Soit, $P1_{\text{corrigé}} = P1 \pm X g1$

$P2_{\text{corrigé}} = P2 \pm X g2$

$P3_{\text{corrigé}} = P3 \pm X g3$

a) **Consistance** : Lors de l'essai de gâchage, il est recommandé de ne pas ajouter tout de suite la quantité d'eau totale E prévue. Il est préférable d'ajouter seulement 95 % de E, de mesurer la consistance, puis d'ajouter de l'eau jusqu'à obtention de la consistance prescrite.

b) **Dosage en ciment** : Après les essais d'études, la résistance obtenue pourrait être différent de celle visée lors de la formulation théorique. Alors, il est nécessaire de corriger le dosage en ciment et en eau en déterminant le nouveau rapport C'/E' .

$$C'/E' = f_{c\text{visé}} / f_{c\text{obt}} (C/E - 0.5)$$

En reportant ce rapport dans l'abaque, on obtiendrait le dosage corrigé du ciment (C_{cor}). La différence ΔC de la quantité du ciment est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta C = C_{\text{corrigé}} - C_{\text{obtenu}}$$

S'il faut rajouter (ou enlever) un volume absolu ΔV_c de ciment pour obtenir le dosage désiré, on devra enlever (ou rajouter) un volume absolu équivalent de sable ΔV_s .

$$\Delta V_c = \Delta C / MVR_c, \text{ avec } \Delta V_s = \Delta S / MVR_s \text{ or } \Delta V_c = \Delta V_s$$

Par sécurité, on pourra remplacer la quantité ΔC du ciment enlevé ou augmenté par une masse de sable équivalente ΔS en volume absolu

$$\Delta S = \Delta C * \frac{MVR_s}{MVR_c}$$

c) Résistances mécaniques : Si les résistances mécaniques sont insuffisantes, il faudra avoir recours à l'une ou plusieurs des possibilités suivantes :

- Augmenter le dosage en ciment (au-delà de 400 kg/m³, une augmentation de dosage en ciment n'a plus qu'une très faible influence sur l'accroissement de résistance).
- Diminuer le dosage en eau sans changer la granulométrie.
- Corriger la granulométrie et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un autre type de granulats.
- Utiliser un adjuvant et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un ciment à durcissement plus rapide.

On devra en tous cas toujours veiller à ce que la consistance du béton permette une mise en œuvre correcte.

Remarque

Comme la composition théorique du béton est établie pour des matériaux secs, alors il est nécessaire d'apporter des corrections sur le dosage en eau prévue en tenant compte de la teneur en eau des granulats humides avant la fabrication. Pour donner plus de précision sur la mesure de la teneur en eau, le tableau suivant donne une appréciation du pourcentage d'eau (en poids) des granulats d'une masse spécifique de 2.6 en moyenne selon le degré d'humidité.

Tableau 32: Pourcentage d'eau (en poids) selon le degré d'humidité

Degré d'humidité des granulats		Sec	Humide	Mouillé	Trempé
Pourcentage d'eau	Dans le sable	0% à 3%	4% à 7%	8% à 11%	12% à 15%
	Dans le gravier	1%	3%	5%	6%

a) Correction sur l'eau

Si la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams obtenu (Aff.obtenu) diffère de la valeur de l'affaissement au cône souhaitée (Aff.souhaité) il est nécessaire de modifier la quantité d'eau de la composition de béton. La correction sur la quantité d'eau s'effectue grâce à l'abaque de la figure 23. Cet abaque renseigne la quantité d'eau en fonction de l'affaissement.

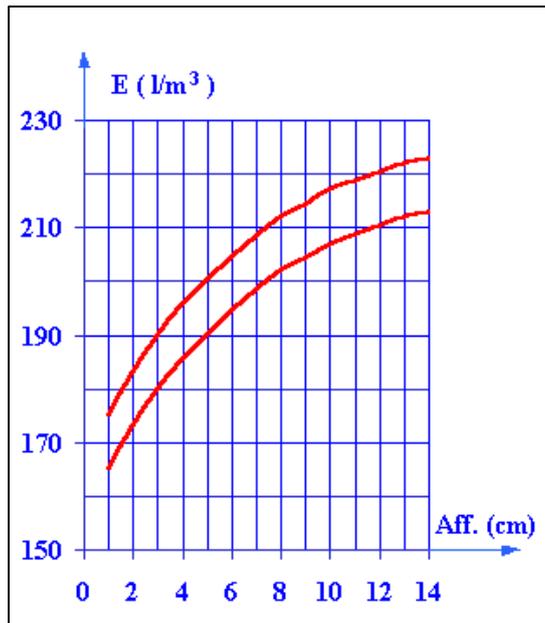


Figure 22 : Variation de la quantité d'eau pour un béton courant.

Détermination de la quantité d'eau E corrigée

Positionner sur le graphe le point caractéristique de la composition effectuée (E utilisée et affaissement au cône obtenu $Aff.obtenu$). Faire passer par ce point une courbe homothétique à celles du diagramme. Pour la valeur de l'affaissement souhaité ($Aff. Souhaité$) en déduire la quantité d'eau à utiliser (E corrigée).

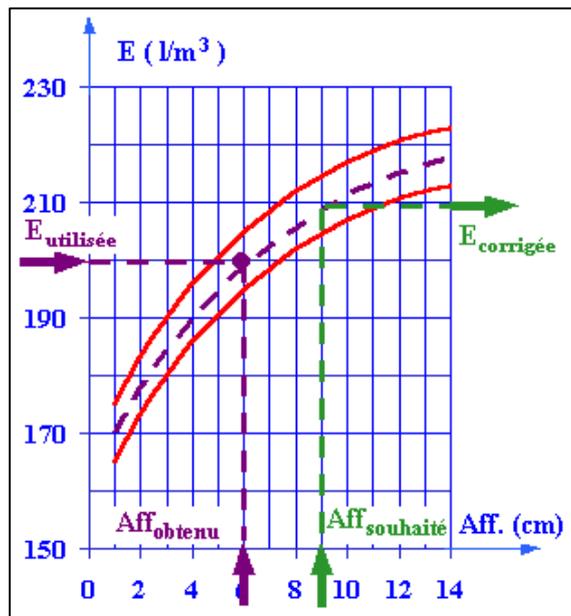


Figure 23 : Détermination de E corrigée

II.2.4. Classe d'exposition et critères de formulation

➤ Critère de formulation

La classe d'exposition impose des valeurs limites pour la composition du béton (classe de résistance, E/C...), mais aussi pour l'enrobage et le calcul d'ouverture des fissures (aciers)...

Tableau 33: Classe d'exposition et critères de formulation

Classes d'exposition																		
	Aucun risque	Carbonatation				Corrosion par les chlorures						Gel/dégel				Environnement avec substance chimique agressive		
						Eau de mer			Autres chlorures									
	XO	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
E/C maxi		0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.55	0.55	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45
Classe de résistance minimale	12/15	20/25	30/37	30/37	35/45	35/45	35/45	35/45	30/37	30/37	35/45	30/37	25/30	30/37	30/37	30/37	30/37	35/45
Teneur minimale en ciment kg/m ³		260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Types de ciment																		
Teneur minimale en air en %													4.4	4.4	4.4			
Autres prescriptions												Granulats résistant aux gel/dégel					Ciments résistant aux sulfates de classe ES	

CHAPITRE III. ETUDES EXPERIMENTALES ET RESULTATS

III.1. EXEMPLE D'APPLICATION

Un exemple d'étude de formulation des bétons hydrauliques prise est celle du béton appliqué aux certains ouvrages (voile et plancher) de la « Tour Orange 786 » Ankorondrano.

Dans la construction du bâtiment, la voile représente les murs en béton armés et la plancher désigne la dalle en langue courante.

Cette formulation procède donc par l'identification des ouvrages, des matériaux, par l'élaboration de la formule théorique à partir d'une méthode de composition et de calcul choisie.

La formule théorique trouvée sera donc appliqué sur chantier selon les matériels existants en faisant des essais de contrôles de la performance mécanique pour valider ladite formule.

III.1.1. Caractérisation des matériaux utilisés

III.1.1.1. Ciment

Le type du ciment utilisé dans cette étude est CPJ CEM I/A 42.5 fabriqué par Holcim. Les analyses concernant la composition chimique et la composition de Bogue minéralogique ont été réalisées au laboratoire de l'usine de fabrication du ciment tandis que celles concernant les caractéristiques physico – mécaniques (cf. Tableau 34) ont été réalisées au sein de laboratoire Colas.

III.1.1.2. Eau de gâchage

Lors des essais d'études en laboratoire, de convenance sur chantier, nous avons utilisé l'eau potable distribuée par le réseau du service public de la JIRAMA dans la ville d'Antananarivo. Cette eau est utilisable sans restriction, elle répond à la norme XP P 18-303 et à la nouvelle norme NF EN 1008.

III.1.1.3. Granulats

Les granulats utilisés sont des granulats concassés provenant de la carrière du Pk13 Iavoloha qui appartient à la société Colas-Madagascar sur la Rn7. Il s'agit d'une carrière de granite migmatitique. Les classes granulaires utilisées sont les classes 0/5, 5/10 et 10/20. Pour

pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers affectent beaucoup sur les caractéristiques du béton, à savoir les propriétés dimensionnelles, physicochimiques et mécaniques. Les résultats d'analyses de ces granulats sont consignés dans les tableaux 35 et 36.

III.1.1.4. Adjuvants

L'adjuvant utilisé est fabriqué en France par la société CHRYSO. C'est un adjuvant Super-plastifiant Haute Réducteur d'Eau (SPHRE) Optima100 jouant aussi le rôle d'un retardateur de prise. Le dosage prévu est à 5L/kg de ciment, et le béton maintient sa consistance pour une durée inférieure à 1h30. Les caractéristiques physico-chimiques de cet adjuvant sont mentionnées dans le tableau 37.

III.1.2. La méthode choisie

La méthode de composition et de calcul choisie est respectivement celle de Dreux-Gorisse et de Bolomey.

Le béton à produire sera donc un Béton à Composition Prescrite dans la Norme FR EN 206-1 (**BCPN**) se trouvant dans un milieu (**XC3**) avec une humidité modérée et qui résiste à la corrosion et aura une résistance en compression à 28j aux environs de 30Mpa ou plus sur une éprouvette cylindrique et 37Mpa sur une éprouvette cubique avec une consistance très plastique à fluide. La classe de résistance de ce béton est donc C30/37. Comme il s'agit d'un béton armé, la teneur maximale en ion chlorure **Cl** est de **0.40%** par rapport au poids du ciment.

III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.2.1. Caractéristiques Physico - Mécaniques du Ciment

Les caractéristiques physico-mécaniques sont dépendants de la formulation de béton. Il est vrai que ces caractéristiques sont déjà mentionnés dans le sac du ciment mais ce ne sont que des valeurs approximatives. Le ciment à utiliser sera donc contrôler avant la formulation pour savoir sa vraie qualité. Le tableau suivant nous donne donc des résultats sur cette analyse.

Tableau 34: Résultat des contrôles qualité Physico - Mécaniques du Ciment

Densité apparente en t/m³		1.018
Poids spécifique en t/m³		3.126
Consistance (%)		Normale
Temps de prise et de la stabilité (EN 196-3)		Début : 2h33mn Fin : 3h55mn
Détermination de la finesse- méthode par tamisage (EN 196-6)		1.1% avec un tamis d'ouverture 90µm
Résistance à la compression σ_c (Mpa)	2 jours	24.1
	7 jours	39.6
	28 jours	55
Résistance en traction (MPa)	2 jours	4.8
	7 jours	6.3
	28 jours	7.4

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Sa classe vraie est donc 55 Mpa.

III.2.2. Résultats des essais géotechniques des granulats

Les tableaux suivant montrent les résultats d'identification des matériaux à utiliser pour avoir une bonne formulation.

Tableau 35: Résultat sur les essais géotechniques des granulats

Caractéristiques des granulats	0/5	5/10	10/20
Teneur en eau par séchage en étuve	0.8%	0.1%	0.1%
Masse volumique réelle	1.69 mg/m ³	2.65 mg/m ³	2.79 mg/m ³
Masse volumique réelle imbibée	2.98 mg/m ³	2.68 mg/m ³	2.80 mg/m ³
Masse volumique Apparente (kg/m ³)	-	1.41 t/m ³	1.40 t/m ³
Equivalent de sable (%)	86%	-	-
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	1.96	-
Coefficient d'aplatissement (%)	-	13.20%	8.00%
Module de finesse	2.6	-	-
Teneur en fines (%)	86.0% (ES)	-	0.30%
Evaluation des fines essais au bleu de méthylène	1.76g	-	-
Absorption d'eau	2.0%	1.0%	1.0%

Commentaire :

La teneur en eau des granulats courants à présent n'est qu'une valeur non exhaustive, car elle varie selon le temps et la nature d'une roche. Dans ce cas, la teneur en eau du sable comprise entre 0% à 3% est supposée comme à l'état sec et celle du gravier (5/10 et 10/20) est aussi à cet état.

La dimension des grains du sable lui permet d'avoir une capacité d'absorption de l'eau plus que le gravier. Cette absorption d'eau est très importante et entre directement dans la composition du béton.

La valeur de l'ES>80% nous indique que le sable est très propre avec une absence presque total de la fine argileuse. Cette valeur peut entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Cette grande absence de la fine argileuse est vérifiée par le module de finesse de 2.6% qui montre que le sable est à grains moyen.

Les résultats d'analyses granulométriques sont affichés dans le tableau 36 suivant.

Tableau 36: Résultats d'analyses granulométriques

TAMIS (mm)	Sable 0/5 C	Gravier 10/20 C	Gravier 5/10 C
40	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
25	100,0	100,0	100,0
20	100,0	99,0	100,0
16	100,0	87,0	100,0
12,5	100,0	52,0	100,0
10	100,0	14,0	95,0
8	100,0	4,0	61,0
6,3	100,0	2,0	26,0
5	98,0	1,0	6,0
4	93,0	1,0	1,1
3,15	86,0	1,0	1,0
2,5	79,0	1,0	1,0
1,25	63,0	0,5	1,0
0,63	48,0	0,5	1,0
0,315	34,0	0,5	0,8
0,16	23,0	0,5	0,8
0,08	12,0	0,5	0,8

Commentaire

Le diamètre maximal D est de 20mm (Dmax = 20mm) et à partir de ces résultats, on pourra déterminer le module de finesse de sable Mf. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés Rc des tamis de mailles : 0.16– 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 (mm) sur 100. Il est calculé par la relation suivante :

$$Mf = \frac{\sum Rc}{100}, \text{ avec } \sum Rc = \sum 100 - P$$

$$\sum Rc = (100-23)+(100-34)+(100-48)+(100-63)+(100-79)+(100-98)$$

$$\sum Rc = 255$$

$$\text{Donc, } Mf = \frac{255}{100}; Mf = 2.6$$

Comme $1.5 < Mf < 2.8$, on a un sable à grains moyen.

Courbe granulométrique des granulats

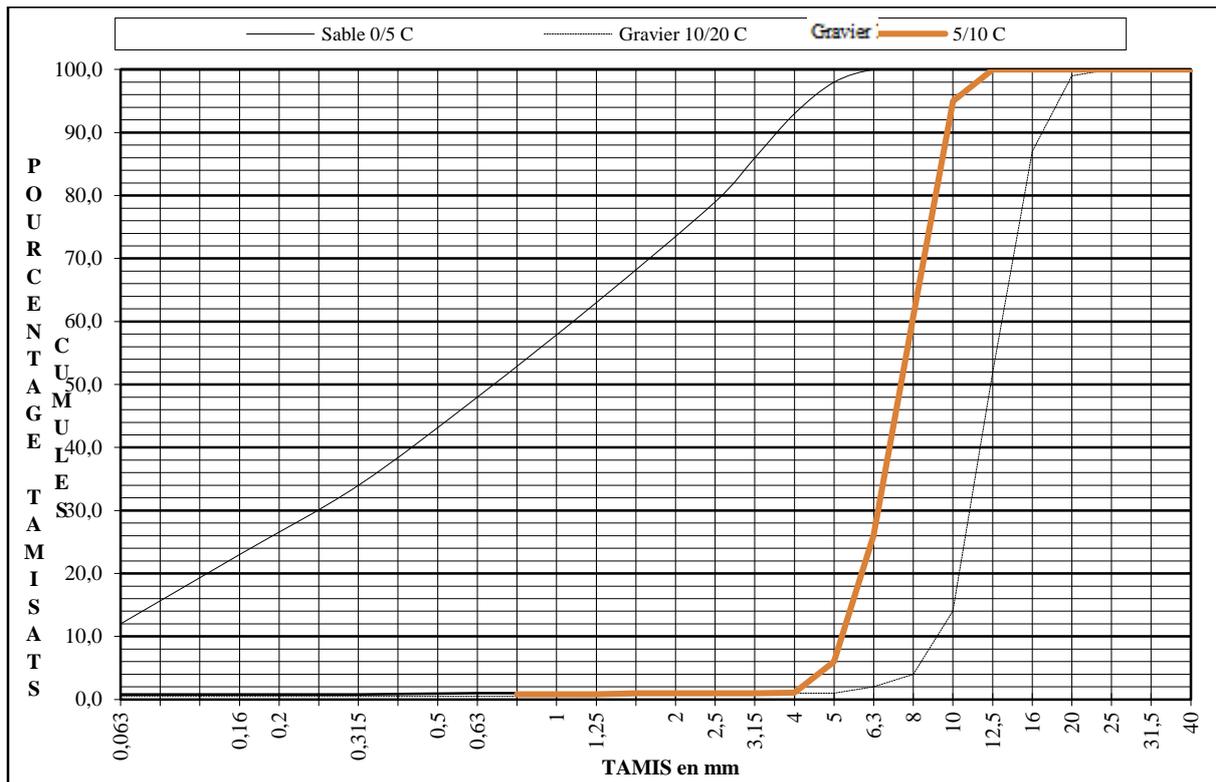


Figure 24 : Courbe d'analyse granulométrique des granulats

Commentaire :

La granularité de toutes les dimensions est bien répartie. Les courbes obtenues sont donc uniforme. Compte tenu de l'ensemble des classes granulaires (0/5, 5/10 et 10/20), la granulométrie est continue.

III.2.3. Résultat du contrôle qualité de l'adjuvant

Le tableau 37 montre les résultats de contrôle de l'adjuvant utilisé pour la confection du béton.

Tableau 37: Résultat du contrôle qualité de l'adjuvant

Forme	Couleur	pH	Densité	Teneur en ion Chlorure	Extrait sec
Liquide	Jaune laiteux	3.5	1.06 ± 0.1 à 20°C	≤ 0.10%	30.7%

Comme $4.5 < \text{pH} < 3.5$ et $28.5\% < \text{extrait sec} < 31.5\%$, ce produit est conforme selon le Cahier de Prescription Technique du chantier (CPT).

III.2.4. Tracé de la droite de référence

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisque $D=20\text{mm}$, on trouve $G=0,50$.

Dans cette étude, le granulat est concassé et le béton est vibré de condition normale, pompé. Alors, $k = 2$; $Kp = 6$.

Donc, les coordonnées des points OAB de la courbe de référence sont :

- Avec, O (0.063mm ; 0%) ;
- A (10mm ; 54.13) ;
- B (20mm; 100%) ;

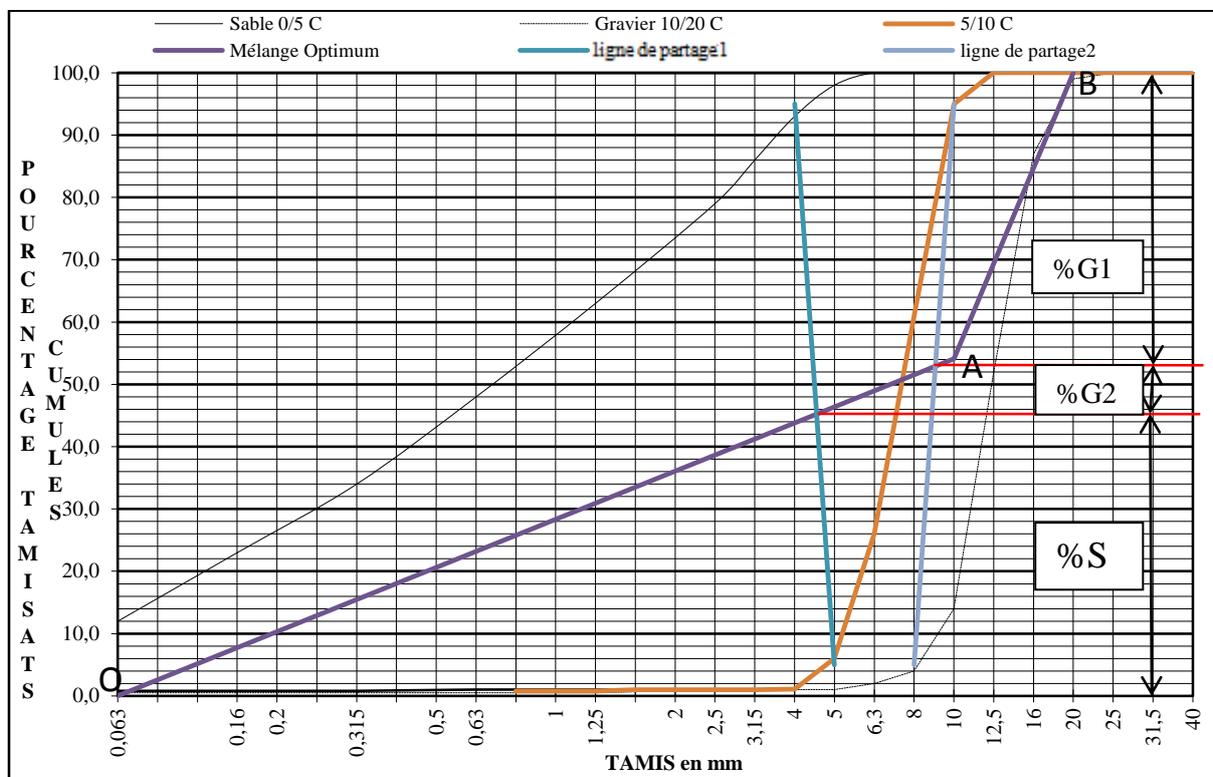


Figure 25 : Tracé de la droite de référence OAB

Commentaire

Le point d'intersection de la ligne de partage 1 avec la courbe de référence nous donne le pourcentage théorique de la quantité du sable 0/5 (%S). Celui de la ligne de partage 2 nous donne aussi la quantité du gravillon 5/10 (%G1) et le complément à 100% est la quantité du gravillon 10/20 (%G2).

Ces résultats de proportion théorique générale, nous permet de déterminer le volume absolu V_G et la masse totale G de l'ensemble des granulats à l'aide de leur compacité et de la masse volumique absolue. Comme il s'agit des granulats concassés, le coefficient de compacité γ est donc égal à 0.795. La formule théorique générale prend donc naissance à partir de ces données.

III.2.5. Formulation du béton appliquée à la partie d'ouvrage voile

La formule théorique trouvée serait appliquée en laboratoire et au moyen de chantier d'application.

III.2.5.1 Essai d'étude et de convenue

Le tableau suivant présente les résultats des essais d'études et de convenue pour la formule F8

Tableau 38: Résultat des essais d'étude et de convenue pour la formule F8

%Abs	%EAU	CONSTITUANTS	NATURE PROVENANCE	FORMULATION		CHARGE de 1 m' kg humides	ECARTS
				COMP. THEORIQUE kg/m³			
				Pds secs	Pds humides		
1.0	0.1	GRAVILLON 1	Gravillon 10/20mm Carrière PK 13 RN7	792	792.8	792.8	0.00
0.2	0.6	GRAVILLON 2	Gravillon 5/10mm Carrière PK 13 RN7	149	149.9	162.4	7.70
1.0	1.8	SABLE	Gravillon 0/5mm Carrière PK 13 RN7	914	930.5	952.0	2.26
		CIMENT	CEM 142.5 HOLCIM	380	380.0	377.6	-0.64
		EAU	Eau de gachage de la ville Tana	190	171.9	184.0	6.60
		ADJUVANT 1	OPTIMA 100 cheyso	5.7	5.7	5.3	-7.55

Dans ce cas, le béton frais ainsi produite ait une consistance fluide de classe S4 avec un affaissement de 17cm.

III.2.5.2 Vérification de la formule

Les résultats de la vérification de la formule F8 sont affichés dans le tableau 39 qui suite.

Tableau 39: Vérification de la formule

	Age d'essai / 7 jours			Age d'essai / 28 jours		
	0839/1	0839/2	0839/3	0839/4	0839/5	0839/6
Masse en kg avant conserv. après conserv.	15.537 15.662	15.572 15.693	15.576 15.700	15.552 15.668	15.545 15.657	15.529 15.643
Densité en t/m³ avant conserv. après conserv.	2.41 2.43	2.42 2.44	2.42 2.44	2.42 2.44	2.42 2.43	2.41 2.43
Moyenne	Avant conserv. Après conserv.			2.42 t/m³ 2.44 t/m³		
Résistance en MPa	32.2	32.5	32.5	34.8	35.6	35.5
Moyenne	32.4 MPa			35.3 MPa		

$$F_{cm} = 35.3 > 34\text{MPa}$$

$$F_{mini} = 34.8 > 26\text{MPa}$$

L'écrasement des trois éprouvettes cylindriques âgées de 28 jours permet donc d'obtenir un résultat satisfaisant.

Remarque : Une autre étude de convenance a été faite sur cette partie d'ouvrage avec la formule affichée dans le tableau suivant :

Tableau 40: Résultat des essais d'étude et de convenance pour une autre formule

%Abs	% EAU	CONSTITUANTS	NATURE PROVENANCE	COMP. THEORIQUE kg/m ³		CHARGE de 1 m ³ kg humides	ECARTS
				Pds secs	Pds humides		
				1.0	1.1		
1.0	3.5	GRAVILLON 2	Gravillon 5/10mm Carrière PK 13 RN7	150	155.3	157.6	1.49
2.0	6.0	SABLE	Gravillon 0/5mm Carrière PK 13 RN7	950	1007.0	1000.0	-0.70
		CIMENT	CEM 142.5 HOLCIM	360	360.0	366.4	1.75
		EAU	Eau de gachage de la ville Tana	190	119.0	129.8	8.33
		ADJUVANT 1	OPTIMA 100 chryso	5.40	5.4	5.4	0.11
G/S = 1.01 Eff/C = 0.47		ST Centrale : ST chantier : 17 cm		DENSITE BETON FRAIS = 2455 kg/m ³ W% BETON = 8.6			

Le ciment est dosé à 360kg/m³, et la classe de consistance est S4 soit un affaissement de 17cm. A 28 jours, le béton atteint une résistance en compression simple de 48.3 Mpa.

$$F_{cm} = 48 > 34 \text{MPa}$$

$F_{mini} = 46.5 > 26 \text{MPa}$, donc ce résultat est aussi conforme à l'exigence technique requise pour la partie d'ouvrage voile.

III.2.6. Formulation du béton appliquée à la partie d'ouvrage plancher

III.2.6.1 Essai d'étude et de convenance

Le tableau suivant présente les résultats des essais d'études et de convenance pour la formule F9

Tableau 41: Essai d'étude et de convenance pour la formule F9

%Abs	% EAU	CONSTITUANTS	NATURE PROVENANCE	COMP. THEORIQUE kg/m ³		CHARGE de 1 m ³ kg humides	ECARTS
				Pds secs	Pds humides		
				1.0	0.1		
1.0	0.6	GRAVILLON 2	Gravillon 5/10mm Carrière PK 13 RN7	149	149.9	151.2	0.86
2.0	1.8	SABLE	Gravillon 0/5mm Carrière PK 13 RN7	914	930.5	922.4	-0.87
		CIMENT	CEM 142.5 HOLCIM	380	380.0	380.0	0.00
		EAU	Eau de gachage de la ville Tana	190	171.9	184.8	7.00
		ADJUVANT 1	OPTIMA 100 chryso	4.75	4.8	4.8	0.42
G/S = 1.04 Eff/C = 0.46		ST Centrale : ST chantier : 15 cm		DENSITE BETON FRAIS = 2430 Kg/m ³ W% BETON = 8.7			

Dans ce cas, le béton frais ainsi produite ait une consistance très plastique de classe S3 avec un affaissement de 15cm.

III.2.6.2 Vérification de la formule

Les résultats de la vérification de la formule F9 sont affichés dans le tableau 42 suivant.

Tableau 42: Vérification de la formule F9

	Age d'essai / 7 jours			Age d'essai / 28 jours		
	0838/1	0838/2	0838/3	0838/4	0838/5	0838/6
Masse en kg avant conserv. après conserv.	15.552 15.674	15.566 15.687	15.560 15.683	15.551 15.672	15.537 15.653	15.553 15.669
Densité en t/m ³ avant conserv. après conserv.	2.42 2.44	2.42 2.44	2.42 2.44	2.42 2.44	2.41 2.43	2.42 2.44
Moyenne	Avant conserv. Après conserv.			2.42 t/m ³ 2.44 t/m ³		
Résistance en MPa	32.5	30.9	31.5	34.0	34.5	33.9
Moyenne	31.6 MPa			34.1 MPa		

$$F_{cm} = 34.1 > 34\text{MPa}$$

$$F_{mini} = 33.9 > 26\text{MPa}$$

L'écrasement des trois éprouvettes cylindriques âgées de 28 jours permet donc d'obtenir un résultat satisfaisant et conforme

Remarque : Une autre étude de convenance a été faite aussi sur cette partie d'ouvrage avec la formule dans le tableau suivant :

Tableau 43: Un autre essai d'étude et de convenance pour le plancher

%Abs	% EAU	CONSTITUANTS	NATURE PROVENANCE	COMP. THEORIQUE kg/m ³		CHARGE de 1 m ³ kg humides	ECARTS
				Pds secs	Pds humides		
1.0	0.6	GRAVILLON 1	Gravillon 10/20mm Carrière PK 13 RN7	800	804.8	797.0	-0.98
1.0	0.5	GRAVILLON 2	Gravillon 5/10mm Carrière PK 13 RN7	150	150.8	156.0	3.37
2.0	1.6	SABLE	Gravillon 0/5mm Carrière PK 13 RN7	950	965.2	951.0	-1.49
		CIMENT	CEM142.5 HOLCIM	360	360.0	360.0	0.00
		EAU	Eau de gachage de la ville Tana	190	169.3	127.9	-32.33
		ADJUVANT 1	OPTIMA 100 chryso	4.824	4.8	4.8	-0.46
G/S = 1.01 Eff/C = 0.34		ST Centrale : ST chantier : 13 cm		DENSITE BETON FRAIS = 2455 Kg/m ³ W% BETON = 8.6			

Le ciment est dosé à 360kg/m³, et la classe de consistance est S3 soit un affaissement de 13cm. A 28 jours, le béton atteint une résistance en compression simple de 42.2 Mpa.

$$f_{cm} = 42.2 > 34\text{MPa}$$

$f_{mini} = 41.4 > 26\text{MPa}$, donc ce résultat est aussi conforme à l'exigence technique pour la partie d'ouvrage plancher. Certes, les formules proposées ci-dessus pourraient être utilisées sans restriction sur les parties d'ouvrages (voile et plancher) de la Tour 786. Les études de convenances ont été faites sur le Centrale à Béton Prêt à l'Emploi du chantier Tour 786.

III.2.7. Résultats des essais de résistances en compression sur la partie d'ouvrage : Voile

Les tableaux suivants, montrent la moyenne des résultats de 48 essais de résistances en compression sur ladite partie d'ouvrage « voile » de niveau 3 à 28. La formule du béton utilisée est C30/37 dosé à 380 kg/m³ avec une consistance S4. Cette formule est nommée F8 dont la composition théorique et expérimentale des divers constituants est aussi mentionnée dans ces tableaux.

Tableau 44: Résultats de la composition théorique et expérimentale des constituants

	Rc28	Granulat 5/10	Granulat 10/20	Granulat 0/5	Ciment	Eaux	Adjuvant
Formule Théorique F8 C30/37	30	149,00	792,00	914,00	380,00	190,00	5,32
Données expérimentales	36,31	149,02	795,56	923,18	373,32	190,65	5,32

Tableau 45: Résultats des essais de résistance en compression et écarts des constituants

	Rc18h	Rc7j	Rc28	Granulat 5/10	Granulat 10/20	Granulat 0/5	Ciment	Eaux	Adjuvant	Slump test
Moyenne	8,80	28,67	36,31	0,02	0,45	1,00	-1,76	0,34	0,07	17,61
Minimum	8,30	23,10	31,80	-10,48	-1,21	-4,00	-4,00	-0,55	-0,16	14,00
Ecart type	0,71	2,71	2,80	3,69	3,75	1,50	1,10	0,63	0,17	1,31

La résistance moyenne en compression à 28j f_{cm} est 36.31 Mpa et la résistance minimale $f_{c\ mini}$ est de 31.80 Mpa. Après la vérification des conditions :

- $f_{cm} \geq f_{c28}+4$, f_{c28} est la résistance souhaitée lors de l'étude de formulation qui est égale à 30Mpa. Donc $f_{cm} > 34\text{Mpa}$
- $f_{c\ mini} \geq f_{c28}-4$, on a $f_{c\ mini} > 26\text{Mpa}$

Ces conditions sont respectées, les résultats sont donc conformes aux exigences techniques requises.

Pour visualiser l'impact de la formule obtenue, une analyse statistique a été faite à partir d'un intervalle de la classe de résistance. Le tableau suivant montre cette analyse.

Tableau 46: Analyse statistique des résistances en compression sur la formule F8

CLASSE	Nbre valeurs	Fréquence
30<Rc<32	1	2,0
32<Rc<34	9	18,4
34<Rc<36	19	38,8
36<Rc<38	11	22,4
38<Rc<40	2	4,1
40<Rc<42	2	4,1
42<Rc<44	5	10,2
	49	100

Après cette analyse statistique, nous avons pu obtenir la fréquence correspondante à chaque classe de résistance.

La répartition de cette résistance sera bien distinguer dans l'histogramme suivant.

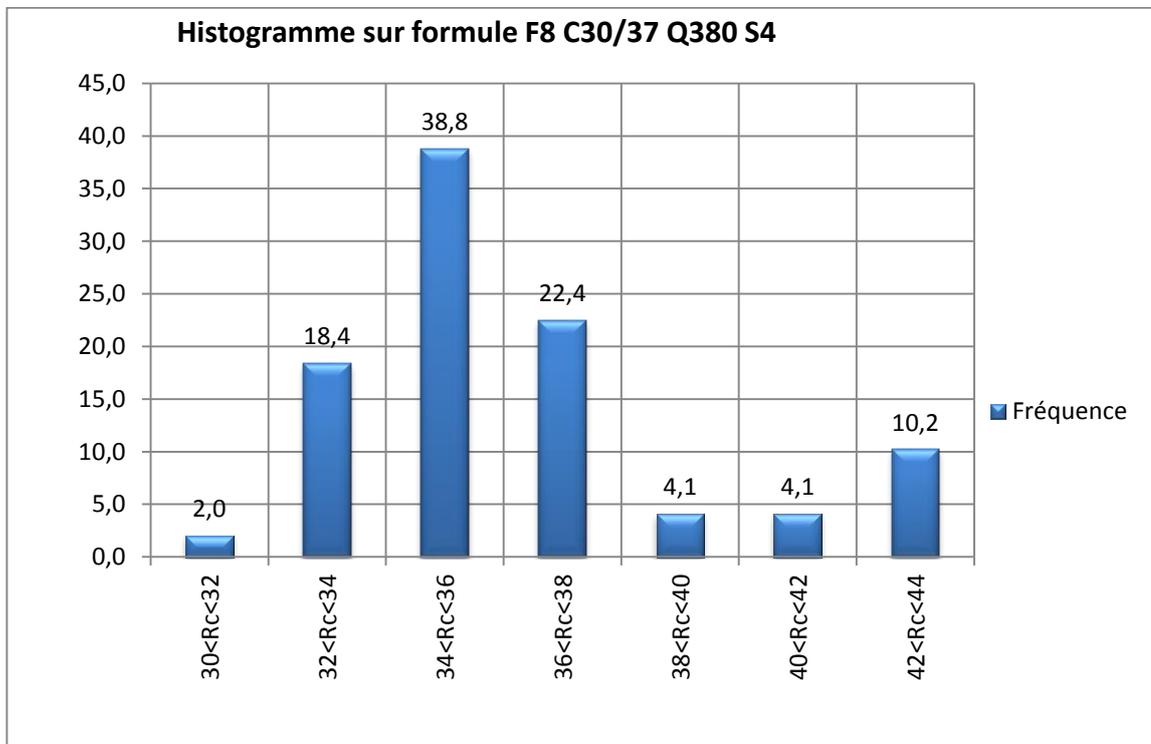


Figure 23: Histogramme de la formule F8

Sur ces 49 résultats, la plupart des résistances obtenues est de 34 à 36 Mpa soit 38.8%.

Les résistances minimales comprises entre 38 à 40Mpa et 40 à 42 ne représentent que de 4.1%.

La courbe suivant indique, l'augmentation de la résistance en compression de F8 en fonction de l'âge du béton.

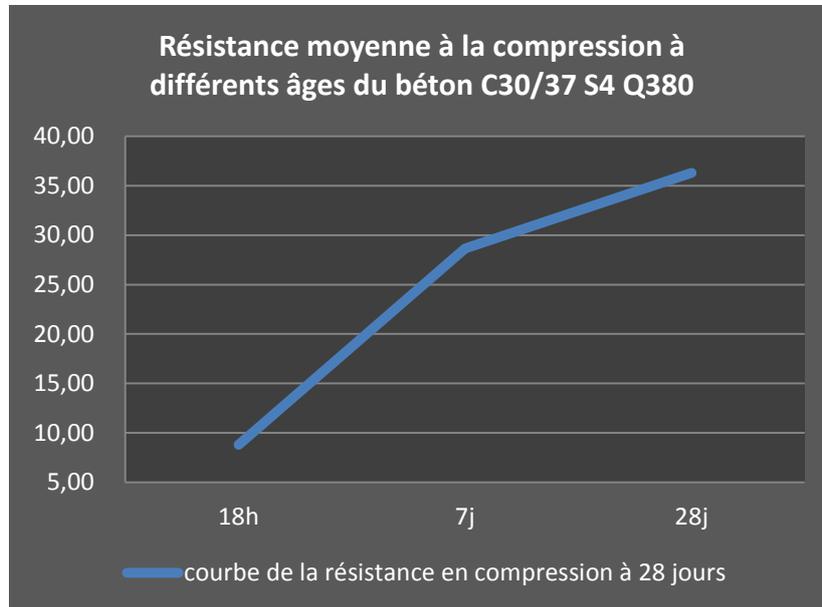


Figure 24: Courbe de résistance moyenne à la compression de la formule F8

Cette courbe nous montre que la résistance en compression du béton monte avec l'âge.

La figure 25 montre la comparaison de la composition théorique et la composition expérimentale de la formule F8.

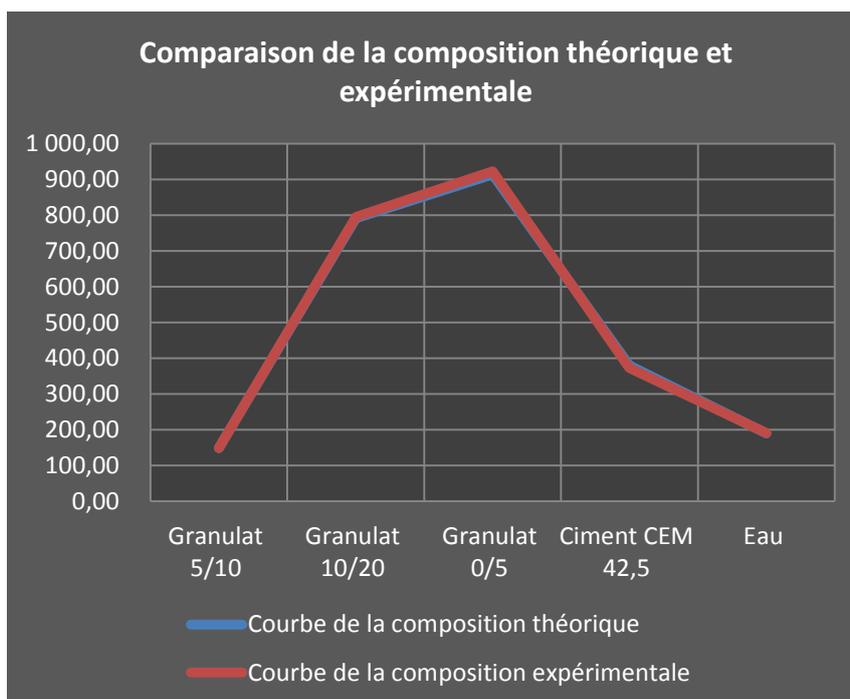


Figure 25: Courbe de la composition théorique et expérimentale de F8

Les courbes de la composition théorique et expérimentale sont presque confondues, ceux qui signifient que les écarts entre ces deux compositions sont bien conformes.

III.2.8. Résultats des essais de résistances en compression sur la partie d'ouvrage : Plancher de haut niveau

Les tableaux suivants, montrent la moyenne des résultats de 35 essais de résistances en compression sur ladite partie d'ouvrage de niveau 10 à 29. La formule du béton utilisée est C30/37 dosé à 360 kg/m³ avec une consistance S3. Cette formule est nommée F9 dont la composition théorique et expérimentale des divers constituants est aussi mentionnée ces tableaux.

Tableau 47: Résultats de la composition théorique et expérimentale des constituants sur F9

	Rc28j	Granulat 5/10	Granulat 10/20	Granulat 0/5	Ciment	Eaux	Adjuvant
Formule théorique F9 C30/37	30	150,0	800,0	950,0	360,0	190,0	4,8
Données expérimentales	34,6	148,6	799,2	951,9	357,8	189,9	4,8

Tableau 48: Résultats des essais de résistance en compression et écarts des constituants de F9

	Rc2j	Rc7j	Rc28j	Granulat 5/10	Granulat 10/20	Granulat 0/5	Ciment	Eaux	Adjuvant	Slump Test
Moyenne	-	27,1	34,6	-1,4	-0,8	1,9	-2,2	-0,1	0,0	15,7
Minimum	0	25,8	32,5	-5,4	-1,3	-2,2	-4,4	-2,2	-0,2	12,0
Ecart type	-	1,0	1,7	2,9	0,3	1,1	1,5	0,5	0,1	1,3

La résistance moyenne en compression à 28j fcm est 34.6Mpa et la résistance minimale fc mini est de 32.5Mpa. Après la vérification des conditions :

- $f_{cm} \geq f_{c28} + 4$, f_{c28} est la résistance souhaitée lors de l'étude de formulation qui est égale à 30Mpa. Donc $f_{cm} > 34$ Mpa
- $f_{c\ mini} \geq f_{c28} - 4$, on a $f_{c\ mini} > 26$ Mpa

Ces conditions sont respectées, les résultats sont donc conformes aux exigences techniques requises.

Classe des résistances

Pour visualiser l'impact de la formule F9 obtenue, une analyse statistique a été aussi faite à partir d'un intervalle de la classe de résistance. Le tableau suivant montre cette analyse.

Tableau 49: Analyse statistique des résistances en compression sur la formule F9

CLASSE	Nbre valeurs	Fréquence
32<Rc<34	18	47,4
34<Rc<36	12	31,6
36<Rc<38	7	18,4
38<Rc<40	1	2,6

Après cette analyse statistique, nous avons pu aussi obtenir la fréquence correspondante à chaque classe de résistance.

La répartition de cette résistance sera bien distinguer dans l'histogramme suivant.

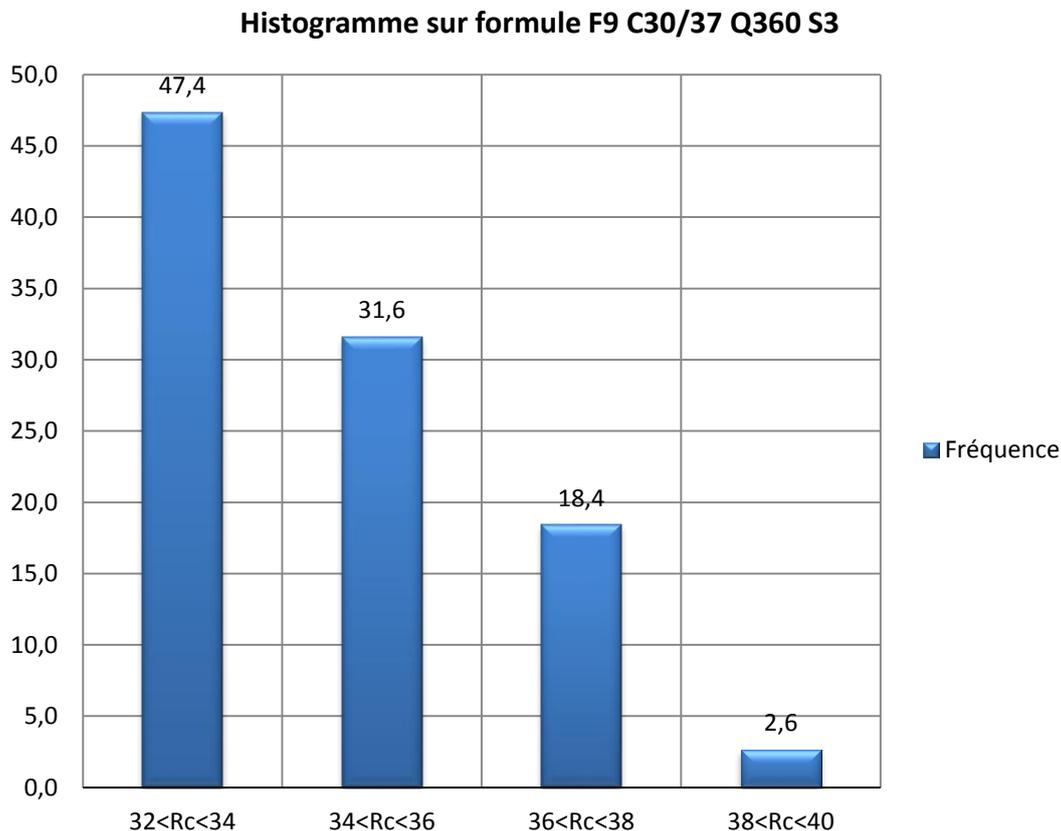


Figure 26: Histogramme sur la formule F9

Sur ces 35 résultats, la plupart des résistances obtenues est de 32 à 34 Mpa soit 47.4%.

Les résistances comprises entre 38 à 40Mpa ne représentent que de 2.6%.

La courbe suivant indique, l'augmentation de la résistance en compression de F8 en fonction de l'âge du béton.

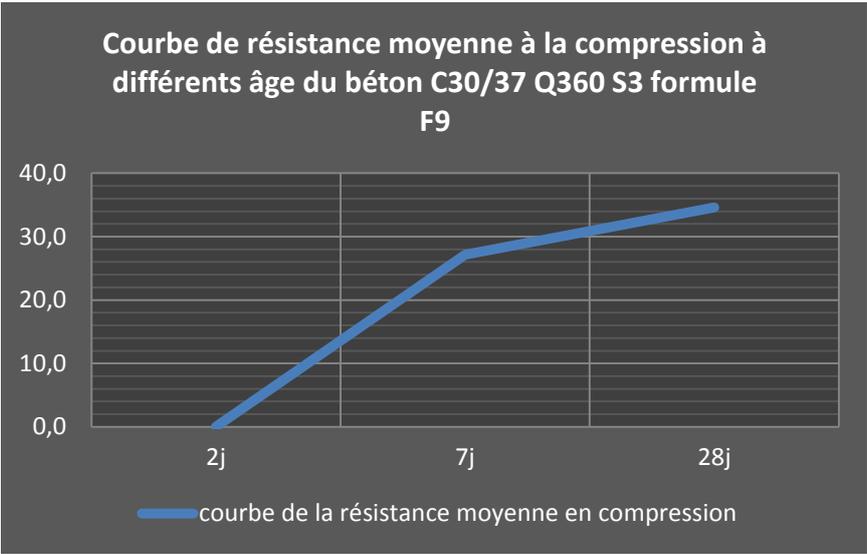


Figure 27: Courbe de résistance moyenne à la compression de la formule F9
Cette courbe nous montre toujours que la résistance en compression du béton monte avec l'âge.

La figure 28 montre la comparaison de la composition théorique et la composition expérimentale de la formule F9.

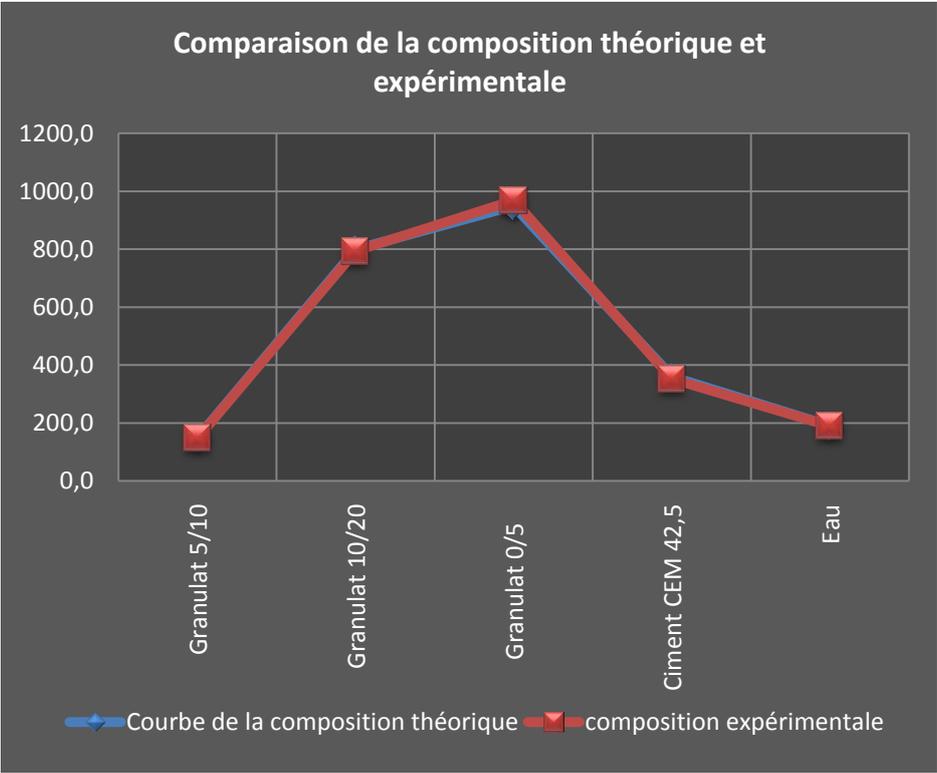


Figure 28: Courbe de la composition théorique et expérimentale de F9

Les courbes (Cf. figure 28) de la composition théorique et expérimentale sont presque confondues, ceux qui signifient que les écarts entre ces deux compositions sont aussi bien conformes.

III.2.9. Spécification

Le béton ainsi produite dans ces deux ouvrages est un Béton à Composition Prescrite dans la Norme FR EN 206-1 (**BCPN**) se trouvant dans un milieu (**XC3**) avec une humidité modérée et qui résiste à la corrosion induite par carbonatation. Comme il s'agit d'un béton armé, la teneur maximale en ion chlorure **Cl** est de **0.40%** par rapport au poids du ciment. La spécification du béton de ces deux ouvrages se différencie seulement par le dosage en matériau (ciment, granulats, eaux) et la classe de consistance mais le type, la classe du ciment, la dimension maximale des granulats et la classe de résistance du béton sont les mêmes. Les tableaux suivant montrent la spécification de ces deux ouvrages.

Tableau 50: Spécification du béton utilisé dans l'ouvrage : Voile (formule F8)

Désign. Béton (6) (7)	Classe exposit (1)	Classe chlorure	Classe résistance (2)	Liants équivalents			Consistance (5)	Dmax	Adjuvant (10)
				Type et Classe ciment	Nature Addition (3)	kg / m ³ (4)			
FR EN 206-1 BCPN	XC3	0,40	C30/37	CEM 42.5		380	S4	0/20	SPHRE 5 L/M3

Le béton à présent peut être désigné comme suit :

BCP – CEM I 42.5 N CE – C30/37 – XC3 – S4 – Cl 0.4 – Dmax 20– NF EN 206-1

Tableau 51: Spécification du béton utilisé dans l'ouvrage : Plancher (Formule F9)

Désign. Béton (6) (7)	Classe exposit (1)	Classe chlorure	Classe résistance (2)	Liants équivalents			Consistance (5)	Dmax	Adjuvant (10)
				Type et Classe ciment	Nature Addition (3)	kg / m ³ (4)			
FR EN 206-1 BCPN	XC3	0,40	C30/37	CEM 42.5		360	S3	0/20	SPHRE 4.8 L/M3

Dans ce cas, ce béton peut être désigné comme suit :

BCP – CEM I 42.5 N CE – C30/37 – XC3 – S3 – Cl 0.4 – Dmax 20– NF EN 206-1

CONCLUSION

Pour conclure, la formulation des bétons hydrauliques normalisée s'inspire à partir du concept d'un ouvrage, de la caractérisation des matériaux constitutifs, de l'établissement d'une formule théorique à l'aide de la « Méthode de composition à granulométrie continue combinée à la méthode de calcul Dreux-Gorisse ». Elle est suivie d'une application de cette formule en laboratoire par les essais d'étude et une application au moyen de chantier d'application par les essais de convenance pour obtenir la vraie formule.

Quant aux contrôles de performances mécaniques, on fait appel à la méthode géophysique par des essais non destructifs ou semi-destructifs et à la méthode destructifs par des essais d'écrasement à la presse béton.

Cette dernière méthode de contrôle est appliquée au chantier Tour Orange 786 Ankorondrano – Antananarivo sur certaines parties d'ouvrages.

Le premier ouvrage choisi est la voile de niveau 03 à 28 dont la formule utilisée est C30/37 dosé à 380 kg/m³ de ciment avec une consistance S4. Les 49 résultats des essais de contrôle de résistances à la compression à 28j sur cette partie d'ouvrage représentent en majorité 34 à 36 Mpa.

Le deuxième ouvrage choisi est le plancher de haut niveau de niveau 10 à 29 avec une formule C30/37 dosé à 360 kg/m³ et une consistance S3, la plupart des performances mécaniques obtenues sont à l'ordre de 32 à 34 Mpa avec 35 résultats à 28jours.

Ces résultats ont donc permis d'obtenir les performances mécaniques (par des essais destructifs) et environnementales adaptés aux ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- **BARON J. & OLLIVIER J. P.**, «LES BETON. Base et données pour leur formulation», Edition EYROLLES, 1997,522p.
- **G.DREUX et J.FESTA**, nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris, Huitième Edition EYROLLES, mai 1998, 409p.
- **R.Dupain-R.Lanchon-JC.Saint-Arroman**, caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Nouvelle édition. EDUCALIVRE. 1978, 235p.
- **CIM béton**, « Béton et mortier », Paris, collection B70.
- **AFNOR**. Normalisation Française

Référence webographique

- <http://fsi.univ-tlemcen.dz/cours/Methodes-de-composition-du-beton.pdf>(**Septembre 2012**)
- <http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G11.pdf>(**Septembre 2012**)
- <http://www.ensh.dz/files/Cours/1011/.../Eau%20et%20adjuvants.pdf>(**Mai 2012**)
- <http://biblioweb.u-cergy.fr/theses/08CERG0395.pdf>(**Septembre 2012**)
- <http://s4.e-monsite.com/.../98202702methode-de-composition-beton-pdf.p>(**Septembre 2012**)
- http://www.mssmat.ecp.fr/files/content/.../Abaques_CES-Dreux-Gorisse.pdf(**Janvier 2011**)
- http://www.umc.edu.dz/revuest/Amara_PDF/.../st_b27_article_01.pdf(**Janvier 2011**)
- http://www.cours-genie-civil.com/.../TP6_Beton_Durci_laboratoire_materiaux(**Janvier 2011**)
- <http://www.cnrs.edu.lb/info/zeghichi.pdf>(**Janvier 2011**)
- <http://www.infociments.fr/telecharger/CT-T43.56-63.pdf>(**Décembre 2010**)
- <http://www.infociments.fr/telecharger/CT-G10.49-69.pdf>(**Octobre 2011**)
- <http://www.ac-nancy-metz.fr/.../Chapitre%20004%20-%20Les%20Betons.pdf>(**Novembre 2010**)
- <http://www.ajol.info/index.php/afsci/article/download/61626/49741> (**Juillet 2010**)

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	4
GLOSSAIRE	6
LISTE DES ACRONYMES	7
LISTE DES FIGURES	8
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON	2
I.1. Caractéristiques et contrôle de la performance des bétons : frais et durci	2
I.1.1. Bétons frais	2
I.1.2. Bétons durcis.....	3_Toc420478007
I.2. Les différentes spécifications des bétons hydrauliques.....	8
I.2.1. Classes de résistances.....	9
I.2.2. Classes de consistance	10
I.2.3. Classes de chlorures	11
I.2.4. Classes d'exposition.....	11
I.3. Les constituants des bétons	14
I.3.1. Les granulats	14
I.3.2. Les liants hydrauliques.....	15
I.4. Notions sur les éventuels défauts des bétons	15
I.4.1. Le gonflement dû au sulfate	15
I.4.2. Phénomène de fissuration	16
I.4.3. Défaut dû à la Carbonatation.....	16
I.5. Validation d'une formulation du béton.....	17
I.6. Fabrication	17
I.6.1. Approvisionnement et stockage des constituants.....	17
I.6.2. Dosage des constituants	18

I.6.3. Malaxage des constituants	18
I.6.4. Transport	18
I.7. Contrôles	19
CHAPITRE II. METHODOLOGIE.....	20
II.1. CRITERES DE SELECTION DES CONSTITUANTS DE BETONS	20
II.1.1 Granulat	20
II.1.2. Le ciment	24
II.1.3. Adjuvant : Types, objectif qualité, normes, spécification	31
II.1.4. Eau : Types, objectif qualité, normes, spécification	33
II.2. METHODE DE FORMULATION	35
II.2.1. Contraintes des normes.....	35
II.2.2. Les paramètres incontournables pour une formulation de bétons	36
II.2.3. Méthodes de formulation et notions de base	39
II.2.4. Classe d'exposition et critères de formulation.....	53
CHAPITRE III. ETUDES EXPERIMENTALES ET RESULTATS	54
III.1. EXEMPLE D'APPLICATION	54
III.1.1. Caractérisation des matériaux utilisés	54
III.1.2. La méthode choisie.....	55
III.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	55
III.2.1. Caractéristiques Physico - Mécaniques du Ciment	55
III.2.2. Résultats des essais géotechniques des granulats	56
III.2.3. Résultat du contrôle qualité de l'adjuvant.....	58
III.2.4. Tracé de la droite de référence	58
III.2.5. Formulation du béton appliquée à la partie d'ouvrage voile	59
III.2.6. Formulation du béton appliquée à la partie d'ouvrage plancher	61
III.2.7. Résultats des essais de résistances en compression sur la partie d'ouvrage : Voile.....	63
III.2.8. Résultats des essais de résistances en compression sur la partie d'ouvrage : Plancher de haut niveau	66

III.2.9. Spécification.....	69
CONCLUSION.....	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUE.....	71

RESUME

Le béton est un matériau composite dont les caractéristiques sont liées fortement au choix et au dosage de ses constituants. Une bonne formulation, confère au béton le niveau de performances et de qualités voulues puis amène à la durabilité d'un ouvrage.

Afin d'aboutir à ce terme, dans ce présent mémoire une méthode de formulation appelée « Méthode Dreux-Gorisse » a été choisie. Elle exige, la consultation des Cahiers de Prescription Technique, l'identification des matériaux constitutifs par les études géotechnique, minéralogique et chimique. Cette méthode nécessite aussi, la détermination du dosage en ciment, eau et des pourcentages en volume absolu des granulats à l'aide de la droite brisée OAB de Dreux. Ainsi, on obtient une formule théorique qui sera ajusté par les essais d'études en laboratoire et les essais de convenance au moyen du chantier d'application.

Certes, la méthode choisi a permis d'obtenir les performances adaptées aux ouvrages de la Tour Orange 786 à Akoronrano-Antananarivo sur la partie d'ouvrage (voile) des niveaux 03 à 28 dont la formule utilisée C30/37 est dosé à 380 kg/m³ de ciment avec une consistance S4 et sur le plancher des niveaux 10 à 29 avec la formule C30/37 dosée à 360 kg/m³ et une consistance S3.

Mots clés : Formulation des bétons, dosage, droite brisée, méthode Dreux-Gorisse, Tour Orange 786 Ankorondrano – Antananarivo

ABSTRACT

Concrete is a composite material in which its characteristics are strongly related to the choice and dosage of its constituents. The desired qualities and the performance of concrete level depend on the good formulation in order to have a sustainable structure. To achieve this aim, in this present study, a brief formulation method called "Method Dreux Gorisse" was chosen.

The consultation of Technical Papers Prescription, identification of constituent materials by geotechnical, mineralogical and chemical studies are required. This method also needs the determination of cement content, water and percentages in absolute volume of aggregates using the Dreux broken line OAB. Therefore, we obtain a theoretical formula to be adjusted to the testing laboratory and testing convenience through the application site.

So, the chosen method yielded the performance adapted for the structure of the "Orange Tour Akoronrano-786" in Antananarivo on the wall part from 03 to 28 level, the used formula is C30/37 dosed at 380 kg/m³ of cement with a consistency S4 and on the slabs part, from 10 to 29 level with a formula of C30/37 dosed 360 kg/m³ and consistency S3.

Keywords : Concrete, formulation, dosage, broken line, Dreux Gorisse Method, Orange Tour Ankorondrano 786 – Antananarivo.

Titre : METHODES DE FORMULATIONS DE BETON HYDRAULIQUE

Encadreur :

Dr. RAKOTO Heritiana

Impétrant :

DASY Kellyo