

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC.336

**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**

**Département de Génie Civil  
(Centre de Thiès)**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION**

**Sujet :**

**ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS THEORIQUES ET IN SITU EN VUE DE  
LA MAITRISE DE LA QUALITE :  
APPLICTION AU BETON DE CIMENT DE DENSITE NORMALE**

**ANNEE ACADEMIQUE : 2005/2006**

*Auteurs : Souleymane MBEGUE*

*Moctar Abdoul BA*

*Directeur interne : Professeur Ibrahima Khalil CISSE*

*Directeur externe : M. Mouhamadou A. Dame LO,*

*Ing. Génie Civil*

## REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à Allahi qui nous a accordé santé et vie, nous exprimons toute notre profonde reconnaissance et gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce rapport.

Par leur disponibilité, leur assistance et leurs conseils qui nous ont été favorables, nous tenons à remercier particulièrement :

- ✓ Le Professeur Ibrahima Khalil CISSE du département Génie Civil pour avoir bien voulu assurer la direction de ce projet et pour le soutien total et l'assistance permanente qu'il nous a apportés ;
- ✓ Monsieur Mouhamadou Ahmed Dame LO, Ingénieur Polytechnicien responsable du Bureau d'Organisation et des Méthodes à la Générale d'Entreprises pour son soutien, et la grande compréhension dont il a fait montre ;
- ✓ Monsieur Barama SARR, Directeur Général de l'Association Sénégalaise de Normalisation (A.S.N) pour les documents qu'il nous a fournis ;
- ✓ Monsieur Ablaye THIAM, Ingénieur Polytechnicien et responsable de la qualité à Jean Lefebvre Sénégal ;
- ✓ Monsieur Lamine LO, Ingénieur Polytechnicien et Professeur à l' E.S.P
- ✓ Monsieur Alioune KASSE, Ingénieur en Génie Civil à Caoutchouc Plastique pour les adjuvants qu'il a mis à notre disposition pour les fins de ce projet ;
- ✓ Madiaw GUEYE technicien Génie Civil et tous ses collaborateurs notamment Cheikh SARR et Amadou NIANG du laboratoire de sol de l'E.S.P Thiès.

## SOMMAIRE

Le but de ce travail était de faire une formulation de béton de ciment de densité normale reproductible sur le chantier.

En effet une telle entreprise demeure complexe vu les multitudes de contraintes technico-économiques qui se posent.

Le travail consiste à faire une étude théorique du béton, basée sur une meilleure connaissance du matériau (de ses constituants) afin d'optimiser ses performances, lesquelles sont obtenues à travers une étude expérimentale.

Pour ce faire, il est question de s'inscrire fermement dans une démarche qualité par la mise en place de procédures techniques et administratives fiables.

Notre analyse s'est portée sur le choix de la qualité des différents constituants, ainsi que la détermination de leur proportion dans le mélange grâce à la méthode semi empirique de Dreux et Gorisse. Des échantillons d'éprouvettes d'élanement 2 ( $\Phi = 15$ ) ont été prélevés et soumis à l'essai de compression simple après sept (7) et vingt huit (28) jours de mûrissement à l'eau.

Les essais de laboratoire ont révélé que les résistances souhaitées sont pratiquement obtenues dès le septième jour, et mieux, les performances mécaniques du béton augmentent de façon significative au vingt huitième jour. L'affaissement mesuré au cône d'Abrams qui tourne autour de  $6 \pm 1$  cm reste dans la gamme des bétons plastiques et permet ainsi une bonne mise en œuvre du béton frais dans les coffrages.

Les résultats obtenus montrent que le dosage théorique est reproductible sur le chantier, si toutefois le travail est conduit dans les règles de l'art.

Enfin cette étude apporte aux professionnels du béton une méthode ouverte pour tirer le meilleur parti des possibilités qu'offrent les adjuvants, aux contrôleurs techniques une vue raisonnée des points sensibles à considérer.

Mots – clés : béton – compacité – formulation – résistance – qualité – management.

## TABLE DES MATIERES

	Page
LISTE DES TABLEAUX .....	VII
LISTE DES FIGURES .....	VIII
INTRODUCTION.....	1
<b>PARTIE A: ETUDE THEORIQUE DU BETON HYDRAULIQUE DE DENSITE NORMALE.....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DU BETON .....</b>	<b>3</b>
I. Les ciments courants .....	3
I.1. Définition.....	3
I.2. Les constituants des ciments courants.....	3
I.3. Le clinker portland et les grandes lignes de la fabrication du ciment .....	3
I.4. Les types, classes et désignation des ciments courants .....	6
II. Les granulats du béton.....	10
II.1. Définition .....	10
II.2. Le rôle des granulats .....	10
II.3. Les caractéristiques des granulats .....	11
II.3.1. Les caractéristiques géométriques.....	11
II.3.2. Les caractéristiques physico-chimiques .....	13
II.3.3. Les caractéristiques mécaniques .....	15
III. Les Adjuvants pour béton.....	16
III.1. L'influence des adjuvants sur l'ouvrabilité du béton.....	17
III.2. Entraînement d'air et durabilité.....	18
III.3. Accélérateurs de prise et de durcissement .....	19
III.3.1. Accélérateur de prise.....	19
III.3.2. Adjuvant accélérateur de durcissement.....	20
III.4. Retardateurs de prise.....	20
III.5. Réducteurs d'eau .....	21
III.6. Adjuvant hydrophobant.....	21
III.7. Autres types d'adjuvants .....	22
III.8. Applications et problèmes généraux .....	23
IV. L'eau de gâchage.....	24
IV.1. Types d'eau.....	24
IV.2. Aptitudes à l'emploi .....	24
IV.3. Critères d'évaluation de la norme « EN 1008 ».....	25
IV.3.1. Les critères sensoriels.....	25

IV.3.2. Les critères chimiques .....	25
IV.3.3 Les critères mécaniques .....	26
IV.4. Quelques eaux particulières .....	26
IV.4.1. L'eau de mer .....	26
IV.4.2. Les eaux acides .....	27
IV.4.3. Les eaux de recyclage .....	27
Chapitre II: FORMULATION DU BETON ET SES OBJECTIFS.....	28
I. Problématique de la formulation de béton en entreprise .....	28
I.1. Cinq questions à se poser .....	28
I.2. La production du béton par l'entreprise .....	31
I.2.1. Choix des constituants .....	31
I.2.2. La prise en compte des moyens de production d'un béton chaud ou froid en fonction des conditions climatiques .....	31
II. Consistance adaptée aux moyens de mise en œuvre .....	32
II. Résistance du béton au jeune âge .....	33
IV. Résistance à la compression à 28 jours.....	35
IV.1. Résistance caractéristique garantie : quelle résistance viser au moment de l'étude ?	36
IV.1.1. La résistance caractéristique, grandeur statistique .....	36
IV.1.2. Application à un lot de la grandeur <<résistance caractéristique>> .....	36
IV.1.3. Résistance moyenne à viser au moment de l'étude .....	38
IV.2. Données expérimentales sur les moyens de régler la résistance à la compression ..	38
IV.3. Données expérimentales sur les paramètres susceptibles de modifier la résistance à la compression .....	39
IV.3.1. La conservation des éprouvettes .....	39
IV.3.3. L'air entraîné .....	40
IV.3.4. Autres paramètres .....	40
V. La durabilité du béton .....	41
V.1. Données expérimentales sur les moyens d'éviter la corrosion des armatures sous l'effet de la carbonatation atmosphérique .....	41
V.1.1. Le rôle de la carbonatation des bétons vis-à-vis de la corrosion des armatures ...	41
V.1.2. Le rapport E/C .....	42
V.1.3. La durée de cure du béton .....	43
V.1.4. La résistance à la compression .....	43
V.2. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons pour limiter la diffusion des ions chlorure .....	43
V.2.1 La diffusion des ions chlorure dans le béton comparée au modèle de diffusion élémentaire .....	44
V.2.2. Influence du rapport E/C et de la période de cure sur la pénétration des ions	

chlorure .....	45
V.3. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons aux attaques sulfatiques .....	46
V.4. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons aux attaques des eaux douces et acides .....	46
<b>CHAPITRE III : PROPOSITION DE FORMULATION ADAPTEE AU CONTEXTE TROPICAL .....</b>	<b>48</b>
I. Méthode de Dreux et Gorisse .....	49
I.1. Enoncé du problème .....	49
I.2. Principe de la méthode .....	49
I.3. Dosage en ciment et en eau .....	49
I.4. Courbe granulaire de référence .....	50
I.5. Proportion des granulats .....	51
I. Note de calcul de l'application de la méthode de Dreux et Gorisse .....	51
<b>PARTIE B: ETUDE EXPERIMENTALE DU BETON HYDRAULIQUE DE DENSITE NORMALE .....</b>	<b>58</b>
Chapitre I: CONFECTION DU BETON: procédures et méthodes techniques d'exécution ..	59
I. Confection du béton : procédure et méthode technique d'exécution .....	59
<b>CHAPITRE II : EXPERIMENTATION ET INTERPRETATION .....</b>	<b>64</b>
I.1. Caractéristiques des ingrédients utilisés pour l'expérimentation .....	64
I.2. Confection et mûrissement des éprouvettes .....	66
I.3. Présentation et interprétation des résultats .....	67
<b>PARTIE C: MAITRISE DE LA QUALITE .....</b>	<b>71</b>
Chapitre I : QUALITE ET CONTROLE DE LA QUALITE DU BETON .....	73
I. Application au béton hydraulique .....	74
I.1. Qualité du béton .....	74
I.2. Conformité d'une réalisation .....	75
I.3. Plan de contrôle du béton .....	75
I.4. Dossiers d'études des bétons .....	76
I.5. Les épreuves de convenance .....	77
I.6. Les épreuves de contrôle .....	77
Chapitre II - ASSURANCE DE LA QUALITE .....	79
I. Objectif: .....	80
I. La certification .....	80
II. Plan d'Assurance Qualité (PAQ) .....	82
II. Normes d'assurance de la qualité .....	84
Chapitre III : MANAGEMENT DE LA QUALITE .....	85
I. Principe de management de la qualité .....	85
II. Approche processus .....	86

---

---

III. Phases et étapes de la mise en œuvre du système de management de la qualité .....	87
IV. Coût d'Obtention de la qualité.....	90
IV.1 Qualité et non qualité.....	90
IV.2. Coût d'obtention de la qualité.....	92
IV.2.1 Concept et finalité.....	92
IV.2.2 Elément du COQ : .....	93
IV. L'éthique et le management.....	93
<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>97</b>

## LISTE DES TABLEAUX

1	les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P. 15301).....	7
2	Spécifications des résistances à la compression à des ciments suivant leur Classe .....	8
3	Types de sable selon la valeur de l'équivalent de sable.....	14
4	Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères chimiques).....	26
5	Condition pour qu'une eau soit utilisable (critère mécanique).....	26
6	Classes de consistances définies par l'affaissement au cône d'Abrams.....	33
7	Récapitulatif des proportions des constituants pour B20 pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	53
8	Récapitulatif des proportions des constituants pour B25 pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	55
9	Récapitulatif des proportions des constituants pour B30 pour 1m <sup>3</sup> de béton.....	57
10	Résultats essai équivalent de sable.....	64
11	Résultats essai poids spécifique.....	64
12	Masse volumique du béton durci.....	69
13	Récapitulatif des résultats de l'essai de compression simple.....	70
14	Plan de contrôle des bétons.....	76
15	Résultats analyses granulométriques sable.....	99
16	Résultats analyses granulométriques basalte 3/8.....	99
17	Résultats analyses granulométriques basalte 8/20.....	100
18	Résultats analyses granulométriques 16/25.....	100
19	Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	100
20	Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D ≠ 25 mm).....	100
21	Valeurs du coefficient K.....	101
22	Valeurs du coefficient de compacité.....	102
23	Dimension des contenants des différentes proportions des constituants du béton pour 1 sac de ciment.....	104

## LISTE DES FIGURES

1	Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	33
2	Processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors (1980).....	34
3	influence de la température du mûrissement sur la résistance à la compression d'un béton différente échéance, d'après Klieger (1958).....	35
4	Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton.....	42
5	Distribution des chlorures en fonction de la profondeur pour différents valeurs du paramètre $Dt$ .....	45
6	Influence du rapport $E/C$ sur le coefficient de diffusion effectif des ions chlorures.....	46
7	Image symbolique de la construction du béton.....	60
8	Courbe granulométrique sable, basalte 3/8, 8/20 et 16/25.....	66
9	Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment $C$ à prévoir en fonction du rapport $C/E$ et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône $A$ ).....	101
10a	Aperçu des lignes de rupture après écrasement.....	105
10b	Aperçu des lignes de rupture après écrasement.....	106

## INTRODUCTION

De nos jours comme autrefois d'ailleurs, le dosage classique du béton selon le principe du mélange de 800 litres de gravier, 400 litres de sable 4 à 5 sacs de ciment et de l'eau en abondance est devenu monnaie courante dans le secteur Bâtiment Travaux Pratiques (B.T.P).

Les rares entreprises qui s'engagent pour une étude rationnelle de formulation du béton qui répond aux critères de bonne performance se retrouvent souvent confrontés à des problèmes majeurs de conformité entre le dosage théorique et *in situ*.

Toutefois il convient de signaler que formuler un béton durable pose un problème de choix dans la qualité et la quantité des constituants ; lequel choix est fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage.

Pour remédier à ce problème il est nécessaire de faire intervenir des considérations techniques et économiques s'appuyant sur une réflexion globale touchant à la formule de béton dans son ensemble.

L'objectif principal de notre projet est de trouver les voies et moyens appropriés conformes aux normes spécifiées pour reproduire convenablement la formulation théorique sur le chantier afin d'obtenir les performances visées du béton en terme de consistance, résistance et durabilité tout en s'inscrivant dans notre contexte tropical et intégrant pleinement le label qualité dans la conduite des travaux.

En effet la formulation d'un béton, comportant deux volets (le choix des constituants d'abord la détermination des proportions ensuite), se pratique en principe en trois temps : choix et caractérisation des constituants suivis d'un calcul approché des proportions, un calcul de coin de table ; optimisation expérimentale suivie de l'épreuve d'étude de la formule retenue (vérification des performances atteintes et sensibilité de ces performances lorsque les proportions varient entre des points de consigne) ; au démarrage du chantier , épreuve de convenance qui a pour but de vérifier qu'avec les moyens du chantier il est effectivement possible de réaliser le béton proposé.

Nous allons en premier lieu faire l'étude théorique du béton hydraulique qui permettra de passer en revue les différents constituants du béton, sa formulation et ses objectifs.

Ensuite nous ferons une proposition de formulation du béton adaptée au contexte tropical et son expérimentation.

Enfin la dernière partie nous permettra d'aborder la notion de la qualité des travaux.

**Partie A**

**ETUDE THEORIQUE DU BETON HYDRAULIQUE DE DENSITE NORMALE**

## CHAPITRE I : LES CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un matériau formé par un mélange dans des proportions appropriées, de granulats, d'eau et de ciment, et éventuellement d'adjuvants et d'additions. Les granulats constitués de sable et de graviers, forment un squelette rigidifié dont les vides entre éléments sont remplis par une pâte formée d'un mélange d'eau et de ciment. Les propriétés du béton se développent par hydratation du ciment.

### I. Les ciments courants

#### I.1. Définition

Ce sont formellement des ciments conformes à la norme NF P 15-301 << Liants hydrauliques Ciment Courant Composition, Spécification et critère de conformité >>.

C'est une poudre minérale qui forme avec l'eau une pâte faisant prise et durcissement, même à l'abri de l'air notamment sous l'eau. Les ciments sont des liants hydrauliques formés de constituants anhydres, cristallisés ou vitreux, renfermant essentiellement de la silice, de l'alumine et de la chaux, et dont le durcissement est principalement dû à la formation par combinaison de ces constituants anhydres avec l'eau, de silicate et d'aluminates de calcium hydratés très peu soluble dans l'eau. Ils sont industriellement à base de clinker Portland dont l'un des composants, le silicate tricalcique, assure principalement le durcissement du ciment à travers un processus d'hydratation.

Par le choix de leur classe et type, une gamme très large de possibilités est offerte respectivement tant en résistance mécanique qu'en adaptation à l'environnement.

#### I.2. Les constituants des ciments courants

L'un des principaux constituants du ciment courant est le clinker qui assure la fonction liante permettant ainsi au béton de passer d'un état initial fluide moulable à un état final solide mécaniquement résistant. Il est composé d'au moins d'après les normes NF P15301 de deux tiers en masse de silicates de calcium (silicate bi et tricalcique) sa teneur en sulfate de calcium (gypse, plâtre ou anhydrite) lui confère cette aptitude à réguler la prise.

#### I.3. Le clinker portland et les grandes lignes de la fabrication du ciment

Le clinker se présente en granulés de dimension centimétrique et représente le produit qui sort du four de la cimenterie.

Il est principalement composé d'oxydes métalliques dont les quatre principaux sont : l'oxyde

de calcium (CaO), de silicium (SiO<sub>2</sub>), d'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et représentant 95% en masse des matières premières.

Les formules de Bogue permettent de calculer les proportions théoriques des phases du clinker sur la base des suppositions suivantes :

Les quatre phases principales du clinker que sont: Le silicate bicalcique (SiO<sub>2</sub>, 2CaO ou C<sub>2</sub>S), le silicate tricalcique (SiO<sub>2</sub>, 3CaO ou C<sub>3</sub>S), l'aluminate tricalcique (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO ou C<sub>3</sub>A) et l'alumino ferrite tétracalcite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4CaO ou C<sub>4</sub>AF).

Les silicates tricalcique, bicalcique, et aluminate tricalcique sont respectivement appelés : alite, bélite et célite.

- Tout le fer se trouve sous forme de C<sub>4</sub>AF ;
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> restant se trouve sous forme de C<sub>3</sub>A ;
- CaO restant et SiO<sub>2</sub> se combinent sous les formes C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S ;
- La combinaison entre les différents constituants est complète et les éléments mineurs présent dans le clinker n'interviennent pas.

Les formules de Bogue s'écrivent alors :

$$C_2S = 4,07 C^* - 7,60 S^* - 6,72 A - 1,43 F$$

$$C_3S = 8,60 S^* + 1,08 F + 5,07 A - 3,07 C^*$$

$$C_3A = 2,65 A - 1,69 F$$

$$C_4AF = 3,04 F$$

avec:

$$A = Al_2O_3$$

$$C^* = CaO \text{ (totale)} - CaO \text{ (libre)} - 1,27 CO_2 - 0,7 SO_2$$

$$F = Fe_2O_3$$

$$S^* = SiO_2 \text{ (totale)} - SiO_2 \text{ (non combine)}$$

Application numérique à partir des valeurs du tableau I A. II :

$$SiO_2 \text{ non combinée} = \text{insoluble} = 0,06$$

$$CO_2 = \text{supposée égal à la perte au feu} = 1,08$$

$$S^* = 21,1 - 0,06 = 21,04$$

$$C^* = 65,5 - 1,34 - 1,27 \times 1,08 = 62,79$$

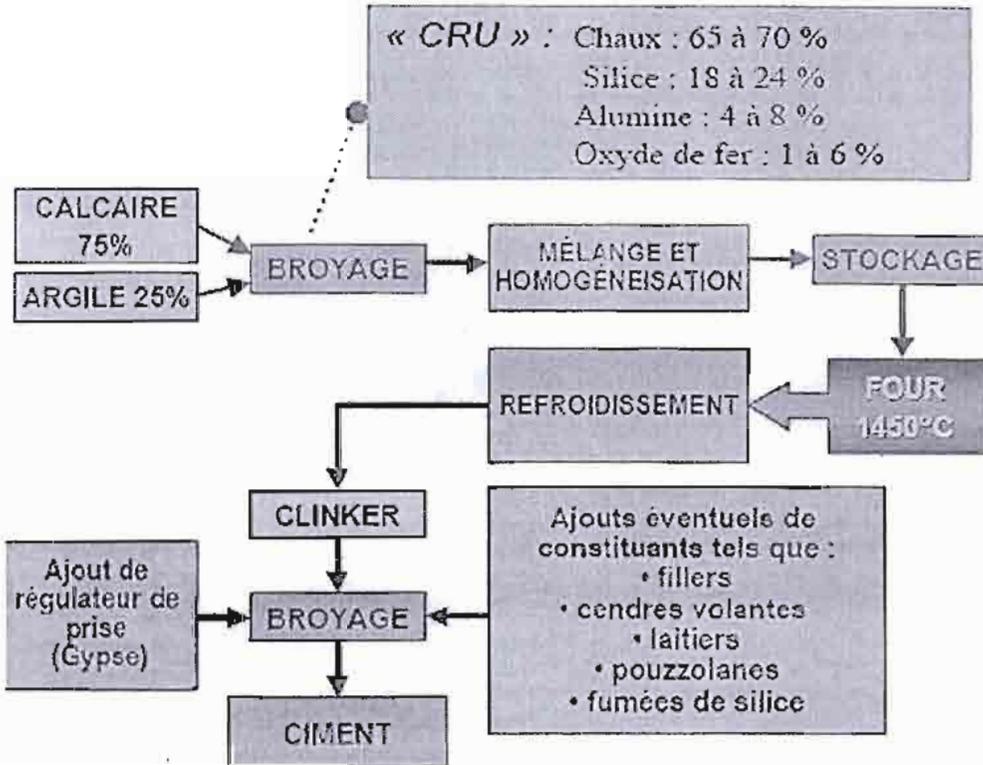
Les formules de Bogue donnent après application numérique :

$$C_2S = 57\% ; C_3S = 18\% ; C_3A = 8\% ; C_4AF = 10\%$$

Le clinker résulte de la réaction à haute température (autour de 1450°C) du mélange des quatre oxydes principaux. Ceux-ci proviennent, pour la plus grande part, des roches naturelles extraites de carrières, en général proche de l'usine : les calcaires apportent l'oxyde de

calcium ; les argiles la silice, l'alumine et l'oxyde de fer ; les marnes apportent les quatre oxydes à la fois, lorsqu'elles sont utilisées à la place de l'argile et du calcaire.

A partir de là se dessine le schéma type d'une cimenterie avec trois étapes : la préparation du cru, la cuisson du clinker et l'élaboration du ciment suivant le schéma ci dessous.



*Le clinker broyé en poudre avec quelques % de gypse, pour modérer la prise, conduit au ciment (CPA = ciment Portland Artificiel)*

Schéma N°1 : Processus de fabrication du ciment

#### ✓ La préparation du cru

Le cru est le mélange homogène, dans les bonnes proportions, des quatre oxydes non combinés, destiné à être introduit dans le four.

#### ✓ La fabrication du clinker par voie sèche

La cuisson du cru, introduit dans le four à l'état sec, comporte deux étapes, d'abord la décarbonatation du calcaire (entre 700 et 940°C) libérant l'oxyde de calcium, ensuite la clinkérisation (autour de 1450°C), c'est-à-dire la réaction de l'oxyde de calcium avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer.

#### ✓ Le broyage du clinker et l'élaboration du ciment

C'est la troisième étape du processus. Ces deux opérations sont simultanées sauf rares exceptions, les autres constituants à mélanger au clinker et, notamment, le sulfate de calcium étant introduits dans le broyeur. Un atelier de broyage associe aujourd'hui un broyeur et un

séparateur. L'ensemble constitue un circuit fermé dont seuls les grains suffisamment fins peuvent sortir, les grains les plus gros étant recyclés jusqu'à obtenir une finesse suffisante.

#### **I.4. Les types, classes et désignation des ciments courants**

##### **✓ Les cinq types de ciment suivant la norme NF P 15-301**

Le type informe sur les constituants entrant dans la composition du ciment et fixe les limites de leurs proportions. Celles-ci sont rapportées au noyau du ciment c'est-à-dire à l'ensemble formé par le clinker, les constituants autre que le clinker et les constituants secondaires, à l'exclusion des sulfates de calcium et des additifs. On a par convention :

$$(\text{Clinker}) + (\text{autres constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100$$

Les différents types de ciment sont :

- Le Ciment portland
- Le Ciment portland composé
- Le Ciment de haut fourneau
- Le Ciment pouzzolanique
- Le Ciment aux laitiers et aux cendres

Notation	Clinker (k)	Autres constituants	Constituants secondaires
<b>Ciment portland</b>			
CPA-CEMI	95-100	-	0-5
<b>Ciment portland composé</b>			
CPJ-CEMII/A	80-94	6-20*	-
CPJ-CEMII/B	65-79	21-35*	-
(*) les constituants autres que le clinker sont : <ul style="list-style-type: none"> <li>- le laitier granulé de haut fourneau (S), les pouzzolanes (Z), les cendres volantes silicieuses (V), les cendres volantes calciques (W), les schistes calcinés (T), les calcaires (L) ;</li> <li>- les fumées de silice (D), en proportion limitée à 10%.</li> <li>- les fillers (F), en proportion limitée à 5% (constituant secondaire compté avec les autres constituants).</li> </ul>			
<b>Ciment de haut fourneau</b>			
CHF-CEM III/A	35-64	36-65*	0-5
CHF-CEMII/B	20-34	66-80*	0-5
CLK-CEMIII/C	5-19	81-95*	0-5
*laitier granulé de haut fourneau (S) uniquement.			
<b>Ciment pouzzolanique</b>			
CPZ-CEMIV/A	65-90	10-35*	0-5
CPZ-CEMIV/B	45-64	36-55*	0-5
*les constituants autres que le clinker sont : les pouzzolanes naturelles (Z) et les cendres volantes silicieuses (V) ; les fumées de silice (D), en proportion limitée à 10%.			
<b>Ciment au laitier et aux cendres</b>			
CLC-CEMV/A	40-64	18-30*	0-5
CLC-CEMV/B	20-39	31-50*	0-5
*Pouzzolanes naturelles (Z) ou cendres volantes silicieuses (V).			
Les valeurs limites garanties sont en caractères gras.			

Tableau N°1: les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P 15-301).

## ✓ Les classes de résistance de ciment

La classe informe sur la résistance à la compression à vingt huit jours, pour les ciments notés R, elle informe aussi sur la résistance à deux jours.

La résistance à la compression du ciment est mesurée sur mortier conformément à la norme NF EN 196-1.

Les ciments sont classés suivant leur résistance normale à vingt huit jours et suivant leur résistance normale à deux jours dite au jeune âge.

Il existe trois classes de résistance normale à vingt huit jours, désignées par leur valeur caractéristique inférieure exprimée en MPa ( $N/mm^2$ ) soit : 32.5 – 42.5 – 52.5.

Pour chaque classe de résistance à vingt huit jours, il existe deux classes de résistance au jeune âge, appelées ordinaire ou élevée, la seconde étant distinguée par la lettre venant après l'indication de la classe de résistance normale à vingt huit jours (exemple : 42.5 R).

Les spécifications du ciment concernant sa résistance à la compression à vingt huit jours ou à deux jours dépendent de la classe à laquelle il appartient.

Classe	Résistance à la compression (Mpa)				
	Résistance au jeune âge (2 jours)		Résistance normale (28 jours)		
	LiG	Li	LiG	Li	Li
32.5	(a)	-	30	32.5	52.5
32.5 R	12	13.5			
42.5	10	12.5	40	42.5	62.5
42.5 R	18	20			
52.5	18	20	50	52.5	-
52.5 R	28	30			

Li et Li sont les limites inférieure (Li) ou supérieure (Li) caractéristiques.

LiG est la limite garantie, c'est-à-dire qu'aucune valeur élémentaire ne lui soit inférieure.

(a) pour les ciments de classe 32.5 la limite inférieure de résistance est garantie à 7 jours (et non à 28 jours comme pour les autres ciments) ; elle vaut 17.5 MPa.

Tableau N°2: Spécifications des résistances à la compression à des ciments suivant leur classe.

#### ➤ Les ciments adaptés à des usages spécifiques

En complément de la norme NF P 15-301, trois normes spécifient les ciments courants en tant qu'adaptés à des environnements ou à des usages spécifiques : ciment PM, ciment ES, ciment CP.

- *Ciment PM* : ciment pour travaux à la mer (NF P 15-317)

Les bétons exposés à l'eau de mer ou aux embruns marins doivent avoir un rapport E/C suffisamment faible, inférieur à 0,45 selon la norme P18-305. Cette première disposition est indispensable pour assurer la tenue des ouvrages.

Pour réduire encore les risques de dégradation, on utilise parmi les ciments courants ceux qui sont conformes à la norme NF P 13-317,

Ce sont :

- ✓ CHF-CEM III/A et B (Ciment de Haut Fourneau, pour travaux à la mer et en eaux à haute teneur en sulfates, contenant entre 36 et 65 % de laitier pour A et 66 et 80 % pour B), CLK-CEM III /C (Ciment de Haut Fourneau contenant entre 81 et 95 % de laitier) et CLC-CEM V/A et B (Ciment au Laitier et au Cendre, contenant entre 18 et 30 % de pouzzolanes naturelles ou cendres volantes pour le type A et entre 31 et 50 % pour le type B) ;
- ✓ Le ciment Portland (CPA-CEM I), le Ciment Portland Composite (CPI-CEM II/A et B), satisfaisant à des spécifications complémentaires réduisant notamment leur teneur en aluminat tricalcique.
- *Ciment ES* : ciment pour travaux en eau à haute teneur en sulfates (XP P 15-319)

Les ciments conformes à cette norme sont recommandés pour les travaux de fondation en terrain gypseux. Ce sont :

- ✓ CHF-CEM III/A et B, CLK-CEM III/C et CLC-CEM V/A et B
- ✓ CPA-CEM I, CPI-CEM II/A et B
- *Ciment CP* : ciment à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfure limitée (NF P 15-318).

Ils satisfont aux deux spécifications supplémentaires suivantes :

- ✓ La chaleur d'hydratation du ciment menée conformément à la norme 15-436 est à douze heures inférieure à 230 KJ /kg
- ✓ La teneur en ions sulfure du ciment  $S^{2-}$ , déterminée conformément à la norme NF EN 196-2, est limitée, suivant deux classes ; les ciments de classe CPI en contiennent moins de 0,5% ;

## II. Les granulats du béton

### II.1. Définition

Les granulats sont définis par la norme P 18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm appelés fines, sables, gravillons, cailloux ou graves destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base, et de

roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

En d'autres termes, ce sont des matières minérales qui, agglomérées par un liant constituent le squelette du béton.

On distingue les granulats naturels et les granulats artificiels :

- ✓ Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissent aucun traitement autre que mécanique c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection ;
- ✓ Les granulats artificiels résultent de la transformation thermique de roches de minerais de sous-produits industriels (laitier, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrage ou de bâtiments divers en béton et appelés souvent granulats recyclés.

### II.2. Le rôle des granulats

Selon un concept traditionnel, les granulats constituent le squelette du béton. Les granulats sont généralement moins déformables que la matrice de ciment, s'opposent à la propagation des microfissures provoquées dans la pâte par le retrait. Ils améliorent ainsi la résistance de la matrice.

Les granulats occupent environ 70% du volume d'un béton frais, il joue donc un rôle non négligeable. En dehors de l'aspect remplissage et support, leur granulométrie, leurs caractéristiques physiques (forme, textures), mécaniques (Los Angeles) et chimiques (composition et réactivité) influent sur les propriétés du béton plastique (frais) et du béton durci.

Idéalement ils doivent être inertes, durs, résistants et durables.

Cependant, le caractère « inerte » signifierait que les granulats ne réagissent pas avec le liant et ne participent à la résistance du béton que par la compacité qu'il lui confère. De nos jours cette idée de FERET (1892-1896) est totalement rejetée si l'on sait que d'après MATHER (1975) tous les granulats sont plus ou moins réactifs à des vitesses et intensités différentes.

Pour qu'un granulat puisse être un véritable constituant du béton, il faut :

- qu'il soit convenable du point de vue pétrographique
- qu'il joue son rôle de « produit de remplissage » de par ses caractéristiques géométriques, mécaniques et physiques.

Le choix d'un granulat est ainsi un facteur important de la composition d'un béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

## II.3. Les caractéristiques des granulats

### II.3.1. Les caractéristiques géométriques

#### ❖ Granulométrie

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis.

Les ouvertures sont normalisées et s'échelonnent de 0.08mm à 80mm

Il existe plusieurs types de classifications dont certaines sont un peu arbitraires.

Celle qui correspond mieux à nos réalités communément appelée classification d'*Atterberg* est la plus répandue de toutes, c'est la suivante :

- ✓ les blocs rocheux ou enrochement ont un diamètre moyen  $D$  supérieur à 200mm
- ✓ entre 20 et 200mm ce sont des cailloux
- ✓ entre 2 et 20mm ce sont des gravillons et graviers
- ✓ les sables ont un diamètre moyen compris entre 0.02 et 2mm
- ✓ les silts ou limon ont un diamètre moyen compris entre 0.002 et 0.02mm soit (2 à 20 microns) tandis que les argiles varient entre 0.2 et 2 $\mu$ m

L'arbitrarité des classifications granulométriques fait que pour caractériser un granulat, on tient compte en plus de la granulométrie d'autres paramètres tels que la forme des grains (arrondie, anguleuse), leur texture et de leur nature minéralogique (quartz, calcaire, granite).

Les domaines d'utilisation de ces différents granulats sont :

- Pour les sables fins : réalisation de mortiers de scellement, enduit, pose de carrelage
- Pour les sables fins de rivière : lier les briques (joints)
- Pour les sables moyens de rivière : lier les moellons ou parpaing
- Pour les sables gros de rivières : coffrages plus grands, semelles, chapes
- Pour les cailloux : gros béton et blocage
- Au-delà de 100mm, on parle de galet (quand ils sont roulés, donc naturels) ou de moellons concassés (donc artificiels)
- On parle de graves lorsque le granulat est tel que la plus petite dimension est inférieure à 0.5mm et la plus grande dimension supérieure à 6.3mm.

#### ❖ Notion de classes granulaires

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité c'est-à-dire la distribution dimensionnelle des grains déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à

mailles carrées dans la série normalisée NF ISO 565 (indice de classement X 11-501).

Ils sont désignés par  $d$  et  $D$  qui représente respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions de l'application commerciale des produits. Ils sont appelés  $d/D$  (ou  $0/D$  si  $d$  est inférieur à 1 mm).

Le projet de révision de la norme P18-101 (future norme P 18-540, partie 1) retient pour les dimensions  $d$  et  $D$  exprimées en millimètre des classes granulaires désignant les produits commerciaux, la série suivante :

0 - 1 - 2 - 4 - 6.3 - 8 - 10 - 12.5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31.5 - 40 - 63 - 125mm si nécessaire, les coupures à 2.5 - 3.15 - 5 - 25 - 50 et 90mm peuvent être utilisées.

Les différentes familles de granulats (projet de norme P 18-540, partie 1) sont les suivantes :

- ✓ fillers  $0/D$  où  $D \leq 2$  mm et contenant au moins 70% de passant à 0,063 mm
- ✓ sable  $0/D$  où  $D \leq 6.3$  mm (ramené à 4mm pour le sable à béton)
- ✓ sablons  $0/D$  où  $D \leq 1$ mm et contenant moins de 10% de passant
- ✓ gravillons  $d/D$  où  $d \geq 1$ mm et  $D \leq 31.5$
- ✓ cailloux  $d/D$  où  $d \geq 20$ mm et  $D \leq 125$ mm
- ✓ graves  $0/D$  où  $D > 6.3$ mm.

#### ❖ Module de finesse

La norme NF P 18-304 le définit de la façon suivante : « Le module de finesse d'un granulat est égal à  $1/100^e$  de la somme des refus, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série suivante :

0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5.0mm » ce qui correspond aux modules 23 - 26 - 29 - 32 - 35 - 38.

Un sable à béton devrait posséder un module de finesse ( $M_f$ ) compris entre 2.2 et 3.2 et la tolérance sur cette valeur doit être  $\pm 20\%$ .

Plus précisément lorsque  $2.2 < M_f < 3.2$  on a un béton à ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités ;

Lorsque  $M_f < 2.2$  le béton procure une bonne facilité de mise en place au détriment probable de la résistance et enfin lorsque  $M_f > 3.2$  le béton a une résistance élevée mais on aura en général une ouvrabilité moins bonne et des risques de ségrégation.

> 0.25 pour les granulats de 12.5 à 25mm

$C > 0.15$  pour les cailloux de 25 à 50mm

### II.3.2. Les caractéristiques physico-chimiques

#### ❖ Masse volumique en vrac (ou masse volumique apparente)

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement des granulats secs occupant l'unité de volume.

Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis : (Norme NF P 18554 et 18555).

La masse volumique réelle du granulat (vide entre grains exclu) est de 2500 à 2900 kg/m<sup>3</sup>.

#### ❖ Porosité

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume total des grains, exprimés en pourcentage.

La porosité des granulats courants est en général très faible. Cependant elle est importante dans le cas des granulats légers. La compacité est de 0.70 pour le sable tassé et 0.60 pour le sable en vrac alors que pour les graviers les valeurs respectives sont 0.65 et 0.55.

#### ❖ Propreté des granulats

Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur limite acceptable est comprise entre 2 et 5% selon le type de béton.

##### • Pour les graviers

La norme française (AFNOR) préconise que le pourcentage d'impureté susceptible d'être éliminées par le lavage (argile, limon, poussière) ne dépasse pas 5% sinon on risque de compromettre l'adhérence du mortier sur le granulat.

Pour les cailloux, graviers et gravillons, elle est obtenue par le pourcentage de passant au tamis de 0.5mm (tamisage effectué sous l'eau).

Pour les granulats concassés, lorsque la valeur du passant à 0.5mm est supérieure à 3%, il est nécessaire d'effectuer un essai complémentaire appelé essai au bleu méthylène (Norme NF P 18-598).

Le pourcentage d'impureté est déterminé comme suit :

soit  $P_1$  la masse du matériau non lavé et sec ;

soit  $P_2$  la masse du matériau lavé et sec ;

la masse  $P$  des impuretés est alors :  $P = P_1 - P_2$ .

D'où le pourcentage est de :  $\left(\frac{P}{P_2}\right) * 100$

##### • Pour les sable

#### ✓ Eléments argileux

Dans le cas des sables, la propreté est fournie par l'essai appelé « équivalent de sable » qui consiste à séparer le sable des matières argileuses ou fines, qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage.

La procédure est la suivante :

On agite 120g de sable sec dans une solution lavante à raison de 90 allers retour en 30 secondes avec une amplitude de 200 mm, puis on laisse reposer pendant 20 minutes : la hauteur du dépôt de sable visible étant  $h_1$  et  $h_2$  celle de la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension), l'équivalent de sable est :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Il est conseillé d'utiliser du sable humide pour ne pas perdre des éléments fins.

#### ✓ Matières organiques

D'autres impuretés sont susceptibles de nuire aux qualités du béton. Il s'agit de particules organiques qui peuvent perturber son durcissement, de sels tels que les sulfates ou les sulfures, qui sont à l'origine de phénomène de gonflement ou de tâches.

Cet essai (décrit dans la norme NF P18301), réalisé à l'aide de soude caustique permet de rejeter les sables contenant trop de matière organique.

La valeur limite de l'équivalent de sable à vue (ES<sub>vue</sub>) prévue par norme NF P 18-301 est de 75, sauf pour les sables de concassage et de broyage où cette valeur limite est de 65.

Pour des sables très propres on peut être amené à exiger un ESV au moins égal à 80

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour béton de qualité
65 < ES < 75	60 < ES < 70	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 < ES < 85	70 < ES < 80	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileuses Convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75 ; ES à vue = 80)
ES > 85	ES > 80	Sable très propre : l'absence de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité à combler par une augmentation du dosage en eau

**Tableau N°3:** Types de sable selon la valeur de l'équivalent de sable.

#### ➤ Absorptivité

L'absorptivité des granulats influe sur la maniabilité des bétons. Plus un granulat est absorbant plus la maniabilité diminue si le granulat a été mis à sec au moment du malaxage puisque une partie de l'eau de gâchage est absorbée par les granulats alors qu'on n'en avait pas tenu compte dans le calcul du dosage.

L'absorptivité est le rapport de l'augmentation de masse entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon. Elle doit être < à 5%.

### II.3.3. Les caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression.

#### ➤ Essai Micro Deval

C'est un essai dont le principe est de reproduire dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Les modalités de cet essai font l'objet de la norme NF P 18-572.

Il se pratique sur les fractions : 4/6.3 – 6.3/10 ou 10/14 de 500g de gravier placés avec une charge de 2 à 5 kg de billes d'acier de 10mm de diamètre dans une jarre cylindrique remplie d'eau. On fait tourner 15 minutes et on récupère le passant au tamis de 2 mm, dont le poids

est P. Le coefficient Micro-Deval est :  $M_D = \frac{P}{500} \times 100$

Le coefficient  $M_D$  doit être inférieur à 35 pour les usages autres que routiers.

L'essai Micro Deval peut s'adapter aux bétons car les frottements mutuels des granulats peuvent entraîner de la production de sable et de fines.

#### ➤ Essai Los Angeles

Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573. Le coefficient Los Angeles calculé à partir du passant au tamis de 1.6mm, mesuré en fin d'essai sur les classes granulaires 4/6.3 – 6.3/10 ou 10/14 de 5 kg de graviers placés avec une charge de 8 à 12 boulet de 417 g de masse dans un tambour dont une génératrice intérieure est munie d'une plaque suivant que D est inférieur à 40mm ou compris entre 40 et 80mm, la masse de l'échantillon sera de 2.5 ou 5 kg et la charge abrasive de 8 ou 12 boulets, avec 500 ou 1000 tours.

Le coefficient Los Angeles est :

$$L_A = \frac{P}{5000} \times 100$$

Pour un béton de classe A (exceptionnel)  $L_A < 35$

Pour un béton de classe B (qualité bonne)  $L_A < 40$

Pour un béton de classe C (Béton courant)  $L_A < 45$

### ➤ Friabilité des sables

Pour les sables on fait un essai de friabilité ; la friabilité est le caractère de ce qui peut se réduire en fragments ou en poudre. le seuil de friabilité est fixé à 40, ce coefficient est le rapport de la masse effritée à la masse initiale. Le principe consiste à faire subir pendant 15 minutes à une jarre contenant 500g de sable 0/2 à 2.5 kg de bille d'acier de 10 mm de diamètre une rotation et à récupérer le passant au tamis de 50 $\mu$ m.

Le coefficient de friabilité est égal à :

$$FS = 100 \times \frac{P}{500}$$

FS étant d'autant plus friable que le sable est friable.

Les granulats pour mortiers et béton hydrauliques doivent répondre aux spécifications de la NFP 18-301 :

• Friabilité des sables :  $FS \leq 60$

• Coefficient de Los Angeles :  $LA \leq 40$

### III. Les Adjuvants pour béton

Aujourd'hui, on attend plus du béton que jamais auparavant; on l'utilise dans une variété sans cesse croissante de constructions de formes diverses et pour des fins bien particulières. Il doit souvent résister aux conditions rigoureuses du milieu, et faire face à une forte concurrence, surtout en ce qui concerne la production en série et la programmation des travaux. Cette évolution a nécessité de la part de l'architecte et du constructeur une connaissance approfondie de toutes les possibilités et limites des matériaux qu'ils emploient.

L'adjuvant a pour objet de modifier une ou plusieurs propriétés, soit du mélange plastique, soit du béton durci. Il permet ainsi d'adapter le béton à la fabrication de produits et aux méthodes de construction, ce qui n'est pas toujours réalisable par d'autres moyens. C'est le cinquième ingrédient du béton, qui vient s'ajouter aux quatre constituants fondamentaux : le ciment portland, l'eau, le sable et la pierre. Aujourd'hui, les normes sur le béton régissent l'emploi et le rôle de ces agents, qui sont devenus partie intégrante de la technologie et de la pratique du béton.

Bien que l'emploi d'un adjuvant puisse résoudre un problème particulier, il peut en même temps en créer d'autres. Il faudra donc les prévoir. Tout comme les médicaments, les

adjuvants produisent des effets secondaires qui peuvent être bénéfiques, inoffensifs ou dommageables, selon le cas. Le producteur de béton peut être conscient de ces effets, mais peut ignorer s'ils seront nuisibles à la structure. Par conséquent, l'architecte et le constructeur doivent être bien informés sur la nature des adjuvants, leur avantage et les problèmes inhérents à leur utilisation. Ceci est particulièrement important dans le bétonnage sur place, où le béton est fabriqué sur le chantier.

### III.1. L'influence des adjuvants sur l'ouvrabilité du béton

Les premiers adjuvants ont **selon** toute probabilité été utilisés dans le but d'améliorer le malaxage, la mise en place et la finition du mélange plastique. C'est une considération importante pour l'architecte, parce que cela permet de réduire ou d'éliminer le ressuage, la ségrégation, la formation de **nids d'abeilles** et autres défauts superficiels disgracieux pouvant résulter du manque de **plasticité du mélange**. La plupart des adjuvants utilisés, qu'ils soient agents entraîneurs d'air, retardateurs de prise, ou réducteurs d'eau, amélioreront l'ouvrabilité. Bien que cette amélioration soit considérée comme un effet secondaire, c'est souvent la principale raison pour laquelle on a recours aux adjuvants, par exemple, un adjuvant plastifiant ...

*Adjuvant plastifiant réducteur d'eau* : à consistance égale, il permet une réduction du dosage en eau et, à dosage en eau constant, il permet une augmentation de l'affaissement au cône d'Abrahams.

Par rapport au témoin	
Réduction du dosage en eau	$\geq 5 \%$
Résistance à la compression, à 7 et 28 jours	$\geq 110 \%$

*Adjuvant superplastifiant-haut réducteur d'eau* : sa définition est identique à celle du plastifiant réducteur d'eau mais la réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement au cône sont plus marquées.

Par rapport au témoin et à consistance constante	
Réduction du dosage en eau	$\geq 12 \%$
Résistance à la compression à 1 jour	$\geq 140 \%$
Résistance à la compression à 28 jours	$\geq 140 \%$

Par rapport au témoin et à dosage en eau constant	$\geq 120 \text{ mm}$
Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams à partir d'une valeur initiale de $30 \pm 10 \text{ mm}$	$\geq 30 \text{ mm}$
Affaissement au cône d'Abrams après 30 minutes	

L'accroissement plus grand de la résistance à la compression à un jour s'explique par un effet thermique accélérant les réactions d'hydratation du ciment.

*Adjuvant rétenteur d'eau* : il réduit le départ d'eau par ressuage.

Par rapport au témoin	
Quantité d'eau ressuée	$\leq 50 \%$

Le béton frais a tendance à se compacter légèrement et progressivement depuis le moment où le béton est mis en œuvre dans les coffrages jusqu'au début de prise ; une partie de son eau interne, en quelque sorte essorée, remonte à la surface : c'est le phénomène de ressuage qui entraîne des déformations indésirables et même des fissures.

### III.2. Entraînement d'air et durabilité

L'usage est d'utiliser deux mots différents pour l'air normalement emprisonné par le béton lors de sa mise en place (air occlus) et l'air volontairement introduit grâce à un adjuvant approprié (air entraîné). Un béton courant contient, en général, entre 1 et 2 % d'air occlus. Les cycles de gel et de dégel peuvent endommager le béton ordinaire en un temps relativement court, particulièrement s'il est exposé aux sels de déverglaçage qu'on répand habituellement sur les chaussées et les trottoirs. Le béton qui renferme de petites bulles d'air entraînées par un adjuvant entraîneur d'air résistera à ces conditions rigoureuses. Etant donné qu'il n'y a pas d'autres solutions et que l'amélioration de la durabilité est si marquée, toutes les normes de béton exigent maintenant l'air occlus, lorsque le béton doit être exposé à un mouillage continu ou fréquent.

Les agents entraîneurs d'air qui produisent de bons réseaux de bulles d'air dans la pâte de ciment sont formulés à partir de matières organiques comme les résines de bois, les hydrocarbures sulfonés, et les détergents synthétiques. Les proportions spécifiées des agents pour produire de 5 à 7 % d'air, qui est normalement requis, sont de l'ordre de 1 % du poids du ciment. La baisse de résistance qui peut découler de la présence d'air occlus, est généralement compensée par la réduction du rapport eau ciment, rendue possible grâce à une meilleure

ouvrabilité.

On a établi que l'espacement des bulles d'air doit être de l'ordre de 0.008 pouce, pour assurer une meilleure durabilité possible.

### III.3. Accélérateurs de prise et de durcissement

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont, en général, des sels minéraux. Le chlorure de calcium est le plus connu. On admet généralement que le chlorure de calcium favorise la croissance du silicate de calcium hydraté et demeure sans contestation l'accélérateur de prise et de durcissement le plus puissant, le plus économique et le plus utilisé.

#### III.3.1. Accélérateur de prise

Il avance le début de prise ; c'est-à-dire le moment où le béton frais passe de l'état plastique à l'état rigide.

Pour le bétonnage par temps froid, on fait beaucoup usage d'un adjuvant minéral, le chlorure de calcium qui est agréé par la COPLA. Contrairement à certaines opinions bien ancrées, il n'est pas efficace comme antigel, et ne constitue donc pas un substitut au chauffage et à l'isolation nécessaires lorsque la température tombe au-dessous du point de congélation. Il est efficace pour maintenir un gain de résistance satisfaisant à de basses températures au-dessus du point de congélation.

A dose normale de 1 à 2 % du poids du ciment, le chlorure de calcium accélère la prise, de même que le taux d'accroissement de la résistance du béton plastique. En pratique, une diminution du temps de prise peut être nécessaire ou souhaitable, pour permettre de finir plus tôt les planchers pour la réduction des pressions sur les coffrages, ou pour la prise rapide dans le bétonnage par projection. Comme accélérateur de gain de résistance, il peut permettre une application hâtive des charges et réduire le temps de cure.

Malheureusement, le chlorure de calcium provoque un certain nombre d'effets secondaires qui sont généralement dommageables. Toutefois, ces effets ne sont pas importants, et l'on peut normalement y remédier en prenant les dispositions nécessaires. Ils sont principalement associés aux problèmes de la corrosion de l'armature, de retrait au séchage, de fluage, de dégagement de chaleur et de résistance à l'action des sulfates. Le triéthanolamine est un accélérateur organique utilisé dans les formules pour atténuer les effets des retardateurs de prise. Sous ce rapport, il est utilisé dans certains adjuvants réducteurs d'eau et entraîneurs d'air.

On peut obtenir des effets similaires à ceux produits par les accélérateurs en utilisant un ciment plus fin et des températures plus élevées, ces moyens sont souvent préférables, tant du point de vue qualité que coût.



### III.3.2. Adjuvant accélérateur de durcissement :

Il accélère le développement de la résistance du béton à court terme. La résistance à la compression à 24 heures et à 200C, par rapport au témoin à la même température est supérieure à 120%. Ce qui est dit ci-dessus sur les adjuvants chlorés s'applique également aux accélérateurs de durcissement.

Ils servent, d'une façon générale à réduire les délais d'exécution : décoffrage, manipulation des pièces, mise en précontrainte, chargement. Il faut noter que l'accélération est d'autant plus marquée que le durcissement est moins avancé.

### III.4. Retardateurs de prise

Ces dernières années, on s'est rendu compte que le bétonnage par temps chaud doit se faire selon des méthodes spéciales. Le raffermissement et le durcissement prématurés peuvent créer des difficultés de déchargement, de mise en place et de consolidation du béton frais. On fait maintenant grand usage d'adjuvants retardateurs de prise dans de tels cas, particulièrement dans le béton prêt à l'emploi, lorsqu'on prévoit de le transporter sur une longue distance par temps chaud. Ils permettent au béton de garder une consistance plastique durant une période plus longue sans que l'accroissement de la résistance ne soit affecté de façon significative. Il existe d'autres solutions qui consistent à protéger les granulats des températures excessives en les couvrant et en refroidissant le béton avec de la glace dans l'eau de gâchage.

Dans d'autres cas, un retardateur de prise peut être utile : il peut éliminer les joints indésirables entre les coulées, en assurant que le béton de la coulée précédente demeure assez longtemps plastique pour que la coulée suivante s'y joigne bien. Il peut contribuer à réduire les températures maximales dans le béton de masse en répartissant le dégagement de chaleur de réaction sur une période plus longue. On s'en sert aussi dans les coulis d'injection, le béton pompé ou placé selon d'autres procédés.

Les retardateurs de prise utilisés dans le marché proviennent principalement de deux sources, les sels des acides lignosulfoniques et des oxacides carboxyliques. On utilise aussi les détergents, les sucres, et plus récemment, les silicones. Le dosage varie de 0.2 à 1 % du poids du ciment, l'excès étant un risque évident. On a rapporté des cas où le béton n'avait pas encore durci après deux semaines apparemment en raison d'un excès de dosage.

Les adjuvants retardateurs de prise, de plus, agissent comme réducteurs d'eau et plastifiants. Le type lignosulfonate a tendance à réduire le ressuage et entraîne de l'air, alors que le type oxacide carboxylique produit l'effet contraire. Pour tous ces usages, c'est le retard de début de prise qui est recherché ; mais il a pour conséquence inéluctable un retard de fin de prise qui peut avoir pour inconvénient d'augmenter les délais d'exécution du chantier. C'est pourquoi

la performance demandée est une augmentation significative du temps de début de prise conjuguée avec une augmentation limitée du temps de fin de prise. Les deux peuvent produire des effets désirables ou nuisibles, selon les exigences des travaux et cours; les deux types ont tendance à augmenter la vitesse de durcissement, c'est-à-dire qui se traduit par une diminution d'affaissement, fait indésirable. L'ennui avec ces adjuvants est que leur présence dans le béton, particulièrement leur quantité, n'est pas facile à déterminer.

### III.5. Réducteurs d'eau

La propriété de la plupart des adjuvants chimiques de réduire l'eau est recherchée pour deux raisons. En abaissant la quantité d'eau de gâchage requise, ils augmentent la résistance à la compression pour une teneur en ciment et un affaissement donnés. Ceci permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés. Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher qui entre dans la composition du béton. Il ne faut toutefois pas pousser trop loin l'économie de ciment; cela pourrait nuire à la qualité du béton, par exemple, quant à l'absorption, la perméabilité, la durabilité. Au lieu de se servir d'un réducteur d'eau, on peut recourir à la compaction par vibration du béton à faible affaissement.

Les réducteurs d'eau sont vendus comme tels, bien que leurs constituants soient les mêmes que ceux des retardateurs de prise (lignosulfonates ou hydroxy-carboxylates). Ils sont formulés de façon à réduire ou éliminer les propriétés des retardateurs de prise. Ils possèdent donc les mêmes effets secondaires que ces derniers.

### III.6. Adjuvant hydrophobant :

Il réduit l'absorption capillaire du béton durci.

Par rapport au témoin	
Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	de $\leq 50\%$
Absorption capillaire pendant 28 jours, après 28 jours de conservation	de $\leq 60\%$

### III.7. Autres types d'adjuvants

Les adjuvants hydrofuges et imperméabilisants ont pour but de réduire la pénétration d'eau dans les pores les plus grands du béton. Ils comprennent les savons, les stéarates butyliques, l'huile minérale et les émulsions de bitume. Généralement, on peut obtenir un béton suffisamment imperméable et de faible absorption en recourant à de bonnes méthodes de

fabrication.

On évite normalement les problèmes de corrosion de l'acier d'armature en le couvrant d'une épaisseur suffisante de béton, mais ces problèmes peuvent s'aggraver à cause de la présence de chlorure de calcium ou de la carbonatation. L'usage d'adjuvants inhibiteurs de corrosion est limité dans l'industrie de produits préfabriqués en béton. Ex : benzoate de sodium, chlorures ferriques et stanneux, et nitrite de sodium.

Lier le béton fraîchement coulé à du vieux béton constitue un problème toujours actuel. Dans ces cas-là, on peut utiliser les mortiers modifiés avec des adjuvants adhésifs, comme les chlorures et les acétates de polyvinyle, les acryliques et les co-polymères de butadiène styrène.

Les types d'adjuvants étudiés jusqu'à présent sont ce qu'on appelle des adjuvants chimiques, qu'on distingue des ajouts en poudre, comme les cendres volantes. Les adjuvants chimiques sont ajoutés en très petites quantités, de l'ordre de 1 % du poids du ciment, tandis que les « ajouts » en poudre sont ajoutés en quantités variant de 10 à 50 % du poids du ciment.

Les cendres volantes et les matériaux pouzzolaniques, comme les cendres volcaniques, l'argile et les schistes calcinés, sont utilisés pour remplacer une partie du ciment. Ils ont une certaine valeur agglutinante et peuvent ainsi contribuer à la résistance finale et l'imperméabilité. On les utilise pour réduire le dégagement de la chaleur dans les bétons de masse, réduire le ressuage et la ségrégation, améliorer l'ouvrabilité, réduire l'expansion excessive causée par la réaction alcalis-granulats, et souvent, simplement réduire le coût du ciment. Etant donné qu'on les ajoute en assez grandes proportions, et qu'ils sont de nature minérale, leurs effets sont moins complexes et il y a moins de possibilité d'effets secondaires que dans le cas des adjuvants chimiques organiques.

### III.8. Applications et problèmes généraux

Les exigences et les problèmes rencontrés en cours d'utilisation des adjuvants du béton varient considérablement selon les procédés de fabrication et de mise en place. Dans les usines d'éléments préfabriqués, il y a un contrôle individuel de tous les matériaux et des opérations, à partir du choix des constituants jusqu'au vieillissement final du produit. Les problèmes peuvent ainsi être réduits au minimum. On fait grand usage des accélérateurs pour réduire les périodes de cure, des réducteurs d'eau pour diminuer le coût et des retardateurs pour assurer l'homogénéité des gros éléments. Le bétonnage sur place se fait également sous une seule autorité, et par conséquent le contrôle est bon.

La fabrication du béton prêt à l'emploi pose un problème du fait que le producteur perd le contrôle lorsque l'entrepreneur des travaux prend la relève. Cette division d'autorité peut

amener des difficultés, comme celles qui ont trait aux effets des adjuvants. Le concepteur et le constructeur peuvent hériter de conséquences fâcheuses si on ne prend pas les bons moyens de garantir un contrôle adéquat de la qualité. En préfabrication, l'architecte et le constructeur peuvent trouver qu'il n'est pas nécessaire de se préoccuper des détails concernant la composition du béton, ni leurs propriétés accessoires parce que les produits sont finis quant à leur forme, comme ceux de verre et de bois. Mais pour le bétonnage sur place, le producteur, l'entrepreneur et le constructeur sont impliqués dans la qualité et le rendement du béton fini dépendra de leurs connaissances et de leurs décisions conjuguées. Ne s'appuyer que sur un devis n'est pas une garantie absolue. En fait, un bon devis de béton doit être basé sur des connaissances techniques approfondies des matériaux et des procédés en question.

Le choix d'un adjuvant approprié à un travail donné peut être difficile. Il faut avant tout se demander s'il est, en fait, nécessaire. On doit toujours considérer d'autres possibilités. Quel que soit le type d'adjuvant, il y a généralement plusieurs marques de commerce sur le marché, chacun comptant plus d'un ingrédient de base. Comme c'était vrai pour les retardateurs de prise, ceci signifie divers effets secondaires. Les produits chimiques sont généralement complexes et parfois variables quant à leur composition, et les formules changent souvent sans que l'utilisateur en soit averti.

Le concepteur doit au moins, être conscient de ces considérations d'ordre général. Il doit se rendre compte qu'il faudra prendre des mesures additionnelles nécessaires pour tenir compte de l'emploi d'un adjuvant : la manutention, l'entreposage, les préparations et l'addition. Par exemple, on doit recourir à un mode d'entreposage spécial dans le cas d'un adjuvant sensible à la température; et plusieurs adjuvants chimiques, contrairement à ce que l'on pense généralement, forment des suspensions colloïdales plutôt que de véritables solutions. Le danger de coagulation et de sédimentation qui s'ensuit peut être évité par une légère agitation. L'équipement d'alimentation doit être essentiellement à l'épreuve du dérèglement et fréquemment calibré.

Toutes les formules de mélange de béton nécessitent des modifications lorsqu'on doit y inclure un adjuvant. La plupart des adjuvants organiques sont influencés par le type et la source du ciment, la granularité des granulats, le rapport eau-ciment et la température. Il est donc nécessaire de s'assurer que l'adjuvant à utiliser a été bien éprouvé. Les résultats d'essais fournis par le fabricant de l'adjuvant ou les résultats d'essais fait sur des matériaux similaires ne sont pas suffisants. Les essais doivent être faits à l'usine avec les matériaux qu'on a l'intention d'utiliser.

#### IV. L'eau de gâchage

C'est une eau incorporée au mélange liant et granulats afin d'enclencher sa prise et conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme.

##### IV.1. Types d'eau

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée. La plus accessible et aussi celle qui sert de référence, c'est l'eau potable distribuée par le réseau du service public. Les autres les plus utilisées sont les eaux de pompage des nappes phréatiques, de cours d'eau, l'eau de mer, les eaux de rejets industriels...

##### IV.2. Aptitudes à l'emploi

Toutes ces eaux ne présentent pas les mêmes risques vis-à-vis du béton. Ainsi, la norme NF P 18-303 sur l'eau de gâchage caractérisait l'aptitude à l'emploi selon deux critères :

- la teneur en matières en suspension (2 à 5g/l),
- la teneur en sels dissous (15 ou 30 g/l).

Ces critères sont insuffisants car toutes les matières en suspension ne sont pas également nocives, pas plus d'ailleurs que tous les sels solubles ne sont nocifs. C'est la raison pour laquelle cette norme, qui est toujours en vigueur sera remplacée à terme par la norme EN 1008, en cours d'élaboration, qui sera plus complète et plus précise. Dans cette norme, toute eau non potable sera jugée sur la base d'analyses chimiques et, éventuellement, d'essais physiques.

##### IV.3. Critères d'évaluation de la norme « EN 1008 »

Il convient de distinguer les critères permettant d'évaluer l'aptitude à l'emploi d'une eau de gâchage et celles qui permettent de juger de l'agressivité d'une eau vis-à-vis du béton durci. Ils peuvent parfois être voisins, mais sont souvent différents. A titre d'exemple, une eau très pure est une excellente eau de gâchage, mais elle est agressive vis-à-vis du béton durci. Ces critères sont d'ordre sensoriel, chimique ou mécanique. Elles permettent de décider de l'opportunité d'employer des eaux particulières telles que l'eau de mer, les eaux acides ou les eaux de recyclage. Cependant, il est rappelé qu'une eau inadéquate peut ralentir la prise, réduire les résistances mécaniques, favoriser la corrosion des armatures, voire l'alcali réaction.

##### IV.3.1. Les critères sensoriels :

- L'odeur : une eau malodorante doit être suspectée de contenir des matières en suspension en décomposition.
- La vue : une eau qui, après décantation, garde une couleur foncée, doit être considérée

comme douteuse.

#### IV.3.2. Les critères chimiques

La norme a retenu quinze (15) critères d'évaluation de l'eau de gâchage. Chacun de ces critères fait l'objet d'une double spécification, suivant que l'on est en dessous ou au dessus d'une certaine valeur limite (tableau 4).

En dessous de cette valeur limite, l'eau peut être utilisée sans risque et sans avoir à faire d'autres contrôles sur mortier ou béton. Au dessus de cette valeur moyenne, l'eau doit être considérée soit comme douteuse, soit comme inutilisable, selon le critère considéré. Si l'eau est jugée douteuse, elle doit faire l'objet d'un contrôle sur mortier ou béton.

Ions à considérer	Utilisables si	Renvoi aux conditions du tableau III	Impropos à l'utilisation
Chlorures (Cl <sup>-</sup> ) :			
- Béton précontraint/coulis	≤ 600mg/l		> 600 mg/l*
- Béton armé	≤ 2000mg/l		> 2000 mg/l*
- Béton non armé	≤ 4500mg/l	> 4500 mg/l	
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	≤ 2000mg/l	> 2000 mg/l	
Sucre :			
- Glucose	≤ 100mg/l	> 100 mg/l	
- Saccharose	≤ 100mg/l	> 100 mg/l	
Phosphates (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	≤ 100mg/l	> 100 mg/l	
Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	≤ 500mg/l	> 500 mg/l	
Zinc (Zn <sup>2+</sup> )	≤ 100mg/l	> 100 mg/l	
Sulfures (S <sup>2-</sup> )**	≤ 100mg/l	> 100 mg/l	
Sodium (Na <sup>+</sup> )***	au total		
Potassium (K <sup>+</sup> )	≤ 1000mg/l		> 1000 mg/l

Tableau N°4 : Conditions pour qu'une eau soit utilisable (critères chimiques)

\* l'eau peut néanmoins être acceptée si la teneur maximale en chlorure (Cl<sup>-</sup>) du béton est inférieur à 0,2% par kg de ciment (béton précontraint), 0,4% par kg de ciment (béton armé), 1% par kg de ciment (béton non armé).

\*\* N'est exigée que pour les bétons et les coulis en contact direct avec les aciers de précontrainte.

\*\*\* N'est exigé qu'en cas risque de réaction des granulats avec les alcalins (granulats potentiellement réactifs).

#### IV.3.3 Les critères mécaniques

L'aptitude d'une eau considérée comme douteuse se vérifie sur deux types d'essais : un essai de prise sur mortier et un essai de résistance mécanique à 7 jours sur mortier ou béton. Une

eau douteuse peut être utilisée comme eau de gâchage si elle n'altère pas la prise et la résistance au-delà de certaines valeurs limites précisées dans la norme (tableau N°5).

Type d'essais		Sur le résultat	Par rapport au témoin
Temps de prise	Début	$\geq 1 \text{ h}$	$\pm 25\%$ **
	Fin	$\leq 12 \text{ h}$	$\pm 25\%$
Résistance à la compression à 28 jours			$\geq 90\%$

**Tableau N°5** : conditions pour qu'une eau soit utilisable (critère mécanique)

#### IV.4. Quelques eaux particulières

##### IV.4.1. L'eau de mer

Les principaux éléments nocifs contenus dans l'eau de mer sont le chlore, sous forme de chlorures de sodium et de magnésium (environ 30g/l), le sulfate, sous forme de sulfate de magnésium, de calcium et de potassium (environ 3,7g/l), les micros algues.

##### IV.4.2. Les eaux acides

L'acidité de l'eau est, en général, mesurée par son pH. L'ion hydrogène contenu dans l'eau de gâchage n'est pas à proprement parler nocif pour le béton, car il peut être très largement neutralisé par le ciment qui contient une réserve importante de produits basiques. Les eaux acides peuvent être nocives du fait de l'anion qui est lié à l'ion  $\text{H}^+$ , en général  $\text{Cl}^-$  ou  $\text{SO}_4^{2-}$ .

##### IV.4.3. Les eaux de recyclage

Les eaux de recyclage sont, en général, soit des eaux qui ont déjà été utilisées pour gâcher du béton, soit des eaux de lavage du matériel (malaxeurs, camions, etc.). Elles peuvent parfois se mélanger avec les eaux de pluies ou de ruissellement. Elles sont surtout chargées en éléments fins qui proviennent du ciment, des additions et des granulats ou en composés chimiques et des adjuvants. Lorsque ces eaux restent conformes aux spécifications de la norme, elles sont utilisables sans danger.

Une eau non conforme peut être ramenée à conformité par un traitement approprié et notamment à l'aide de bassins de décantation. Les matières en suspension peuvent, néanmoins, déroger sans risque à la limite maximale de 4% prévue dans la norme pour les autres eaux.

Le respect de l'environnement devrait conduire tout producteur de béton à installer un système de récupération des eaux de lavage pour pouvoir les recycler.

## Chapitre II: FORMULATION DU BETON ET SES OBJECTIFS

### I. Problématique de la formulation de béton en entreprise

L'entreprise a la responsabilité de la qualité et de la durabilité de ce qu'elle construit. La qualité de l'ouvrage, à la satisfaction du client, est son premier objectif avec le souci de respecter les délais contractuels. La durabilité est l'art de construire pour longtemps. C'est ce à quoi une entreprise performante doit tendre. Mais l'entreprise a aussi un devoir essentiel, c'est celui de la prise en compte de l'économie. Elle doit respecter le coût de la construction de l'ouvrage sur lequel elle s'est engagée. C'est dans ce contexte que l'entreprise doit choisir ses matériaux et formuler son béton.

Au cours de ces dernières années, sous la double influence extérieure des cahiers des charges et intérieure du bureau des méthodes, les objectifs à atteindre sont devenus à la fois plus diversifiés et plus précis, un exemple typique est de concilier la durabilité du béton en place et la rapidité d'exécution. En même temps, les possibilités se sont multipliées ; et l'on songe à la variété des ciments disponibles sur le marché, à l'apparition récente des additions normalisées et au formidable développement des adjuvants.

Rien de cela ne se met vraiment en équation et chaque cas doit être examiné de façon pragmatique ; cinq questions permettent, à chaque fois, de poser le problème à résoudre.

#### I.1. Cinq questions à se poser

Cinq questions fondamentales vont nous aider à constituer l'ensemble des données nécessaires pour formuler les bétons d'ouvrages. Elles sont de deux types :

- ✓ Celles émanant de l'administration, du maître d'œuvre, du client privé ou de l'architecte qui sont donc imposées à l'entreprise, mais qui peuvent aussi, au départ, être adaptées par un dialogue constructif entre l'entreprise et son client ;
- ✓ Celles émanant du chantier ou des services opérationnels de l'entreprise qui peuvent être évolutives, donc modifiables mais toujours imposées au spécialiste « béton ».

##### 1. Quelles sont les demandes du maître d'œuvre ?

Le maître d'œuvre, le client privé ou l'architecte doivent définir le ou les types de béton à réaliser pour un type d'ouvrage donné dans un environnement donné et pour une durée de vie souhaitée. Ces définitions du béton sont consignées dans les cahiers des clauses techniques particulières, les spécifications techniques ou les cahiers de charges et doivent couvrir toutes les séquences de la vie du béton qui vont de la fabrication jusqu'à la maintenance de l'ouvrage en service.

S'il est vrai que l'entreprise se doit d'être compétente pour définir elle-même ses formules de

béton, il faut, au minimum, lui indiquer le type d'ouvrage à construire, la résistance caractéristique à la compression et l'environnement. A partir de là, l'entreprise est capable de formuler ses bétons dans le cadre de documents normatifs contractuels.

### *2. Quels sont les documents normatifs ?*

Dans un appel d'offre, et à fortiori à l'exécution, le maître d'œuvre doit préciser dès le début et très clairement, les « règles du jeu », autrement dit à quels documents normatifs il entend se référer (AFNOR, ASTM, etc.). Il faut ajouter à la liste des principales normes, les textes qui spécifient l'exécution des travaux :

- DTU P 18-201 DTU 21 (Exécution des travaux en béton. Cahier des clauses techniques) ;
- fascicule n° 65-A du cahier des clauses techniques générales.

### *3. Quel est l'environnement de l'ouvrage ? Quelles sont les conditions climatiques de mise en œuvre ?*

La notion d'environnement prend de plus en plus d'importance dans la formulation du béton. On ne définira plus uniquement un béton par sa résistance à la compression à **vingt** huit jours et par son affaissement au cône ; on aura à définir, en plus l'environnement dans lequel l'ouvrage s'inscrit et les critères qui caractériseront la durabilité de l'ouvrage face à cet environnement (rapport E/C, pénétration des ion Cl<sup>-</sup>, perméabilité, etc.). A côté de cette notion d'environnement qui concerne le béton durci tout au long de sa vie, il faut considérer le « climat » dans lequel va se trouver le béton frais au cours de son durcissement et qui va conduire l'entreprise à choisir certains moyens de mise en œuvre et de protection du béton plutôt que d'autres.

Les données climatiques sont liées à :

- l'hygrométrie (humide ou sec) et la pluviométrie ;
- la température ambiante avec des valeurs maximales, minimales, moyennes indispensables pour calculer l'exothermie du béton dans l'ouvrage ;
- la vitesse du vent qui influence l'exothermie du béton en surface ;

Pour ce qui est des données hydrogéologiques, on peut citer par exemple, la température de l'eau (souterraine, de surface) utilisée soit comme eau de gâchage, soit comme eau de refroidissement.

Pour ce qui est des données sur l'agressivité de l'environnement, il est indispensable d'avoir une connaissance, la plus exhaustive possible, de l'agressivité du milieu extérieur (liquide, sol, gaz, etc.). En principe, c'est au maître d'œuvre de préciser cette agressivité (teneur en  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ , pH, titre hydrométrique TH qui caractérise la dureté de l'eau, titre alcalimétrique).

Le fascicule de documentation AFNOR P18-011 classe les environnements fortement agressifs, en fonction des concentrations en ions agressifs. Par exemple, les zones industrielles construites sur des sols contenant des déchets agressifs (très faibles pH, teneurs importantes en sulfates, présence de  $H_2S$ ) doivent être classées soit A3 (environnement fortement agressif), soit A4 (environnement très fortement agressif). Dans le premier cas, on choisira le ciment en conséquence (CLK-CEM III/C, CHF-CEM III/A ou B) ; dans le second, on prévoira en plus une protection interne ou externe.

#### **4. Quelles sont les valeurs des caractéristiques imposées par la note de calcul ?**

Si les réponses aux trois questions précédentes sont pratiquement imposées à l'entreprise, les réponses à cette quatrième question viennent à la fois du maître d'œuvre et de l'entreprise.

Le maître d'œuvre ou le client impose généralement des valeurs minimales à respecter pour le béton :

- la résistance à la compression à vingt huit jours sur cylindres ;
- la résistance à la compression au jeune âge (décoffrage d'une voûte, mise en précontrainte, mise en place d'une machine lourde, etc.) ;
- le retrait, la déformation maximale sous charge ou les gradients thermiques.

De son côté, le bureau d'étude de l'entreprise peut demander au formulateur du béton des caractéristiques différentes, à l'occasion d'une recherche de variantes. Le calculateur pourra définir par exemple :

- la résistance caractéristique à la compression du béton nécessaire au jeune âge ou à vingt huit jours afin d'alléger la structure.
- le module de déformation pour les calculs de fluage, les valeurs du retrait ;
- la densité du béton durci.

#### **5. Quels sont les méthodes constructives et les moyens prévus sur le chantier ?**

Ces questions relèvent particulièrement du domaine de l'entreprise et leurs réponses ont une incidence directe sur la formulation du béton. En effet, le béton ainsi formulé doit pouvoir être fabriqué et mis en œuvre conformément à un programme de travaux et aux moyens prévus par le chantier. Avant toute formulation, l'entreprise doit répondre, entre autres, aux questions suivantes :

- les méthodes de construction (préfabrication, coulage en place, coffrage fixe, coffrage glissant, etc.) ;
- les types de coffrage (peau métallique traitée ou non, bois, matières synthétique, etc.)

- les méthodes de bétonnage (benne, pompe, tapis, délais de mise en œuvre, reprise de bétonnage, etc.) ;
- les moyens (tombereau, camion toupie, agitateur ou mélangeur, grue, etc.) ;
- les points particuliers à prendre en compte (fissuration préjudiciable, qualité des parements, masse volumique en place, etc.).

## **1.2. La production du béton par l'entreprise**

### **1.2.1. Choix des constituants**

Par nature de matériaux, on liste en premier les caractéristiques physico-chimiques que l'on doit respecter avant de formuler un béton et l'intérêt que l'on porte à ces caractéristiques.

Vis-à-vis de la durabilité, on se penchera tout particulièrement sur cinq facteurs importants :

- le choix du ciment en fonction de l'agressivité environnante et de la chaleur d'hydratation du ciment ;
- le choix des granulats ou le bilan analytique des alcalins du béton pour la prévention des risques dus à l'alcali réaction ;
- la quantité minimale de ciment,
- le rapport E/C maximal ;
- la teneur en air entraîné (cas du gel)

### **1.2.2. La prise en compte des moyens de production d'un béton chaud ou froid en fonction des conditions climatiques.**

Formuler un béton ne signifie pas uniquement déterminer les proportions des différents composants, mais peut également impliquer d'avoir à faire des choix dans la chaîne de production du béton. C'est le cas, du bétonnage par temps chaud où il s'avère, que l'on doit limiter la température maximale du béton frais sous peine de voir l'ouvrabilité du béton décroître très vite et l'évolution des résistances à long terme plafonner.

Le choix des matériaux pour bétonnage par temps chaud peut être, notamment, celui du ciment et des adjuvants. Ainsi, un ciment à faible chaleur d'hydratation est recommandé ; de même, un retardateur de prise est recommandé pour augmenter les délais de mise en œuvre et maintenir une bonne ouvrabilité.

Par temps froid, ce qui n'est pas réaliste sous nos latitudes, ce sont des mesures telles que le dégel des granulats, l'utilisation d'eau de gâchage chaude et le calorifugeage des coffrages qui s'imposent. Le choix des matériaux est, dans ce cas, inverse de celui du bétonnage par temps chaud, c'est-à-dire le choix d'un ciment de classe R et le recours à des adjuvants accélérateurs de prise.

Une étude de formulation de béton pour une entreprise doit être telle qu'elle réponde aux exigences du maître d'œuvre, qu'elle offre une grande durabilité, mais aussi qu'elle permette au chantier de réaliser un ouvrage avec la meilleure qualité possible et au plus juste coût. Il faut suivre les premiers bétonnages sur chantiers et être capable, à la première alerte, de dénouer rapidement les problèmes qui pourraient se poser. A l'impossible nul n'est tenu, mais tout l'art de formuler un béton consiste justement à prévoir aussi, autant que possible, les situations exceptionnelles.

## II. Consistance adaptée aux moyens de mise en œuvre

Elle fait partie de l'un des aspects non moins important de la formulation des bétons. Elle représente la grandeur unique mesurée relative à l'aptitude du béton à être mis en place dans les coffrages, effectuée en laboratoire avec un appareillage simple.

### ✓ *Mesure de la consistance du béton frais et classes de consistance*

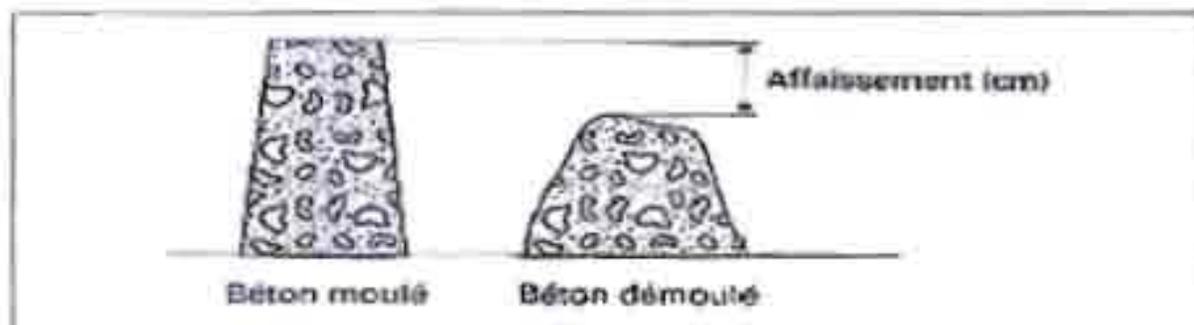
La norme européenne EN 206 retient quatre types d'appareils pour la consistance du béton frais : le Vébé (norme ISO 4110), le cône d'Abrams (norme ISO 4109 ou NF 18-451), l'essai de compactibilité (norme ISO 4111) et l'essai d'étalement à la secousse (norme ISO 9812).

Nous choisissons dans le cadre de notre étude le cône d'Abrams par l'exactitude de ses résultats et la simplicité de son principe décrit ci-après

### ✓ *Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams (SLUMP TEST)*

C'est l'essai le plus courant. Il s'agit d'un essai quasi statique où une différence de hauteur est mesurée entre un volume de béton. Préalablement moulé par piquage dans un coffrage en forme de tronc de cône et ce même échantillon démoulé et affaissé (figure 1).

La méthode d'essai est définie par la norme NF P 18-451.



**Figure 1 – Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams**

### ➤ *Classes de consistances définies par l'affaissement au cône d'Abrams*

Les classes de consistance sont définies en fonction des variations de l'affaissement (tableau IV). Les résultats sont donnés en centimètres d'affaissement et perdent une partie de leur signification à partir d'un affaissement supérieur à 18 cm : un autre type d'essai plus discriminant doit alors être recherché.

Classe de consistance		Affaissement au cône (cm)
F	ferme	de 0 à 4
P	plastique	de 5 à 9
TP	très plastique	de 10 à 14
FL	fluide	> 15

Tableau N°6 : Classes de consistances définies par l'affaissement au cône d'Abrams

### III. Résistance du béton au jeune âge

Les entreprises cherchent souvent à améliorer leur productivité sur site en écoulant les cycles de fabrication afin de décoffrer ou de mettre en contraintes certaines parties d'ouvrages le plus rapidement possible.

Pratiquement, ceci se traduit par la recherche d'une valeur de la résistance à la compression du béton à une échéance possible, quelles que soient les conditions climatiques.

L'optimisation à court terme des opérations de construction sur chantier telles le décoffrage ou la mise en contrainte passe d'abord par un travail de formulation : choix du ciment, du rapport E/C, des adjuvants, des additions minérales etc. et nécessite la résistance du béton dans l'ouvrage.

Le développement des résistances à court terme d'un béton donné dépend essentiellement de l'histoire des températures.

Celle-ci est la résultante des conditions environnementales et de la géométrie de l'ouvrage. Dans ces conditions, il est clair que la résistance à court terme, mesurée sur des éprouvettes normalisées, n'est généralement pas représentative de la résistance de l'ouvrage.

#### ➤ Définition de la notion de court terme

Les propriétés du béton évoluent en fonction de l'état d'avancement de la réaction d'hydratation du ciment.

La figure suivante présente schématiquement le processus de durcissement du béton et les différentes phases de la « vie » du béton.

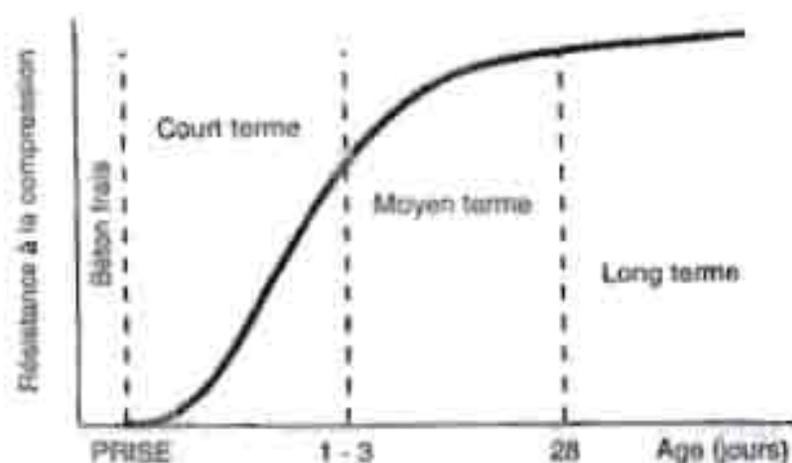


Figure n°2 : Processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors (1980).

La période appelé « court terme » démarre à l'instant où la prise du béton commence. Elle est caractérisée par une grande activité chimique qui se traduit par une croissance rapide de la résistance du béton (Vernet et Cadoret 1992).

La fin de cette période correspond au moment du décoffrage ou de la mise en précontrainte.

#### ➤ Influence de la température sur la résistance à court terme

Toutes les études venant de Klieger, 1958 ; Verbeck et Helmuth, 1968 ; Mamillan, 1970 ; Alexanderson, 1972 ; Byfor, 1980 ; Rogoud et Gautier, 1980... (Réf : BARON Jacques et OLIVIER Jean-Pierre in Les bétons : base et données pour leur formulation) ont montré que : Plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont résistances.

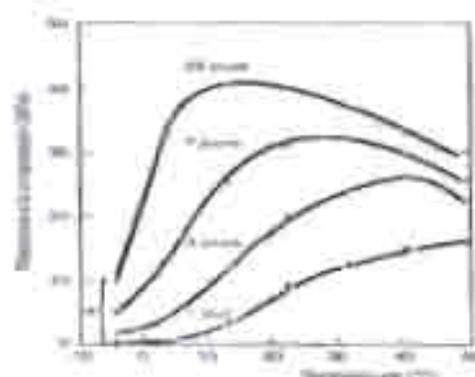


Figure n°3 : influence de la température du mûrissement sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances, d'après Klieger (1958)

La figure ci-dessus montre que plus la température de fabrication et de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée, alors que pour les âges de trois à vingt huit jours l'influence de la température change radicalement.

En effet pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance.

En fait cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente.

Toutefois l'augmentation des résistances du béton à court terme s'explique par le fait que l'hydratation du ciment est une réaction thermo activée. Ceci signifie que la vitesse à laquelle se fait cette réaction chimique croît avec la température.

De façon générale, la température de mûrissement subie par le béton au jeune âge peut :

- être imposée à celui-ci par un apport thermique de chaleur extérieure, c'est-à-dire en lui faisant subir un traitement. Dans ce cas, des températures élevées peuvent être atteintes dans des éléments, quelles que soient leurs dimensions.
- être provoquée par l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment. En effet, dans certaines conditions, la seule chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment peut conduire à des élévations de température supérieure à 50°C dans le béton.

#### IV. Résistance à la compression à 28 jours.

Partant d'une résistance caractéristique spécifiée, on détermine d'abord la résistance moyenne du béton qu'il faut viser. L'essai de compression simple peut être reproductible s'il est exécuté en suivant rigoureusement les spécifications des normes. Des changements mineurs du mode opératoire peuvent avoir des effets importants.

La commande, en matière de résistance à la compression est, en général, une résistance caractéristique spécifiée, à laquelle doit répondre une résistance caractéristique garantie. La spécification vient de la note de calcul où elle a servi de base au dimensionnement de l'ouvrage. Mais en application des nouvelles normes <<Bétons>> françaises, elle vient aussi de la classe d'environnement. On peut donc se trouver en présence de deux valeurs spécifiées, auquel cas il faut choisir la plus grande.

##### IV.1. Résistance caractéristique garantie : quelle résistance viser au moment de l'étude ?

La résistance visée au moment de l'étude tient compte à la fois de la valeur de la résistance

garantie et de la régularité de la fabrication.

Objectif : formuler un béton B25. La valeur garantie de 25 MPa, attachée à la désignation du béton, porte sur la résistance caractéristique à 28 jours. Cette valeur, 25 MPa dans le cas présent, est –ce qui est tout différent– une propriété du lot de béton, c'est-à-dire de la fraction d'une fourniture correspondant à un ouvrage ou à une partie de l'ouvrage que l'utilisateur désire individualiser. Elle dépend, à la fois, du béton et du lot, de la propriété mécanique du béton qu'est sa résistance à la compression et de la propriété statistique du lot qu'est sa régularité.

#### IV.1.1. La résistance caractéristique, grandeur statistique

Soit une population de valeurs de résistance, en nombre infini, distribuées selon une loi normale, dite aussi loi gaussienne. La résistance caractéristique  $f_{ck}$  de cette population est la valeur de la résistance telle que la proportion des résultats, donnant une valeur qui lui soit inférieure est égale à  $p$ . Pour une population normale donnée, la proportion  $p$  suffit à définir la résistance caractéristique en tant que grandeur statistique. La résistance caractéristique est égale à :

$$f_{ck} = f_c - k(p)\sigma$$

où  $f_c$  est la résistance à la compression moyenne du béton ;  $\sigma$  est l'écart type de la distribution,  $k(p)$  est la fonction de répartition de la loi normale réduite tablée dans tous les manuels de statistiques :

$$\begin{aligned} \text{pour } p = 10\% & \dots\dots\dots k = 1,28 \\ \text{pour } p = 5\% & \dots\dots\dots k = 1,64 \end{aligned}$$

#### IV.1.2. Application à un lot de la grandeur <<résistance caractéristique>>

La définition du lot est, dans son esprit, purement opérationnelle et peut être adaptée à différents contextes. L'ingénieur qui formule un béton et, de ce fait, raisonne en amont, est implicitement conduit à considérer comme lot l'ensemble de la production.

Le lot est caractérisé par une population de  $n$  résultats de résistance à la compression à vingt-huit jours. Selon la norme, un résultat unitaire est la moyenne de trois mesures faites sur le même prélèvement. Pour appliquer ce qui précède, on suppose que ces  $n$  résultats sont tirés, au hasard, d'une population normale infinie. Connaissant les  $n$  résultats, il s'agit d'estimer avec une précision  $\alpha$  la résistance caractéristique de cette population hypothétique.

Si  $f_c$  et  $\sigma$  représentent respectivement la moyenne et l'écart type de la population des  $n$  résultats, la résistance caractéristique est égale à :

$$f_{ck} = f_c - K \sigma$$

Cette relation ressemble à celle qui sert à définir la résistance caractéristique, mais avec trois différences importantes :

- $f_{ck}$  est une valeur probable de la résistance caractéristique, c'est-à-dire telle qu'il y ait une probabilité  $\alpha$  que la valeur vraie lui soit inférieure, la valeur vraie étant celle de la population hypothétique infinie;  $\alpha$  définit l'intervalle de confiance;
- $K$  est une fonction probabiliste tabulée de  $p$ ,  $\alpha$  et  $n$ ,  $n$  étant le nombre de résultat; s'agissant de la résistance du béton, chaque résultat est la moyenne de trois essais (norme P 18-305);
- $s$  est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par  $(n-1)$ . La raison pour laquelle on divise par  $(n-1)$ , et non par  $n$ , vient de ce que la même population servant d'abord à calculer la moyenne, il ne reste plus, pour le calcul de l'écart type  $s$ , que  $(n-1)$  résultats indépendants.

Les valeurs de  $p$  et de  $\alpha$  sont fixées par les règles de calcul du béton armé (BAEL) et du béton précontraint (BPEL). Elles sont reprises par la norme P18-305 :

$$\begin{aligned} p &= 10 \% && \text{si } f_c \leq 25 \text{ MPa} \\ p &= 5 \% && \text{si } f_c > 25 \text{ MPa} \\ \alpha &= 0,05 \end{aligned}$$

La valeur probable de la résistance caractéristique à la compression du béton, pour un intervalle de confiance  $\alpha$  de 5 % et un nombre de résultats  $n$  supérieur à 30, est égale à :

$$\begin{aligned} f_{ck} &= f_c - 1,58 s && \text{si } f_c \leq 25 \text{ MPa} \\ f_{ck} &= f_c - 1,95 s && \text{si } f_c > 25 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Les valeurs de  $\alpha$  et de  $n$  retenues ici sont courantes.

Le formulateur de béton utilise ces formules en sens inverse. Pour lui,  $f_{ck}$  est la valeur spécifiée à partir de laquelle il calcule la valeur minimale de la résistance à la compression moyenne que le béton doit atteindre.

#### *IV.1.3. Résistance moyenne à viser au moment de l'étude.*

Dans le BAEL et le BPEL, les valeurs spécifiées de la résistance caractéristique renvoient à des valeurs mesurées sur des éprouvettes cylindriques d'éclatement 2 ( $\emptyset 15$  ou 16 cm). Il en est de même de la valeur garantie de 25 MPa pour un B25.

L'utilisation des relations précédentes pour calculer  $f_c$  nécessite une évaluation de la valeur de l'écart type  $s$ . En général, on connaît les conditions dans lesquelles le béton étudié sera fabriqué et contrôlé. On procède alors par analogie avec des conditions existantes pour lesquelles la valeur de  $s$  est connue.

On écrit alors pour  $\alpha = 0,05$  et  $n \geq 30$  :

$$\begin{aligned} f_c &= f_{ck} + 1,58 \sigma && \text{si } f_c \leq 25 \text{ MPa} \\ f_c &= f_{ck} + 1,95 \sigma && \text{si } f_c > 25 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Où  $f_c$  est la résistance à la compression moyenne qu'il faut viser au moment de l'étude.

#### IV.2. Données expérimentales sur les moyens de régler la résistance à la compression

Ces moyens correspondent aux grandeurs qui interviennent dans les relations de Féret et de Bolomey : résistance normale du ciment, rapport E/C. Avec ces mêmes relations, on peut étudier aussi l'influence des additions.

Sous sa forme la plus complète, la relation de Féret s'écrit comme suit :

$$f_c = k_f f_{mc} \left[ \frac{c}{c+e+v} \right]^2$$

où  $f_c$  est la résistance du béton à l'échance considérée,  $f_{mc}$  la résistance normale du ciment à la même échance,  $c$ ,  $e$  et  $v$  les volumes respectifs de ciment, d'eau et d'air (occlus ou entraîné) rapporté au volume de béton ;  $k_f$  est un coefficient (indice f pour Féret).

Explicitons la structure de cette relation qui se présente sous le produit de trois termes :

- $[c/(c+e+v)]^2$ , dont la valeur dépend de la formulation du béton et, en premier lieu de la valeur du rapport E/C ;
- $f_{mc}$  dont la valeur dépend du ciment ;
- le coefficient  $k_f$ , enfin, dont la valeur, dans le domaine des bétons courants dépend principalement du granulat (sable et gravillon) utilisé.

Sous sa forme la plus complète, la relation de Bolomey s'écrit :

$$f_c = k_b f_{mc} \left[ \frac{C}{E+V} - 0,5 \right]$$

Où  $C$  et  $E$  désignent respectivement les masses de ciment et d'eau,  $V$  le volume d'air exprimé en masse du même volume d'eau ;  $C$ ,  $E$  et  $V$  se rapportent au même volume de béton ;  $k_b$  est un coefficient (indice b pour Bolomey).

Cette formule comme celle de Féret, est le produit de trois termes qui se partagent, dans l'ordre des facteurs, l'influence des granulats, du ciment et de la formulation du béton. La différence, par rapport à la relation de Féret, porte exclusivement sur le troisième terme, parabolique chez Féret et linéaire chez Bolomey. On montre que la relation Bolomey est une bonne approximation de la relation de Féret pour les valeurs du rapport E/C comprises entre 0,40 et 0,70 ; dans cette fourchette l'erreur est inférieure ou égale à 3% ; en dehors, c'est la relation de Féret qui doit être utilisée. Ces deux relations permettent des prévisions

quantitatives de résistance pour tous les bétons courants.

#### IV.3. Données expérimentales sur les paramètres susceptibles de modifier la résistance à la compression

A la différence des moyens d'action étudiés précédemment, les paramètres dont nous traitons sont ceux susceptibles de modifier la résistance à notre insu. La connaissance de ces paramètres permet d'expliquer les anomalies qui peuvent se présenter. Un moyen d'action comme le paramètre E/C peut devenir en ce sens, un paramètre, lorsqu'il y a un ajout d'eau subreptice sur le chantier. La relation de Bolomey permet d'évaluer la baisse de résistance à la compression provoquée par un ajout de 10 litres d'eau dans le cas par exemple d'un B25 (E/C = 0,60) ; celle-ci est d'autant plus forte que le dosage en ciment du béton est plus faible : 6% pour 350 kg/m<sup>3</sup>, 8% pour 280 kg/m<sup>3</sup>.

Lorsque la valeur mesurée de la résistance n'est pas celle attendue, il faut envisager l'influence de paramètres tels la conservation des éprouvettes, la propreté des granulats, l'excès d'air entraîné, etc.

##### IV.3.1. La conservation des éprouvettes

La norme NF P 18-404 « Bétons. Essais d'études, de convenueance et de contrôle. Confection et conservation des éprouvettes » fixe les conditions de conservation des éprouvettes : d'abord pendant 24 heures dans un local maintenu à 20 ± 2°C, puis dans l'eau à la même température ou en chambre humide, d'humidité relative supérieure ou égale à 95%. Toutes ces indications sont importantes et doivent être suivies à la lettre. C'est parfois difficile sur le chantier et cela peut conduire à des valeurs de résistance différentes de celles attendues.

C'est le cas par exemple, lorsque, sur tout ou partie de la durée de conservation, la température de l'éprouvette s'est trouvée à l'extérieur de la fourchette de 20 ± 2°C. Les spécifications de la norme n'étant pas respectées, la mesure de la résistance à 28 jours perd sa valeur contractuelle. Faute de mieux, on peut néanmoins lui conserver une valeur indicative grâce à la notion d'âge équivalent. S'agissant d'estimer la résistance à 28 jours, la formule empirique due à Nurse et Saul peut être retenue. En prenant  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ , elle s'écrit :

$$\int \theta(t) dt = 28 \text{ jours} \times 20^\circ\text{C}$$

Où  $\theta$  est la température Celsius, le membre de gauche représente l'aire comprise entre la courbe de température et l'axe  $\theta = 0^\circ\text{C}$  ; le temps équivalent, pour lequel le béton de l'éprouvette a la maturité qu'il aurait dû avoir à 28 jours suivant la norme NF P 18-404, est tel que :

Aire sous la courbe = 560 jours. °C.

Si les éprouvettes ont été conservées en moyenne à 15°C, il faudra attendre 560/15, soit trente sept jours.

#### *IV.3.2. La propreté des granulats*

Une variation de la propreté des granulats, par interruption du lavage par exemple, peut s'accompagner d'une diminution de la résistance de l'ordre de 10 à 15%.

Le fait qu'un lavage insuffisant des granulats puisse provoquer une baisse de résistance n'est pas en contradiction avec l'existence d'une valeur optimale de l'équivalent de sable, autour de 75. Ce n'est pas la présence des éléments fins qui est néfaste mais, entre autres causes, leur collage sur la surface des gravillons qui peut empêcher une bonne adhérence.

#### *IV.3.3. L'air entraîné*

Un surcroît d'air peut résulter d'un effet secondaire d'un adjuvant, un plastifiant par exemple. On retiendra que 1% d'air a exactement le même effet sur la résistance à la compression que dix litres d'eau, soit une baisse de 4 à 6%.

A l'inverse la présence de carbone ou autres matières organiques dans une addition peut réduire la teneur en air occlus et augmenter artificiellement la résistance.

#### *IV.3.4. Autres paramètres*

Ce qui précède permet d'expliquer la plupart des variations inattendues de résistance, mais d'autres causes peuvent se présenter. Des expériences au laboratoire ont pu montrer une chute de la résistance à la compression due à l'utilisation de granulats très chauds (70°C, cas d'un tas exposé au soleil) : une baisse de résistance de 10 à 15 % a été observée, attribuable d'une part, à l'augmentation du dosage en eau nécessaire pour obtenir une consistance plastique et d'autre part, à un affaiblissement de la liaison gravillon-mortier. Une humidification des tas de gravillons les jours de grande chaleur, peut suffire pour éviter un tel effet. Elargissant le cadre de cet exemple, on voit bien la nécessité de respecter les règles de l'art.

Le rapport pondéral E/C tient une place centrale dans le raisonnement quantitatif sur la résistance à la compression. Dans une étude de formulation de béton, il faut considérer la quantité d'eau nécessaire pour une mise en œuvre correcte.

### **V. La durabilité du béton**

L'ingénieur qui formule un béton dispose de moyens efficaces pour en assurer la durabilité vis-à-vis des environnements habituels. Il est d'ailleurs soutenu maintenant dans cette démarche par des normes qui spécifient justement les bétons en fonction de ces environnements.



Les agressions types rencontrées sont souvent la carbonatation, les chlorures, les eaux sulfatées, eaux douces. En général, la première prévention consiste à viser un béton suffisamment compact, ce qui revient à fixer une borne supérieure au rapport E/C et une borne inférieure à la résistance caractéristique du béton. La tenue aux eaux sulfatées et aux eaux douces demande de faire appel à des types de ciments adaptés.

#### V.1. Données expérimentales sur les moyens d'éviter la corrosion des armatures sous l'effet de la carbonatation atmosphérique

##### V.1.1. Le rôle de la carbonatation des bétons vis-à-vis de la corrosion des armatures

Le pH d'un béton non carbonaté, en général supérieur à 13 pour un béton de ciment Portland sans addition, est tel que l'armature d'acier est dans un état dit « passivé » qui empêche la corrosion. Mais le dioxyde de carbone de l'air, en pénétrant à l'intérieur du béton et en réagissant avec la portlandite, peut faire baisser ce pH en deçà de 11,5, valeur à partir de laquelle la corrosion de l'acier devient possible. Cela conduit à distinguer deux phases dans le processus de corrosion d'une armature enrobée : d'abord une phase d'amorçage, ensuite une phase de développement de la corrosion. L'objectif de toute formulation est de prolonger le plus longtemps possible la phase d'amorçage, donc de ralentir la diffusion du dioxyde de carbone.

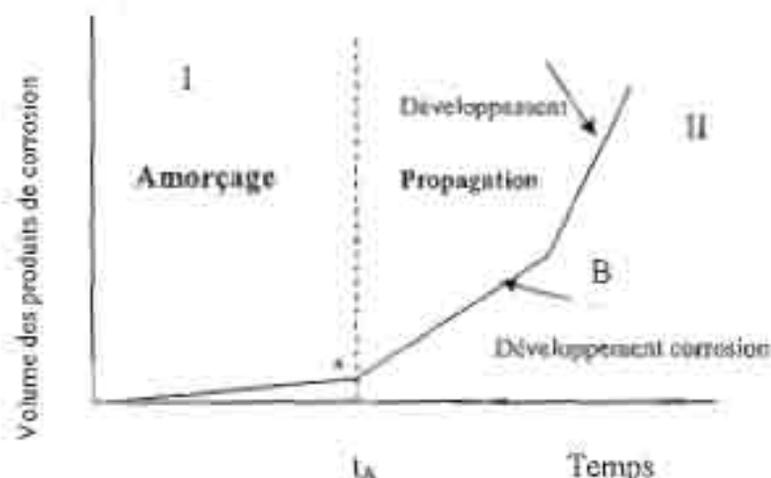


Figure N°4 : Schéma de la cinétique du comportement des armatures et du béton

La profondeur de pénétration du  $\text{CO}_2$  dans le béton augmente, en général, proportionnellement à la racine carrée du temps. Pour une durée fixée, elle dépend :

- des caractéristiques de la structure poreuse. La quantité de dioxyde de carbone

diffusée est d'autant plus petite que le béton est moins perméable ;

- **de l'aptitude du béton à fixer chimiquement le dioxyde de carbone.** En effet celui-ci réagit avec l'oxyde de calcium des hydrates du ciment (portlandite et CSH) pour former du carbonate de calcium et, plus il se fixe chimiquement, plus sa pénétration à l'intérieur du béton est ralentie ;
- **de l'état d'humidité de la structure poreuse.** La diffusion du  $\text{CO}_2$  étant dix mille fois plus élevée dans l'air que dans l'eau, cette diffusion est beaucoup plus lente dans les bétons saturés. En revanche, la présence d'eau est nécessaire à la carbonatation des composés hydratés du ciment car le  $\text{CO}_2$  doit se dissoudre dans l'eau avant de réagir. Il importe de noter que les ouvrages extérieurs subissent des cycles d'humidification-dessiccation qui peuvent prolonger très longtemps la période d'amorçage.

Pour ralentir la carbonatation, le formulateur dispose des moyens suivants :

- réduction du rapport E/C ;
- augmentation de la résistance à la compression ;
- dosage minimal en ciment.

#### *V.1.2 Le rapport E/C*

La profondeur de carbonatation du béton dépend de la porosité capillaire de la pâte de ciment qui dépend elle-même du rapport E/C.

La norme P 18 – 305 spécifie une borne supérieure au rapport E/C, ce qui revient à fixer une valeur maximale de la porosité de la pâte d'hydrates.

La profondeur de carbonatation dépend de la structure poreuse du béton, donc de la durée de la cure humide. Des données expérimentales sur son influence sont présentées dans ce qui suit.

#### *V.1.3. La durée de cure du béton*

Après le décoffrage et en l'absence de cure, le béton d'enrobage des armatures perd rapidement son eau et l'hydratation y est alors beaucoup plus lente. Le degré d'hydratation est plus faible et la porosité de la pâte est plus forte : le béton d'enrobage se carbonate plus rapidement.

Dans les normes « Bétons », une valeur minimale de la résistance caractéristique à vingt-huit jours est fixée pour chaque classe d'environnement. Cette spécification qui, associée au dosage en liant minimal et au rapport E/C maximal, permet de limiter la porosité et donc la vitesse de carbonatation.

#### *V.1.4. La résistance à la compression*

La résistance est une fonction décroissante de la porosité de la pâte de ciment à l'état frais exprimé par le rapport E/C. La profondeur de carbonatation, comme toutes les propriétés de transfert, est une fonction croissante de la porosité. Elle diminue lorsque la résistance du béton augmente. Pour un ensemble donné de matériaux, les profondeurs de carbonatation diminuent dans tous les cas lorsque la résistance caractéristique augmente, mais les relations entre ces deux grandeurs varient avec les matériaux utilisés et, en particulier, elles dépendent du type de ciment. Toutefois, la résistance mesurée dans des conditions normalisées n'est pas un indicateur dans la mesure où le béton d'enrobage est exposé à l'air ambiant dès le décoffrage.

## V.2. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons pour limiter la diffusion des ions chlorure

La formulation du béton exposé à un environnement marin doit prendre en compte deux actions fondamentales de l'eau de mer. La première est une action chimique vis-à-vis du béton d'enrobage (action des sulfates et des chlorures), la seconde concerne l'accélération de l'amorçage de la corrosion des armatures par l'action des chlorures. Les moyens de prévenir les dégradations dues aux actions chimiques seront traités par la suite, l'essentiel étant de choisir un ciment PM (Prise Mer). Dans tous les cas, il faut viser une résistance caractéristique suffisante ( $\geq 30$  MPa) et un rapport E/C faible ( $\leq 0,55$ ).

L'environnement marin englobe des situations bien différentes. Pour les ouvrages côtiers, soumis aux embruns, la concentration superficielle en ions chlorures décroît rapidement avec l'éloignement de la côte : par exemple 0,6 % en masse de béton au bord de la côte à 0,04 % à un kilomètre.

La profondeur de pénétration des ions chlorure par diffusion dépend comme la profondeur de carbonatation, de :

- la structure poreuse du béton ;
- l'état de saturation des pores ;
- la fixation par les hydrates du ciment.

### V.2.1 La diffusion des ions chlorure dans le béton comparée au modèle de diffusion élémentaire

Le modèle de diffusion élémentaire décrit la diffusion d'un élément individualisable (ion, molécule, etc.) dans un milieu (solide, liquide ou gaz) au voisinage de l'équilibre. C'est un modèle très général, mais qui repose néanmoins sur l'hypothèse propre au voisinage de l'équilibre, d'une relation linéaire entre le flux de l'élément à travers une surface et sa différence de concentration de part et d'autre de cette surface.

La relation linéaire étant admise, il suffit d'écrire l'équation qui exprime la conservation de l'élément diffusant. Pour un milieu semi infini et un front de concentration plan, parallèle à la surface exposée, la variation de la concentration en ions chlorure dans une tranche est égale à la différence entre le flux d'ions entrant et le flux d'ions sortant ; par ailleurs chacun de ces flux est proportionnel au gradient local de concentration. La différence entre ces flux est alors proportionnelle à la dérivée seconde de la concentration par rapport à  $x$ , le coefficient de proportionnalité  $D$  étant le coefficient de diffusion caractéristique du milieu :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

La solution de cette équation différentielle à deux variables ( $x, t$ ) dépend des conditions aux limites imposées. Dans le cas d'une structure armée immergée dans de l'eau chargée en ions chlorures de concentration  $C_1$ , la dispersion des chlorures dans le béton augmente avec la durée de contact. La variation de la concentration est donnée par la relation :

$$C(x, t) = C_1 \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

où  $\operatorname{erf}$  désigne « fonction erreur » définie par :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy$$

L'application de ce modèle est illustrée dans l'exemple numérique suivant.

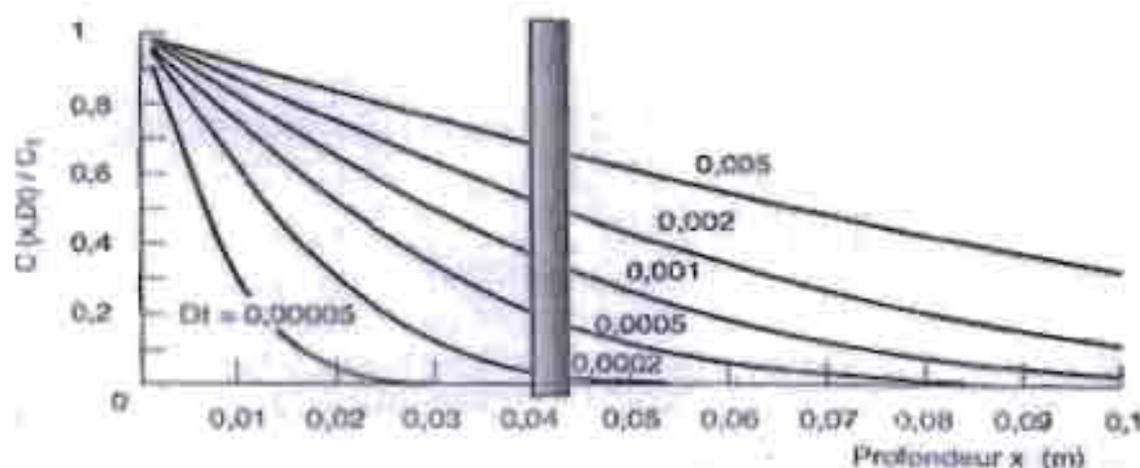


Figure N°5 : Distribution des chlorures en fonction de la profondeur pour différents valeurs du paramètre  $Dt$ . (Réf: BARON Jacques et OLIVIER Jean-Pierre in Les bétons : base et données pour leur formulation)

Application numérique : calcul de la durée avant amorçage de la corrosion

De l'expression  $C(x, t)$ , donnée précédemment, on trace les courbes de la figure 5 dans laquelle la quantité  $C(x, Dt)/C_1$  est portée en fonction de la distance  $x$  pour différentes valeurs du paramètre  $Dt$  où  $D$  est le coefficient de diffusion.

Supposons une armature à 4 cm de la face exposée et que l'amorçage de la corrosion ait lieu pour une concentration ( $C = C_{lim}$ ) en ions chlorure de 2 g/l. Les autres données numériques sont :  $C_1 = 10$  g/l et  $D = 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

D'après la figure 11.20, pour  $C(x, Dt)/C_1 = 0,2$  et  $x = 0,04$ , la valeur de  $Dt$  est 0,0005.

Connaissant le coefficient de diffusion  $D$ ,  $t = \frac{0,0005}{10^{-12}} = 5 \cdot 10^8$  secondes, soit environ 17 ans.

### V.2.2. Influence du rapport $E/C$ et de la période de cure sur la pénétration des ions chlorure

Quand le béton est complètement immergé, le transport d'ions a lieu par diffusion pure. Comme dans le cas de la carbonatation, nous allons présenter successivement l'influence du rapport  $E/C$ , de la cure et de la résistance sur la diffusion des ions chlorure.

L'influence du rapport  $E/C$  est illustrée par la figure N°6. Le coefficient de diffusion augmente avec la valeur du rapport  $E/C$ , ce d'autant plus vite que le rapport  $E/C$  est plus élevé.

L'augmentation de la durée de cure humide rend plus difficile la pénétration des ions chlorures.

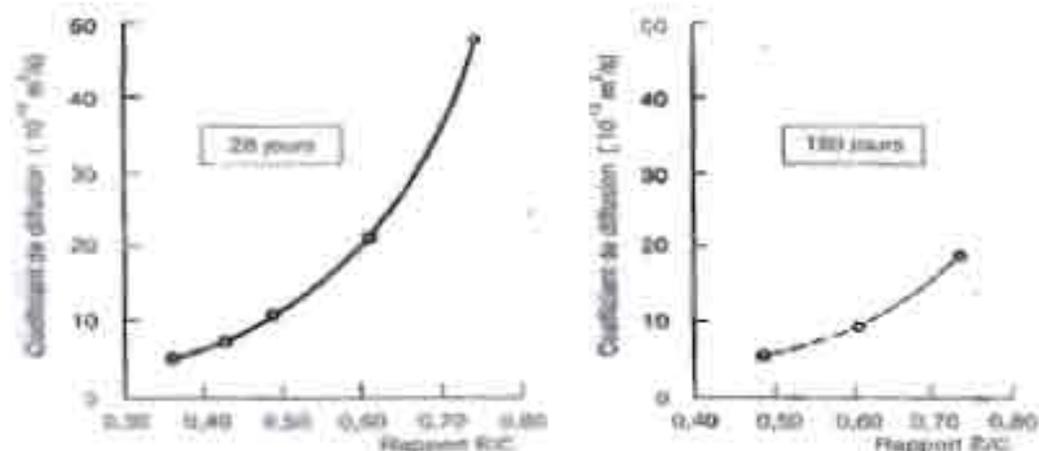


Figure N°6 : Influence du rapport  $E/C$  sur le coefficient de diffusion effectif des ions chlorures.

### V.3. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons aux attaques sulfatiques

L'agressivité des milieux sulfatiques dépend de la concentration en ions  $SO_4^{2-}$  et de la nature du cation ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ). Sont considérées comme eaux à hautes teneurs en sulfates

les solutions présentant une concentration en  $\text{SO}_4^{2-}$  supérieure ou égale à 1500 mg/l ; elles constituent un environnement chimiquement très agressif.

**Critères de durabilité : résistance, rapport E/C, dosage en ciment, type de ciment.**

Que ce soit pour la carbonatation ou la diffusion des ions chlorure, les limitations portant sur ces trois critères servent à limiter la « capacité de transfert » du béton, exprimé par un coefficient de perméabilité ou de diffusion. Les ions sulfate, en effet, ne diffusent pas et le facteur déterminant est plutôt la réduction de la surface d'attaque, laquelle est d'autant plus faible que le béton est moins poreux et que les pores sont plus fins.

Des expériences sur des mortiers ont montré qu'il existe un lien direct entre le gonflement produit par l'attaque sulfatique et la teneur en aluminat tricalcique ( $\text{C}_3\text{A}$ ). Ceci nous édifie beaucoup sur l'importance du choix du ciment.

**V.4. Données expérimentales sur les moyens d'adapter les bétons aux attaques des eaux douces et acides**

Une eau douce est une eau qui contient peu de sels calciques et magnésiens ; la limite fixée par la norme, appliquée à une eau qui ne contiendrait que des sels calciques, revient à dire que l'eau est douce si elle contient moins de 28 mg/l de  $\text{Ca}^{2+}$ .

L'agressivité de cette eau dépend de deux paramètres, le pH, d'une part et, d'autre part, la concentration de «  $\text{CO}_2$  agressif », ce dernier étant défini comme l'excès de  $\text{CO}_2$  dissout par rapport au  $\text{CO}_2$  nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de calcium et de magnésium.

Deux sortes de précautions sont à prendre : viser un béton suffisamment compact et choisir un ciment adapté. La deuxième précaution consiste à choisir des ciments libérant peu de portlandite. La portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est, en effet l'hydrate le plus soluble des ciments courants. L'attaque par l'eau douce dissout la portlandite et réduit le rapport C/S dans les C S H, ce qui se traduit par une perte de masse, mais aussi par une augmentation de la porosité et une diminution de la résistance.

Un béton mécaniquement résistant n'est pas nécessairement durable. C'est pourquoi, à côté de la consistance, des résistances caractéristiques à vingt huit jours, l'adaptation du béton à son environnement contribue fortement à déterminer sa composition.

Les normes actuelles ne fixent que des bornes à respecter et laissent ouvert un champ d'optimisation possible.

### CHAPITRE III : PROPOSITION DE FORMULATION ADAPTEE AU CONTEXTE TROPICAL

Jusqu'à la fin des années cinquante, et sauf exception, la formulation du béton était d'une simplicité biblique : 500 litres de gravillon, 400 litres de sable, de 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance. Cette recette ne devait pas correspondre toujours exactement à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes.

Progressivement, une certaine rationalité a été introduite dans cet artisanat.

Des essais et des constatations menés à l'occasion de grands ouvrages (Villeneuve St Georges- Tancarville) ou de grands barrages ont permis de mieux connaître les relations entre les divers facteurs intrinsèques et extrinsèques influençant les caractéristiques du béton.

Les laboratoires se sont mis au travail : les méthodes de calcul et les règlements se sont considérablement affinés. Parallèlement, le matériel de fabrication évoluait sur les grands chantiers puis très rapidement dans les centrales fixes.

Des révolutions successives ont ensuite accéléré les processus ; l'arrivée en force de l'électronique d'abord analogique, puis numérique. On pourrait maintenant parler de FBAO (Fabrication de Béton Assistée par Ordinateur).

La formulation n'a plus rien à voir avec les errements anciens : le béton est un composite technique dans lequel entrent de multiples composants dont certains sont d'autant plus actifs que leur dosage est faible (adjuvants et additifs variés). Il ne s'agit pas encore, bien sûr, de chimie fine ou de pharmacie, mais certains dérèglages de fabrication peuvent avoir des conséquences graves.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage, ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses. Nous pouvons citer : la méthode de Bolomey, de Valette, de Faury, d'Abrams, de Dreux et Goris, de Baron et Lesage.

Nous retenons dans le cas de notre étude celle de Dreux et Goris qui est une synthèse de ce qui est apparu comme le plus valable et le plus intéressant dans les méthodes existantes connues. De plus, elle tient compte des résultats d'une grande enquête sur les dosages les plus usuels pour divers bétons jugés aujourd'hui satisfaisants. Elle n'a donc pas de bases scientifiques mais bénéficie sans restriction partisane de l'expérience déjà acquise par d'autres

dans ce domaine et, de plus, bien entendu, des recherches au CEBTP.

## 1. Méthode de Dreux et Gurisic

### 1.1. Énoncé du problème

Quatre principaux critères constituent les données de l'énoncé du problème qui pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage.

- ✓ la dimension maximale  $D$  des granulats doit être fixée en premier lieu.
- ✓ la résistance souhaitée  $R'$  (rupture en compression à 28 jours sur éprouvettes cylindriques) est prise égale pour la valeur moyenne visée à la résistance caractéristique demandée majorée de 15 %.
- ✓ l'ouvrabilité désirée est fixée par l'affaissement  $A$  à obtenir par l'essai au cône d'Abrams.
- ✓ la nature du ciment à utiliser doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant.

### 1.2. Principe de la méthode

La résistance et l'ouvrabilité désirée conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau.

Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, pompabilité, etc.

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose.

Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré.

Reste à exécuter, bien entendu, quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

### 1.3 Dosage en ciment et en eau

On commence par évaluer le rapport  $C/E$  en fonction de la résistance moyenne souhaitée (à 28 j). On utilise pour cela une formule inspirée des études de Bolomey :

$$f_{c28} = G \cdot \sigma_c \cdot \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

avec :

$f_{c28}$  en (MPa) : résistance moyenne souhaitée,

G : coefficient granulaire (densité, adhérence, dimension) que l'on peut choisir dans le Tableau N°V de l'annexe, C (kg/m<sup>3</sup>) dosage en ciment, E (litres/m<sup>3</sup>) : dosage en eau totale,  $\sigma_c$  en (MPa) : classe de résistance moyenne garantie du ciment.

La connaissance ou l'évaluation de,  $f_{c28}$ ,  $\sigma_c$  et G permet de calculer la valeur de C/E.

L'application de l'abaque de la figure n°7 permet, en fonction de cette valeur de C/E et de l'affaissement souhaité A, de déterminer le dosage en ciment C ; la connaissance de ce dosage C et de la valeur C/E permet d'évaluer approximativement le dosage en eau E qui sera ultérieurement corrigé expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (affaissement A au cône).

Le tableau N°VI de l'annexe donne la correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension.

#### 1.4. Courbe granulaire de référence

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sables + graviers mais ciment non compris) peut être schématisée suivant une ligne brisée tracée sur un graphique granulométrique normalisé ; son origine basse est à 0 % de tamisât pour la dimension 0,08 mm correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable, et son extrémité haute à 100 % pour la dimension D correspondant aux plus gros granulats utilisés (figure 9).

Son point de brisure a pour coordonnées :

- l'abscisse X qui est égal à la valeur de la graduation D/2 si  $D \leq 25$  mm ou le milieu du segment limité par le module 38 et le module de D si  $D > 25$  mm.

- l'ordonnée  $Y = 50 \cdot \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

avec K coefficient à choisir dans le tableau N°21 de l'annexe,

$K_s$  coefficient tenant compte du module de finesse du sable Mf :

$$K_s = 6 Mf - 15$$

$K_p$  coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité pompable ; on peut prendre en général  $K_p = + 5 \text{ à } + 10 \%$ .

#### 1.5. Proportion des granulats

Sur le même graphique, on trace les courbes granulaires des différents granulats à utiliser. Les droites joignant le point à 95 % (tamisât) d'un granulat au point à 5 % du granulat suivant (et ainsi de suite) sont appelées lignes de partage. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en cumulés les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs.

## II. Note de calcul de l'application de la méthode de Dreu et Gorisse

Le maître d'œuvre exige pour ce projet des résistances caractéristiques au vingt huitième jour de 20, 25 et 30 MPa, l'utilisation de granulats basaltiques de classe 3/8, 8/20 et 16/25 et du sable de mer. Ce béton est destiné à des ouvrages de structure porteuse dans un environnement normal ou agressif.

### 1. Résistance nominale spécifiée : 20 MPa

#### ✓ Dosage en ciment

$$f_{c28} = G \times \sigma_c \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad \text{avec } f_{c28} = 1,15 \sigma_c \approx 1,15 \times 20 = 23 \text{ MPa}$$

$D = 25 \text{ mm}$ , granulats de bonne qualité alors  $G = 0,5$

$$230 = 0,5 \times 325 \times \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 1,91 \\ A = 6 \text{ cm} \end{array} \right\} \longrightarrow C = 375 \text{ kg}$$

$$\frac{C}{E} = 1,91 \text{ par conséquent } \frac{E}{C} = 0,52$$

#### ✓ Dosage en eau

$$\left. \begin{array}{l} C/E = 1,91 \\ C = 375 \text{ kg} \end{array} \right\} \longrightarrow E = 197 \text{ litres}$$

#### ✓ Dosage en granulats

Tracé de la courbe de référence

$$\text{Coordonnées du point de brisure A : } X_A = \frac{D}{2} = 12,5 \text{ mm, } Y_A = 50 - D^{0,5} + K_1$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Vibration normale} \\ \text{Granulats concassés} \\ C = 375 \text{ kg} \end{array} \right\} \longrightarrow K_1 = 1$$

$$Y_A = 46\%$$

$$\text{Coordonnées du point B : } X_B = D = 25 \text{ mm ; } Y_B = 100\%$$

Mélange de 02 granulats : 8/16 et 16/25

Le principe de détermination des différentes proportions ci-dessous des granulats est explicité au paragraphe 1.5 du même chapitre.

- ↓ Sable : 35 %
- ↓ Basalte 8/20 : 39%

↳ Basalte 16/25 : 26%

Coefficient de compacité corrigé  $\gamma = 0,830$  à prendre dans le tableau N°X en annexe.

Volume total absolu =  $0,830 \times 1000 = 830$  litres

Volume ciment :  $375/3,1 = 121$  litres

Volume absolu des granulats :  $830 - 121 = 709$  litres

Le rapport des masses diffère de celui des volumes du fait de la différence de densité entre le sable et le basalte.

Détermination du volume des granulats :

$M_g$  : masse gravier,  $M_s$  : masse sable,  $V_G$  : Volume Granulats,  $V_g$  : Volume basalte

$V_s$  : Volume sable

$$\frac{M_g}{M_s + M_g} = 0,65 \text{ et } \frac{M_s}{M_s + M_g} = 0,35$$

$$\text{Donc } \frac{M_s}{M_g} = \frac{0,35}{0,65} = 0,538$$

$$\text{or } M_s = \rho_s \times V_s = 2,63 \times V_s \text{ et } M_g = \rho_g \times V_g = 2,8 \times V_g \rightarrow \frac{V_s}{V_g} = 0,573$$

$$V_s = 0,573 \times V_g - 0,573 \times (V_G - V_s) \rightarrow V_s = 0,364 \times V_G = 0,364 \times 709 = 258,16 \text{ litres}$$

$$V_s = 258,16 \text{ litres}$$

$$V_g = V_G - V_s \rightarrow V_g = 709 - 258,16 = 450,84 \text{ litres}$$

$$V_g = 450,84 \text{ litres}$$

$$V_g = V_{8/20} + V_{16/25} = 450,84 \text{ et } \frac{V_{8/20}}{V_{16/25}} = \frac{M_{8/20}}{M_{16/25}} = \frac{0,39}{0,26} = 1,5 \rightarrow V_{8/20} + V_{16/25} = 450,84$$

$$V_{8/20} = 1,5 \times V_{16/25}$$

Après résolution :

$$V_{16/25} = 180,34 \text{ litres}$$

$$V_{8/20} = 1,5 \times 180,34 = 270,5$$

$$V_{8/20} = 270,5 \text{ litres}$$

*Mélange de 03 granulats B20 : 3/8, 8/20 et 16/25*

Proportion des granulats :

- ↳ Sable 0/1 : 30%
- ↳ Gravier 3/8 : 12%
- ↳ Gravier 8/20 : 32%
- ↳ Gravier 16/25 : 26%

De façon analogue on détermine la composition volumique et massique de ces constituants.

Mélange	Ciment Kg	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg	Masse Vol théo Kg
2 Granulats	375	197	679		758	505	2514
3 Granulats			585	234	623	506	2520

Tableau N°7 : Récapitulatif des proportions des constituants pour B20 pour 1m<sup>3</sup> de béton

## 2. Résistance nominale spécifiée : 25 MPa

✓ Dosage en ciment

$$f_{c28} = G \times \sigma_c \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad \text{avec } f_{c28} = 1,15 \sigma_c = 1,15 \times 25 = 29 \text{ MPa}$$

D= 25 cm, granulat de bonne qualité alors G= 0,5

$$290 = 0,5 \times 325 \times \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,28 \\ A = 6 \text{ cm} \end{array} \right\} \longrightarrow C = 400 \text{ kg} + \text{fluidifiant (équivalent à 460 kg)}$$

$$\frac{C}{E} = 2,28 \text{ par conséquent } \frac{E}{C} = 0,44$$

✓ Dosage en eau

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,28 \\ C = 400 \text{ kg} \end{array} \right\} \longrightarrow E = 175,5 \text{ litres}$$

✓ Dosage en granulat

Tracé de la courbe de référence

$$X_A = \frac{D}{2} = 12,5 \text{ mm}, \quad Y_A = 50 - D^{0,3} + K_1$$

$$\left. \begin{array}{l} C = 400 \text{ kg} \\ \text{Granulat concassé et vibration normale} \end{array} \right\} \longrightarrow K_1 = -2$$

$$Y_A = 43\%$$

$$X_B = D = 25 \text{ mm} : \quad Y_B = 100\%$$

*Mélange de 02 granulats B25 : 8/20 et 16/25*

Proportion des granulats :

⚡ Sable : 34 %

↓ Basalte 8/20 : 40%

↓ Basalte 16/25 : 26%

$$\text{Coefficient de compacité corrigé } \gamma = 0,825 + \frac{(400 - 350)}{5000} = 0,835$$

$$\text{Volume total absolu} = 0,835 \times 1000 = 835 \text{ litres}$$

$$\text{Volume ciment} : \frac{400}{3,1} = 129 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des granulats} : 830 - 129 = 706 \text{ litres}$$

Le rapport des masses diffère de celui des volumes

Détermination du volume des granulats

$M_g$  : masse gravier  $M_s$  : masse sable  $V_G$  : Volume Granulats  $V_g$  : Volume gravier  $V_s$  :

Volume sable

$$\frac{M_g}{M_s + M_g} = 0,66 \text{ et } \frac{M_s}{M_s + M_g} = 0,34$$

$$\text{Donc } \frac{M_s}{M_g} = \frac{0,34}{0,66} = 0,944$$

$$\text{or } M_s = \rho_s \times V_s = 2,63 \times V_s \text{ et } M_g = \rho_g \times V_g = 2,8 \times V_g \rightarrow \frac{V_s}{V_g} = 0,54845$$

$$V_s = 0,54845 \times V_g = 0,54845 \times (V_G - V_s) \rightarrow V_s = \frac{0,54845}{1,54845} V_G \rightarrow V_s = \frac{0,54845}{1,54845} \times 706$$

$$V_s = 244,32 \text{ litres}$$

$$V_g = V_G - V_s \rightarrow V_g = 706 - 244,32 = 445,47 \text{ litres}$$

$$V_g = 445,47 \text{ litres}$$

$$V_g = V_{8/20} + V_{16/25} = 445,84 \text{ et } \frac{V_{8/20}}{V_{16/25}} = \frac{M_{8/20}}{M_{16/25}} = \frac{0,40}{0,26} = 1,4 \rightarrow V_{8/20} + V_{16/25} = 445,84$$

$$V_{8/20} = 1,4 \times V_{16/25}$$

Après résolution :

$$V_{16/25} = 175,42 \text{ litres}$$

$$V_{8/20} = 1,5 \times 180,34 = 270,5$$

$$V_{8/20} = 270,15 \text{ litres}$$

Mélange de 03 granulats B25 : 3/8, 8/20 et 16/25

Proportion des granulats :

↓ Sable 0/1 : 28%

- ↳ Gravier 3/8 : 10%
- ↳ Gravier 8/20 : 36%
- ↳ Gravier 16/25 : 26%

De façon analogue on détermine la composition volumique et massique de ces constituants :

Mélange	Ciment Kg	Adjuvant g	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg	Masse Vol théo Kg
2 Granulats	400	1400	176	879		758	505	2468
3 Granulats				545	195	701	508	2522

Tableau N°8: Récapitulatif des proportions des constituants pour B25 pour 1m<sup>3</sup> de béton.

### 3. Résistance nominale spécifiée : 30 MPa

#### ✓ Dosage en ciment

$$f_{c28} = G \times \sigma_c \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \text{avec } f_{c28} = 1,15 \sigma_n = 1,15 * 25 = 34,5 \text{ MPa}$$

D= 25 cm, granulats de bonne qualité alors G= 0,5

$$345 = 0,5 \times 325 \times \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,62 \\ A = 6 \text{ cm} \end{array} \right\} \longrightarrow C = 400 \text{ kg} + \text{fluidifiant (équivalent à 140 kg de ciment)}$$

$$\frac{C}{E} = 2,62 \text{ par conséquent } \frac{E}{C} = 0,38$$

#### ✓ Dosage en eau

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 2,62 \\ C = 400 \text{ kg} \end{array} \right\} \longrightarrow E = 153 \text{ litres}$$

#### ✓ Dosage en granulats

Tracé de la courbe de référence

$$X_A = \frac{D}{2} = 12,5 \text{ mm}, \quad Y_A = 50 - D^{0,5} + K_1$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Vibration normale} \\ \text{Granulats concassés} \\ C = 400 \text{ kg} \end{array} \right\} \longrightarrow K_1 = -2$$

$$Y_A = 43\%$$

$$X_B = D = 25\text{mm}; Y_B = 100\%$$

Mélange de 02 granulats B30 : 8/20 et 16/25

Proportion des granulats :

$$\downarrow \text{Sable} : 34\%$$

$$\downarrow \text{Basalte } 8/20 : 40\%$$

$$\downarrow \text{Basalte } 16/25 : 26\%$$

$$\text{Coefficient de compacité corrigé } \gamma = 0,825 + \frac{(400 - 350)}{5000} = 0,835$$

$$\text{Volume total absolu} = 0,835 \times 1000 = 835 \text{ litres}$$

$$\text{Volume ciment} : \frac{400}{3,1} = 129 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des granulats} : 830 - 129 = 706 \text{ litres}$$

Le rapport des masses diffère de celui des volumes

Détermination du volume des granulats

$M_g$  : masse gravier  $M_s$  : masse sable  $V_G$  : Volume Granulats  $V_g$  : Volume gravier  $V_s$  :

Volume sable

$$\frac{M_g}{M_s + M_g} = 0,66 \quad \text{et} \quad \frac{M_s}{M_s + M_g} = 0,34$$

$$\text{Donc } \frac{M_s}{M_g} = \frac{0,34}{0,66} = 0,944$$

$$\text{or } M_s = \rho_s \times V_s = 2,63 \times V_s \quad \text{et} \quad M_g = \rho_g \times V_g = 2,8 \times V_g \quad \rightarrow \quad \frac{V_s}{V_g} = 0,54845$$

$$V_s = 0,54845 \times V_g = 0,54845 \times (V_G - V_s) \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{0,54845}{1,54845} V_G \quad \rightarrow \quad V_s = \frac{0,54845}{1,54845} \times 706$$

$$V_s = 244,32 \text{ litres}$$

$$V_g = V_G - V_s \quad \rightarrow \quad V_g = 706 - 244,32 = 445,47 \text{ litres}$$

$$V_g = 445,47 \text{ litres}$$

$$V_g = V_{8/20} + V_{16/25} = 445,84 \quad \text{et} \quad \frac{V_{8/20}}{V_{16/25}} = \frac{M_{8/20}}{M_{16/25}} = \frac{0,40}{0,26} = 1,4 \quad \rightarrow \quad V_{8/20} + V_{16/25} = 445,84$$

$$V_{8/20} = 1,4 \times V_{16/25}$$

Après résolution :

$$V_{16/25} = 175,42 \text{ litres}$$

$$V_{8/20} = 1,4 \times 180,34 = 270,5$$

$V_{B20} = 270.15$  litres

Mélange de 03 granulats B30 : 3/8 – 8/20 – 16/25

Proportion des granulats :

- ↓ Sable 0/1 : 28%
- ↓ Gravier 3/8 : 10%
- ↓ Gravier 8/20 : 36%
- ↓ Gravier 16/25 : 26%

De façon analogue on détermine la composition volumique et massique de ces constituants :

Mélange	Ciment Kg	Adjuvant g	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg	Masse Vol théo Kg/m <sup>3</sup>
2 Granulats	400	1620	153	679		758	506	2466
3 Granulats				585	195	701	506	2522

Tableau N°9 : Récapitulatif des proportions des différents constituants pour B30

**Partie B**

**ETUDE EXPERIMENTALE DES BETONS HYDRAULIQUES**

## Chapitre I : CONFECTION DU BETON: procédures et méthodes techniques d'exécution

Après le choix judicieux des constituants du béton (granulats, ciment, eau, adjuvants éventuellement) et la maîtrise des principes de calcul de ces derniers, il faut passer à la phase fabrication dont la non maîtrise des règles peut conduire à un béton fabriqué différent de celui conçu aussi bien en ce qui concerne le béton frais que celui durci. En effet, le choix de la qualité et de la quantité des constituants est une condition nécessaire mais pas suffisante pour l'obtention d'un béton fabriqué répondant aux exigences et spécifications des cahiers de charges. Un soin particulier doit être apporté aux phases de fabrication, transport, mise en place et finition.

### I. Confection du béton : procédure et méthode technique d'exécution

Un béton est un mélange défini par une formulation ou par un fuseau, par lesquels on prévoit les quantités des différents constituants pour un volume particulier de béton (généralement le mètre cube) et pour lequel on annonce certaines performances (performances de base : consistance et résistance mécanique).

Outre cette demande, d'autres propriétés découlant des règles de l'art sont également attendues comme par exemple l'absence de ségrégation lors des manutentions et la compacité maximale une fois le béton en place.

A partir du choix des constituants, ces propriétés sont obtenues grâce au respect des bonnes pratiques pour la fabrication du mélange.

La fabrication du béton consiste à organiser les constituants pour donner au mélange la consistance et la cohésion, qui permettent d'assurer sa bonne mise en place, et la résistance et la compacité, qui donnent à l'ouvrage la durabilité escomptée (figure 8).

Pour que le béton acquière les propriétés attendues, il faut que les constituants soient dans les proportions définies par la formule et que la position relative des éléments respecte les conditions particulières pour que les réactions physico-chimiques se développent normalement.

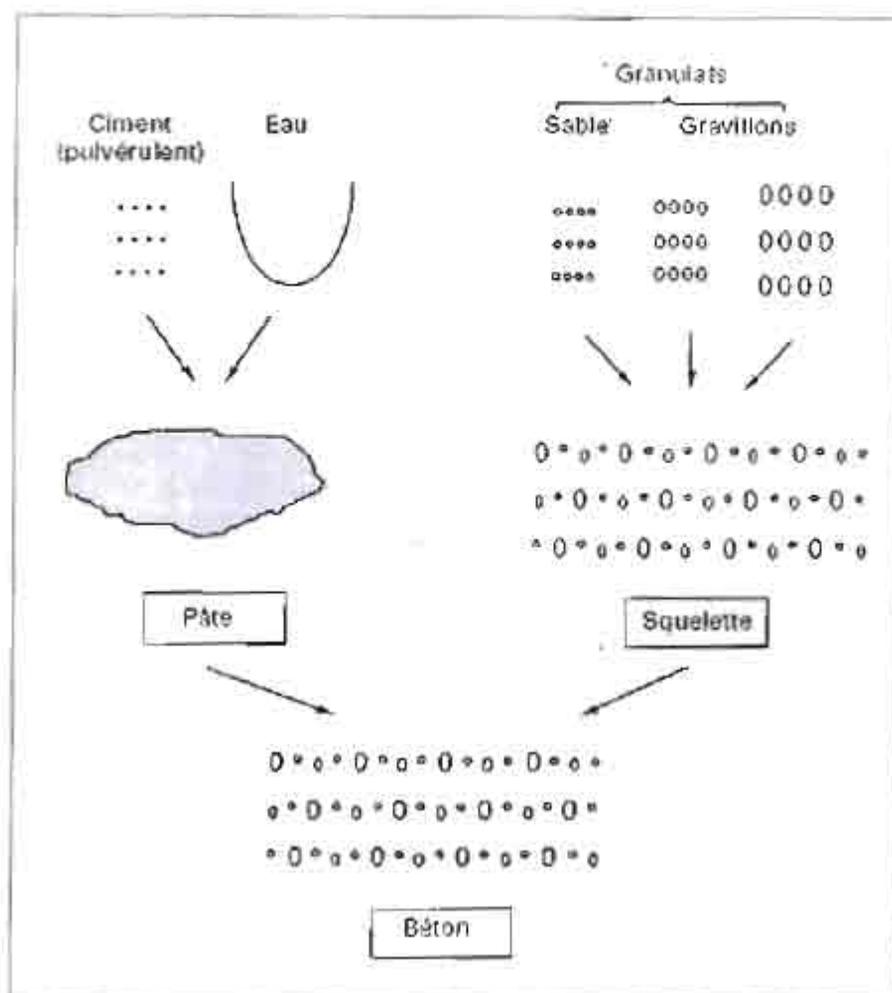


Figure n° 8 : Image symbolique de la construction du béton

Les granulats utilisés doivent être de préférence secs, non absorbants et propres. Si ces derniers ne sont pas secs, leur taux d'humidité doit être mesuré et leur masse volumique corrigée en conséquence.

La teneur en eau du béton doit être calculée en tenant compte de la teneur en humidité des granulats, de l'eau de gâchage et de la teneur en eau des adjuvants. Aucune réduction de la teneur en eau ne doit être faite dans le cas des bétons fluidifiés par ajout de plastifiants ou super plastifiants et lorsque les essais sur des adjuvants hydrofuges de masse sont effectués à même rapport E/C.

#### ➤ Procédure de malaxage

Dans l'opération de fabrication du béton, le malaxage est une étape importante puisque le but de ce dernier est de mélanger toutes les matières premières de façon à ce que la pâte de ciment enrobe toutes les particules de granulats et assure le collage. Ainsi l'uniformité et l'homogénéité du béton dépendent en bonne partie de la qualité du malaxage.

La méthode de malaxage suivante doit être adaptée afin de garantir la répétabilité des résultats et d'éliminer l'effet que pourrait avoir une absorption d'eau initiale sur la consistance.

- Utiliser un malaxeur à cuve ouverte et action forcée, rempli au minimum à 50 % de sa capacité (et au maximum à 90 % de sa capacité).
- Humecter l'intérieur de la cuve à l'aide d'un linge humide si celle-ci est sèche.
- Introduire dans la cuve la totalité des granulats secs puis la moitié de la quantité d'eau de gâchage.
- Malaxer pendant 2 min, puis laisser reposer 2 autres minutes. Recouvrir la cuve pendant la période de repos pour réduire les effets de l'évaporation.
- Remettre le malaxeur en marche pendant 30 s après ou pendant l'addition du ciment. Pendant les 30 secondes suivantes, ajouter le reste d'eau (plus l'adjuvant dans le béton adjuvanté). Malaxer pendant 2 min.
- Dans le cas d'adjuvants en poudre, ajouter l'adjuvant aux constituants secs du béton, sauf indication contraire du fabricant.
- Déterminer la consistance dans les 5 min qui suivent la fin du malaxage.
- Si la consistance ne correspond pas aux limites fixées (sauf pour les bétons adjuvantés à +même rapport B/C), jeter le béton et recommencer l'opération en modifiant la quantité d'eau.

Mesurer la teneur en air et confectionner les éprouvettes dans les 30 min qui suivent la fin du malaxage.

#### ➤ Procédure d'acheminement

Déversé directement de la centrale de fabrication dans une benne ou transporté en bétonnière portée jusqu'au point de livraison, le béton est acheminé jusqu'à son emplacement définitif par des méthodes telles que la séparation des constituants soit évitée au maximum et que toute pollution soit écartée.

##### • *Durée d'acheminement*

Les variations excessives de température ou les risques de dessiccation doivent conduire à prendre toutes dispositions pour réduire la durée d'acheminement et à protéger la conduite.

Les adjuvants accélérateurs ou retardateurs ne seront utilisés qu'après un essai de convenance.

Le programme de bétonnage et de fabrication de béton est organisé afin de limiter au maximum les attentes en cours ou en fin d'acheminement.

##### • *Mise en place directe*

Dans le cas des dallages, radiers, planchers et poutres : mise en place directe par goulotte,



bandes transporteuses ou pompage d'une façon semi continue, ou bien discontinu par benne. La mise en place directe permet le suivi visuel du remplissage et de l'efficacité du serrage par vibration interne.

On doit éviter l'accumulation locale du béton, génératrice de ségrégation, et, dans le cas d'un ouvrage sur étalement, de charges concentrées.

- *Mise en place indirecte*

Par l'intermédiaire d'un tube souple ou d'un tube rigide (tube rougeur) à partir d'une benne ou d'une trémie tampon, la progression du béton et son serrage doivent être suivis soit directement par de fenêtres ménagées dans les coffrages, soit indirectement par sondage voire par caméra de télévision (bétonnage sous l'eau ou en sous œuvre).

- *Déversement par goulotte*

La section et la pente peuvent varier en fonction de du diamètre maximal des granulats et de la consistance du béton, un déflecteur placé à l'extrémité de la goulotte ou de la conduite doit permettre de limiter les risques de ségrégation du mélange. Après chaque opération, la goulotte doit être nettoyée, si possible hors de la proximité immédiate de l'ouvrage.

- *Déversement par benne*

La vidange de la benne est opérée progressivement et le point de déversement choisi en arrière du front d'avancement du béton. Pour la mise en place du béton dans les murs et les poteaux de plus de 3m de hauteur, la benne doit être prolonger par un tube afin d'éviter la chute libre du béton.

Pour les poutres de grande hauteur à l'exception des poutres cloison, on bétonnera en talus à partir de l'un ou l'autre des extrémités, ou de deux extrémités de l'ouvrage, exception faite pour les bétons fluidifiés.

- *Transfert par pompage*

Dans les cas usuels, la distance maximale de transfert par pompage est d'environ 300m horizontalement et de 100m verticalement. Au delà de ces cas, il sera nécessaire d'étudier des dispositions particulières ayant trait soit au matériel soit à la formulation du béton.

La distance équivalente de transport peut être évaluée en prenant en première approximation la formule suivante :

$$D + 5 H + 10 C_1 + 5 C_2$$

Où

D = distance horizontale en mètre

H = Dénivellation en mètre vers le haut

$C_1$  = nombre de coude à  $90^\circ$

$C_2$  = nombre de coude à  $135^\circ$

➤ **Procédure de bétonnage par temps chaud et froid**

• *Temps chaud*

Pour le bétonnage par temps chaud (ambiance supérieure à  $25^\circ\text{C}$ ) les dispositions suivantes seront appliquées afin d'éviter la perte d'humidité et/ou un raidissement rapide du béton avant mise en œuvre.

- Mise en œuvre en réduisant toute attente ;
- Utilisation d'un retardateur de prise ou d'un ciment à faible chaleur d'hydratation ;
- Limitation de la température du béton frais. Il est conseillé de faire en sorte que cette température ne dépasse pas  $30^\circ\text{C}$  soit en utilisant de l'eau froide pour le gâchage soit de la glace pour tout ou partie de l'eau ;
- Adaptation des horaires de bétonnage aux variations climatiques diurnes (bétonnage aux heures optimales, voire la nuit) ;
- Tenir compte de l'hygrométrie ambiante comme de celle du vent.

• *Temps froid*

Pour le bétonnage par temps froid (ambiance inférieure ou égale à  $5^\circ\text{C}$ ), certaines dispositions particulières après étude seront prises.

En règle générale, tenir compte des principales recommandations suivantes :

- Choisir un ciment à durcissement rapide,
- Maintenir un rapport eau/ciment aussi faible que possible,
- Employer un adjuvant (ou des adjuvants composés) permettant soit d'accélérer la prise et le durcissement (mise hors gel) ;
- Réchauffer les granulats en stock ou en centrale. Il est conseillé de ne réchauffer que la quantité directement nécessaire (danger de gel de l'eau de condensation) ;
- Préchauffer l'eau de gâchage,
- Eliminer neige ou glace des coffrages et des armatures,
- Au moment du bétonnage utiliser un béton dont la température est de  $5^\circ\text{C}$  au minimum ;
- Calorifuger les coffrages pour avoir une résistance thermique d'autant plus grande que les pièces sont moins épaisses,
- Abriter le béton fraîchement coulé du vent et, à la limite, l'isoler dans une enceinte chauffer en prenant soin d'empêcher une évaporation excessive d'eau.

## CHAPITRE II : EXPERIMENTATION ET INTERPRETATION

Une formulation d'un béton hydraulique comprend deux phases essentielles que sont le choix des différents constituants en fonction de leur disponibilité, des performances voulues et la détermination de leurs proportions dans le mélange. Après avoir défini les procédures et méthodes techniques d'exécution de la confection du béton, s'ensuit alors son expérimentation.

### I.1. Caractéristiques des ingrédients utilisés pour l'expérimentation

#### ✓ Ciment

Le ciment utilisé est un ciment ordinaire, normal de type CEM II/A-32,5 R de la SOCO CIM. Les essais réalisés sur le ciment nous ont fournis les résultats suivants :

- Consistance normale : 28,3% ;
- Prise initiale : 225 mn ;
- Prise finale : 345 mn ;
- Résistance à la compression à 7 jours : 26,2 MPa ;
- Résistance à la compression à 28 jours : 39,5 MPa

#### ✓ L'eau

L'eau utilisée est celle de la SDE ; elle est potable et exempte de toutes impuretés susceptibles d'altérer la qualité du béton.

#### ✓ Le sable

Le sable utilisé est un sable de mer. En effet, il est trop fin avec notamment un module de finesse de 1,16 et de poids spécifique 2,63. Cependant, il est trop propre.

$$\gamma_s = \frac{(P_3 - P_1) \times d}{P_3 + P_2 - P_1 - P_4}$$

Avec : P1 = Poids pycnomètre seul + bouchon.

P2 = Poids pycnomètre rempli d'eau + bouchon

P3 = Poids pycnomètre rempli de matériau + bouchon

P4 = Poids pycnomètre rempli de matériau + eau + bouchon.

d = densité en eau fonction de la température

Prise d'essai N°		1	2
Addition du matériau $t_0$		10h50	10h57
Agitation - lavage	$t_0 + 10$ mn	11h00	11h07
Mise au repos	$T_0$	11h02	11h09
Lectures	$T_0 + 20$ mn	11h22	11h29
Hauteur du flocculat $h_1$ (cm)		9,8	9,7
Hauteur du sédiment au piston $h_2$ (cm)		9,5	9,3
Hauteur du sédiment à vue $h'_2$ (cm)		9,7	9,6
Equivalent de sable sur prise d'essai	PISTON	97	95,88
	A VUE	98,98	98,96
Equivalent de sable sur échantillon	PISTON	96,44	
	A VUE	98,97	

Tableau N°10: Résultats essai équivalent de sable

ESSAI	1	2	3
Pycnomètre seul ( $P_1$ )	106,75	102,99	102,98
Pycnomètre + liquide ( $P_2$ )	354,05	350,43	350,28
Pycnomètre + matériau ( $P_3$ )	131,66	128,08	127,52
Pycnomètre + matériau + liquide ( $P_4$ )	369,58	365,95	365,01
Température (°c)	26	26	26
Volume spécifique	0,9978019	0,9978019	0,9978019
Poids spécifique	2,65	2,62	2,63
	2,63		

Tableau N°11: Résultats essai poids spécifique

## ✓ Le basalte

C'est un granulat de bonne qualité couramment utilisé pour un béton de bonne qualité. Il provient des gisements de Diack. Trois classes de granulats, à savoir les classes 3/8, 8/16 et 16/25 ont été utilisés pour cette étude. La densité du basalte est de 2,8.

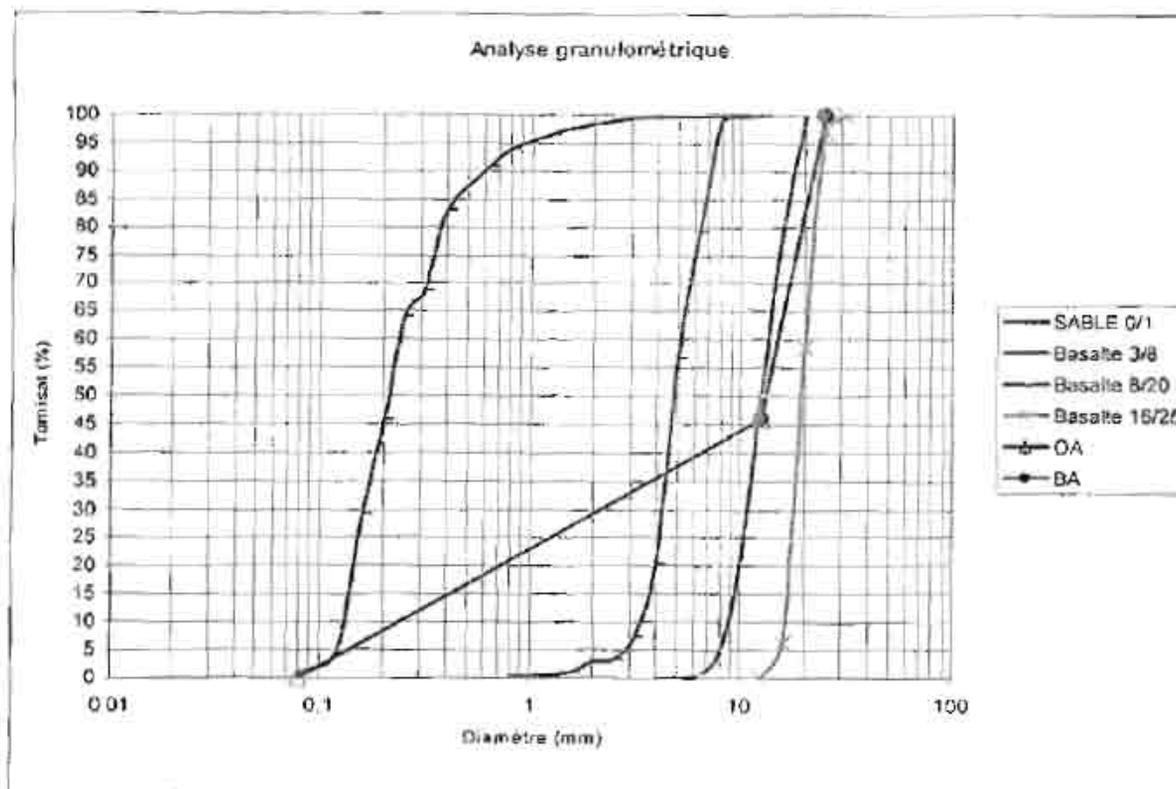


Figure N°8 : Courbe granulométrique sable, basalte 3/8, 8/20 et 16/25

#### ✓ L'adjuvant

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé le PLASTIMENT 22S qui est un adjuvant liquide pour béton, de couleur brune agissant comme réducteur d'eau puissant ou plastifiant. Son action permet l'obtention de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Il est applicable sur tout type de béton et particulièrement recommandé en BPE (Béton Prêt à l'Emploi).

Le PLASTIMENT 22S, par son action fortement défloculante, agit sur les grains de ciment en augmentant sensiblement la maniabilité du béton même en réduisant la quantité d'eau de gâchage.

A dosage élevé, il augmente le temps de prise du béton, ce qui conduit à un meilleur maintien de la maniabilité, en particulier en période chaude.

Sur le béton durci, il permet l'obtention d'une plus grande compacité et des résistances mécaniques élevées qui se traduisent par de meilleures performances en terme de durabilité.

Le dosage est de 0,2 à 1,3% du poids du ciment. L'effet retardateur de prise devient sensible à partir de 0,5 % (pour une température de 20°C). Pour notre cas, un dosage de 0,3% a été opté.

#### 1.2. Confection et mûrissement des éprouvettes.

Après avoir déterminé les quantités des différents constituants, on passe à la confection du béton. Les gâchées ont été effectuées avec une petite bétonnière.

Compte tenu du fait que la teneur en eau du sable est très variable, la quantité d'eau requise a

été déterminée à partir de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams en fixant un affaissement égal à  $6 \pm 1$  cm.

Il convient aussi de noter que :

- plus l'élanement est important, plus la valeur de rupture de l'éprouvette est faible ;
- plus le diamètre de l'éprouvette est important, plus sa résistance est faible.

La mise en place du béton est effectuée par piquage à vingt cinq (25) coups sur trois (3) couches puis vibré normalement. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et sont conservées dans l'eau pour un mûrissement pendant sept (7) et vingt huit (28) jours. En effet, compte tenu de la durée de l'hydratation du ciment, il est nécessaire de maintenir pendant cette période l'eau libre qui entre dans la composition du béton et donc de limiter son évaporation par les surfaces.

Les résistances sont mesurées sur des moules cylindriques de diamètre 15 cm et d'élanement 2, dont la section est de  $176,7 \text{ cm}^2$  : ce sont les éprouvettes normalisées de hauteur 30 cm et de diamètre 15 cm. L'appareil d'essai, est en effet une presse hydraulique conforme aux exigences de la norme ASTM E4.

Un surfacage au soufre mélangé avec 40 % de sable est effectué sur une couche de 1 à 2 mm afin d'assurer un parallélisme entre les faces de l'éprouvette ; ceci permettant de minimiser les risques d'erreur liés au frottement excessif et à l'apparition d'effort de cisaillement.

L'éprouvette est soumise à une charge uni axiale croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

$$\sigma_c = \frac{4 \times F_c}{\pi \times D^2}$$

Où  $F_c$  représente la charge de rupture et  $D$  le diamètre de l'éprouvette.

Le tableau N°IX ci-dessous présente les résultats des écrasements au septième et vingt huitième jour.

### 1.3. Présentation et interprétation des résultats

Les résultats de l'essai de compression montrent que dès le septième jour, les résistances visées sont atteintes.

Elles augmentent de façon considérable au 28ème jour. Cela était prévisible du fait, d'une part, qu'on s'est mis dans le cas le plus défavorable en utilisant dans la formule de Bolomey la classe garantie ( $\sigma = 32.5 \text{ MPa}$ ) au lieu de la classe vraie ( $\sigma = 39.5 \text{ MPa}$ ) et d'autre part de la qualité du granulat de basalte utilisé qui est propre, très dense et rugueux.

De même, un soin particulier a été apporté au niveau de la phase fabrication où le malaxage qui occupe une place importante a été mené dans les règles de l'art.

Par ailleurs, une différence de résistance est notée entre le mélange à 02 granulats (classes 8/20 et 16/25) et celui à 03 granulats (classes 3/8, 8/20 et 16/25) qui est en faveur de ce dernier. Ceci montre l'influence de la granulométrie sur la résistance du béton.

En effet, le mélange à 03 granulats présente une granulométrie étalée, ce qui rend le béton plus compact du fait que les grains 3/8 vont remplir l'espace entre les granulats de plus grand diamètre, lequel espace étant occupé dans l'autre cas par la pâte de ciment et de l'air occlus. Des variations de résistance sont notées sur les éprouvettes d'une même gâchée de béton. Les sources d'erreurs probables peuvent s'expliquer comme suit :

La mesure de la résistance à la compression est faite selon un essai dit «<compression simple>>, l'adjectif simple signifiant que l'effort de compression est uniaxial. Mais cet essai dit «<simple>> est, en fait, difficile à réaliser et deux sources d'erreur, au moins, peuvent survenir :

- les frottements excessifs produisant une erreur par excès ;
- les cisaillements produisant une erreur par défaut.

Compte tenu de l'importance de la résistance à la compression, il est indispensable que la personne qui formule un béton s'assure de la justesse de cet essai et se donne les moyens de la contrôler régulièrement, en faisant étalonner la presse.

- **Fabrication des éprouvettes** : La façon dont l'éprouvette de béton est vibrée peut modifier sa teneur en air et par conséquent sa résistance. C'est pourquoi il est indispensable de déterminer le volume d'air occlus.

- **Surfaçage** : le frottement entre les plateaux de la presse et l'éprouvette limite l'extension transversale des extrémités au cours de la montée en contraintes (effet de poisson) et produit un frottement. Or comme une contrainte transversale de 1 MPA augmente la résistance de 5 MPA, il importe que les conditions d'interface entre la presse et l'éprouvette soient bien définies, d'où l'importance du surfaçage normalisé.

Le surfaçage doit assurer le parallélisme des faces, sinon apparaissent des contraintes de cisaillement qui entraînent une erreur par défaut.

- **Essai de compression simple** : les plateaux de la presse doivent s'appliquer constamment et uniformément, pendant toute la durée de l'essai, sur la face entière de l'éprouvette. Cette liberté nécessaire du mouvement est assurée par la rotule, une pièce importante de la presse. Un mauvais fonctionnement de celle-ci induit des contraintes de cisaillement et une erreur par défaut. Le décentrement de l'éprouvette par rapport à l'axe de la presse produit également des contraintes de cisaillement et une erreur par défaut de 6% pour un décentrement de 6mm et de 17% pour un décentrement de 12mm.

On voit nettement que les surfaces de rupture épousent le contour des granulats. Ceci est dû à une séparation entre le mortier et les granulats par rupture de l'auréole de transition le long des surfaces latérales des granulats (par rapport à la direction de la charge de compression).

Il est constaté également que les masses volumiques sont assez élevées par rapport à celles théoriques. Les valeurs obtenues s'écartent un peu de la gamme des bétons de densité normale et tendent vers des bétons lourds du fait de la densité élevée du basalte qui leur confère une bonne compacité.

Eprouvette N°	O2 granulats: 8/20 - 16/25			O3 granulats: 3/8 - 8/20 - 16/25		
	1	2	3	1	2	3
B20	2810,56	2735,11	2735,11	2735,11	2678,52	2810,56
	2760,26			2741,39		
B25	2716,24	2584,2	2678,52	2735,11	2735,11	2640,79
	2659,66			2703,67		
B30	2678,52	2640,79	2697,38	2697,38	2772,83	2810,56
	2672,2			2760,3		

Tableau N°12 : Masse volumique du béton durci

Les résultats assez satisfaisants de l'essai de compression obtenus au septième (7) et vingt-huitièmes (28) jour confirment que la technique ne ment pas. Il suffit tout simplement de faire preuve de volonté et de sérieux pour s'inscrire résolument dans la démarche qualité.

Age	Résistance spécifiée	Classes granulaires	02 granulats : 8/20 - 16/25			03 granulats: 3/8 - 8/20 - 16/20		
			Eprouvette N°	1	2	3	1	2
7 <sup>ème</sup> jour	B20	Résistance à la rupture en MPa	19,24	20,37	20,09	24,67	25,8	26,03
			19,9			25,5		
	B25		28,69	21,5	31,41	28,86	29,43	25,46
			27,20			27,92		
	B30		16,98	31,46	29,43	33,95	38,99	33,39
			25,96			35,44		
28 <sup>ème</sup> jour	B20		33,95	33,95	32,8	35,93	35,08	34,52
			33,57			35,18		
	B25		33,29	35,25	39,33	36,95	39,61	35,08
			35,96			37,21		
	B30		38,76	39,84	42,1	43,91	44,31	44,59
			40,23			44,27		

Tableau N°13. Récapitulatif des résultats de l'essai de compression simple

Partie C

MAITRISE DE LA QUALITE

## MAITRISE DE LA QUALITE

Le rôle de la fonction « fabrication du béton » est de reproduire à l'identique, en instantané (homogénéité) et dans le temps (stabilité) une composition de béton à l'image de la composition théorique décrite par la formulation.

L'objectif de la maîtrise de la qualité est :

- de faire en sorte que toutes les actions tendent vers ce but ;
- de s'assurer que tout le cycle se déroule comme prévu ;
- d'informer le conducteur de la centrale dès qu'une anomalie se présente dans le cycle de fabrication avant que cette dernière ne devienne une non-conformité ;
- de mettre à la disposition du « client » les informations utiles pour qu'il puisse prévoir le devenir du béton et engager éventuellement les dispositions nécessaires pour atteindre le but visé.

### Domaine concerné

Pour la fabrication du béton, la maîtrise de la qualité concerne la période qui sépare la fourniture des constituants et le départ du béton de la centrale. La qualité pour la fabrication sera la **régularité de la constitution** du mélange tant dans un volume restreint de béton (la gâchée) que tout au long de la production. Pour obtenir une **régularité de constitution** à l'image de la **référence visée**, il faut respecter les proportions des composants et atteindre l'homogénéité souhaitée du mélange. Comme on l'a vu dans le paragraphe relatif au dosage, le respect des proportions correspondant à la référence visée, impose d'abord de bien définir les **valeurs de consignes** et pour cela il est nécessaire de connaître l'état des constituants, état qui peut fluctuer en permanence. Pour le dosage et le malaxage, il faut en premier lieu effectuer les réglages qui permettent d'aboutir à la qualité attendue et vérifier par la suite que ces réglages ne se modifient pas.

La maîtrise de la qualité concerne donc :

- la connaissance de l'état des constituants ;
- la conduite des différents postes formant la centrale (stockage, dosage et malaxage) ;
- la surveillance du fonctionnement du matériel ;
- l'information du conducteur de la centrale.

## Chapitre I : QUALITE ET CONTROLE DE LA QUALITE DU BETON

L'engouement suscité dans les années 80 pour la gestion de la qualité a eu pour effet de placer la qualité au tout premier rang des priorités des entreprises. La mondialisation de l'économie qui se traduit par une concurrence internationale plus importante, la nécessité de réduire les coûts de production, obligent les entreprises à mettre en place des politiques de qualité.

Ainsi la qualité pourrait se définir comme étant l'ensemble des aptitudes à satisfaire des besoins aux meilleures conditions de coût et de délai. En tout cas l'idée que la qualité est une fonction croissante des performances, ou de certaines performances, est abandonnée. La prise en compte dans la définition de la qualité des fonctions de toute nature associées à une catégorie d'emplois conduit parfois à préciser le concept sous l'appellation *qualité d'usage*.

Bien que cette référence aux exigences fonctionnelles doive rester une préoccupation permanente, la définition et la conduite des phases de conception et de fabrication du produit et le contrôle des résultats obtenus au cours de ces phases, particulièrement en fin de fabrication, imposent de disposer d'une traduction des diverses exigences en performances ou caractéristiques mesurables.

Il est souvent considéré comme souhaitable et demandé par les producteurs que les spécifications définissent à elles seules, la qualité requise. Il appartient alors au seul producteur de définir les conditions de fabrication permettant d'assurer, sauf anomalie, le respect des spécifications. Cette séparation des rôles, qui consiste à laisser au client la responsabilité du choix des niveaux de performance dont il a besoin et, le cas échéant, le soin de les contrôler sur les produits livrés, et au producteur la responsabilité du choix des solutions pour satisfaire les performances requises, se heurte, en pratique à des obstacles techniques ou économiques parmi lesquels on peut citer :

- l'impossibilité d'associer un niveau de performance à la satisfaction d'une exigence fonctionnelle ; on se trouve fréquemment dans une telle situation vis-à-vis des exigences de durabilité ou esthétiques, pourtant essentielles aux yeux des clients ;
- l'impossibilité d'associer ou la difficulté de mesurer le niveau de performance pour des raisons techniques (absence de méthode ou incertitude du résultat), de délai ou de coût ;
- la difficulté ou le coût d'une procédure de contrôle, à posteriori, pour vérifier le niveau réel de performance atteint par un ensemble de produits ou une quantité de matériaux, qui résulte des risques de non représentativité physique ou statistique de l'échantillon.

Les clients sont alors conduits, en se référant à l'expérience ou aux règles de l'art, à définir la qualité requise comme un ensemble de spécifications de performances et de prescriptions

portant sur les moyens à mettre en œuvre pour obtenir les performances nécessaires que l'on ne sait pas définir ou vérifier dans des conditions techniques ou économiques acceptables. De la même manière, on est alors normalement conduit à organiser le contrôle de qualité comme un ensemble de dispositions associant des opérations relevant du *contrôle de production* à celles qui appartiennent au *contrôle de conformité*.

Au plan contractuel cette imbrication conduit au développement des procédures d'assurance qualité mises en œuvre par le producteur et transparentes pour le client.

## I. Application au béton hydraulique

### I.1. Qualité du béton

La qualité et le contrôle de la qualité des bétons constituent un cas où l'application des principes précédents se révèle particulièrement fructueuse, bien que délicates. Cela tient à la grande variété d'usage des bétons, à la difficulté de définir des performances accessibles à la mesure dans des conditions techniques, de délais et de coût acceptables, et de la quasi impossibilité de disposer d'éprouvettes qui soient physiquement et statistiquement représentatives du matériau en place dans les produits ou les ouvrages.

Les différentes normes distinguent, de façon d'ailleurs redondante :

- les exigences générales concernant la composition du béton ;
- les exigences relatives à la durabilité, qui se traduisent notamment, elles aussi par des exigences de composition ;
- les spécifications du béton.

Les deux premières catégories sont des **exigences de moyens** portant essentiellement sur la qualité des constituants et les limites de leur proportion dans le mélange.

La troisième catégorie présente une liste des performances exigibles dans tous les cas, dites données de base, et des données complémentaires à choisir selon les emplois parmi lesquels : la densité, la résistance aux attaques chimiques, la résistance à la pénétration de l'eau, la résistance à l'abrasion.

C'est sur les données de base, c'est-à-dire les caractéristiques et performances exigibles dans tous les cas, que portent les procédures de contrôle normalisées. Elles concernent :

- la résistance, en général à la compression à 28 jours ;
- les dimensions maximales des granulats et les exigences de composition ;
- la consistance, ou autre caractéristique équivalente ;

considérées comme représentatives respectivement des performances mécaniques du béton de sa durabilité et de sa capacité à protéger les armatures, de son aptitude à être mis en œuvre dans les conditions prévues.

## 1.2. Conformité d'une réalisation

Toute réalisation est destinée à un usage, c'est-à-dire qu'elle doit satisfaire une fonction qui est définie par l'utilisateur ou son représentant.

Dans le vocabulaire de la construction, le client rédige « un cahier des charges » qui regroupe les différentes spécifications auxquelles doit satisfaire l'exécution.

Pour s'assurer de la conformité à ces spécifications à chaque étape de l'élaboration d'un ouvrage : conception, approvisionnement, exécution, réception, les partenaires mettent en place des moyens d'appréciation permettant d'une part, avant réalisation de chaque étape, de s'assurer que la qualité visée est en mesure d'être obtenue et que d'autre part, après exécution, les preuves objectives de la conformité aux spécifications sont obtenues et rassemblées.

L'obtention de la qualité d'une réalisation implique une méthodologie systématique et formalisée dont l'objectif est, par la préparation de l'exécution, de donner une confiance suffisante dans l'obtention de la qualité requise (c'est l'assurance de la qualité) ; les preuves de cette qualité étant fournies par la matérialisation et la conservation des différents contrôles (c'est le *contrôle de la qualité*).

## 1.3. Plan de contrôle du béton

Le contrôle de la qualité du béton doit permettre :

- de s'assurer de la pertinence des choix et des moyens retenus pour obtenir la qualité : constituants, composition, matériel de fabrication, conditions de transport, moyens de mise en œuvre, conditions de durcissement, cure, etc., compte tenu des exigences ;
- de maîtriser les conditions d'obtention de la qualité pendant la fabrication et la mise en œuvre ;
- de vérifier et d'attester que les spécifications ont bien été respectées pour les matériaux livrés et utilisés. (Tableau N°14 : plan de contrôle des bétons)

On est ainsi amené à organiser les travaux en trois phases :

- la phase préalable à la fabrication : étude et convenance ;
- la phase en cours de fabrication, qui porte sur la maîtrise de facteurs préalablement retenus comme susceptibles de conditionner la qualité requise ; elle inclut la vérification des caractéristiques du béton frais et celles potentielles du béton durci ;
- la phase en cours de mise en œuvre et de durcissement.

Les informations issues de ces trois phases ne sont pas indépendantes et ne doivent être recherchées, interprétées comme telles. En particulier :

- les opérations de contrôle lors de la fabrication et de la mise en œuvre doivent découler des connaissances préalables sur la probabilité d'apparition des défauts et sur les risques attachés

à l'existence de ces défauts ;

- les vérifications de conformité doivent s'appuyer sur les connaissances déjà acquises au cours des phases précédentes.

Il est donc recommandé d'établir un plan de contrôle adapté à chaque cas, qui, pour chaque poste de contrôle, réparti au cours des trois phases, permet d'adopter une modalité adéquate pour constituer un ensemble organisé optimal au plan technico-économique.

Plan de contrôle des bétons							
Phase préalable à la fabrication		Phase en cours de fabrication				Phase en cour de mise en oeuvre	
1	2	3	4	5	6	7	8
Dossier d'étude	Epreuve de convenance	Vérification des équipements de fabrication	Vérification des constituants du béton	Contrôle du processus de fabrication et du béton frais	Vérification des résistances potentielles du béton durci	Contrôle à la mise en oeuvre	Vérification du béton en place

Tableau N°14: Plan de contrôle des bétons

#### I.4. Dossiers d'études des bétons

##### ✓ Contenu

Le dossier d'étude des bétons, élément du PAQ, disponible avant le début des fabrications, comporte :

- la description des moyens de fabrication ;
- lorsqu'un transport est prévu, la description des moyens de transport et l'estimation entre la fin de la fabrication, l'arrivée sur le site et la fin de la mise en oeuvre ;
- la description des moyens de mise en place, y compris les moyens de manutention sur le chantier ;
- les éventuelles conditions particulières relatives au durcissement (température, notamment) ;
- la formule nominale du béton qui fixe, en tenant compte des éléments précédents, la nature,

la qualité et la provenance des différents constituants ainsi que le dosage de chacun ;

- la justification de la formule nominale par rapport aux exigences, soit par l'utilisation de références, soit par l'exécution d'une épreuve d'études, en laboratoire.

#### 1.5. Les épreuves de convenance

Elles ont pour objectif de vérifier, après épreuves d'études, qu'il est possible avec les moyens du chantier d'obtenir les bétons étudiés.

Selon les risques encourus et l'expérience disponible ; l'épreuve de convenance peut prendre plusieurs formes.

Ces épreuves portent sur la vérification des caractéristiques du béton sur des gâchées de composition nominale.

Elles peuvent également concerner les conditions de mise en œuvre ou des résultats d'aspect qui seront appréciés sur des « bétons témoins ».

Ces épreuves permettent fréquemment de s'assurer que la formulation employée permet effectivement d'obtenir un volume de béton compacté de un (1) mètre cube.

#### 1.6. Les épreuves de contrôle

Elles permettent, en cours de réalisation de l'ouvrage, de s'assurer que les caractéristiques requises au titre du contrat sont effectivement obtenues.

Sont en général considérés comme relevant du contrôle de fabrication, les opérations de vérifications du fonctionnement des équipements, la vérification des constituants et le contrôle du processus de fabrication.

##### ✓ Principe et définition

Les contrôles portent sur :

- la vérification de la consistance immédiate avant la mise en œuvre,
- la vérification de la résistance à la compression à 28 jours.
  - Lot d'emploi : c'est une partie d'ouvrage ou un élément homogène d'une partie d'ouvrage. Les différents lots d'emploi sont généralement définis par le contrat.
  - Prélèvement : c'est une quantité de béton frais provenant d'une même gâchée ou unité d'approvisionnement (un seul prélèvement étant effectué par gâchée ou unité) et destinée :
    - à confectionner 3 éprouvettes ;
    - à effectuer une mesure de consistance ;
    - à effectuer des essais complémentaires éventuels.
  - Résultat : sur un prélèvement, un résultat est constitué par :
    - la moyenne des résistances sur les trois éprouvettes,

- une valeur de la consistance.

En résumé :

$n$  prélèvements  $\rightarrow 3n$  éprouvettes  $\rightarrow n$  résultats

✓ Critères de conformité :

Pour vérifier la résistance à la compression à 28 jours, on considère deux critères de conformité qui doivent être satisfaits simultanément :

$$\bar{f}_c \geq f_{c28} + k1$$

$$f_{c1} \geq f_{c28} - k2$$

Avec  $\bar{f}_c$ , moyenne arithmétique des  $n$  résultats,  $f_{c1}$ , plus petite valeur parmi ces  $n$  résultats,  $f_{c28}$ , résistance contractuelle spécifiée.

$k1$  et  $k2$  : paramètres dont les valeurs, en MPa dépendent des situations dans lesquelles on se trouve et des hypothèses statistiques que l'on peut y associer.

## Chapitre II : ASSURANCE DE LA QUALITE

Initialement au 18<sup>ème</sup> siècle, l'artisan contrôlait lui-même tous ses produits, pour s'assurer de leur qualité. Au 19<sup>ème</sup> siècle, devant la croissance de la production, l'industrie naissante adopta la méthode du contrôle par échantillonnage (seuls des exemplaires du produit choisis aléatoirement étaient contrôlés. Les lois de la statistique permettaient d'extrapoler le résultat des échantillons contrôlés à l'ensemble de la production).

Après la Seconde Guerre Mondiale, le monde industriel est passé au stade de "l'assurance qualité". Il s'agissait alors de vérifier que l'entreprise appliquait des principes d'organisation qui permettaient ainsi de maîtriser les anomalies de production.

D'une façon très concise, l'assurance et le contrôle qualité pourraient se résumer par la formule suivante :

- écrire ce qu'on va faire,
- faire ce qu'on a écrit,
- prouver à tout moment qu'on l'a fait.

Par extension, le terme Assurance de la qualité englobe bien souvent l'aspect préparatoire de l'exécution et le contrôle de la qualité.

Le respect de ces principes d'organisation peut être vérifié par un organisme tiers : c'est la certification qui est un stade ultime d'une démarche qualité, mais elle n'est pas obligatoire. Ces principes propres au monde industriel ont été adaptés aux activités de services et à l'administration.

De ce fait seul peut garantir la qualité celui qui la surveille constamment. Les contrôles périodiques des installations de dosage et de malaxage, des composants de base, liants, granulats, ajouts et adjuvants, ainsi que les essais effectués avec les bétons frais et durcis permettent aux entreprises d'octroyer les garanties stipulées pour leurs produits. Le client mettant en oeuvre le béton peut travailler en toute sécurité, les entreprises qui fabriquent le béton prêt à l'emploi garantissant par des protocoles de production la quantité et la qualité conformément à la commande.

### I. Objectif :

L'objectif visé est de mettre en confiance, de rassurer l'utilisateur du produit ou du service.

Elle permet à l'entreprise de démontrer à ses clients son aptitude à les fidéliser par la mise en

place d'un "système qualité", c'est-à-dire une organisation stable donnant l'assurance que la qualité de son produit ne doit rien au hasard et pourra être maintenue et améliorée dans le temps.

La finalité de l'assurance qualité pourrait être la certification d'entreprise délivrée par un organisme indépendant (par exemple en France, l'Association Française pour l'Assurance de la Qualité (AFAQ, en Allemagne, DOS qui a un accord avec l'AFAQ), au Danemark, DS qui a un accord avec l'AFAQ, en Espagne, AENOR qui a accord de reconnaissance mutuelle avec l'AFAQ.)

## H. La certification

La certification à la norme ISO 9001 : 2000 constitue pour les entreprises un moyen de communiquer à leurs différents partenaires et clients, leur volonté et leur engagement dans la voie de la Qualité. C'est aussi une façon de faire reconnaître officiellement tous les efforts consentis par les différents acteurs internes à l'entreprise pour améliorer la qualité des produits et services et son souci de répondre pleinement aux attentes de ses clients.

### ➤ La certification, comment ?

Chaque certification de produits s'appuie sur un référentiel constitué d'un texte normatif définissant les performances exigibles et d'un règlement précisant les modalités d'obtention de la certification. L'élaboration de ces textes suit un processus réglementé. Une large concertation préalable permet de prendre en compte des données allant bien au-delà des préoccupations immédiates : caractéristiques et performances, durée de vie du produit, aptitude à l'emploi et satisfaction des besoins du consommateur... Les industriels s'engagent volontairement à fabriquer les produits conformément aux spécifications fixées

Cet engagement entraîne deux obligations :

- **se doter de moyens de contrôle interne et d'assurance de la qualité à toutes les phases de production.**
- **se soumettre aux audits inspections régulières des résultats du contrôle interne et des modalités d'assurance qualité par un organisme tiers**

Ce concept du contrôle interne vérifié est la clef de voûte de la certification. C'est grâce à lui

que l'organisme certificateur peut garantir que les performances définies sont obtenues.

➤ **La certification, pourquoi ?**

La certification de produits est destinée à sécuriser l'acheteur.

Grâce à l'utilisation systématique de produits titulaires d'une certification, les maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et les entrepreneurs bénéficient de :

- une réduction des coûts de mise en œuvre due à la qualité industrielle;
- une constance des performances mécaniques, thermiques, d'étanchéité...;
- l'assurance d'utiliser des produits dont la conception prend en compte des données allant bien au-delà des habituelles préoccupations à court terme et couvrant l'ensemble des paramètres d'aptitude à l'emploi (longévité du produit, incidence sur l'environnement...);
- une garantie juridique car les produits en béton certifiés sont conformes aux textes normatifs en vigueur;
- l'assurance de respecter les classes de réglementation relatives à la conformité des produits (code des marchés publics – code des assurances).

Il est important de signaler que la certification produit et la certification entreprise ne sont pas contradictoires mais complémentaires.

Le choix de l'une ou l'autre dépend surtout de l'objectif de marché de l'entreprise. Si l'entreprise vise uniquement la commercialisation de ses produits dont elle veut prouver la qualité, compte tenu de l'exigence de plus en plus poussée des consommateurs qui bénéficient de l'opportunité de la libéralisation qui leur offre la possibilité de choisir dans la diversité de gammes de produits qui leur sont offerts, l'entreprise a intérêt à viser la certification de ses produits.

Par contre, si l'entreprise vise des relations de partenariat avec d'autres entreprises avec lesquelles elle peut sous-traiter ou vendre la totalité ou partie de sa production, elle a intérêt à viser la certification de son système qualité.

### III. Plan d'Assurance Qualité (PAQ)

Le Plan d'assurance qualité est un ensemble de documents établis par l'entreprise et soumis à l'acceptation du Maître d'œuvre. Il décrit :

- L'organisation mise en place tout au long de la réalisation du projet,

➤ Les responsabilités et activités de chaque intervenant.

Il s'applique tout au long du déroulement du projet et devra être mis à jour par le groupe de A direction de projet pour chaque décision le mettant en cause.

Sa mise en œuvre a pour but de s'assurer de la traçabilité de la réalisation de l'ouvrage.



Un P.A.Q peut être constitué de trois types de documents éventuellement complétés par des annexes :

➤ Une note d'organisation générale établie par le Directeur des Travaux et présentant globalement le chantier puis décrivant les dispositions générales prises pour gérer la qualité :

- les coordonnées des parties concernées : Maître d'Ouvrage, Maître d'œuvre, Entreprises... ;
- les rappels des parties du contrat qui traitent de l'Assurance qualité ;
- l'organisation générale du chantier en précisant les tâches des différents intervenants (entreprise, fournisseur, sous-traitants, bureaux d'étude, organisme de contrôle, laboratoire... ) ;
- les moyens du personnel sous forme d'organigramme ;
- les moyens généraux en matériels ;
- les conditions générales d'exercice du contrôle du Maître d'ouvrage (points critiques et points d'arrêts, laboratoires... ) ;
- les conditions de gestion et de validation des notes de calcul, plans d'exécution et document d'assurance de la qualité ;
- le principe de fonctionnement du contrôle interne ;

- la liste et le calendrier d'établissement des documents qui seront élaborés en cours de travaux et remis ou tenus à la disposition du Maître d'œuvre ;
  - la liste et les modèles des documents de suivi d'exécution qui seront utilisés ;
  - les conditions de gestion des non-conformités ;
- Une ou des **procédures d'exécution** définissant les moyens et les conditions de réalisation et de contrôle des travaux établies par le responsable de l'exécution de la partie d'ouvrage ou de la tâche concernée et précisant les éléments d'organisation concourant à l'obtention de la qualité :
- les travaux concernés par la procédure,
  - les documents de référence nécessaires à l'exécution (non annexés : pièce du marché, documents établis par l'entreprise...)
  - les moyens en personnel et en matériel nécessaires à l'exécution,
  - les matériaux et fournitures incorporés ou non en précisant leurs caractéristiques et les contrôles de réception effectués,
  - les modes opératoires, méthodologies et instructions particulières pour l'exécution ainsi que les liaisons éventuelles avec d'autres procédures,
  - les contrôles particuliers à réaliser par l'entreprise (intervenant : contrôle interne ou externe ; épreuve de convenance éventuelles ; nature, fréquence des contrôles et critères d'acceptation ; les points sensibles de l'exécution, les points critiques et points d'arrêt.
- Des **documents de suivi et d'exécution**, dressés sous l'autorité du responsable de la phase de travaux concernée répondent à quatre objectifs :
- définir et préparer les conditions pratiques du contrôle de l'exécution avec indication des points critiques et des points d'arrêt,
  - constituer le support de la matérialisation des différents contrôles et des observations éventuelles effectuées au cours de l'exécution. Il est souhaitable que l'ensemble des contrôles (internes, externes et extérieurs) soient portés sur le même document,
  - permettre à la direction des travaux et au Maître d'œuvre de s'assurer que les résultats sont bien conformes aux prévisions,

- offrir au gestionnaire de l'ouvrage, lorsque les documents de contrôles seront regroupés dans le dossier de recollement, les moyens d'être informé sur les conditions d'exécution.

#### IV. Normes d'assurance de la qualité

Il est de plus en plus fait appel à des normes couvrant l'ensemble de l'assurance de la qualité elle-même. Elles sont éditées par un certain nombre d'organismes nationaux de normalisation à l'intention des fabricants, des industries de service etc., aussi bien comme directives pour la gestion d'un système d'assurance de la qualité, qu'en tant que norme établissant les critères par rapport auxquels la capacité d'une entreprise en matière de qualité peut être évaluée. Le comité technique ISO/TC 176 « Assurance de la qualité » prépare sur cet aspect les normes internationales suivantes :

ISO 9000\* - Système qualité – Introduction générale et principes directeurs.

ISO 9001\* - Système qualité – Modèle en vue d'assurer l'aptitude en matière de conception/développement, de production, d'installation et d'entretien.

ISO 9003\* - Système qualité – Modèle en vue d'assurer l'aptitude en matière de contrôle final et d'essai.

ISO 9004\* - Gestion de la qualité et éléments de système qualité – principes directeurs

Les normes ISO 9001, 9002 et 9003 peuvent servir à l'évaluation et l'enregistrement, ou à la certification d'une entreprise. Leur adoption mondiale est du plus grand intérêt pour évaluer l'aptitude qualité dans le commerce international.

Ainsi pouvons nous retenir que l'assurance de la qualité est devenue un impératif pour toute entreprise qui veut assurer ses parts de marché en participant pleinement à cette concurrence internationale.

Toutefois il convient de signaler qu'une prudence s'impose quant à la démarche à adopter qui passe fondamentalement par un respect des procédures puis des contrôles périodiques à effectuer et enfin des traitements de non conformités.

### Chapitre III : MANAGEMENT DE LA QUALITE

Il est souhaitable que l'adoption d'un système de management de la qualité relève d'une décision stratégique de l'organisme. La conception et la mise en œuvre d'un système de management de la qualité tiennent compte de besoins variables, d'objectifs particuliers, des processus mis en œuvre, de la taille de la structure de l'organisme.

La norme ISO 9001 spécifie les exigences relatives à un système de management de la qualité lorsqu'un organisme doit démontrer son aptitude à fournir des produits satisfaisant aux exigences des clients et à la réglementation applicable et qu'il vise à accroître la satisfaction de ses clients.

#### I. Principe de management de la qualité

Diriger et faire fonctionner un organisme avec succès nécessite de l'orienter et de le contrôler méthodiquement et en transparence. Le succès peut résulter de la mise en œuvre et de l'entretien d'un système de management conçu pour une amélioration continue des performances tout en répondant aux besoins de toutes les parties intéressées. Le management d'un organisme inclut le management de la qualité parmi d'autres disciplines de management.

Huit principes de management de la qualité ont été identifiés, qui peuvent être utilisés par la direction pour mener l'organisme vers de meilleures performances.

##### a) Orientation client

Les organismes dépendent de leurs clients, il convient donc qu'ils en comprennent les besoins présents et futurs, qu'ils satisfassent leurs exigences et qu'ils s'efforcent d'aller au-devant de leurs attentes.

##### b) Leadership

Les dirigeants établissent la finalité et les orientations de l'organisme. Il convient qu'ils créent et maintiennent un environnement interne dans lequel les personnes peuvent pleinement s'impliquer dans la réalisation des objectifs de l'organisme.

##### c) Implication du personnel

Les personnes à tous les niveaux sont l'essence même d'un organisme et une totale implication

de leur part permet d'utiliser leurs aptitudes au profit de l'organisme.

d) Approche processus

Un résultat escompté est atteint de façon plus efficiente lorsque les ressources et activités afférentes sont gérées comme un processus.

e) Management par approche système

Identifier, comprendre et gérer des processus corrélés comme un système contribue à l'efficacité et à l'efficience de l'organisme à atteindre ses objectifs.

f) Amélioration continue

Il convient que l'amélioration continue de la performance globale d'un organisme soit un objectif permanent de l'organisme.

g) Approche factuelle pour la prise de décision

Les décisions efficaces se fondent sur l'analyse de données et d'informations.

h) Relations mutuellement bénéfiques avec les fournisseurs

Un organisme et ses fournisseurs sont interdépendants et des relations mutuellement bénéfiques augmentent les capacités des deux organismes à créer de la valeur.

## II. Approche processus

Toute activité ou ensemble d'activités qui utilise des ressources pour convertir des éléments d'entrée en éléments de sortie peut être considérée comme un processus.

Pour qu'un organisme fonctionne de manière efficace, il doit identifier et gérer de nombreux processus corrélés et interactifs. Souvent, l'élément de sortie d'un processus forme directement l'élément d'entrée du processus suivant. L'identification et le management méthodiques des processus utilisés dans un organisme, et plus particulièrement les interactions de ces processus, sont appelés «l'approche processus».

### III. Phases et étapes de la mise en œuvre du système de management de la qualité

Ayant pris la décision ferme de mettre en œuvre un système de management de la qualité, les entreprises ne savent souvent pas par où démarrer. En effet, la norme ISO 9001 V 2000 décrit ci-après les différentes phases et étapes de la mise en œuvre du système de management de la qualité.

L'approche présentée ici se compose de trois phases :

- Développement  
Etudier ce qui se passe dans l'entreprise (c'est-à-dire vos processus)
- Mise en œuvre  
Mise en route du système de management de la qualité.
- Maintenance  
Entretien et améliorer le système de management de la qualité.

Chaque phase contient un certain nombre d'étapes décrites, comme suit :

#### Phase 1 : Développement

Maintenant que le chef d'entreprise a décidé de passer à l'analyse des activités de l'entreprise et qu'il veut travailler plus efficacement, par où doit-il commencer ?

##### ✦ *Etape 1 : Etudier les activités principales de l'entreprise*

Il s'agit à ce niveau de discuter avec ses partenaires ou associés, selon le cas, et énoncer par écrit les activités principales de l'entreprise et de ses principaux clients. A cette fin, il est possible de se servir d'un organigramme. Le chef d'entreprise devra faire un diagnostic de l'existant en identifiant les différents processus.

Ce diagnostic est fait sous forme d'audit qui prend en compte les différents points de la norme et les fonctions de l'entreprise qui ont une incidence sur la qualité du produit.

##### ✦ *Etape 2 : lancement de la mise en œuvre*

Il s'agit de dresser un rapport sur le diagnostic précédent en y portant les améliorations à mettre en place, d'élaborer de façon sommaire un calendrier du projet.

A cette étape, on procède à la nomination du représentant de la direction et/ou du comité de projet qualité et à la préparation du plan de communication en examinant comment les informations circulent d'une personne à l'autre. La communication écrite ou électronique est

souvent un moyen adapté.

Il est important de mettre en œuvre un système de management de la qualité adapté à l'entreprise et non pas à l'entreprise d'adopter un système de management modèle.

#### **Phase 2 : Mise en œuvre et maintenance**

Après la phase développement, il convient d'assurer la mise en route du système de management de la qualité avec une politique orientée client, puis le soutenir et l'améliorer.

##### *✦ Etape 3 : Formation à la gestion du système de management de la qualité*

C'est le moment venu d'impliquer le personnel concerné et de lui faire expliquer par écrit la manière dont il exécute les tâches pour lesquelles il est responsable.

L'enjeu de la formation est aussi de faire comprendre à l'ensemble du personnel les enjeux de la mise en œuvre d'un système de management orienté "client" et de les rassurer face à l'obligation d'une certaine formalisation.

##### *✦ Etape 4 : Mise en place du système de management de la qualité*

Il s'agit à ce niveau d'une réorganisation et mise en place des actions d'améliorations. En effet, le comité Qualité élabore des documents écrits nécessaires à la gestion du système : les méthodes, les instructions de travail.

L'organisme doit établir et tenir à jour un manuel qualité qui comprend :

- a) le domaine d'application du système de management de la qualité, y compris le détail et la justification des exclusions;
- b) les procédures documentées établies pour le système de management de la qualité ou la référence à celles-ci;
- c) une description des interactions entre les processus du système de management de la qualité.

Le système de management de la qualité traduira alors la réalité plutôt que de former un amas de paperasse sans intérêt. La documentation doit être diffusée ; chacun doit pouvoir consulter celle relative à ces activités. Il importe que chacun ait reçu des indications quant au mode de fonctionnement du système de management de la qualité.

##### *✦ Etape 5 : Gestion du système de management de la qualité*

Dans cette étape, on formalise des enregistrements qualité qui consistent en un document qui fournit des preuves tangibles des activités effectuées ou des résultats obtenus.

En fonction des objectifs qualité fixés, on établit des indicateurs qui vont permettre de définir très précisément ce que l'on veut faire. Leur mise en forme et leur suivi dans un tableau de bord amènera à vérifier que l'on est en train de bien faire ce que l'on a dit, et à développer les plans d'action nécessaires pour réduire les inexorables écarts.

Au cours des premières étapes, les améliorations à apporter peuvent être simples et facile à intégrer, mais elles peuvent devenir plus difficiles une fois les possibilités d'améliorations évidentes exploitées. Il vaut la peine de préserver une approche systématique de l'amélioration de la qualité, les bénéfices retirés étant considérables.

Généralement, les améliorations sont intégrées au fur et à mesure que l'argent et les moyens sont disponibles. Une approche réaliste et des progrès constants créeront un sentiment de confiance et de renforceront l'ardeur au travail.

#### ↳ *Etape 6 : Formation / mise en œuvre de l'audit qualité interne*

L'organisme doit mener des audits internes à intervalles planifiés pour déterminer si le système de management de la qualité :

- a) est conforme aux dispositions planifiées, aux exigences de la présente Norme internationale et aux exigences du système de management de la qualité établies par l'organisme;
- b) est mis en œuvre et entretenu de manière efficace.

Un programme d'audit doit être planifié en tenant compte de l'état et de l'importance des processus et des domaines à auditer, ainsi que des résultats des audits précédents. Les critères, le champ, la fréquence et les méthodes d'audit doivent être définis. Le choix des auditeurs et la réalisation des audits doivent assurer l'objectivité et l'impartialité du processus d'audit. Les auditeurs ne doivent pas auditer leur propre travail.

Les responsabilités et les exigences pour planifier, mener les audits, rendre compte des résultats et conserver des enregistrements doivent être définies dans une procédure documentée.

L'encadrement responsable du domaine audité doit assurer que des actions sont entreprises sans délai indu pour éliminer les non-conformités détectées et leurs causes. Les activités de suivi doivent inclure la vérification des actions entreprises et le compte-rendu des résultats de cette vérification.

#### ↳ *Etape 7 : Audit interne*

Il importe de planifier et exécuter un programme d'audit interne et de s'assurer régulièrement que le système de management de la qualité est entretenu et soutenu partout dans l'entreprise.

Il n'est pas toujours facile d'allouer le temps nécessaire aux auditeurs internes, mais les audits internes peuvent constituer un outil efficace pour attiser l'engagement de chacun dans le système de management de la qualité et permettent souvent de déceler des améliorations possibles.

L'audit interne permet de connaître l'efficacité du système de management de la qualité.

La direction doit, à intervalles planifiés, revoir le système de management de la qualité de l'organisme pour assurer qu'il demeure pertinent, adéquat et efficace. Cette revue doit comprendre l'évaluation des opportunités d'amélioration et du besoin de modifier le système de management de la qualité, y compris la politique qualité et les objectifs qualité.

Les enregistrements des revues de direction doivent être conservés.

#### ↓ *Etape 8 : choix de l'organisme certificateur*

Une fois toutes les étapes précédentes franchies, l'entreprise suit alors une procédure de sélection et constitue un dossier en vue d'une demande pour une certification par une tierce partie. L'entreprise aura à répondre au questionnaire d'évaluation préliminaire.

#### ↓ *Etape 9 : Audit de certification*

Pour bien réussir cette dernière étape, une attention toute particulière doit être portée sur la préparation de l'audit à tous les niveaux. Il importe aussi d'établir un plan de communication claire et concise sur l'intervention pour mieux convaincre les auditeurs.

A la suite de cet audit, une déclaration de la conformité à la norme ISO 9001 version 2000 par l'organisme certificateur pourra être établie dans le cadre d'un système de certification formellement reconnu si l'auditeur ne trouve pas de non-conformité sinon après correction des dysfonctionnements, un nouvel audit a lieu.

La certification est à la fois une assurance de la qualité pour les consommateurs (clients) ; un argument commercial pour les fabricants (prestataires). Elle contribue ainsi au développement de l'entreprise en renforçant l'image de marque de ses produits.

### IV. Coût d'Obtention de la qualité :

#### IV.1 Qualité et non qualité

Elle consiste à mettre en œuvre certaines dispositions visant à améliorer les produits et la satisfaction des divers clients.

Si l'on examine des près de l'entreprise, il y a cinq types de clients différents :

- Les clients à qui sont destinés les produits ;
- Les employés à qui sont destinés les salaires et les avantages sociaux en compensation du travail fourni ;
- Les fournisseurs à qui est destiné de l'argent en compensation de produits ou services qu'ils vendent ;
- Les actionnaires à qui sont destinés les dividendes en compensation des capitaux versés
- Les collectivités locales, territoriales, administrations, à qui sont destinées certaines informations et cotisations.

Ainsi peut être décrit le concept « qualité totale » qui veut que tout client ait un besoin ou une attente de l'entreprise.

L'homme s'intéresse à la qualité, à l'intérieur de l'entreprise pour principalement deux raisons : économiques et techniques.

Les raisons économiques sont :

- la diminution des dysfonctionnement des l'entreprise ;
- l'augmentation de la production et de la rentabilité de l'entreprise ;
- la maîtrise des coûts qui permet de distinguer les activités rentables de celle qui le moins ;
- l'assurance de la pérennité de l'entreprise à moyen et surtout à long terme ;
- la volonté nationale d'un pays d'accroître sa puissance.

Les raisons techniques sont :

- les réalisations de produits à forte technicité et très complexes
- l'assurance de la reproductibilité (être toujours capable de réaliser des produits avec le même niveau de caractéristiques
- l'assurance d'une évolutivité constante des produits et technologies afin d'améliorer les capacités, précisions, commodités, sécurité et voire et banaliser.

La norme ISO 8402 donne une définition de la qualité sur laquelle, il est nécessaire de commenter :

- ✓ La qualité c'est l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites.

- ✓ Caractéristiques d'un produit : ce sont toutes les valeurs, grammaires ou critères qui définissent le produit
- ✓ Entité : produit, service ou processus
- ✓ Besoins exprimés : ce sont les exigences du produit que les clients a consignées par écrit (cahier de charges)
- ✓ Besoins implicites : ce sont des exigences du client et souvent de l'utilisateur qui ne sont pas spécifiées par écrit et qu'il faut détecter.

Parler de la non qualité et en définition certains éléments d'évaluation et de ménagement constitue un point incontournable si l'on veut comprendre et mettre en œuvre les outils de management de la qualité. Une négligence humaine de quelques secondes, qui peut avoir pour origines plusieurs facteurs (défaut de communication, laxisme, incompétence...) peut avoir des conséquences fâcheuses.

Au global, la non qualité coûte actuellement 10 à 15% du chiffre de son chiffre d'affaires de bénéfice ne est considérée comme économiquement saine, cela signifie que 4 à 5 fois le résultat net est « gaspillé ».

Si l'entreprise met en œuvre une politique vis-à-vis de la qualité qui intègre cette notion de coût, elle deviendra à terme (2 à 3) plus performante.

## IV.2. Coût d'obtention de la qualité

### IV.2.1 Concept et finalité :

D'une part, l'entreprise investit ou dépense de l'argent (coûts dits contrôlables ou volontaires). D'autre part, elle constate un niveau de non qualité (coûts dits résultats). Le concept de COQ repose sur une balance économique où il faut investir, donc « semer pour récolter » par la suite. Cela se traduit par une liste de postes relatifs de dépense, influant sur une liste de postes relatifs au gain (baisse de la non qualité).

La finalité de cet outil est de diminuer au maximum la non qualité tout en prenant garde de ne pas trop dépenser ou investir.

Une autre finalité du COQ est de fournir un outil supplémentaire d'aide à la décision.

En effet décider d'un investissement d'ordre matériel afin d'augmenter la capacité de l'entreprise est bien à condition que tout ce qui s'y rapporte ne soit entaché de dysfonctionnement.

### IV.2.2 Elément du COQ :

Les COQ est composé de deux grandes parties :

- ❖ Les coûts contrôlables (CC) : ce sont les dépenses volontaires générés pour maintenir un certain niveau de qualité. On distingue :
  - Les coûts de prévention générés afin de limiter et diminuer les dysfonctionnements ;
  - Les coûts de détection générés afin de déceler la non qualité par la mise en œuvre de processus de contrôle sur produit ;
- ❖ Les coûts résultants (CR) ou coûts de non qualité (CNQ) : ce sont les frais complémentaires et involontaires que doit supporter l'entreprise du fait des dysfonctionnement. On distingue :
  - Les défaillances internes : dysfonctionnements internes à l'entreprise ou en amont du processus global se traduisant par une perte économique donc un coût, ne touchant pas directement les clients à qui sont les produits ;
  - Les défaillances externes, dysfonctionnements externes à l'entreprise se traduisant par un coût et touchant directement les clients.

#### IV. L'éthique et le management

La complexité des tâches, des fonctions exercées, des liaisons entre les personnes, la difficulté du contrôle, favorisent les comportements malhonnêtes, parfois, malaisés à découvrir.

##### ❖ Qu'est ce que l'éthique ?

Ayant des droits mais aussi des devoirs, chacun doit appliquer des règles dont certaines sont édictées sous forme de lois et de règlements.

A l'intérieur de la firme, l'éthique concerne la nature des relations entre la direction et les salariés et d'une façon générale entre les personnes : respect des droits, honnêteté, contrats corrects.

De plus, on s'interdit normalement d'engager la responsabilité individuelle ou collective des personnes qui ne peuvent pas agir, excluant ainsi de faire payer une erreur ou une faute à quelqu'un n'ayant pas les moyens matériels de l'éviter.

Il faut aussi assurer la discipline interne, résoudre les conflits entre les gens et aider matériellement, voire psychologiquement ceux qui en ont besoin.

Accroître les performances financières et en faire profiter à ceux qui œuvrent dans la société constitue l'un des objectifs majeurs à atteindre.

##### ❖ Pourquoi l'éthique s'impose-t-elle de plus en plus ?

Les clients, les collectivités locales, les médias, l'opinion publique, les tribunaux sanctionnent

chacun à leur manière ce qu'ils considèrent comme des manquements à la morale du moment ou à la loi. Cela altère l'image de l'entreprise fautive et de ses dirigeants, les éliminant éventuellement et faisant fuir les clients à tort ou à raison.

Certaines firmes créent des « comités d'éthique » et élaborent des programmes de formation pour leur personnel. Néanmoins, subsistent beaucoup de canards boiteux.

Il est vrai aussi que l'éthique est parfois en conflit avec les conditions de la pérennité de l'entreprise surtout lorsqu'il faut durcir les conditions de travail pour améliorer la productivité voire licencier.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet avait pour objectif de faire une formulation de béton binaire (avec deux granulats de basalte de classes 8/20 et 16/25) et béton ternaire (avec 03 granulats de basalte :3/8 ; 8/20 et 16/25). Il consistait également à mettre en place un système et des procédures garantissant la qualité dans les travaux.

Pour ce qui est de la formulation, la méthode de Dreux, basée sur le principe de la compacité maximale (ou porosité minimale) a été utilisée. Elle en est une parmi tant d'autres mais le mérite de Dreux est d'avoir su se servir judicieusement de ce qui est utile dans les autres méthodes comme celles de Faury, Valette...

Les résultats obtenus justifient pleinement le bien fondé de la démarche qualité qui a été adoptée.

En effet, dès le septième jour, les résistances souhaitées sont presque atteintes ; ce qui permet de réduire davantage les délais de coffrage et de mieux optimiser la production. De plus, le choix de la classe garantie dans la formule de Bolomey, la qualité du granulat de basalte utilisé combiné au respect des normes ont favorisé l'obtention des résistances à la rupture au vingt huitième jour largement supérieures à celles visées.

L'ingénieur qui formule un béton a aujourd'hui davantage de possibilités avec l'avènement des adjuvants tels que les superplastifiants et les plastifiants réducteurs d'eau qui permettent de réduire la quantité d'eau et celle du ciment pour un même rapport E/C. Toutefois, il convient de noter que ces produits ne peuvent pas augmenter les performances d'un béton mal dosé ou encore mal fabriqué, bref ne se substituent pas aux règles de l'art.

Il n'est pas nécessaire de répéter que pour donner des résultats optimaux, les normes doivent être appliquées dans leur intégralité par toutes les personnes concernées. La motivation et la conviction des différents acteurs ou intervenants sont très importantes, et elles passent par l'information et la formation des intéressés.

Enfin, de petits changements réguliers, réfléchis et effectifs conduisant à des améliorations, engendreront des avantages à long terme et contribueront à la croissance de l'entreprise.

Pour finir, nous formulons les recommandations suivantes :

- ◆ Mélanger le sable fin avec des résidus de gravillons de concassage pour obtenir un module de finesse qui respecte les normes ( $2.2 \leq Mf \leq 3.2$ ) avec une tolérance de  $\pm 0.2$  ;

- ❖ Vérifier toujours par une analyse granulométrique si la classe déclarée des granulats correspond à celle vraie ;
- ❖ Promouvoir l'utilisation des adjuvants dans le béton vu les nombreuses opportunités qu'ils offrent ;
- ❖ Envisager l'utilisation du gré rose qui pourrait procurer de meilleures performances mécaniques au moindre coût par rapport au basalte du fait de sa texture plus rugueuse ;
- ❖ Pour être plus compétitive mettre en place une démarche d'amélioration continue du système de management de la qualité.

## REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE

- [1] CISSE I. K., Cours de technologie du béton, ESP 2005.
- [2] BARON J. et OLIVIER J. P. 1999, Les bétons : Bases et données pour leur formulation, EYROLLES Ed. Paris, 1999.
- [3] J. MATHIVAT et C. BOITEAU 1992, Procédés généraux de construction 1. EYROLLES Ed. Paris 1992.
- [4] FERREBOEUF Claude, Techniques de l'ingénieur
- [5] GEOFFRAY Jean Marie, Techniques de l'ingénieur, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées.
- [6] LE COZ Edmond., Techniques de l'ingénieur, Consultant, Formateur, Qualité (ADEQUAFORM)
- [7] BARON Jacques et SAUTEREY Raymond, Le béton hydraulique : connaissance et pratique.
- [8] <http://www.degussa-cc.fr>
- [9] normalisation française P18-504, Juin 1990.
- [10] ISO 9001 Troisième édition 2000-12-15.

**ANNEXES**

Diamètre(mm)	module	Refus partiel	Refus cumulés	% refus cum	%tamisat cum
10	41	0	0	0	100
8	40	1,08	1,08	0,054	99,946
6,3	39	1,73	2,81	0,1405	99,8595
5	38	1	3,81	0,1905	99,8095
4	37	1,23	5,04	0,252	99,748
3,15	36	5,63	10,67	0,5335	99,4665
2,5	35	8,41	19,08	0,954	99,046
1,6	33	26,11	45,19	2,2595	97,7405
1,25	32	27,41	72,6	3,63	96,37
0,8	30	49,73	122,33	6,1165	93,8835
0,63	29	65,4	187,73	9,3865	90,6135
0,4	27	153,21	340,94	17,047	82,953
0,31	26	288,96	629,9	31,495	68,505
0,25	25	90,73	720,63	36,0315	63,9685
0,2	24	365,32	1085,95	54,2975	45,7025
0,16	23	333,17	1419,12	70,956	29,044
0,12	22	492,42	1911,54	95,577	4,423
0,08	20	74,91	1986,45	99,3225	0,6775

Tableau N° 15 : Résultats analyses granulométriques sable

Diamètre (mm)	module	Refus partiel	Refus cumulés	% refus cum	%tamisat cum
12,5	42	0	0	0	100
10	41	6,77	6,77	0,1354	99,8646
8	40	34,26	41,03	0,8206	99,1794
6,3	39	999,35	1040,38	20,8076	79,1924
5	38	1137	2177,38	43,5476	56,4524
4	37	1810	3987,38	79,7476	20,2524
3,15	36	642,83	4630,21	92,6042	7,3958

2,5	35	203,57	4833,78	96,6756	3,3244
2	34	13,46	4847,24	96,9448	3,0552
1,6	33	102,55	4949,79	98,9958	1,0042
1,25	32	23,67	4973,46	99,4692	0,5308
0,8	30	5,33	4978,79	99,5758	0,4242

Tableau N°16 : Résultats analyses granulométriques basalte 3/8

Diamètre (mm)	module	Refus partiel	Refus cumulés	% refus cum	%tamisat cum
20	44	0	0	0	100
16	43	986,03	986,03	19,7206	80,2794
12,5	42	1520	2506,03	50,1206	49,8794
10	41	1480	3986,03	79,7206	20,2794
8	40	775,26	4761,29	95,2258	4,7742
6,3	39	222,48	4983,77	99,6754	0,3246
5	38	5,28	4989,05	99,781	0,219

Tableau N°17: Résultats analyses granulométriques basalte 8/20

Diamètre (mm)	module	Refus partiel	Refus cumulés	% refus cum	%tamisat cum
31,5	46	0	0	0	100
25	46	137,44	137,44	2,7488	97,2512
20	44	1933	2070,44	41,4088	58,5912
16	43	2614	4684,44	93,6888	6,3112
12,5	42	312,9	4997,34	99,9468	0,0532

Tableau N°18 : Résultats analyses granulométriques 16/25

Qualité des granulats	Dimension $D$ des granulats		
	Fins ( $D < 16$ mm)	Moyens ( $25 < D < 40$ mm)	Gros ( $D \geq 50$ mm)
Excellente	0,55	0,50	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Ces valeurs supposent que le serrage sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

Tableau N°19 : valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Dimension maximale $D$ des granulats ..... (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau ..... (%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

Tableau N°20 : Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale  $D$  des granulats (si  $D \neq 25$  mm)

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	400 + fluidifiant	-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

Tableau N°21: Valeurs du coefficient  $K$

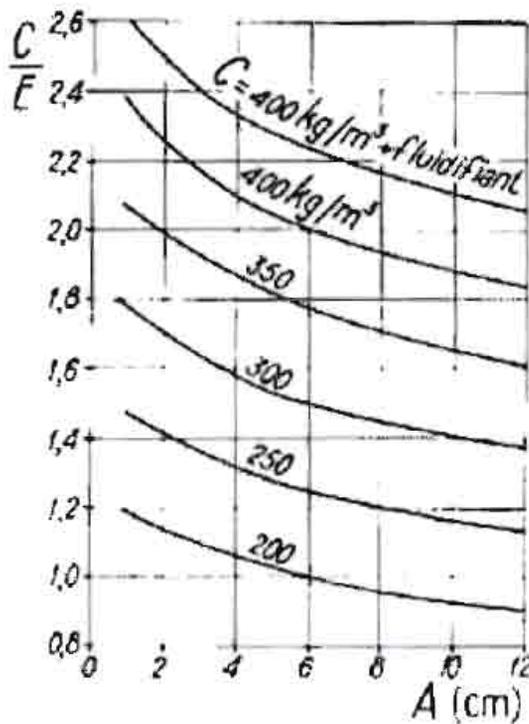




Figure n°9 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône A)

Consistance	Serrage	Dimension $D$ des granulats (en mm)						
		$D = 5$	$D = 10$	$D = 12,5$	$D = 20$	$D = 31,5$	$D = 60$	$D = 80$
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

Nota : 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.

Tableau N°22 – Valeurs du coefficient de compacité

**Dimensionnement des contenants pour les différentes classes de résistance.**  
**- pour une résistance spécifiée de 20 MPa**

Proportion des constituants pour 1 sac de ciment.

**Pour 02 granulats**

- Sable  $\frac{258.16}{7.5} = 34.42l$
- Gravier 8/20  $\frac{270.5}{7.5} = 36.06l$
- Gravier 16/25  $\frac{180.34}{7.5} = 24.04l$
- Eau  $\frac{197}{7.5} = 26.26l$

**Pour 03 granulats**

- Sable  $\frac{222.43}{7.5} = 29.66l$
- Gravier 3/8  $\frac{83.57}{7.5} = 11.14l$
- Gravier 8/20  $\frac{222.5}{7.5} = 29.66l$
- Gravier 16/25  $\frac{180.34}{7.5} = 24.04l$
- Eau  $\frac{197}{7.5} = 26.26l$

<b>B20</b>						
Mélange	Ciment Kg	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg
2 Granulats	50	26.26	34.42		36.06	24.04
dimensions contenants (cm)			42*42*20		43*43*20	35*35*20
3 Granulats			29.66	11.14	29.66	24.04
dimensions contenants (cm)			39*39*20	24*24*20	39*39*20	35*35*20
<b>B25</b>						
Mélange	Ciment Kg	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg
2 Granulats	50	22	32,27		33,84	23,55
dimensions contenants (cm)			40*40*20		41*41*20	35*35*20
3 Granulats			25,9	8,705	31,3	22,59
dimensions contenants (cm)			36*36*20	21*21*20	40*40*20	34*34*20
<b>B30</b>						
Mélange	Ciment Kg	Eau L	Sable 0/1 Kg	Basalte 3/8 Kg	Basalte 8/20 Kg	Basalte 16/25 Kg
2 Granulats	50	19	32,27		33,84	23,55
dimensions contenants (cm)			40*40*20		41*41*20	35*35*20
3 Granulats			27,8	8,705	31,3	22,59
dimensions contenants (cm)			38*38*20	21*21*20	40*40*20	34*34*20

**Tableau N°23 :** Dimensions des contenants des différentes proportions des constituants du béton pour un sac de ciment.



Figure N°10: Aperçu des lignes de rupture après écrasement



Figure N°11: Aperçu des lignes de rupture après écrasement

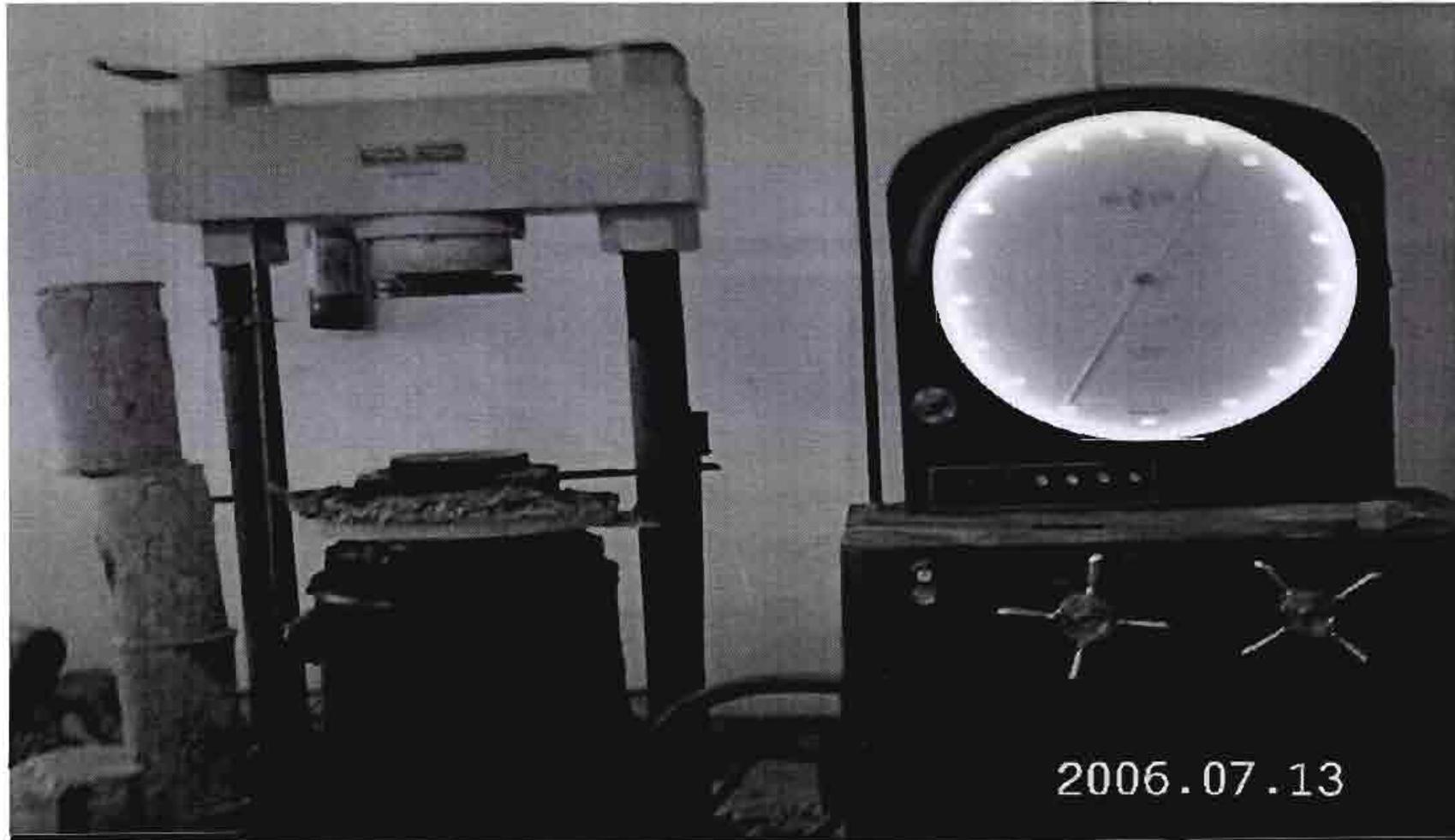


Figure : Photo de la presse pour l'écrasement des éprouvettes