

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Thème

RESISTANCE AU JEUNE AGE DU BETON

Proposé et dirigé par :

M^{me}. A.CHIKH

Présenté et étudié par :

TOUHARI Mahfoud
HENNICHE Abderrahmane

Promotion juin 2007

E.NP- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة مقاومة ضغط الخرسانة في المدى القصير، و العوامل المؤثرة فيها، و الطرق المناسبة لتقييمها بالخصوص الطريقة المسماة بالناضجية، يهدف أيضا إلى دراسة الأخطار التي تصاحب صلابة الخرسانة ولاسيما أخطار التشققات، و في الأخير الإجراءات الواجب اتخاذها خلال السن المبكرة للخرسانة.
كلمات مفتاحية : الناضجية , الطاقة التحريضية, السن المكافئة, المعاييرة

Résumé

Le but de ce travail est étudier la résistance au jeune âge du béton, les paramètres influençant celles-ci, et les méthodes appropriées servant à son évaluations en particulier la méthode de maturométrie et aussi les éventuels risques accompagnants le processus de durcissement et notamment les risques de fissuration et en fin les précautions qu'ils faut tenir compte pendant le jeune âge du béton.

Mots clef : Maturométrie, énergie d'activation, âge équivalent, étalonnage.

Summary

The goal of this work is to study the strength to the youth of the concrete, the parameters influencing those, and the suitable methods being used for its evaluations in particular the method of maturometric and also the possible risks accompanying the process of hardening and in particular the risks by cracking and in end the precautions which they is necessary to hold account during the youth of the concrete.

Key words: maturometry, energy of activation, equivalent age, calibration.

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de nous avoir donnés la force et la volonté d'achever ce travail.

Nous tenons à remercier Madame A.Chikh, notre promotrice pour l'aide qu'elle a apportée à la réalisation de ce travail et pour ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier M Mounir CHIKH pour ses aides qu'il nous a données.

Nôtres remerciement vont également aux responsables et personnel du Laboratoire Central des Travaux Publiques (LCTP-Hussein Dey), en particulier à monsieur HADID et monsieur MEHDI pour leurs précieuses aides et aussi monsieur MEZAACHE, le chef de département du laboratoire, pour son accueil bienveillant et tous les techniciens du laboratoire (Mohamed, Nasser, Abderrahmane,.....).

Nous remercions aussi les responsables et personnel du Laboratoire ECOBETAS

Nos remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail.

Nous remercions aussi tous ceux qui nous ont aidés pendant la période d'essais et notamment Farid par sa voiture 504 peugeot.

Nous tenons aussi à remercier nos familles et toute personne ayant contribué de près ou loin à l'élaboration de ce travail.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Désignation des ciments

- Tableau V.1** : Analyse granulométrique - Gravier 8/15
- Tableau V.2** : Analyse granulométrique - Gravier 3/8
- Tableau V.3** : Analyse granulométrique - Sable 0/5
- Tableau V.4** : Densités absolue et apparente (NF P18-554)
- Tableau V.5** : Propreté superficielle (NF P18-591)
- Tableau V.6** : Résistance à la fragmentation (NF P 18-573)
- Tableau V.7** : Résistance à l'usure (MDE) (NF P18-572)
- Tableau V.8** : Module de finesse du sable (NF P18-304)
- Tableau V.9** : Valeurs de l'équivalent de sable (NF P18-598)
- Tableau V.10** : Différentes classes de ciment (NF EN 196-1)
- Tableau V.11** : Temps de prise du ciment (NF P15-473)
- Tableau V.12** : Composition chimique des ciments utilisés
- Tableau V.13** : Composition minéralogique des ciments
- Tableau V.14** : Détermination de la courbe de mélange
- Tableau V.15** : Composition du béton témoin (en poids)
- Tableau V.16** : Composants du béton avec 20 % de fillers calcaires
- Tableau V.17** : Composants du béton avec 30 % de fillers calcaires

- Tableau VI.1** Affaissement des cinq types de bétons
- Tableau VI.2** Masse volumique des bétons frais
- Tableau VI.3** Masses volumiques des bétons durcis
- Tableau VI.4** Charge à la rupture du béton (compression)
- Tableau VI.5** Résistance à la compression des bétons
- Tableau VI.6** Variation de la température des bétons en fonction du temps

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1** : Les étapes de la fabrication du ciment [DEG 06]
Figure I.2 : Différentes classes de résistance des ciments [JEF 05]
Figure I.3 : Différentes formes de granulats [JEF 05]
Figure I.4 : Courbe granulométrique [JEF 05]
Figure I.5 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20 [JEF 05].
Figure I.6 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20 [JEF 05]
Figure I.7 : Différents types de sable [JEF 05]
Figure I.8 : Courbes granulométriques de sable fin et moyen [JEF 05]
Figure I.9 : Courbes granulométriques de sable gros [JEF 05]
- Figure II.1** : Dégagement de chaleur au cours du temps [SHE 09]
Figure II.2 : Structure du cristal d'ettringite [SHE 09]
Figure II.3 : Structure du cristal de monosulfite [SHE 09]
Figure II.4 : Les deux étapes de l'hydratation du C₃A [SHE 09]
Figure II.5 : Mécanisme d'hydratation de C₃A [SHE 09]
Figure II.6 : Apparition du 3^{ème} pic dans la courbe calorimétrique [SHE 09]
Figure II.7 : Effet du gypse sur l'hydratation globale du ciment portland [SHE 09]
Figure II.8 : Influence du gypse sur l'hydratation [SHE 09]
- Figure III.1** : Processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors [BAR 02]
Figure III.2 : Influence de la température du mûrissement sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [BAR 02]
Figure III.3 : Prévision des températures et des résistances à court terme [SHE 09]
Figure III.4 : Principe de la maturométrie [KAD 15]
Figure III.5 : Procédure d'étalonnage
- Figure IV.1** : Aperçu des graviers utilisés
- Figure V.1** : Echantillonneur. [SOS 11]
Figure V.2 : Courbe granulométrique des granulats utilisés
Figure V.3 : Appareil de Los Angeles [SOS 11]
Figure V.4 : Dispositif d'essai- Micro Deval [SOS 11]
- Figure VI.1** : Masse volumique des bétons frais
Figure VI.2 : Variation de masse volumique des bétons avec l'âge
Figure VI.3 : Essai de compression
Figure VI.4 : Résistance des bétons jeunes en fonction du temps
Figure VI.5 .Influence des pourcentages de la substitution de fillers calcaires sur la résistance à court terme
Figure VI.6 : Variation de la température des bétons en fonction du temps

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Problématique.....	1
Objectifs.....	1
Organisation de travail.....	2

CHAPITRE I : CONSTITUANTS DU BETON

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. COMPOSANTS DU BETON	3
I.2.1. LES CIMENTS.....	3
I.2.1.1. Généralités	3
I.2.1.2. constitutions de base des ciments	3
I.2.1.3. Les grandes lignes de la fabrication du ciment.....	5
I.2.1.4. Types, classe et désignation des ciments.....	6
I.2.1.4.1. Types de ciments	6
I.2.1.4.1.1. Classe et désignation des ciments.....	7
I.2.1.4.1.2. Désignation des ciments	8
I.2.1.5. Hydratation, prise et durcissement des ciments.....	9
I.2.1.5.1. Hydratation	9
I.2.1.5.2. Prise	10
I.2.1.5.3. Durcissement	10
I.2.1.6. Représentation triangulaire des constituants du ciment	10
I.2.2. GRANULATS	12
I.2.2.1. Généralités	12
I.2.2.2. Provenance des granulats.....	13
I.2.2.2.1. Les roches massives.....	13
I.2.2.2.2. Les roches meubles.....	14
I.2.2.3. Elément sur la production des granulats.....	14
I.2.2.4. Classe granulaire.....	16
I.2.2.5. Forme des granulats.....	16
I.2.2.6. Courbe granulométrique	17
I.2.2.6.1. Définition.....	17
I.2.2.6.2. Les fuseaux	17
I.2.2.6.3. Les courbes granulométriques pour les différents types de granulats :.....	18
I.2.2.7. Sable	18
I.2.2.7.1. Généralités	18
I.2.2.7.2. Fuseau granulométrique	19
I.2.2.8. Les mélanges ternaires.....	19

I.2.3.ADJUVANTS.....	21
I.2.3.1 Définition.....	21
I.2.3.2. Classification des adjuvants.....	21
I.2.4. EAU DE GACHAGE	21
I.2.4.1. Aptitude à l'emploi de l'eau de gâchage	21
I.2.4.1.1 Critères sensoriels (olfactifs ou visuels).....	21
I.2.4.1.2 Critères chimiques	21
I.2.4.1.3. Critères mécaniques.....	22
I.2.4.2. QUELQUES EAUX PARTICULIERES	22
I.2.4.2.1. L'eau de mer	22
I.2.4.2.2. Les eaux acides	22
I.2.4.2.3. Les eaux de recyclage.....	22
I.2.4.2.4. Les eaux de rejets industriels.....	23
I.2.5. LES ADDITIONS	23
I.3.5.1. Cendre volantes	23
I.2.5.2. Fillers et additions calcaires	23
I.2.5.3. Laitier vitrifié moulu et autres laitiers de haut fourneau	23
I.3.5.4. Fumées de silice.....	23

CHAPITRE II : L'HYDRATATION DU CIMENT

II.1. DEFINITION	24
II.1.1. Hydratation.....	24
II.1.2. Prise.....	24
II.1.3. Durcissement.....	24
II.2. THEORIE DE LA PRISE ET DU DURCISSEMENT.....	25
II.2.1. La théorie cristalloïde.....	25
II.2.2. La théorie colloïdale.....	25
II.2.3. La théorie moderne.....	26
II.3. EVOLUTION DE L'HYDRATATION.....	26
II.4. INFLUENCE DU GYPSE SUR L'HYDRATATION.....	33
II.5. DEFINITION DU DEGRE D'AVANCEMENT DES REACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT	35
II.6. Définition générale du degré d'hydratation du ciment α_c	35

CHAPITRE III : RESISTANCE A COURT TERME DU BETON

III.1. INTRODUCTION	37
III.2. EVOLUTION DE LA RESISTANCE A COURT TERME DU BETON EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA TEMPERATURE	37
III.2.1. Définition de la notion de « court terme »	37
III.2.2. Influence de la température sur la résistance à court terme du béton	38
III.2.3. Le concept d'âge équivalent	39
III.2.4. Le paramètre « énergie d'activation apparente » du béton et son influence.....	41
III.2.5. La prévention des résistances à court terme du béton dans un ouvrage	42
III.3. MATUROMETRIE	43
III.3.1. Définition	43
III.3.2. Fondement scientifique	43
III.3.3. Avantages.....	44
III.3.4. Limites d'emploi de la maturométrie.....	45
III.3.5. Modalités d'application	45
III.3.6. Etalonnage préliminaire en laboratoire (facultatif).....	46
III.3.6.1. Voie mécanique	47
III.3.6.1.1. Plan expérimental.....	47
III.3.6.1.2. Exploitation des résultats mécaniques	49
III.3.6.2. VOIE THERMIQUE	50
III.3.7. Contrôles de conformité initiaux : Validation de l'étalonnage et établissement de la courbe de référence	54
III.3.8. Contrôles de conformité et de régularité en cours de chantier.....	55
III.4. LES MOYENS PERMETTANT DE REGLER LA RESISTANCE A COURT TERME.....	55
III.4.1. Rapport E/C	55
III.4.2. Le dosage en ciment à même maniabilité	55
III.4.3. Le type et la classe du ciment	56
III.4.4. Les additions minérales.....	56
III.4.4.1. Pouzzolanes.....	56
III.4.4.2. Cendres volantes	56
III.4.4.3. Laitier	56
III.4.4.4. Fumées de silice.....	57
III.4.4.5. Les accélérateurs de prises et de durcissement.....	57

CHAPITRE IV : OBJECTIFS ET PROGRAMME DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Variables d'étude	59

CHAPITRE V : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS

V.1. INTRODUCTION	61
V.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX	61
V.2.1. Echantillonnage (NF P18-553)	61
V.2.2 Analyse et courbe granulométrique	61
V.2.2.1. Analyse granulométrique	61
V.2.2.2. Courbes granulométriques :	63
V.2.3. Densités absolue et apparente (NF P18-554).....	63
V.2.4 Propreté superficielle (NF P18-591).....	64
V.2.5. La résistance à la fragmentation -essais Los- Angeles (NF P 18-573)	64
V.2.6 Résistance à l'attrition et à l'usure- essai Micro Deval (NF P18-572)	65
V.3. Essais sur sable.....	65
V.3.1 Module de finesse (NF P18-304).....	65
V.3.2 Equivalent de sable (NF P18-598).....	66
V.4.3. Composition chimique	66
V.4. Essais sur le ciment	66
V.4.1 Résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1).....	67
V.4.2 Temps de prise (NF P15-473).....	67
V.6. Caractéristiques des ajouts	69
V.6.1. Fillers calcaires	69
V.5.2. Superplastifiant	69
V.7. FORMULATION DES BETONS	69
V.7.1. La méthode Bolomey	70
V.7.1.1 Formulation du béton avec le ciment CPJ CEM I	70
V.7.1.2. Formulation du béton avec 20% de fillers calcaires	74
V.6.1.3. Formulation du béton avec 30 % de fillers calcaires	75
V.7.1.4. Formulation du béton avec superplastifiant	76
V.7.2 Préparation de la gâchée	77

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VI.1 INTRODUCTION	77
VI.2 ESSAIS SUR BETON FRAIS.....	77
VI.2.1. Essais d'affaissement.....	77
VI.2.2 Mesure de la masse volumique du béton frais.....	78
VI.3. ESSAIS SUR BETON DURCI A SON JEUNE AGE	79
VI.3.1. Mesure de la masse volumique du béton durci.....	79
VI.3.2. La résistance à la compression	80
VI.3.3. Le suivi de la température.....	82
VI.4 EXPLOITATION DES RESULTATS	83
VI.4.1 Vérification expérimentale de la relation de Bolomey	83
VI.4.2. Calcul de l'âge équivalent à 20 ⁰ C.....	84
VI.4.3.taux d'accroissement des résistances.....	85
VI.5. TERPRETATION DES RESULTATS.....	85
VI.5.1 propriétés rhéologiques.....	85
VI.5.1.1 Effet du type de ciment.....	86
VI.5.1.2 Effet du superplastifiant.....	86
VI.5.1.3 Effet de filler calcaire	86
VI.5.2 Propriétés mécaniques	86
VI.5.2.1 Effet du type du ciment.....	87
VI.5.2.2 Effet du superplastifiant.....	87
CONCLUSION.....	88

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. PROBLEMATIQUE

Dans les dernières années, les développements de plus en plus accélérés dans les différents types d'ouvrages réalisés en différents types de bétons, nécessitent l'utilisation de nouvelles techniques permettant un avancement convenable des travaux en tenant compte les cadences des productions et les délais et leurs réalisations.

Les délais du décoffrage, qui dépend du durcissement du béton, affectent la bonne circulation du coffrage, ainsi que la mise en précontrainte qui ne peut s'effectuer qu'après le béton atteint une certaine valeur de résistance, et d'autres opérations de construction, sont les principaux paramètres qui influent sur l'avancement des travaux et sur l'optimisation des cycles de production.

L'optimisation à court terme des opérations de construction sur chantier est fonction de la formulation du béton : choix du ciment, du rapport E/C, des adjuvants, des additions. Et l'exécution en toute sécurité de ces opérations nécessite la connaissance et l'obtention d'une certaine valeur de la résistance à une échéance précise quelle que soient les conditions environnantes.

2. OBJECTIFS

Après avoir consulté en revue les différents ouvrages traitant les bétons, leurs caractéristiques, et les objectifs visés de leurs formulations, la résistance au jeune âge du béton est une parmi les principales préoccupations des formulateurs du béton, et qui nécessite de s'intéresser à certain nombre de paramètres influant sur celle-ci, à savoir :

- Le ciment (type et classe) ;
- Les accélérateurs de prise et de durcissement ;
- Les additions (pouzzolanes naturelles, cendres volantes, laitiers et fumées de silice) ;
- Le rapport E/C ;
- Le traitement thermique.

Des nouvelles notions telles que l'énergie d'activation et l'âge équivalent, permettent de prendre en considération l'effet de la température sur l'avancement des réactions d'hydratation du ciment, et une nouvelle technique de la maturométrie permet d'évaluer la résistance du béton à court terme en tenant compte de l'énergie d'activation et l'âge équivalent, donc l'effet couplé de la température et du temps sur la résistance d'un béton. Tous ces points et les paramètres influents sur la résistance du béton sont les objectifs de notre sujet.

3. ORGANISATION DE TRAVAIL

Nous avons partagé notre étude en deux parties :

➤ la partie théorique :

Cette partie comporte les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux de construction, leur conformité aux normes et leurs spécifications.

Le deuxième chapitre a pour ambition de décrire les processus des réactions d'hydratation du ciment et leur degré d'avancement.

Le troisième chapitre est destiné à illustrer les différents paramètres influents sur la résistance du béton à court terme, ainsi que la méthode maturométrique s'appuyant sur la notion de l'âge équivalent et celle de l'énergie d'activation.

➤ la partie expérimentale :

Elle aussi comporte trois chapitres :

Le quatrième chapitre : dans lequel, on parlera des buts visés de cette partie, les variables de l'étude, et les conditions durant lesquelles on a effectué nos essais.

Le cinquième chapitre est consacré pour caractériser les matériaux utilisés au cours de nos essais, et aussi tous les formulations de tous les types des bétons confectionnés.

Le sixième chapitre a pour objet de décrire les essais effectués sur les bétons élaborés à leurs états frais et durci, les résultats obtenus et leurs interprétations.

PARTIE
THEORIQUE

CHAPITRE I

CONSTITUANTS
DU
BETON

CHAPITRE I : CONSTITUANTS DU BETON

I.1. INTRODUCTION

Le béton est un mélange de granulats, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier certaines propriétés, dosé de manière à obtenir au moment de la mise en œuvre une consistance convenable, et après durcissement les qualités requises, en fonction desquelles est orientée l'étude préalable de la composition du béton, qui sont :

-la résistance mécanique, essentiellement à la compression, et pour certains usages spéciaux, la résistance à la traction.

-la résistance aux agents agressifs (eau de mer, eau pure, acides, solutions séléniteuse, etc.), et à des agents internes (alcali réaction, activité sulfatique, cycle de gel et dégel de l'eau interstitielle, etc.).

-la déformabilité instantanée et surtout différée, que l'on souhaite généralement la plus faible possible.

-la maniabilité au moment de la mise en œuvre

-et enfin, certaines qualités spéciales, telles que la masse spécifique, aussi élevée que possible (béton lourd) ou aussi faible que possible (béton léger), une faible conductivité thermique, une bonne étanchéité, etc.

I.2. COMPOSANTS DU BETON

La destination du béton à un usage déterminé fixe le dosage des différents constituants de celui-ci, caractérisés par leurs propriétés physiques, chimiques, et mécanique. Dans ce chapitre, on passe en revue l'identification des matériaux constitutifs du béton, leur conformité aux normes correspondantes.

I.2.1. LES CIMENTS

I.2.1.1. Généralités

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (vers 1450⁰c) et broyage d'un mélange minéral (calcaire+ argile en général). Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à une réaction d'hydratation en général exothermique.

I.2.1.2. constitutions de base des ciments

Les principaux constituants sont :

- Clinker portland
- Laitier granulé de haut fourneau
- Filler calcaires
- Sulfate de calcium
- Additifs

a) Clinker portland

Tous les ciments courants contiennent du clinker car c'est lui qui assure la fonction liante, grâce à laquelle le béton passe d'un état initial de fluide moulable à un état final de solide mécaniquement résistant. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium nécessaire pour régulariser la prise, c'est-à-dire faire en sorte que le béton reste coulable pendant une période suffisamment longue (de l'ordre de une heure et demie) sans gêner, ensuite, le passage à l'état solide. Le sulfate de calcium peut être de gypse, du plâtre ou de l'anhydrite.

Les quatre principaux constituants du clinker sont :

-le silicate tricalcique : $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$ ou (C_3S)

-le silicate bicalcique : $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ ou (C_2S)

-l'aluminate tricalcique: $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ ou (C_3A)

-l'alumino-ferrite tétracalcique: $4\text{CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$ ou (C_4AF)

Le clinker est obtenu en broyant très finement un mélange de calcaire et d'argile, qui assure la prédominance dans le clinker de silicates de calcium. Le mélange ferme des grains dont les dimensions vont jusqu'à 40 mm qui est le clinker.

b) Laitier granulé de haut fourneau

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir de minerai et de coke métallurgique.

Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C. Fige par refroidissement brusque et donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportions variables pour être broyé finement avec lui.

Il contient de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%) de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxydes divers et manganèse.

Le laitier est véritable ciment manifestant activées d'ailleurs par la présence du clinker. Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Chimiquement, il résiste normalement mieux tout à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées en certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif.

c) Cendres volantes

Poudres fines constituées principalement de particules vitreuses, de formes surtout sphériques dérivées de la combustion de charbon pulvérisé, ayant en présence d'eau, des propriétés pouzzolaniques, elles rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20%). On les ajoute au moment du broyage de clinker.

d) Pouzzolanes

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice alumine, et oxyde ferrique. Ils sont employés en cimenterie pour leur priorité « pouzzolaniques », qui est l'aptitude à fixer la chaux des propriétés hydrauliques,

c'est-à-dire pouvant faire prise et durci par hydratation. On obtient artificiellement des pouzzolanes à partir d'argile cuite par exemple.

e) Filler calcaires

Ce sont des matières inorganiques minérales naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarités, réduction de la fissurabilité...).

Les fillers peuvent être inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau ; ils sont actifs s'ils ont, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques en présence de ciment et d'eau.

Les filler calcaires peuvent être introduits jusqu'à plus de 5 % de la composition d'un ciment sans pour autant que la teneur en calcaire soit supérieure ou égale de 75 % en masse et qu'il y ait une teneur en eau et en matières organiques compatibles avec les exigences des normes.

- ▶ Filler calcaires et ciments composés

Ils sont utilisés en substitution pour protéger l'environnement (minimiser la Production de gaz nocif) et la consommation d'énergie trop importante.

f) Sulfate de calciums

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de régler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium di-hydrate $\text{Ca SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), du plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4).

g) Additifs

Ce sont les constituants qui ne figurent pas dans les points cités précédemment, et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication et les propriétés des ciments. Leur quantité totale ne doit pas dépasser 0.5 % en masse du ciments. Un complexe très courant augmente le débit des broyeurs et facilite les manutentions ultérieures du ciment.

I.2.1.3. Les grandes lignes de la fabrication du ciment

Les matières naturelles de carrières : les calcaires qui apportent l'oxyde de calcium, les argiles qui apportent la silice, l'alumine et l'oxydes de fer, et les normes qui apportent les quatre oxydes à la fois, doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange homogène, intime et dosé.

Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec) ou en présence d'eau (procédé humide). Le mélange ainsi obtenu est introduit dans un four rotatif, après être passé dans une tour composée de plusieurs étages de cyclones et souvent d'un précalcinateur. La première partie, verticale, permet l'échange de chaleur entre la matière circulant de haut en bas et les gaz issus du four rotatif circulant de bas en haut. Elle mesure une partie de la décarbonatation, et le four achève la décarbonatation et assure la clinkérisation ; c'est alors qu'ont lieu des réactions entre la chaux CaO et les oxydes

acides SiO_2 , Al_3O , Fe_2O_3 et se forment les silicates, aluminates et aluminos-ferrites de calcium.

La troisième grande étape du processus de fabrication est celle du broyage du clinker et la fabrication du ciment ; dans cette étape le clinker qui se présente sous forme de grains plus ou moins arrondis de 0.5 à 3 cm, additionné d'un peu de gypse (3 à 5 %) avec éventuellement certains produits d'addition tels que laitiers, cendres, pouzzolanes, est ensuite réduit en poudre à l'aide d'un broyeur. [DREU 01]

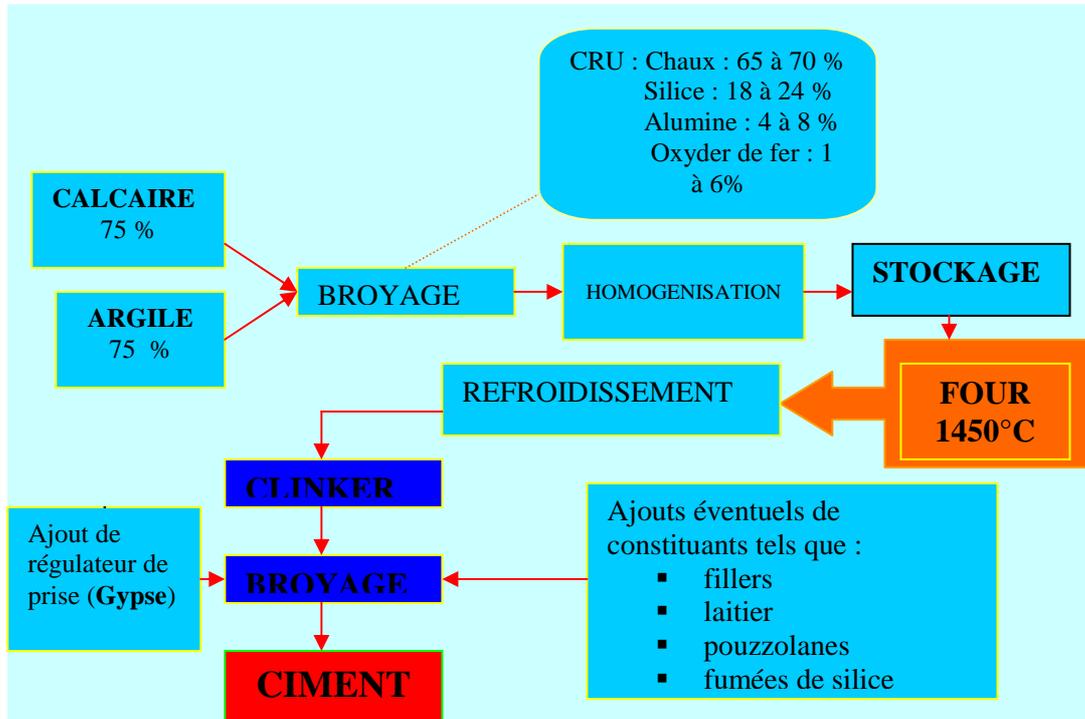


Figure I.1 : Les étapes de fabrication de ciment [DEG 03]

I.2.1.4. Types, classe et désignation des ciments

I.2.1.4.1. Types de ciments

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 de ciment, c'est-à-dire à l'ensemble formé par le clinker, les constituants autres que le clinker et les constituants secondaires, à l'exclusion des sulfates de calcium et des additifs.

On a, par convention

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

On distingue les types des ciments suivants :

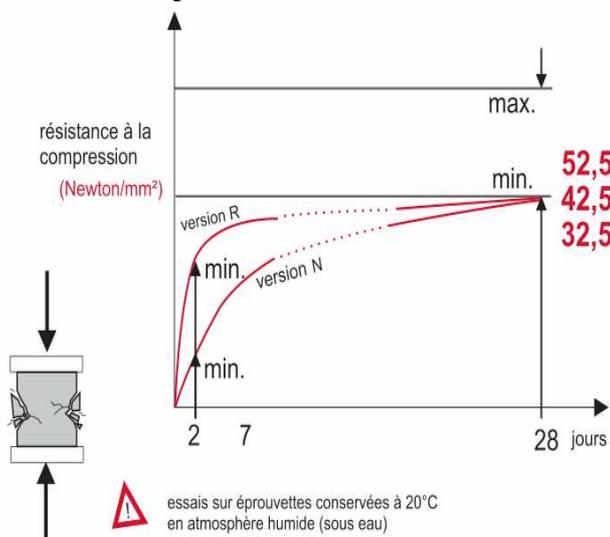
- ❖ **Ciment portland** : sous le terme général de «ciments portland » sont englobées les deux catégories de ciments suivantes :
 - Le ciment portland artificiel (CPA)
 - Le ciment portland composé (CPJ)

- ❖ **Ciments prompts** : Ce sont en général des ciments naturels, de mouture relativement faible, ils présentent des résistances mécaniques faibles (classes 31.5-50 et 80). Ils sont à prise rapide (moins de 8 minutes) ou demi lente (moins de 30 minutes). Leur principales applications découlent de leur propriétés spécifiques : prise et durcissement rapides pour le scellement, le calfatage, la stabilisation, prise réglable pour les maçonneries rapides, les travaux entre marées, faible perméabilité pour le cuvelage, les revêtements, tenue aux eaux acides et aux eaux sulfatées pour les bâtiments agricoles, les industries agro-alimentaires, les fondations. Dans toutes ces applications le ciment prompt naturel est utilisé à des dosages élevés, compris entre 600 et 800 kg/m³.
- ❖ **Ciments alumineux** : Le ciment d'aluminat de calcium diffère des ciments courants par un développement rapide des résistances. Il présente une bonne tenue aux milieux agressifs car il ne libère pas de chaux pendant son hydratation et permet, en outre, une mise en service rapide des ouvrages.
- ❖ **Super-blanc** : cette dénomination commerciale s'applique à la blancheur du ciment obtenue par cuisson de matières premières très pures contenant le minimum d'oxydes métalliques colorants en évitant, grâce à des fours appropriés, les souillures des cendres de combustibles. [DREU 81]

I.2.1.4.2. Classe et désignation des ciments

I.2.1.4.2.1. Classe des ciments

La composition et la finesse de mouture d'un ciment déterminent le développement de sa résistance. En fonction de cette évolution les ciments sont divisés en « **classe de résistance** ». Celles-ci correspondent à des niveaux de performances minimales (et maximales) à **28 jours**. Dans chaque classe, et suivant les **performances au jeune âge**, une distinction est faite entre la version N (normal) et la version R (Rapide).

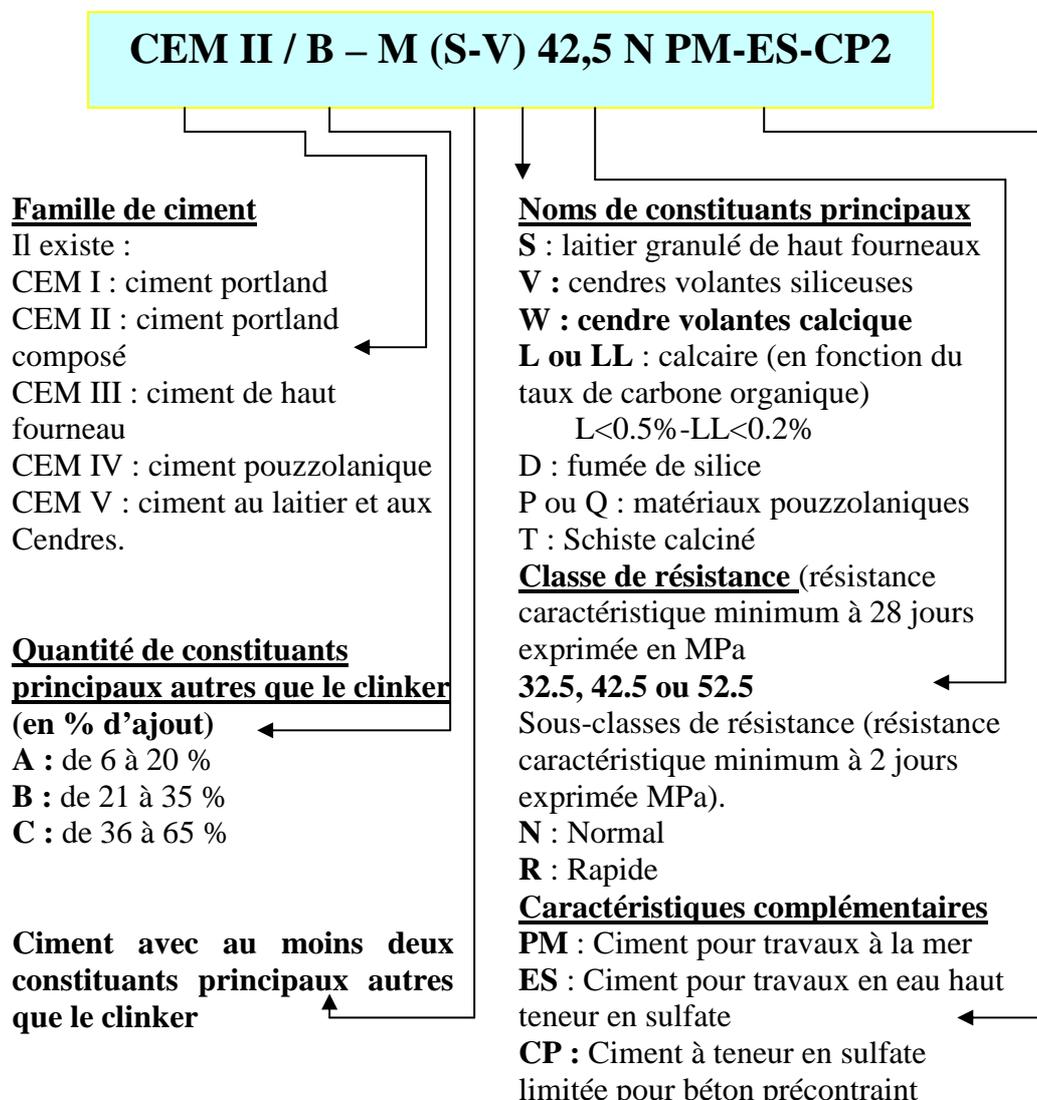


Il existe **trois classes de résistance normale à vingt-huit jours**, désignées par leur valeur caractéristique inférieure exprimée en MPa soit : 32.5-42.5-52.5. Il existe **deux classes de résistances au jeune âge**, appelées *ordinaires* ou *élevées*. [BAR99]

Figure I.2 : Différentes classes de résistance des ciments [JEF 05]

I.2.1.4.2.2. Désignation des ciments

Un exemple de désignation de ciment et leur signification, conformément à la norme européenne EN 179-1.



I.2.1.5. Hydratation, prise et durcissement des ciments

I.2.1.5.1. Hydratation

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables s'hydratent. Il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables. Les réactions chimiques d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter pour le gâchage correct du ciment est supérieure à la quantité strictement nécessaire aux seules réactions chimiques ; on doit en effet distinguer :

-l'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et nécessaire à leur structure cristalline.

- l'eau absorbée qui pénètre plus ou moins à l'intérieur des granulats selon leur degré de porosité.

-l'eau libre (dans les fins réseaux capillaires) et qui s'élimine plus ou moins par séchage. Elle n'est nécessaire que pour obtenir la viscosité, la plasticité et l'onctuosité indispensable au gâchage et à la mise en place correcte du béton dans les coffrages et l'embaras plus ou moins important des armatures.

I.2.1.1.5.2. Prise

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement. On le détermine à l'aide de l'aiguille de Vicat selon l'essai normalisé NFP15-414 et P 15-431.

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide ; elle ne peut se définir avec précision.

Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures.

Les ciments doivent satisfaire, en ce qui concerne le début de prise mesurée sur pâte pure conformément à la norme NF P 15-431, aux spécifications ci-après :

a) les ciments des classes 35 et 45 ont, à 20°C, un temps de début de prise supérieur à 1 h 30 min.

b) les ciments des classes 55 et HP ont, à 20°C, un temps de début de prise supérieur à 1 h.

I.2.2.1.5.3. Durcissement

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue. Pour les ciments à durcissement rapide on obtient après quelques jours la presque totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois.

I.2.3. Représentation triangulaire des constituants du ciment

Un clinker de ciment portland contient essentiellement quatre oxydes métalliques (principaux) :

➤ L'oxyde de calcium CaO

➤ L'oxyde de silicium SiO₂

➤ L'oxyde d'aluminium Al₂ O₃

➤ L'oxyde de fer Fe₂ O₃

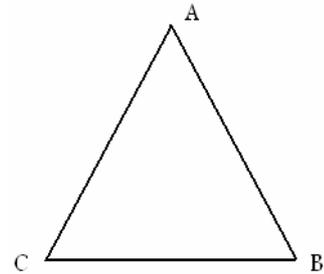
➤ Si on ne considère pas l'élément fer, pour simplifier le problème, en remarquant que le raisonnement n'est pas faussé car le

fer joue le même rôle que l'alumine, on a donc 3 constituants principaux : la chaux, la silice, l'alumine.

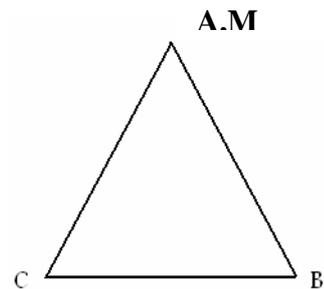
- On convient de représenter l'ensemble de ces 3 valeurs par un point M du plan.

Pour respecter la symétrie entre ces trois variables, on adopte une représentation triangulaire

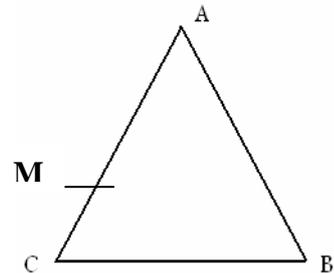
On considère un triangle équilatéral de coté unité (1)



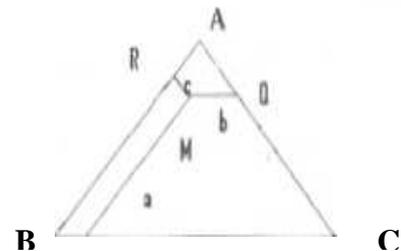
- Lorsque le clinker ne contient qu'un seul constituant, le point M sera au sommet du triangle.



- Lorsque le clinker contient deux constituants, le point M sera sur un coté du triangle



- Dans le cas où le clinker contient les 03 constituants, le point M sera à l'intérieur du triangle.



Nous pouvons maintenant travailler sur un diagramme triangulaire équilatérale dont chacun des sommets correspond 100 % de SiO_2 , CaO , Al_2O_3 . Ce diagramme établi par Rankine en 1916 au laboratoire de géographie du Carnegie institue de Washington a nécessité plus de 7000 mesures.

L'expérience montre que l'on obtient des ciments portland aux performances satisfaisantes (aux points de vue temps de prise, croissance des résistances, coût de fabrication, etc.) lorsqu'on a :

$$2 \% < C_3A < 16 \%$$

$$C_2S < 60 \% \text{ et } C_3S < 70 \%$$

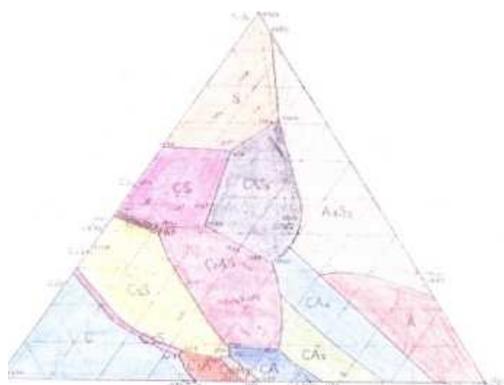


Figure I.3 : Diagramme de Rankine (1916)

D'une autre manière, le clinker est un mélange artificiel et ses oxydes peuvent être dosés en quantités optimales de manière à saturer en chaux (CaO) les oxydes acides (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃). Il en résulte une composition aux tolérances assez strictes, titrant environ :

65 % en CaO

20 % en SiO₂

10 % en Fe₂O₃ et Al₂O₃

Tous les matériaux utilisés dans la fabrication du ciment pour leur potentiel hydraulique ou pouzzolanique peuvent aussi être représentés dans ces diagrammes triangulaires.

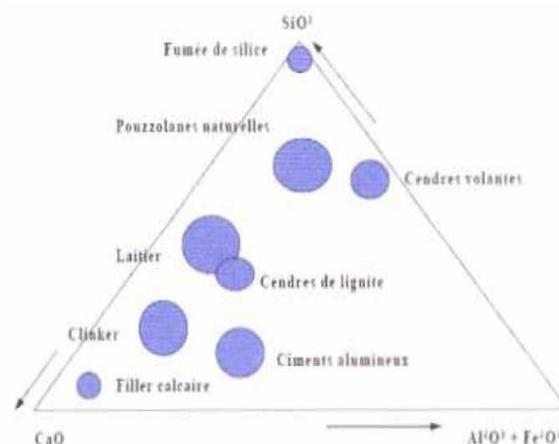


Figure I.4 : Diagramme de Rankin à trois phases pour additions sélectionnées (1916)

I.2.2. GRANULATS

I.2.2.1. Généralités

Les granulats sont définis par la norme P 18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125mm, 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.

Les nouvelles normes européennes harmonisées relatives aux granulats sont :

- EN-13043 : Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation.
- EN-12620 : Granulats pour bétons
- EN-13139 : Granulats pour mortiers
- EN-13242 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées.

On distingue :

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

I.2.2.2. Provenance des granulats

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, caractérisées par leur composition minérales, leur texture, leur état d'altération, leur porosité. De ces caractéristiques dépendront les propriétés des granulats (résistance mécanique, absorption d'eau ou porosité, homogénéité, altérabilité, réactivité aux alcalins).

I.2.2.2.1. Les roches massives

- **Les roches magmatiques :** Elles viennent des profondeurs de l'écorce terrestre ou la matière, qualifiée de magma, est soumise à de hautes pressions et à des températures élevées. Elles appartiennent à deux familles :
 - à texture grenue (à grains millimétriques), si le magma est refroidi lentement ; ce sont les roches plutoniques (ou intrusives),
 - à petits cristaux non visibles à l'œil nu avec substance d'une phase vitreuse et de gros cristaux, si le magma s'est refroidi rapidement en s'épanchant à la surface de l'écorce terrestre ; ce sont les roches volcaniques.
 Ce sont des roches polygéniques à silice et à feldspaths pouvant renfermer des micas et des silicates ferromagnésiens.
- **Les roches sédimentaires :** elles forment une importante famille :
 - les grès et grès quartzites (roche détritiques) ;
 - les roches carbonatées (roches d'origine chimique et biogène) ;
 - les cherts et silex (roches d'origine chimique et biogène).
- **Les roches métamorphiques :** elles résultent de la transformation des roches magmatiques et/ou sédimentaires sous l'action de la température et

des pressions subies pendant leur enfouissement ou au contact de corps chauds. Suivant l'intensité du métamorphisme et l'origine des roches mères, il existe une grande variété de roches métamorphiques

- gneiss ;
- micaschistes ;
- quartzites ;
- amphibolites ;
- cornéennes.

I.2.2.2.2. Les roches meubles

Ce sont des dépôts anciens ou actuels résultant d'un processus d'érosion, d'altération et de sédimentation de roches massives.

Ces dépôts se présentent sous forme :

- d'alluvions de rivières ou de fleuves ou fluvo-glaciaires ;
- de plages et dunes ;
- de gisements appartenant à un horizon stratigraphique défini ;
- de formations autres, telles qu'éboulis ; brèches, conglomérats, arènes.

I.2.2.3. Élément sur la production des granulats

La production des granulats nécessite deux principaux types d'opérations : l'extraction et le traitement.

- L'extraction s'effectue dans des carrières qui utilisent des techniques différentes selon qu'il s'agit de roches massives ou de granulats alluvionnaires meubles. Soit à sec, soit en milieu hydraulique.
- Le traitement est réalisé dans des installations de traitement généralement situées sur le site de la carrière. Dans tous les cas, il y a cinq étapes principales de production :

- Le décapage (découverte) : découvrir, c'est retirer les trains situés au dessus des niveaux à exploiter :
 - terre végétale ;
 - roches plus ou moins altérées ;
 - niveaux stériles.

Les matériaux de découverte, terres végétales et matériaux stériles, doivent être stockés indépendamment de façon à pouvoir être réutilisés lors du réaménagement de la carrière, sans pour autant gêner les différentes phases de l'exploitation.

- L'extraction en terrain meuble, qui peut se faire, soit en site terrestre (milieu sec), ou en site immergé (milieu hydraulique).
- L'extraction des roches massives : dans ce type de gisement compact, l'extraction des roches nécessite l'emploi d'explosifs. Les tirs de mines provoquent l'abattage d'une grande quantité de matériaux éclatés. Les éclats de roche sont ensuite chargés et transportés au centre de traitement.

- Le transfert vers les installations de traitement du lieu d'extraction au centre de traitement (le plus proche possible) s'effectue soit en continu, soit en discontinu :
 - Manutention continue par transporteurs à bandes : On modifie la position des unités de bandes transporteuses en fonction de la progression de l'exploitation.
 - Manutention discontinuée par :
 - camions et dumpers pour les extractions terrestres ;
 - bateaux ou berges dans le cas d'exploitation immergées assez loin des rives.
- Le concassage : s'effectue en plusieurs phases ce qui permet de réduire, de façon successive, la taille des éléments. Il existe différents types de concasseurs :
 - concasseurs à mâchoires ;
 - concasseurs à percussion,
 - concasseurs à projection centrifuge ;
 - concasseurs giratoires.

La fabrication de granulats à partir de roches massives nécessite toujours plusieurs opérations de concassage. Dans le cas de granulats alluvionnaires, le concassage ne s'effectue que sur les plus gros éléments.

- Le criblage : les opérations de criblage ou de tamisage permettent de sélectionner les grains, le crible ne laissant passer dans ses mailles que les éléments inférieurs à une certaine taille. On peut ainsi, par une succession de criblages, trier les grains et obtenir des granulats de tous les calibres possibles :
 - soit correspondant à une dimension précise (granulométrie) ;
 - soit entrant dans une fourchette définie.
- Le lavage : débourber, laver ou dépolvisier permet d'obtenir des granulats propres. La propreté des granulats est une nécessité industrielle. La présence de boues, d'argiles ou de poussières mélangées aux matériaux ou enrobant les grains, empêche leur adhérence avec les liants (ciment, chaux, laitier ou bitume), ce qui interdit alors leur utilisation.
- Le stockage et livraison : en fin de traitement, on obtient des produits de qualité répondant à des critères bien précis :
 - nature des granulats : calcaire, silice, éruptif,....dépendant du gisement ;
 - forme de grains : anguleux, arrondis ;
 - granulométrie précise ou fourchette granulométrique (coupure).

Le carrier peut être amené à réaliser des mélanges avec des proportions précises pour chaque composant, ceci en vue d'utilisations bien particulières. Une fois réduits, traités et classés, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de tas individuels, soit en trémies ou silos.

I.2.2.4. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à traverses le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

Le terme « granulats d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits à D pour les plus grands.

Les tamis sont définis par la norme [EN 933-2]. Les ouvertures de mailles carrées permettent un classement granulaire. Les dimensions successives des mailles (carrées) suivent des progressions géométriques :

- De $10^{1/10} = 1.25$ pour l'ancienne série française
- De $10^{1/20} = 1.12$ pour la nouvelle série européenne

Le module d'un tamis, dans le cas de l'ancienne série française, est le produit par 10 du logarithme décimal de l'ouverture exprimée en micron augmentée d'une unité (ex : le tamis de 5 mm a pour module $10 \cdot \log(5000) + 1 = 38$).

I.2.2.5. Forme des granulats

La forme des granulats a une influence importante sur la stabilité du mélange, ainsi que sur la quantité nécessaire de mortier donc de ciment.

Les granulats ont différentes formes comme l'indique la figure I.3

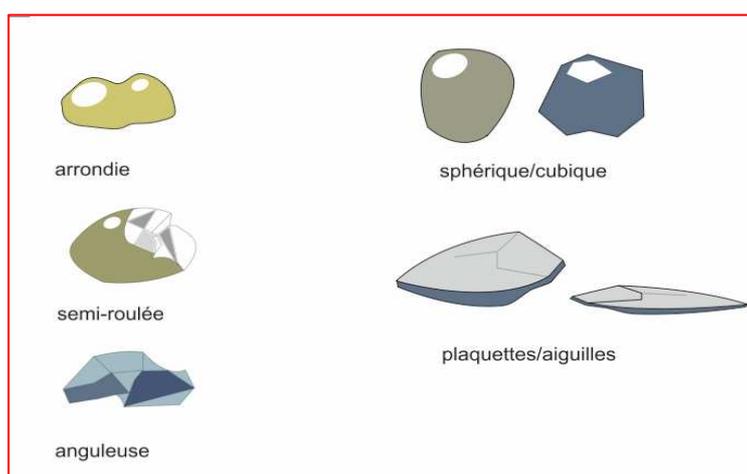


Figure I.5 : Différentes formes de granulats [JEF 05]

I.2.2.6. Courbe granulométrique

I.2.2.6.1. Définition

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires composants un granulats donné d/D ; dans la mesure où l'on peut admettre que la masse spécifique des grains constituant le granulat analysé reste la même quelle que soit la grosseur des grains, la distribution volumétrique est la même que la distribution pondérale.

La courbe est exprimée par un graphique (figure.I.4). La courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs. Pour les classes granulaires les plus fréquentes, les normes définissent des « fuseaux » à l'intérieur desquels des courbes granulométriques doivent être situées.

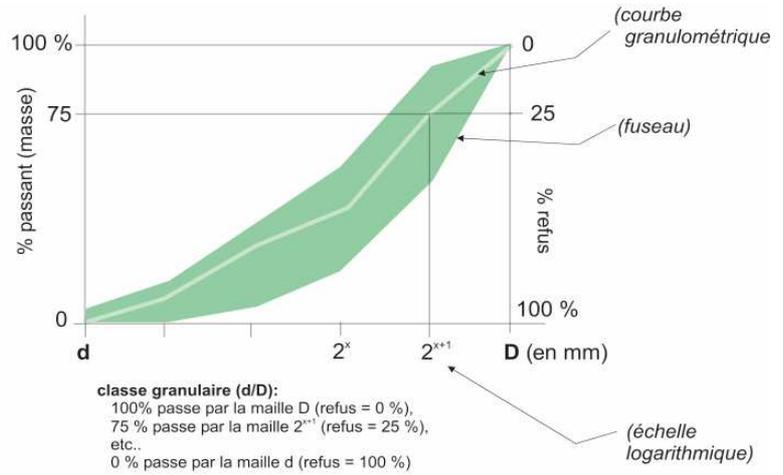


Figure I.6: Courbe granulométrique [JEF 05]

I.2.2.6.2. Les fuseaux

La notion de fuseau, bien qu'elle soit appliquée dans ce paragraphe à la granulométrie, doit être étendue à l'ensemble des propriétés des granulats (ES,...).

- Fuseau ENVELOPPE : il indique l'étendue de variation de la valeur.
- Fuseau de SPECIFICATION : il indique l'étendue dans laquelle doit se trouver la valeur moyenne. Il est propre à une technique considérée.
- Fuseau de FABRICATION : un fuseau de fabrication est entièrement inclus dans le fuseau de régularité.

Fuseau de REGULARITE : Il précise les tolérances acceptables de variation de la valeur moyenne, en tenant compte des incertitudes sur les mesures.

I.2.2.6.3. Les courbes granulométriques pour les différents types de granulats :

Exemple 1 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20

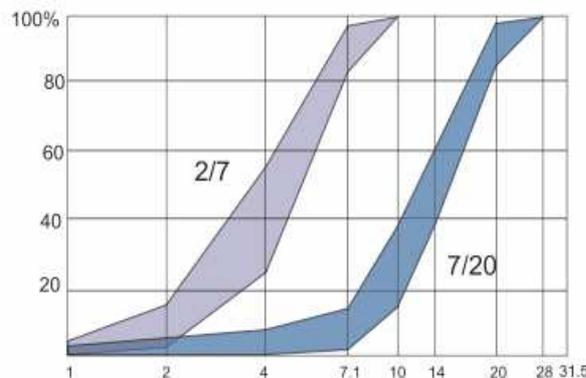


Figure I.7 : Courbes granulométriques pour les graviers 2/7 et 7/20 [JEF 05]

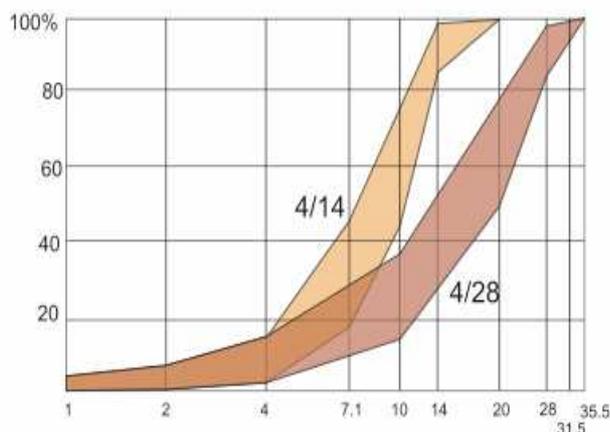
Exemple 2 : Courbes granulométriques pour les graviers 4/14 et 4/28

Figure I.8 : Courbes granulométriques pour les graviers 4/14 et 4/28 [JEF 05]

I.2.2.7. Sable**I.2.2.7.1. Généralités**

Ces grains de sable, de même origine que les granulats, ont un diamètre inférieur à 2 mm. Le sable doit être propre et sans poussières argileuses. Il existe un béton contenant uniquement du sable, du ciment et de l'eau.

Le mortier sert principalement en maçonnerie pour lier les briques ou les parpaings, et pour dresser les enduits sur les murs.



Figure I.9 : les types de sable [JEF 05]

Les fins ont influence sur les caractéristiques du béton à l'état frais et l'état durci.

I.2.2.7.2. Fuseau granulométrique

- ➔ Sable fin et moyen
Pour la série française, le module de finesse est défini comme suit :

$$\text{MDF} = \frac{\sum \text{refus} \{0.08 + 0.16 + 0.315 + 0.63 + 1.25 + 2.5 + 5\}}{100}$$

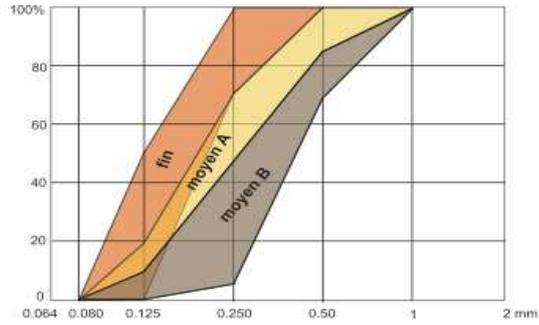


Figure I.10: Courbes granulométriques de sable fin et moyen [JEF 05]

➔ Sable gros

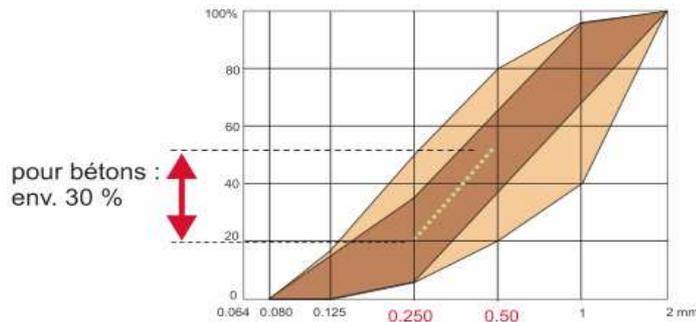
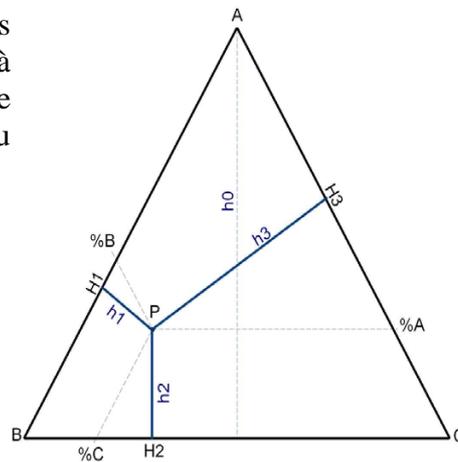


Figure I.11 : Courbes granulométriques de sable gros [JEF 05]

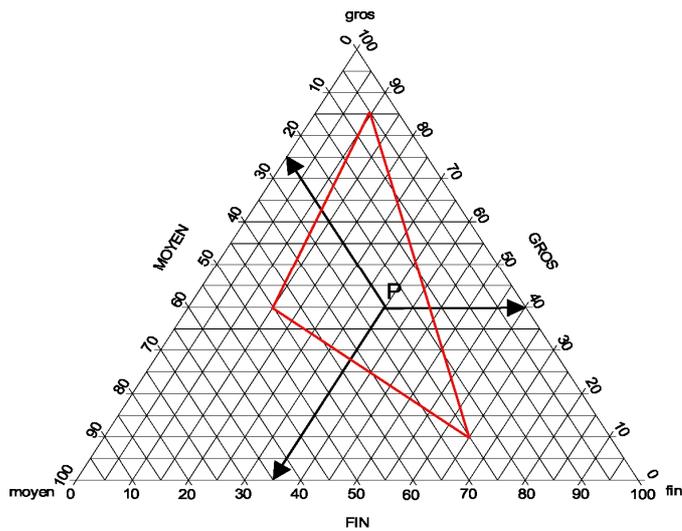
I.2.3. Les mélanges ternaires

Dans un triangle équilatéral, la somme des distances d'un point quelconque situé à l'intérieur du triangle aux 3 cotés de ce triangle est constante et égale à la hauteur du triangle équilatéral.

$$h_1 + h_2 + h_3 = h_0$$



si l'on pose $h_0 = 100h_1$, alors h_2 et h_3 peuvent représenter les proportions en pourcentage d'un mélange ayant 3 composantes. On peut alors poser que h_2 représente la part de A. Puis que h_3 et h_1 les parts de B et C. On pourrait graduer les 3 distances h_1, h_2, h_3 de 10% en 10% sur ces axes. Cependant, on préfère tracer 3 parallèles aux 3 cotés à partir de P, les graduations du % et A, B et C étant reportées pour plus de clarté à l'extérieure du triangle.

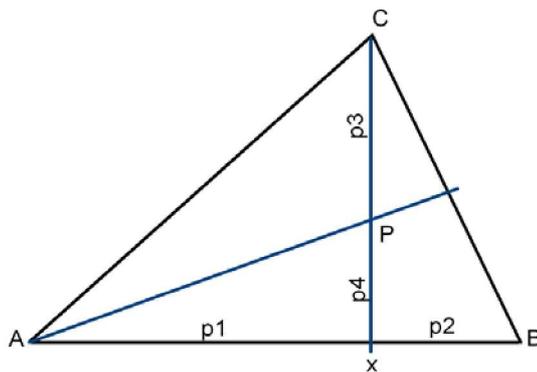


$$\begin{aligned} p1 &= AX \\ p2 &= BX \\ p3 &= CP \\ p1 + p2 &= AB \\ p3 + p4 &= CX \end{aligned}$$

- Le point P représente un mélange 40% du granulat « gros », 25% du granulat « moyen » et 35% du granulat « fin ».
- Toute droite qui joint un sommet à un point situé sur le côté opposé représente tous les mélanges possibles des 3 composantes où 2 granulats ont des proportions respectives constantes.
- Les limites des granulats sont souvent fixées de la manière suivante :

- fin < 6.30 mm
- gros > 5 mm

Détermination des proportions d'un mélange



$$\begin{aligned} p1 &= AX \\ p2 &= BX \\ p3 &= CP \\ p1 + p2 &= AB \\ p3 + p4 &= CX \end{aligned}$$

On montre que dans un triangle quelconque ABC, tout point P situé à l'intérieur du triangle représente un mélange des 3 composantes de base représentées graphiquement par les 3 sommets A, B et C du triangle dans les proportions suivantes :

$$\begin{aligned} X_A &= \frac{P_2}{P_1 + P_2} + \frac{P_3}{P_3 + P_4} & X_C &= \frac{P_4}{P_3 + P_4} \\ X_A &= \frac{P_1}{P_1 + P_2} + \frac{P_3}{P_3 + P_4} & X_A + X_B + X_C &= 1 \end{aligned}$$

De façon pratique, pour mélanger 3 granulats on commence par se fixer les limites granulaires (gros, moyen, fin). On divise ensuite chacun des 3 granulats utilisés en 3 fractions qui détermineront les coordonnées des 3 points représentatifs des 3 granulats dans le diagramme triangulaire. On joint ces 3 points qui forment en général un triangle.

On caractérise ensuite le fuseau imposé par un point représentatif P sur le même diagramme. On peut par exemple calculer la courbe médiane du fuseau en 3 fractions : gros, moyen, fin.

Si le point P est à l'extérieur du triangle quelconque formé par les trois points représentatif des granulats, il est possible de combiner afin d'obtenir un mélange exactement conforme aux exigences.

I.2.3.ADJUVANTS

I.2.3.1 Définition

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci

I.2.3.2. Classification des adjuvants

Les adjuvants sont généralement classés selon leur période d'actions principales, et favorables. Ils sont destinés à agir sur la composition :

- ✧ **A l'état frais** : l'exigence principale concerne la facilité de mise en œuvre, sans affecter le rapport eau/ciment.
Sont classés dans cette catégorie :
 - les agents réducteurs d'eau ;
 - les agents hautement réducteurs d'eau (superplastifiants).
- ✧ **Durant la prise** : selon la situation du chantier, on peut demander d'accélérer ou au contraire de ralentir la prise du béton, du mortier ou du coulis :
 - accélérateur de prise et de durcissement ;
 - retardateur de prise.
 -
- ✧ **Durant le durcissement** : ici en générale l'intérêt est porté sur le raccourcissement du délai de décoffrage ou de mise en service. $X_A + X_B + X_C = 1$
- ✧ **Après durcissement** : il s'agit généralement de donner des performances concernant la durabilité du béton et en particulier sa résistance aux cycles de "gel/dégel".

Autres adjuvants

Il existe d'autres adjuvants qui procurent des propriétés particulières.

Il s'agit par exemple :

- des hydrofuges de masse qui diminuent la perméabilité à l'eau
- des colorants qui agissent sur les caractéristiques d'aspect.

I.2.4. EAU DE GACHAGE

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables.

I.2.4.1. Aptitude à l'emploi de l'eau de gâchage

La norme française NF P 18-303 sur l'eau caractérise l'aptitude à l'emploi selon deux critères :

- teneur en matières en suspension (2 ou 5 g/l)
- 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.

Dans la norme européenne EN 1008, toute eau non potable est jugée sur la base d'analyses chimiques et, éventuellement, d'essais physiques.

I.2.4.1.1 Critères sensoriels (olfactifs ou visuels)

- L'odeur : une eau malodorante doit être suspectée de contenir des matières organiques en décomposition.
- Aspect : une eau qui, après décantation, garde une couleur foncée, doit être considérée comme douteuse.

I.2.4.1.2 Critères chimiques

La norme a retenu 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.

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 limite, l'eau doit être considérée soit comme douteuse, soit comme inutilisable. Si l'eau est jugée douteuse, elle doit faire l'objet d'un contrôle.

I.2.4.1.3. 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 sept 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 EN 1008.

I.2.4.2. QUELQUES EAUX PARTICULIERES

I.2.4.2.1. 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 30 g/l), le sulfate, sous forme de sulfates de magnésium, de calcium et de potassium (environ 3.7 g/l), les micro algues (très variables)

I.2.4.2.2. 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 à cause de l'anion qui est lié à l'ion H^+ , en général Cl_4^{2-} , mais parfois tout autre (acide humide, acide lactique, etc.)

I.2.4.2.3. 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 avoir été additionnées d'eaux de pluie ou de ruissellement. Elles sont chargées en éléments fins qui proviennent du ciment, des additions et de granulats ou en composés chimiques qui proviennent du ciment (sulfates, etc.)

I.2.4.2.4. Les eaux de rejets industriels

Dans certains cas, ces eaux peuvent contenir des impuretés qui vont faire intervenir des réactions complexes avec le ciment : c'est le cas des usines alimentaires ou de la plupart des rejets organiques ou chimiques. Elles ne devraient donc être utilisées qu'après une vérification approfondie de leur non-nocivité.

I.2.5. LES ADDITIONS

Ce sont les cendres volantes, les additions calcaires, les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau, les fumées de silice. Ces poudres sont utilisées comme constituants du ciment ou additions dans le béton.

I.3.5.1. Cendre volantes

Il résulte de la combustion de charbon pulvérisé dans les centrales thermiques des composants volatiles du carbone et des impuretés minérales.

Les composants volatiles et les carbone sont brûlés, tandis que les impuretés minérale telles que l'argile, le quartz et les feldspaths sont fusionnés et entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petit sphères vitreuses.

I.2.5.2. Fillers et additions calcaires

Les données économiques ne faisant pas de distinction entre les fillers et les additions qui relèvent pourtant de normes différentes, nous utilisons ci-après le terme de (fillers) pour désigner l'ensemble de la production.

I.2.5.3. Laitier vitrifié moulu et autres laitiers de haut fourneau

C'est un produit de la production de la fonte.

Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au dessus de la fonte, et se vérifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier donne ce qu'on appelle le laitier vérifié moulu.

I.3.5.4. Fumées de silice

C'est une poudre amorphe de silice extrêmement fine, récupérée dans les cheminées lors de la condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

PARTIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE II

L'HYDRATATION
DU
CIMENT

CHAPITRE II : L'HYDRATATION DU CIMENT

II.1. DEFINITION

1.1. Hydratation

En présence d'eau, les sels minéraux formant le ciment amorphes, anhydres et instables s'hydratent ; il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables. La formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produit la prise. Les réactions d'hydratation s'accompagnent d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter pour le gâchage correct du ciment est supérieure à la quantité strictement nécessaire aux seules réactions chimiques ; on doit en effet distinguer :

- L'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et nécessaire à leur structure cristalline ; elle est en général de l'ordre de 25 à 30 % du poids de ciment.
- L'eau absorbée qui pénètre plus ou moins à l'intérieur des granulats selon leur degré de porosité.
- L'eau libre (dans de fins réseaux capillaires) qui s'élimine plus ou moins par séchage. Elle n'est nécessaire que pour obtenir la viscosité, la plasticité et l'onctuosité indispensable au gâchage et la mise en place correcte du béton dans les coffrages tenant compte de l'embaras plus ou moins important des armatures.

II.1.2. Prise

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement ; on le détermine à l'aide de l'aiguille de Vicat. La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide.

Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts, à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20 °C se situe entre 2 et 5 heures.

II.1.3. Durcissement

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue. Pour les ciments à durcissement rapide on obtient après quelques jours la presque totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois.

II.2. THEORIE DE LA PRISE ET DU DURCISSEMENT

Le début de prise correspond à l'augmentation brusque de la viscosité de la pâte de ciment et à une élévation de sa température. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. C'est le début du durcissement.

Deux théories cherchent à expliquer le phénomène de la prise:

- La théorie cristalloïde de LE CHATELIER (1887) ;
- La théorie colloïdale de MICHAELIS (1893).

II.2.1. La théorie cristalloïde

a) La prise

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau. La solution devient saturée et des sels hydratés cristallisent. Comme la solubilité des sels hydratés est beaucoup plus faible que celle des cristaux anhydres, les sels hydratés précipitent sous forme de cristaux à partir de la solution sursaturée. La solution restante peut dissoudre de nouvelles particules anhydres.

b) Le durcissement

Après la prise commence un phénomène de durcissement mécanique qui se développe par multiplication et par adhérence.

La nucléation et la croissance des cristaux sont fonctions du degré de dissolution des phases anhydres.

II.2.2. La théorie colloïdale

Lors du contact de l'eau avec du ciment anhydre, ce dernier va d'abord se dissoudre dans l'eau. Les grains de ciment augmentent de volume (gonflement) et il y a apparition d'une solution très concentrée en chaux.

La solution de chaux agit sur les silicates et donne formation à un gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) insoluble.

Cette masse gélatineuse augmente peu à peu de volume par absorption de la chaux. Le C-S-H devient dense et imperméable. La masse gélatineuse enserre les grains de ciment qui continuent à s'hydrater par succion de l'eau contenue dans le gel.

Le gel s'appauvrit en eau et ses résistances augmentent (explication de la prise sous l'eau). Le gel constitue une masse protectrice, durcissable et nourricière pour les grains de ciment.

II.2.3. La théorie moderne

On peut admettre qu'il se produit de très fins cristaux qui précipitent peu à peu en une masse colloïdale.

La structure cristalline se développe ensuite en donnant naissance à un réseau de fines aiguilles enchevêtrées qui permettent à la pâte d'acquies sa cohésion et sa dureté.

II.3. EVOLUTION DE L'HYDRATATION

Quand le ciment portland réagit avec l'eau, il y a dégagement de chaleur qui peut être mesurée par le calorimètre à conduction thermique (isotherme).

Le dégagement de chaleur et l'évolution de l'hydratation pourront ainsi être suivis dans le temps.

Existence de trois pics correspondant à trois maximums de dégagement de chaleur. La figure II.1 illustre le phénomène.

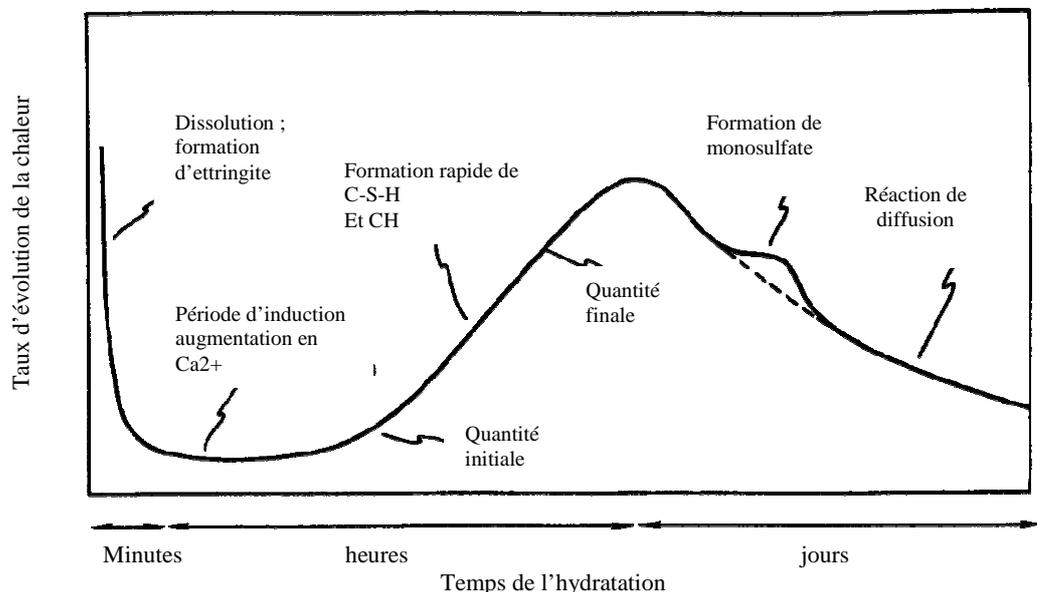


Figure II.1 : Dégagement de chaleur au cours du temps [SHE 09]

► **Premier pic**

C'est le plus haut, mais il est de courte durée. Il est suivi d'une "période dormante" dans laquelle le dégagement de chaleur est relativement faible (sans jamais être nul). Les transformations physiques dans cette période sont détectées par l'augmentation du raidissement de la pâte.

Les phénomènes physiques et chimiques régissant cette phase (période dormante) sont du point de vue pratique très importants, car ils ont un effet sur l'ouvrabilité du béton. Pour un rapport E/C = 0,5, on devra placer le béton dans la structure au plus tard au milieu de la "période dormante".

► **Deuxième pic**

La "période dormante" prend fin avec l'accélération du dégagement de chaleur et de la prise du ciment. Le second pic atteint son maximum (pour un ciment ordinaire à 20 °C) entre 9 heures et 10 heures.

► **Troisième pic**

Ce ne sont pas tous les ciments qui présentent un troisième pic de dégagement de chaleur. Lorsqu'il se présente, son intensité et le moment de son apparition varient beaucoup d'un ciment à un autre.

Pour comprendre les réactions qui se passent lors de l'hydratation du ciment, et faire un lien avec sa prise et le développement des résistances, il faut connaître :

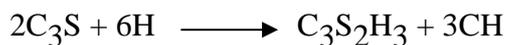
- l'effet de l'hydratation de chaque phase du ciment sur la chaleur d'hydratation;
- les raisons des variations considérables du dégagement de chaleur dans le temps;
- le processus d'agglomération des produits d'hydratation pour remplir les espaces;
- la nature des liens entre les produits d'hydratation dans la pâte durcie.

Les réactions d'hydratation de toutes les phases de ciment Portland se passent en même temps et contribuent avec une intensité différente au dégagement de chaleur du ciment.

❖ Hydratation du silicate tricalcique C_3S

Le C_3S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à 1 année.

- Produits d'hydratation du C_3S



C-S-H + portlandite

Les produits formés sont:

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H)
- L'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH).

- Silicate de calcium hydraté (C-S-H)

La formule du C-S-H, donnée dans l'équation ($C_3S_2H_3$) est approximative, car le produit est très peu cristallin, et il existe plusieurs variétés de C-S-H.

Le C-S-H est le produit d'hydratation qui développe la résistance de la pâte de ciment.

Une partie des ions SO_4^{2-} provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance.

- Mécanisme d'hydratation du C_3S

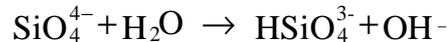
Deux mécanismes d'hydratation du C_3S sont proposés :

- L'hydratation à partir de la solution ;
- L'hydratation topo-chimique.

a) L'hydratation à partir de la solution

Ce mécanisme est basé sur le principe de la formation de cristaux d'hydrates qui précipitent à partir de la phase dissoute.

La solution produite étant sursaturée en ions formant les produits d'hydratation, les produits d'hydratation précipitent alors. La vitesse de mise en solution du C_3S dépendra de la formation et de l'augmentation de volume de ces cristaux.



b) L'hydratation topochimique

Le fait que la silice est en général très peu soluble et présente en quantité importante dans le C-S-H, pousse à penser que le C-S-H se forme très près de la surface du cristal. Le C-S-H se forme sur la surface du grain tandis que le CH est précipité à partir de la solution.

Origine de la "période dormante"

L'existence de la "phase dormante" est très intéressante dans la mesure où dans les réactions à l'état solide l'existence d'une phase d'accélération après une période de décélération est rare.

Il existe plusieurs théories sur l'origine de la "période dormante". Nous allons présenter les deux plus importantes.

Théorie n°1: Formation de deux couches de perméabilités différentes.

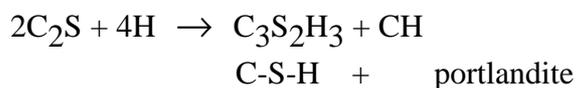
Selon Stein et Stevels (1964), il y a d'abord formation d'une première couche de C_3SH_n imperméable, c'est le début de la "période dormante".

Puis, la formation du C-S-H, plus perméable à l'eau, termine cette période.

Théorie n°2: Rupture de la couche protectrice par l'effet de pression osmotique.

Dans ce mécanisme (Powers, 1961) il y a d'abord formation d'une couche qui permet le passage de Ca^{2+} dans la solution et l'eau dans l'autre sens. La formation de C-S-H derrière cette couche va créer une pression qui provoquera la rupture de cette dernière.

❖ Hydratation du silicate bicalcique C_2S



Produits d'hydratation

Ce sont silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH). La formule du C-S-H donnée dans l'équation ($C_3S_2H_3$) est approximative (comme dans le cas de l'hydratation du C_3S). La quantité de CH produite dans ce cas est plus faible d'un tiers que dans le cas du C_3S . La vitesse d'hydratation de b- C_2S est beaucoup plus faible que celle du C_3S .

La faible quantité de CH va favoriser le développement de meilleures résistances que dans le cas du C₃S. Le b-C₂S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours.

Comme dans le cas du C₃S, une partie des ions SO₄²⁻ provenant du gypse utilisé dans le ciment rentre dans la structure du C-S-H et permet d'améliorer sa résistance.

• **Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A**

Le C₃A réagit avec l'eau pour former des produits cristallins de différents rapports C/A.



Les produits d'hydratation (C₄AH₁₃ + C₂AH₈) sont métastables par rapport à l'hydrogrenat (C₃AH₆). À température plus élevée (30 °C), ils se transforment en C₃AH₆.

La chaleur d'hydratation du C₃A est suffisante pour transformer une petite quantité d'hydrates en C₃AH₆. La présence de chaux, comme dans le cas de l'hydratation du C₃S dans la pâte de ciment, favorise la formation de C₄AH₁₃ et l'inhibition de C₆AH₆.

La formation de ces hydrates va très vite provoquer la solidification de la pâte de ciment.

Pour éviter cette "prise éclair", on ajoute du sulfate de calcium qui va jouer le rôle de retardateur de prise.

En présence de sulfate de calcium, le produit de l'hydratation est le trisulfoaluminate hexacalcique, appelé ettringite.

La formule de l'ettringite est souvent écrite comme ceci :

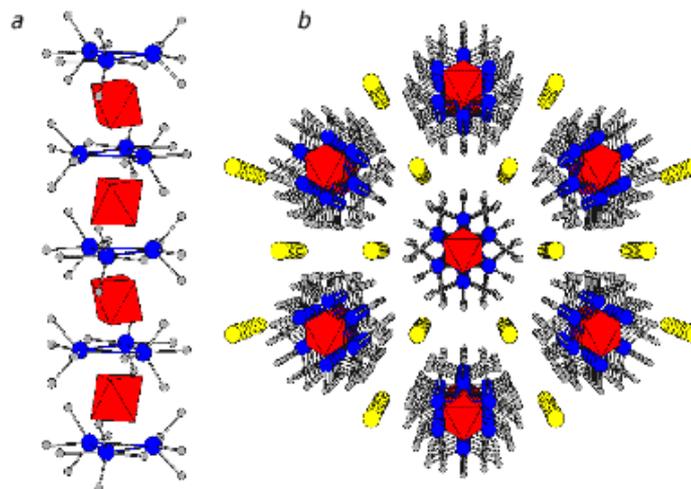


Figure II.2 : Structure du cristal d'ettringite [SHE 09]

La structure du cristal d'ettringite est constituée de :

- (a) colonnes de $(AL, Fe)(OH)_6^{3-}$ octahedra (rouge), Ca^{2+} (bleu), et H_2O (gris) ;
- (b) SO_4^{-2} et eau (jaune) est assis dans les canaux, entre les colonnes.

Souvent la structure de l'ettringite incorpore différents ions, particulièrement Fe^{3+} et Al^{3+} . C'est pour cela que l'on appelle aussi l'ettringite: AFt (t = trisulfate).

L'ettringite est un produit hydraté stable seulement dans le cas où le gypse est en quantité suffisante.

Quand le gypse est consommé et que le C_3A n'est pas complètement hydraté (généralement entre 8 h et 16 h dans les ciments), alors l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate tétracalcique C_4ASH_{12} (Afm).

La formule du monosulfoaluminate est souvent écrite: $C_3A.CS.H_{12}$

Monosulfate,

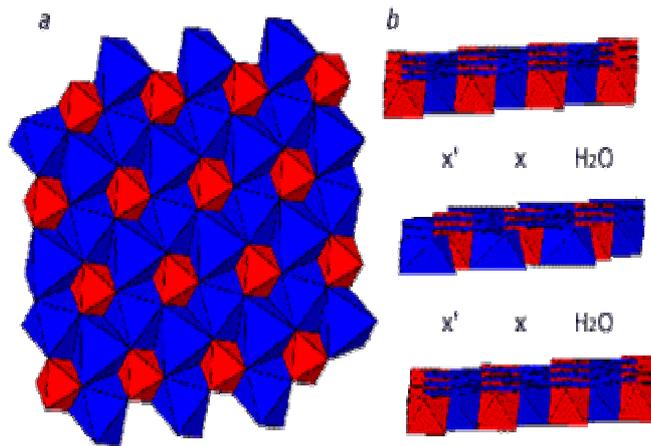


Figure II.3 : Structure du cristal de monosulfite [SHE 09]

La structure du cristal de monosulfate est constituée, en partie supérieure par :

- (a) draps de $(AL, Fe)(OH)_6^{3-}$ octahedra (rouge), et $Ca(OH)_6^{-4}$ octahedra ;
- (b) anions (c'est-à-dire SO_4^{-2}) et l'eau (jaune) s'est assis entre les couches.

Après formation du $C_3A.CS.H_{12}$, s'il reste encore du C_3A , alors le C_4AH_{13} se forme aussi.

Les deux étapes de l'hydratation du C_3A sont exothermiques.

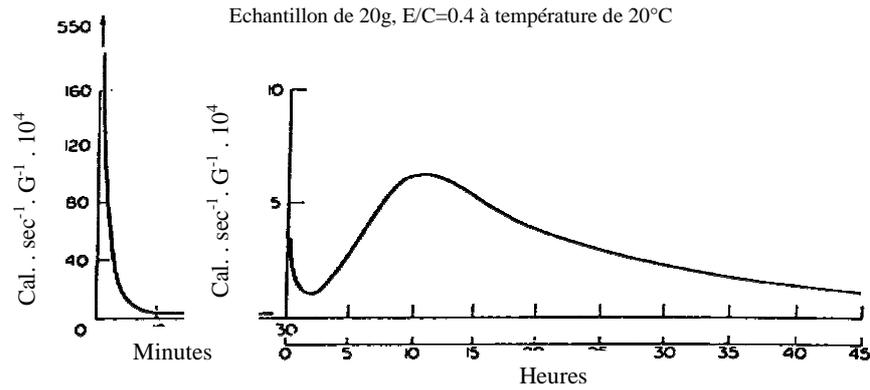


Figure II.4 : Les deux étapes de l'hydratation du C₃A [SHE 09]

Mécanisme d'hydratation du C₃A

La formation de l'ettringite diminue l'hydratation du C₃A en formant une barrière de diffusion ("période dormante") autour du C₃A, de façon analogue à celle qui est formée autour des grains de C₃S par le C-S-H.

Cette barrière une fois brisée lors de la formation du monosulfoaluminate, permet au C₃A de réagir plus rapidement. La courbe calorimétrique de l'hydratation du C₃A est semblable à celle du C₃S, quoique les réactions et le dégagement de chaleur soient différents.

Selon la teneur en gypse, l'hydratation du C₃A peut être plus ou moins retardée.

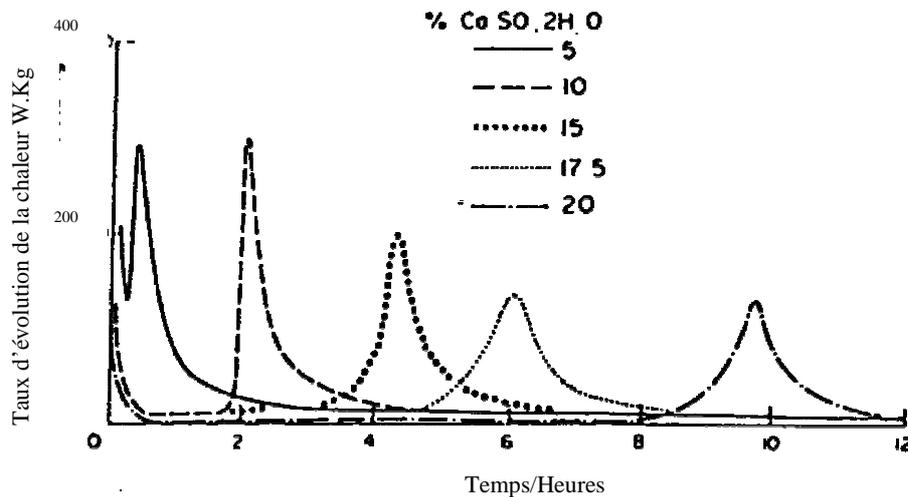


Figure II.5 : Mécanisme d'hydratation de C₃A [SHE 09]

Par ailleurs si la teneur en eau C₃A est supérieure à celle qui est nécessaire à la formation de l'ettringite, alors il y a apparition du 3^{ème} pic dans la courbe calorimétrique par formation du C₄AH₁₃.

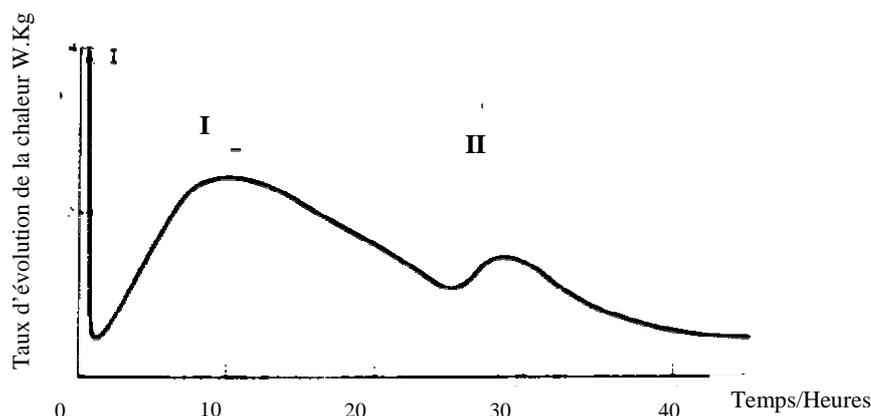


Figure II.6 : Apparition du 3^{ème} pic dans la courbe calorimétrique [SHE 09]

• Hydratation du ferroaluminate tétracalcique C₄AF

Les produits d'hydratation du ferroaluminate tétracalcique sont similaires à ceux du C₃A, avec les ions Al³⁺ partiellement remplacés par les ions Fe³⁺.

Les réactions d'hydratation sont cependant plus lentes et entraînent moins de dégagement de chaleur.

Les ferroaluminates tétracalciques ne s'hydratent jamais assez vite, au point de causer la "prise éclair".

Remarque :

- Pour bien comprendre l'hydratation du ciment, il ne faut pas se baser uniquement sur l'hydratation des phases pures. Dans le ciment, quand ces phases réagissent, elles créent des interactions entre elles.

- Regourd (1976) a trouvé dans la pâte hydratée un silicoaluminate. Dans le ciment, le soufre rentre dans la structure du C-S-H.

L'hydratation du C₃S est accélérée par la présence de sulfates alcalins tandis que la chaux produite accélère l'hydratation du C₃A et C₄AF.

L'hydratation du C₃S contribue majoritairement à la formation du 2^{ème} pic de la courbe calorimétrique de la figure II.1

L'hydratation du C₃A, pour former de l'ettringite, participe aussi à la formation du 2^{ème} pic. Si un 3^{ème} pic apparaît, il y a alors un excès de C₃A.

A cause de sa faible chaleur d'hydratation, la C₄AF ne contribue que très peu à la formation du 2^{ème} pic.

- Les réactions qui se passent lors de la formation du 1^{er} pic sont plus complexes, car au départ, toutes les phases réagissent rapidement avec l'eau avant que la concentration de la solution en ions sulfates soit assez importante pour influencer l'hydratation du C₃S et C₄AF.

Par ailleurs, la chaux libre (CaO_l), la magnésie libre (MgO_l) et l'hémihydrate réagissent aussi de façon exothermique avec l'eau.

- Si la quantité d'ions SO_4^{2-} en solution n'est pas suffisante, le C_3A va alors s'hydrater et donner lieu à une prise rapide, tandis que si la concentration en ions SO_4^{2-} est trop élevée, le gypse va précipiter et donner lieu à une fausse prise.
- La "période dormante" prend fin avec une augmentation brusque de la quantité d'eau liée dans le C-S-H et dans l'ettringite.
L'enchevêtrement des produits d'hydratation entre les grains de ciment va augmenter les résistances mécaniques de la pâte et donner naissance à la prise.

II.4. INFLUENCE DU GYPSE SUR L'HYDRATATION

La présence du gypse a un effet sur la cinétique et la thermodynamique de l'hydratation du ciment. Lors de l'hydratation du ciment, les différentes phases s'hydratent différemment tout en s'influçant les unes les autres. Nous allons donc étudier l'effet du gypse sur l'hydratation de chaque phase principale et sur l'hydratation globale du ciment portland.

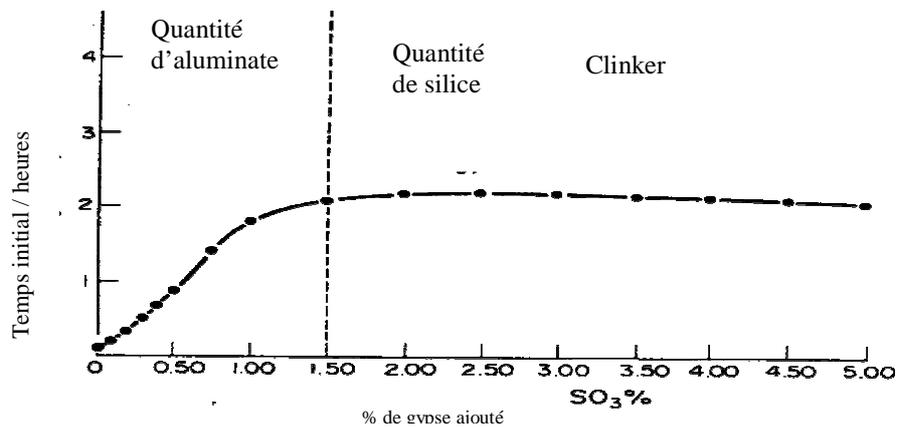


Figure II.7 : Effet du gypse sur l'hydratation globale du ciment portland [SHE 09]

II.4.1. Hydratation du C_3S et du C_2S

Dans le ciment hydraté, le CaSO_4 a un effet sur le silicate de calcium hydraté(C-S-H). Le CaSO_4 affecte l'hydratation du C_3S dès le début de l'hydratation. La présence de gypse dans le ciment active le taux d'hydratation du C_3S .

Au fur et à mesure que l'hydratation progresse, le gypse est consommé.

Après 10 h, il n'y a plus trace de gypse.

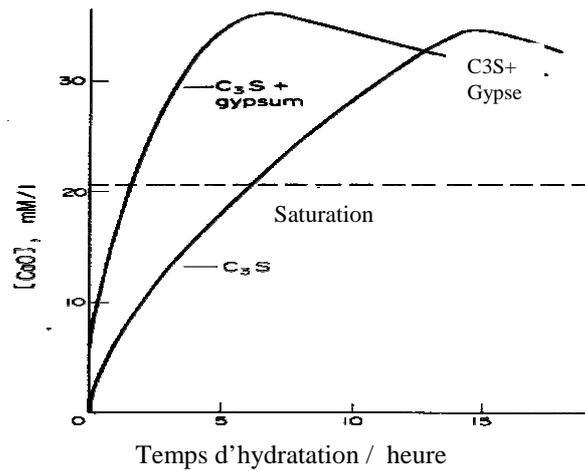


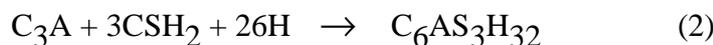
Figure II.8 : Influence du gypse sur l'hydratation [SHE 09]

Sous la forme d'ions SO_4^{2-} , le gypse rentre dans la structure du C-S-H. La quantité exacte d'ions SO_4^{2-} qui rentrent dans la structure du C-S-H n'est pas bien connue, mais elle est estimée à 80 % selon certains chercheurs (Mohan, Taylor).

Selon certains chercheurs (Odler), la liaison entre le sulfate de calcium et le C-S-H est si faible que l'on pense que le sulfate de calcium est adsorbé à la surface du gel de C-S-H. La morphologie du C-S-H formé dans les premières minutes d'hydratation en présence de gypse est différente de la forme alvéolaire formée en son absence.

II.4.2. Hydratation du C₃A

Nous savons que le C₃A réagit avec l'eau en absence et en présence du sulfate de calcium selon les équations suivantes:



Ces réactions dépendent de la réactivité du C₃A, de la solubilité et de la vitesse de dissolution du sulfate de calcium utilisé.

Plus le C₃A est réactif, plus la vitesse de mise en solution et la solubilité du sulfate de calcium doivent être élevées pour que la réaction (2) soit favorisée, sinon la réaction (1) prédominera.

La réactivité du C₃A et le type de sulfate de calcium utilisé auront un effet direct sur la prise du ciment.

II.5. DEFINITION DU DEGRE D'AVANCEMENT DES REACTIONS D'HYDRATATION DU CIMENT

II.5.1. Définition générale du degré d'hydratation du ciment α_c

Le degré d'hydratation du ciment est défini par la masse de ciment ayant réagi, rapportée à celle initialement introduite.

$$\alpha_c(t) = \frac{m_{ch}(t)}{m_c}$$

$\alpha_c(t)$: Degré d'hydratation du ciment à l'instant t ,

$m_{ch}(t)$: Masse de ciment hydraté à l'instant t ,

m_c : Masse initiale de ciment.

Le ciment est un matériau polyphasique. Il est alors possible de définir un degré d'hydratation α_i pour chacune des phases principales du ciment : silicates et aluminates. On obtient ainsi une expression différente du degré d'hydratation du ciment :

$$\alpha_c(t) = \sum_i p_i \alpha_i(t)$$

$\alpha_i(t)$: Degré d'hydratation du constituant i à l'instant t ,

p_i : Fraction massique du constituant i .

La détermination du degré d'hydratation α_c peut se faire par différentes techniques dont la microscopie et l'analyse d'image, la diffractométrie aux rayons X (DRX) et l'analyse quantitative.

Il est à noter que le degré d'hydratation final $\alpha_c(\infty)$ n'atteint jamais 1 dans la pratique et reste très différent de cette valeur lorsque l'hydratation du ciment est incomplète.

II.5.2. Définition du degré d'avancement α

Différentes définitions du degré d'avancement des réactions d'hydratation du ciment peuvent être données à travers le suivi de l'évolution relative d'une propriété physique ou mécanique particulière. La valeur du degré d'avancement évolue alors entre 0 et 1. Parmi ces propriétés, on trouve plus particulièrement :

- Le degré d'hydratation du ciment α_c ,
- La quantité d'eau chimiquement liée : ω_n ,

(ω_n : est définie généralement comme la perte en eau par chauffage à 1050°C après séchage à 105°C.)

- La chaleur d'hydratation : Q ,

La quantité de chaleur dégagée Q peut être mesurée de différentes manières : essais isothermes, adiabatiques ou chaleur de dissolution.

- La surface spécifique des hydrates S_s , (ou V_m),

V_m : est la quantité d'eau permettant de recouvrir la surface des produits d'une couche monomoléculaire. Elle est proportionnelle à la surface spécifique développée : $S_s \cdot V_m$ est en général mesurée par adsorption d'azote et application de la théorie BET.

- La résistance en compression : R_c

On pose alors :

$$\alpha(t) = \frac{X(t)}{X(\mu)}$$

$X(t), X(\mu)$: représentent respectivement, la valeur de la propriété physique ou mécanique considérée à l'instant t , et celle à un temps théorique « infini ».

Corrélations entre les différentes définitions

Des études comparatives mettent en évidence des corrélations fortes entre ces grandeurs physiques [Copeland Kantro et Verbeck 62, Byfors 80, Parrott Geiker Gutteridge et al. 90, Torrenti 92]. Ainsi, chacune d'elles peut être utilisée indifféremment pour estimer le degré d'avancement de l'hydratation du ciment.

PARTIE
THEORIQUE

CHAPITRE III

LA RESISTANCE
DU BETON
A
COURT TERME

CHAPITRE III : RESISTANCE A COURT TERME DU BETON

1. Introduction

La maturométrie se base sur certain nombre de fondements scientifiques (notions de maturité et d'âge équivalent, loi d'Arrhenius) qui ont conduit à l'élaboration de la méthode dite « de l'âge équivalent ».

On constate que dans beaucoup de cas, une réaction chimique ne démarre pas, même si ses paramètres thermodynamiques sont favorables ($\Delta G < 0$) : le papier, le bois ne s'enflamment pas spontanément à température ambiante, il faut les allumer pour qu'ils brûlent. Il en va de même de l'eau oxygénée qui ne se décompose pas spontanément et du permanganate en solution dans l'eau qui n'oxyde pas cette dernière à température ambiante.

Dans tous les cas, sans exception, on remarque que la vitesse des transformations chimiques augmente lorsque l'on augmente la température.

Cette dépendance semble être spécifique à chaque réaction : elle est tantôt grande, tantôt nettement plus faible.

En réfléchissant à ces problèmes, Arrhenius acquit la conviction qu'une réaction chimique a besoin d'un "amorçage". Il faut une certaine quantité d'énergie pour "préparer" les réactifs à réagir. En particulier, il faut qu'ils entrent en collision avec une bonne orientation et que la collision permette un affaiblissement des liaisons chimiques qui doivent se rompre pour former les produits.

Il a en conséquence proposé une loi qui contient deux paramètres indépendants de la température :

L'énergie d'activation E_A exprimée en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

Le facteur de fréquence A appelé aussi facteur pré-exponentiel dont l'unité est celle

de k :

$$\ln(k/A) = -\frac{E_A}{RT} \quad \text{OU} \quad k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

III.2. EVOLUTION DE LA RESISTANCE A COURT TERME DU BETON EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA TEMPERATURE

III.2.1. 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 III.1 représente schématiquement le processus de durcissement du béton et les différentes phases de la vie du béton.

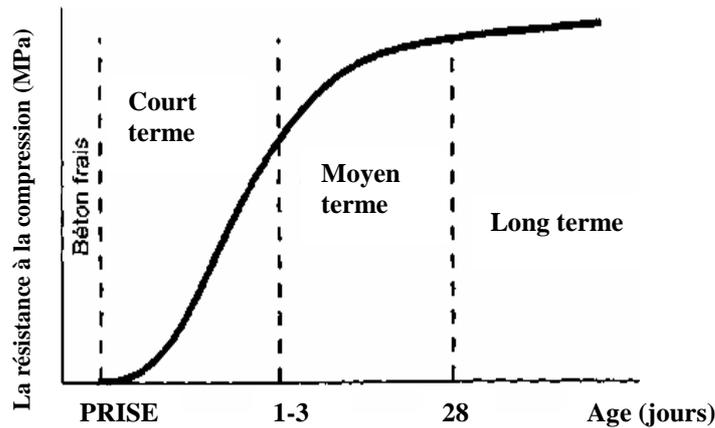


Figure III.1 : Processus de durcissement du béton représenté schématiquement par l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps, d'après Byfors [1980] [BAR 99]

La période appelée « 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 correspondant au moment du décoffrage ou de la mise en précontrainte.

III.2.2. Influence de la température sur la résistance à court terme du béton

De nombreuses études 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 la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes seront les résistances.

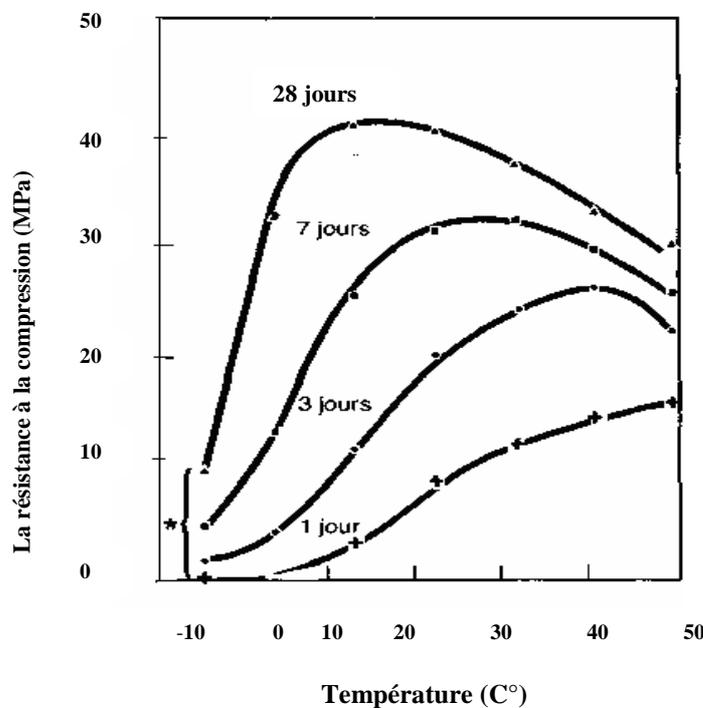


Figure III.2 : Influence de la température du mûrissement sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances [BAR 02]

Cette figure montre que plus la température de fabrication et ou de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée, alors que pour les âges de 3 à 28 jours l'influence de la température change radicalement.

En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de 3 jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance. En effet, cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente. L'augmentation des résistances du béton à court terme s'explique par le fait que l'hydratation du ciment est une réaction thermo-activée.

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

- Etre imposée à celui-ci par un apport de chaleur extérieur, c'est-à-dire en lui faisant subir une température thermique.
- Etre imposée par l'exothermie de la réaction d'hydratation du ciment.

III.2.3. Le concept d'âge équivalent

Plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'évolution de la résistance du béton à l'aide de relations qui prennent en compte les effets couplés de la température et du temps sur la cinétique de mûrissement du béton. C'est ainsi que la notion de maturité a été introduite dans le domaine du béton.

L'expression de la maturité peut être donnée par la relation suivante :

$$M(t, H(T)) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau$$

- $M(t, H(T))$: Maturité à l'instant t pour une histoire de températures donnée $H(T)$;
- $H(T)$: histoire des températures : $T(\tau)$, $\tau \in [0, t]$;
- $K(T)$: constante cinétique à la température T ;
- $T(t)$: température absolue à l'instant t , en Kelvin.

Plusieurs fonctions de maturité ont été proposées pour décrire l'activation de la réaction d'hydratation du ciment par la température.

Aujourd'hui, on peut dire que seulement 2 de ces fonctions de maturité sont encore utilisées. Il s'agit de la loi d'Arrhenius et la fonction de Nurse-Saul dont les expressions sont les suivantes :

➤ **Loi d'Arrhenius**

$$K(\theta) = A \exp\left(\frac{-Ea}{RT}\right)$$

Où A : constante de proportionnalité ;

θ : température [°C]

K : température absolue [°K] ;

R : constante de gaz parfait = 8.314 J.mo⁻¹.K⁻¹

➤ **Fonction de Nurse-Saul**

$$K(\theta) = A(\theta - \theta_0)$$

Avec θ_0 : température seuil pour laquelle l'hydratation du ciment s'arrête.

Le concept «d'âge équivalent» a été introduit postérieurement .Il est défini par rapport à une température de référence, en général 20°C.

Il est relié directement à celui de «maturité» et permet de donner à ce dernier une signification plus immédiate.

L'âge équivalent correspond au temps durant lequel le béton doit être maintenu à la température de référence afin d'obtenir la même valeur de maturité que dans les conditions de cure réelle.

La maturité peut s'exprimer par la relation:

$$\begin{aligned} M(t, H(T)) &= \int_0^t K(T(\tau)) d\tau \\ &= \int_0^{t_{eq}} K(T_{réf}) dt \\ &= M(t_{eq}, T_{réf}) \\ &= K(T_{réf}) t_{eq} \end{aligned}$$

Avec :

$M(t_{eq}, T_{réf})$: maturité à l'instant t_{eq} pour la température de référence $T_{réf}$,

t_{eq} : âge équivalent à la température de référence $T_{réf}$ (en général 20°C soit 293°K).

D'où :

$$t_{eq} = \int_0^t \frac{K(T(\tau))}{K(T_{réf})} d\tau$$

En introduisant la loi d'Arrhenius, l'expression de l'âge équivalent devient :

$$t_{eq_{20}} = \int_0^t e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T(\tau)} \right)} d\tau$$

Et selon la fonction de Nurse-Saul :

$$t_{eq_{20}} = \int_0^t \frac{T(\tau) - T_0}{20 - T_0} d\tau$$

$t_{eq_{20}}$: âge équivalent correspondant à un mûrissement isotherme du béton à 20°C ;

$T(\tau)$: température du béton à l'instant τ en °C ;

T : âge réel.

III.2.4. Le paramètre « énergie d'activation apparente » du béton et son influence

La loi d'Arrhenius fait intervenir le paramètre E_a , énergie d'activation qui caractérise la réaction d'hydratation qui se produit au sein du béton.

Dans le cas du béton, il est préférable de parler d'une énergie d'activation apparente car les divers constituants anhydres du ciment ont des réactions d'hydratation simultanées qui ont chacune leur propre énergie d'activation.

L'énergie d'activation apparente d'un béton dépend du ciment utilisé (composition chimique, finesse), du rapport E/C, de la nature et de la quantité des additions minérales et des adjuvants utilisés. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer l'énergie d'activation apparente du béton proprement dit et de ne pas se limiter uniquement à celle du ciment.

On peut déterminer l'énergie d'activation apparente d'un béton E_a , pour différentes températures de mûrissement, à partir de l'avancement des réactions d'hydratations ou à partir de grandeurs en relation avec cet avancement, par exemple, la résistance à la compression.

La méthodologie permettant d'évaluer E_a d'un béton, fondée sur la mesure de la résistance à la compression de ce béton, repose sur l'hypothèse suivante :

Pour une même formulation et à maturité égale (même âge équivalent), la résistance à la compression d'un béton est identique, quelle que soit l'histoire des températures.

Sur la base de cette hypothèse, l'essai consiste à réaliser le suivi en continu des températures d'au moins deux groupes d'éprouvettes du même béton subissant des histoires de températures différentes (par exemple un groupe conservé à 20°C en laboratoire et un autre conservé dans un caisson calorifugé). Ces suivis thermiques se font depuis le coulage jusqu'à un âge de 24 heures environ. Pendant cette même période, des mesures de résistance à la compression sont réalisées de manière à obtenir l'évolution de la résistance du béton pour chacune des histoires de températures choisies.

Si, conformément à cette hypothèse, la courbe de résistance à la compression d'un béton en fonction de son âge équivalent est indépendante de la température, et

donc unique pour un béton donné, il s’agit alors de déterminer l’énergie d’activation apparente du béton qui permet d’obtenir la meilleure superpositions des points expérimentaux obtenus pour chacune des histoires de températures étudiées, lorsque ceux-ci sont exprimés en fonction de l’âge équivalent.

III.2.5. La prévention des résistances à court terme du béton dans un ouvrage

Lorsqu’il s’agit de prévoir, avant même que le béton ne soit mis en œuvre dans les coffrages, les résistances à court terme qu’aura un béton dans l’ouvrage, il faut déterminer par simulation numérique l’histoire des températures du béton pour les conditions à étudier.

En effet, dans ces conditions, l’évaluation de la résistance d’un béton nécessite d’abord une estimation de l’évolution du champ de températures dans la structure en fonction du temps. Il faut pour cela résoudre l’équation différentielle de conduction de la chaleur.

Cela revient à dire que la température moyenne en un point donné est la somme algébrique des échanges avec les points voisins dus à la diffusion et de la variation de température interne (source de chaleur) due à l’exothermie. Cette dernière variation est évaluée à partir d’un essai calorimétrique. La résolution d’un tel jeu d’équations est complexe et ne peut s’envisager que par des moyens numériques tels que la méthode des éléments finis.

La figure suivante (III.3) décrit la démarche complète qui conduit à la prévision des résistances d’un béton dans un ouvrage et pour des conditions d’échange bien précises.

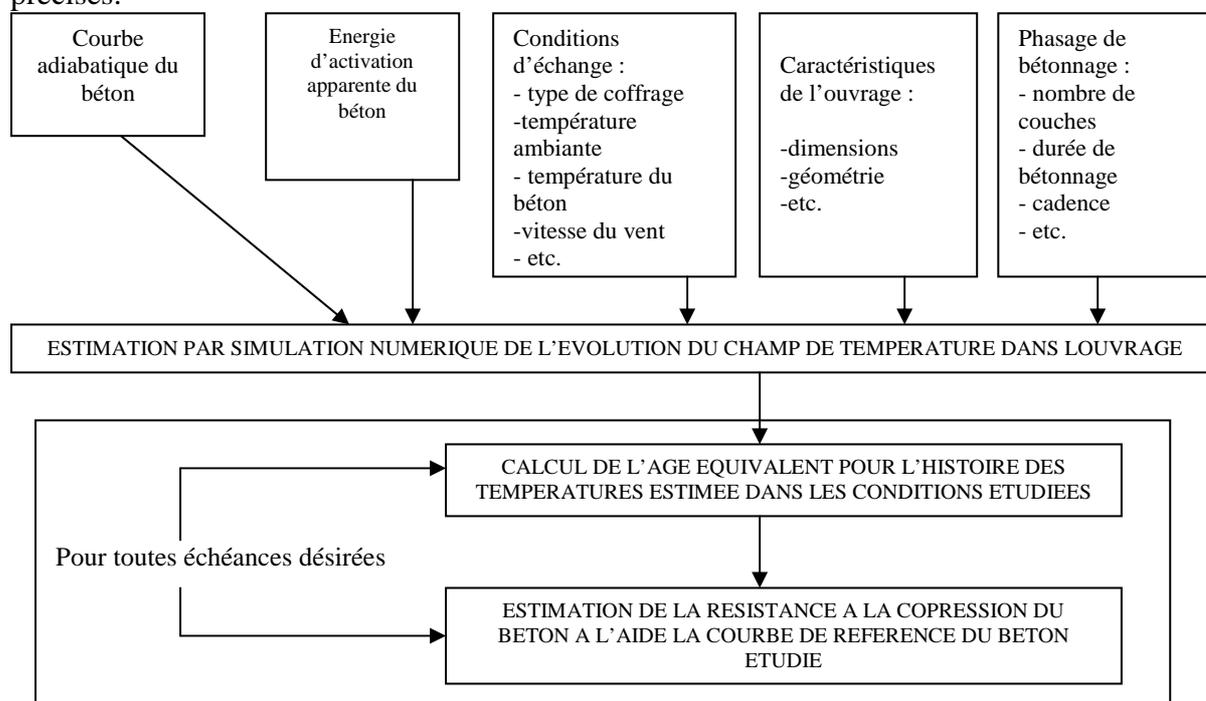


Figure III.3 : *Prévision des températures et des résistances à court terme [SHE 09]*

Le développement des résistances du béton est donc fonction de l’histoire des températures subies par celui-ci. En pratique, cette histoire des températures subies

par le béton mis en œuvre dépendra essentiellement (en excluant le traitement thermique) :

- de la formulation du béton
 - quantité de ciment,
 - classe et sous classe du ciment,
 - rapport E/C,
 - température du béton frais, etc. ;
- des conditions aux limites de l'élément de béton
 - volume,
 - géométrie,
 - type de coffrage de protection, etc.
- des conditions d'échanges climatiques
 - température ambiante,
 - vitesse du vent, etc.).

III.3. MATUROMETRIE

III.3.1. Définition

La maturométrie consiste, à partir du suivi de la température au sein de l'ouvrage, à déterminer par calcul (au jeune âge) le degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton. Le concept de «maturité» permet de traduire l'état de mûrissement du béton, c'est à dire son niveau de durcissement. Il intègre les effets couplés de la température et du temps sur la cinétique de mûrissement du béton. D'après la «loi de maturité» donnée par Saul :

Deux bétons de même composition ayant même valeur de maturité auront même résistance quelle que soit l'histoire de températures ayant conduit à cette valeur de maturité. [ACK 04]

Cette technique permet donc de connaître la résistance du béton in situ à partir de la relation degré d'avancement / résistance (i.e. âge équivalent / résistance) déterminée par étalonnage pour une formulation de béton particulière.

III.3.2. Fondement scientifique

La maturométrie s'appuie sur le fait établi que, pour un béton donné, la résistance au jeune âge ne dépend que de l'histoire thermique. La loi d'Arrhenius s'est révélée être la plus appropriée pour décrire la sensibilité de la vitesse de durcissement du béton à la température. Elle comprend un paramètre unique (appelé énergie d'activation apparente E_a) qui traduit le degré de sensibilité du béton.

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

- A : constante de proportionnalité [1/s] ;
- R : constante des gaz parfaits = 8.314 J/mol K ;
- E_a : énergie d'activation apparente du béton [J/mol].

Un béton donné est donc caractérisé par son énergie d'activation apparente et sa courbe de référence (relation maturité/résistance).
 L'application de la loi d'Arrhenius permet alors de transformer un historique de température quelconque en une valeur de maturité de laquelle on peut déduire la résistance mécanique.

Le schéma suivant montre le principe de la méthode maturométrie.

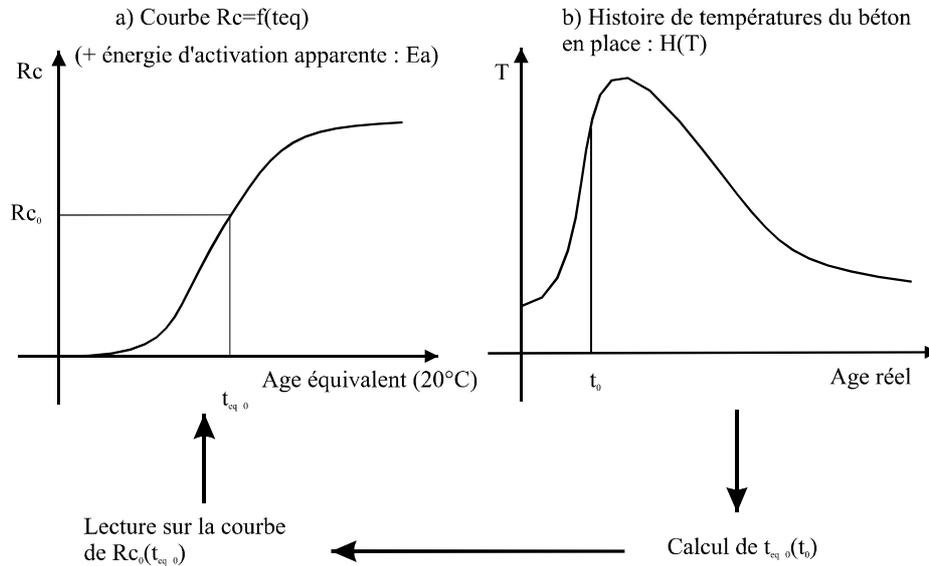


Figure III.4 : Principe de la maturométrie [KAD 15]

$$t_{eq\ 0} = \int_0^{t_0} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{réf}}\right)\right) d\tau$$

Remarque

On supposera ici, que la courbe $Rc = f(teq)$ et E_a sont déterminées à partir d'essais de résistance en compression dans une gamme de températures représentatives de celles du chantier.

III.3.3. Avantages

Les avantages de la maturométrie tiennent avant tout à la représentativité des mesures effectuées par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur les éprouvettes d'information.

L'application de la méthode maturométrique permet de traiter de façon plus fine l'évaluation de la résistance au jeune âge en définissant par exemple les points critiques de l'ouvrage. L'information est instantanée ou quasi-instantanée et ne nécessite pas de transporter des éprouvettes et de fixer et organiser des échéances d'écrasement. Elle est également plus riche qu'un simple résultat d'écrasement puisqu'on peut facilement prévoir le délai nécessaire à l'obtention de la résistance requise (par extrapolation sur la courbe de température). Les données fournies

peuvent permettre de vérifier l'adéquation des systèmes d'isolation ou de chauffage in situ.

Les multiples avantages recensés supposent bien sûr une utilisation correcte de la méthode, qui peut s'avérer dangereuse si elle est mal maîtrisée.

III.3.4. Limites d'emploi de la maturométrie

La maturométrie permet d'évaluer le délai d'obtention de résistances en compression au jeune âge supérieures ou égales à 5 MPa.

En dessous de cette valeur, la précision de la mesure devient faible et l'utilisation de la maturométrie est déconseillée (sauf étude justificative particulière).

Par ailleurs, on couvre habituellement des plages de résistance ne dépassant pas la moitié de la résistance à 28 jours : outrepasser cette limite est possible mais risque d'altérer la précision.

Il faut noter que dans le cas particulier de béton à longue période dormante (température faible ou retard lié à l'adjuvantation), la méthode reste applicable mais risque de perdre de son intérêt (résultats d'étalonnage dispersés conduisant à des prévisions parfois excessivement pessimistes).

Dans le cas général, il faut insister sur les limites d'utilisation pratiques liées aux conditions d'étalonnage (formule de béton fixée, gamme de températures y compris températures initiales à priori déterminées).

III.3.5. Modalités d'application

III.3.5.1. Condition préalable : Régularité des performances du béton au jeune âge

La maturométrie suppose que le béton mis en œuvre dans l'ouvrage est le même que le béton ayant fait l'objet de l'étalonnage et nécessite donc une bonne maîtrise de la régularité de la fabrication du béton et de ses constituants, ainsi qu'un suivi des variations des caractéristiques mécaniques au jeune âge.

Il est nécessaire de limiter les variations de dosage en eau dans une fourchette d'étendue maximale de plus ou moins 10 litres/m³ cube de béton et d'obtenir un engagement de régularité sur les performances au jeune âge du ciment (au minimum un seuil d'alerte en cas de modification sensible), en particulier la demande en eau et la résistance au jeune âge sur mortier ISO.

III.3.5.2. Positionnement des sondes- Définition des points critiques

Il s'agit d'étudier quels seront les points critiques de l'ouvrage en comparant les contraintes aux divers points de la structure et les maturités correspondantes (au moment des opérations de décoffrage, levage ou mise en précontrainte). Ce travail est en général réalisé par le bureau d'études structures. A partir des points critiques retenus, on définit ensuite le nombre de sondes et leur position.

Il est prudent, pour un point critique donné, de mettre en place deux sondes (au cas où une des deux serait endommagée ou déconnectée).

L'implantation des sondes doit être définie sur un schéma joint à la procédure de contrôle maturométrique, à établir pour chaque opération particulière.

Quelle que soit la voie expérimentale choisie, mécanique ou thermique, pour déterminer l'énergie d'activation apparente du béton, la présente démarche s'inscrit dans le cadre général de la maturométrie qui a pour vocation d'estimer la résistance du béton en certains points dits « critiques » d'un ouvrage : ces points sont ceux où des valeurs de résistance doivent être atteintes avant de mener à bien une action donnée (décoffrage, mise en tension de la précontrainte, etc.).

Ces valeurs de résistance R_{c_i} sont appelées valeurs « cibles » et sont généralement communiquées par le bureau d'études. Pour couvrir ce domaine utile de résistance, on s'intéresse dans la suite à une plage $[R_{c_{inf}} ; R_{c_{sup}}]$ s'étendant de la plus basse des résistances cibles diminuée de 5 MPa jusqu'à la plus haute augmentée de 5 MPa. Cette plage $[R_{c_{inf}} ; R_{c_{sup}}]$ est intitulée « plage visée de résistances ».

Valeurs cibles définies par le bureau d'étude :

$$R_{c_1}, R_{c_2}, \dots, R_{c_n}$$

Borne inférieure de la plage visée de résistances :

$$R_{c_{inf}} = (\text{valeur minimale des } R_{c_i}) - 5 \text{ MPa}$$

Borne supérieure de la plage visée de résistances :

$$R_{c_{sup}} = (\text{valeur maximale des } R_{c_i}) + 5 \text{ MPa}$$

En règle générale, il est préférable que la plus grande des valeurs cibles – voire la borne supérieure de la plage visée de résistances ($R_{c_{sup}}$) – n'excède pas la moitié de la valeur de la résistance du béton à 28 jours.

III.3.6 Etalonnage préliminaire en laboratoire (facultatif)

Dans ce paragraphe, on décrit les méthodes expérimentales à mettre en œuvre pour obtenir les données nécessaires à la détermination de la valeur de l'énergie d'activation apparente – et éventuellement de la courbe d'étalonnage – du béton lors d'un étalonnage préliminaire en laboratoire. Ces résultats ne sont en rien définitifs puisque ne seront finalement retenus que l'énergie d'activation apparente et la courbe d'étalonnage déterminées en intégrant les résultats des essais d'étalonnage sur chantier. Cependant, cet étalonnage préliminaire permet de se faire une première idée de l'énergie d'activation apparente et de la courbe d'étalonnage du béton et peut s'avérer utile par exemple pour effectuer des simulations avant l'étalonnage sur chantier.

Les données nécessaires se présentent sous la forme d'enregistrements, au cours du temps, d'une caractéristique du béton représentative de sa maturité, et ce pour différentes histoires thermiques du béton. Pour l'énergie d'activation apparente, et dans le cas présent d'un étalonnage préliminaire en laboratoire, ces caractéristiques peuvent être de deux types : la résistance en compression ou la chaleur produite. Pour

la courbe d'étalonnage, l'obtention de données mécaniques est dans tous les cas indispensable.

Les procédures à suivre selon le type d'essai utilisé pour la détermination de l'énergie d'activation apparente sont présentées dans le détail dans ce qui suit:

- VOIE MECANIQUE (essais de résistance en compression)
- VOIE THERMIQUE (essais calorimétriques).

❖ **Représentativité de la formule testée au cours de l'étalonnage**

Le béton testé au cours de l'étalonnage doit être représentatif de celui qui sera mis en œuvre sur chantier. Cette représentativité concerne :

- la formule : il peut s'agir soit de la formule effectivement prévue pour le chantier, soit d'une formule de mortier de béton équivalent (MBE),
- la procédure de malaxage : la durée de malaxage doit permettre d'obtenir un béton homogène, d'une qualité similaire à celle du béton dans l'ouvrage,
- la plage de température en cours de mûrissement : les plages testées doivent correspondre à celles que balaira effectivement le béton dans l'ouvrage, que ce soit pendant la période dormante ou au jeune âge.

III.3.6.1. VOIE MECANIQUE

On considère ici le suivi de la maturité par l'intermédiaire de la résistance en compression du béton. Cette méthode présente l'avantage, par rapport à la voie thermique, de mener en une seule opération à la détermination de l'énergie d'activation apparente et de la courbe d'étalonnage du béton. Mais elle est, en pratique, plus lourde à mettre en œuvre (essais sur béton en grand nombre, horaires parfois en dehors des plages usuelles).

On cherche donc à obtenir des courbes de montée en résistance pour différentes histoires thermiques du béton. Le domaine de résistance à étudier est la « plage visée de résistances »

III.3.6.1.1. Plan expérimental

➔ Fabrication du béton

Le béton doit être fabriqué en respectant scrupuleusement la formule, et dans la mesure du possible, le mode opératoire qu'il est prévu d'utiliser sur chantier.

➔ Confection des éprouvettes

Des éprouvettes sont confectionnées conformément à la normalisation en vigueur. Le type des éprouvettes, cubique ou cylindrique, ainsi que la nature du moule, doivent être les mêmes que ceux utilisés pour les contrôles du chantier.

Le format du moule à employer dépend de la dimension D du plus gros granulat, conformément à la normalisation en vigueur. L'utilisation de moules cylindriques 11x22 cm ou cubiques 10x10x10 cm est néanmoins tolérée pour des granulats de dimension D supérieure à 16 mm mais n'excédant pas 25 mm.

Le nombre d'éprouvettes à prévoir dépend du mode de conservation, des échéances de casse prévues et du nombre d'éprouvettes à casser à chaque échéance.

➔ **Échéances**

Pour chacun des modes de conservation, les échéances de casse à prévoir (non comprises les échéances éventuellement contractuelles, par exemple à 28 jours) sont :

- quelques échéances entre la prise et le bas de la plage visée de résistances ;
- de 8 à 10 échéances réparties de façon à couvrir la plage visée (mais avec une densité plus importante autour des valeurs cibles de résistance si la plage est très étendue) ;
- quelques échéances au-delà de cette plage.

De façon indicative, la couverture de la plage de résistance à 20 °C correspond en général à une échéance par période d'une ou deux heures, sauf dans le cas de bétons à prises très rapides (montée en résistance supérieure à 5 MPa/h) pour lesquels la fréquence est augmentée à une échéance par demi-heure environ.

Ces fréquences sont ensuite adaptées en fonction de la valeur prévue pour l'énergie d'activation apparente de la formule et du niveau de température de l'histoire thermique imposée.

➔ **Nombres d'éprouvettes par échéance**

Tant que le bas de la plage n'est pas atteint, on peut se limiter à la casse d'une seule éprouvette par échéance. Dès que la plage est atteinte, au minimum 2 éprouvettes (idéalement 3) doivent être testées à chaque échéance.

Dans le cas de l'utilisation de moules cylindriques 11x22 ou cubiques 10x10x10 avec un granulat de dimension D supérieure à 16 mm, le nombre d'éprouvettes testées à chaque échéance doit être impérativement de 3.

Le plan expérimental comporte donc, dans le cas général, au minimum 20 éprouvettes par mode de conservation.

➔ **Modes de conservation des éprouvettes et enregistrements de température**

Le plan expérimental doit prévoir différents modes de conservation (au minimum deux) conduisant à imposer aux éprouvettes des histoires thermiques distinctes, dont l'enveloppe doit contenir les courbes de température des points sensibles de l'ouvrage.

Pour chaque histoire thermique, les conditions de conservation doivent permettre d'assurer une bonne homogénéité de la température dans chaque éprouvette ainsi que dans l'ensemble du lot suivi.

Un écart de l'ordre de 10 °C doit intervenir le plus tôt possible entre les histoires thermiques du béton des deux modes de conservation extrêmes. Dans le cas particulier de bétons à période dormante longue (bétons adjuvantés, ...), cette différenciation des histoires thermiques du béton doit avoir lieu impérativement moins de deux heures après le gâchage. L'écart de 10 °C environ doit ensuite se maintenir au moins jusqu'aux maximums des courbes de température lorsque les conditions ne sont pas isothermes.

Un enregistrement de la température du cœur des éprouvettes doit être effectué dès la fin de la confection et pour chacun des modes de conservation. L'enregistrement doit être réalisé à partir d'une ou de plusieurs éprouvettes représentatives du mode de conservation, et avec une précision adéquate. L'écart maximal de température entre deux éprouvettes placées dans un même mode de conservation doit être au maximum de l'ordre de 1 à 2 °C.

Les éprouvettes doivent être conservées dans leurs moules, même au delà de 24 heures, jusqu'à leur préparation avant mesure.

➤ **Préparation des éprouvettes avant mesure**

Pour les éprouvettes cylindriques, la préparation se fait soit par surfaçage au soufre, soit par utilisation de la boîte à sable, soit par lapidage.

Pour les éprouvettes cubiques, il n'y a pas de préparation particulière (on utilise deux surfaces parallèles moulées).

La durée séparant la sortie des éprouvettes de leur lieu de conservation et la casse ne doit pas excéder 15 minutes. En cas de surfaçage au soufre, la durée de durcissement du soufre est réduite en conséquence.

Le mode de préparation doit être le même pour toute la durée de l'étude, ce qui peut conduire à exclure le lapidage lorsque la valeur basse de la plage visée de résistances est trop faible.

➤ **Mesure de la résistance en compression**

La mesure de résistance en compression (vitesse de montée en charge, etc.) se fait conformément à la normalisation en vigueur.

III.3.6.1.2. Exploitation des résultats mécaniques

L'exploitation des résultats permet d'avoir une première estimation de la courbe d'étalonnage et de l'énergie d'activation apparente du béton, les valeurs définitives étant obtenues à l'issue de l'étalonnage sur chantier. L'exploitation se fait par la méthode de superposition présentée dans l'annexe I. On distingue le cas des bétons à période dormante longue de celui des bétons courants.

❖ **Cas des bétons courants**

Les résultats se présentent sous la forme de couples d'enregistrements (autant qu'il y a d'histoires thermiques différentes) :

- valeurs de résistance en compression à différentes échéances ;
- courbe de température correspondante (éventuellement courbe moyenne si l'enregistrement a concerné plusieurs éprouvettes).

A l'exception des points manifestement aberrants qui doivent être écartés, toutes les valeurs de résistance en compression situées dans la plage visée de résistances sont exploitables, les points situés à l'intérieur étant à privilégier par rapport à ceux situés en dessous.

▪ **Rappel sur la méthode de superposition :**

- L'énergie d'activation est d'abord fixée à une valeur initiale de façon à pouvoir calculer l'âge équivalent du béton à chacune des échéances de casse des différentes histoires thermiques.
- Puis les différentes courbes donnant la résistance en fonction de l'âge équivalent sont figurées pour les différentes histoires thermiques sur un même graphe.
- Et enfin l'énergie d'activation est faite varier de façon à réduire l'écart entre ces courbes.

La valeur recherchée de l'énergie d'activation apparente est celle minimisant l'écart entre les courbes sur la plage visée de résistances (méthode des moindres carrés par exemple). La courbe enveloppe inférieure du fuseau de courbes expérimentales constitue l'estimation recherchée de la courbe d'étalonnage.

Des exemples d'exploitation de résultats sont donnés dans l'organigramme de l'ensemble de la procédure d'étalonnage ci-dessous (Figure III.5) .[]

❖ **Cas des bétons à période dormante longue**

En plus des résultats obtenus pour les bétons courants (enregistrement de résistance et de température au cours du temps), pour chacune des histoires thermiques, l'âge t^* correspondant approximativement à la fin de la période dormante sont déterminés en respectant les spécifications de l'annexe I (mesurés in situ ou donnés par un modèle prédictif, éventuellement basé sur une énergie d'activation propre à la période dormante).

Pour l'exploitation des résultats, on ne considère que les mesures effectuées, pour chacune des histoires thermiques, au-delà de l'âge t^* correspondant. Les âges de ces mesures sont ensuite diminués de la valeur t^* (décalage de l'origine des temps).

On exploite ensuite ces données comme dans le cas des bétons courants. Des exemples d'exploitation de résultats sont donnés dans l'organigramme de l'ensemble de la procédure d'étalonnage résumée dans la figure III.5.

III.3.6.2. VOIE THERMIQUE

On considère ici, pour la détermination de l'énergie d'activation apparente, le suivi de la maturité par l'intermédiaire de la chaleur dégagée par le béton en cours de durcissement. On cherche donc à obtenir des courbes de dégagement de chaleur pour différentes histoires thermiques du béton. Pour la construction de la courbe d'étalonnage, des essais mécaniques complémentaires peuvent être effectués en

laboratoire. Ils sont facultatifs puisque des essais mécaniques seront de toute façon réalisés lors de l'étalonnage sur chantier.

2.2.1. Détermination de l'énergie d'activation apparente par l'essai calorimétrique

❖ nature des essais

Ce sont des essais calorimétriques effectués sur béton ou sur mortier de béton équivalent (MBE).

Le calorimètre est isotherme, semi-adiabatique ou adiabatique :

- isotherme : l'échantillon est placé dans une ambiance régulée qui assure en son sein une température homogène et constante au cours du temps ;

- semi-adiabatique : l'échantillon est placé dans une enceinte l'isolant partiellement de son environnement d'un point de vue thermique ;

- adiabatique : l'échantillon est, du point de vue thermique, complètement isolé de son environnement de façon à ce que le flux de chaleur traversant sa surface soit constamment nul.

Selon la géométrie de la partie concernée de l'ouvrage à construire, on adoptera :

- pour une pièce fine (20 cm ou moins de plus petite dimension), la calorimétrie isotherme,

- pour une pièce moyenne (autour de 40 cm de plus petite dimension), la calorimétrie semi-adiabatique,

- pour une pièce massive (60 cm ou plus de plus petite dimension), la calorimétrie adiabatique.

b) plan expérimental

L'élévation de la température pendant le durcissement s'exprime par la relation suivante :

$$C^{th} \cdot \Delta T = Q_h - Q_p$$

Avec :

C^{th} : la capacité thermique du béton en j/g/k.

ΔT : Élévation de la température en °K.

Q_h : Chaleur produite par l'hydratation en j/g.

Q_p : Chaleur fournie au milieu extérieur en j/g.

Exprimée en flux de chaleur Φ , cette relation devient :

$$C^{th} \cdot \dot{T} = \Phi_h - \Phi_p$$

Où \dot{T} est la dérivée de la température en k/h.

Φ_h et Φ_p sont les flux associés aux quantités de chaleur Q_h et Q_p

- Plage de chaleur à étudier

La plage de chaleur à étudier, et donc à couvrir lors des essais calorimétriques, est celle correspondant à la plage visée de résistances définie au paragraphe III.3.5.2.

En pratique, les enregistrements de chaleur commencent immédiatement après la gâchée et se poursuivent jusqu'à avoir atteint la valeur Q_{sup} donnée par la formule suivante :

$$Q_{sup} = Q(\infty) \cdot \left(0,16 + 0,88 \cdot \frac{Rc_{sup}}{Rc28} \right)$$

où $Q(\infty)$ est la chaleur théorique dégagée à un temps infini (obtenue par extrapolation ou, à défaut, prise égale à 3,5 fois la valeur de Q au point d'inflexion de la courbe de chaleur i.e. au point de dérivée maximum),

Rc_{sup} est la borne supérieure de la plage visée de résistance définie au paragraphe III.35.2

$Rc28$ est la résistance à 28 jours du béton.

- Différenciation des histoires thermiques et enregistrement de température

Le plan expérimental doit prévoir différentes températures de fabrication du béton (au moins 2) ou du mortier de façon à imposer aux éprouvettes des histoires thermiques différentes, dont l'enveloppe doit contenir les Courbes de température des points sensibles de l'ouvrage pendant 48 heures au moins. Toutefois, dans le cas d'essais isothermes, si les histoires thermiques des points sensibles dépassent 50 °C, on limitera la température de l'essai à cette valeur (au-delà, la représentativité du béton mis en place n'est a priori plus assurée). Pour chaque histoire thermique, les conditions de conservation doivent permettre d'assurer une bonne homogénéité de la température dans chaque éprouvette (ainsi que dans l'ensemble du lot suivi si plus d'une éprouvette est concernée).

Pour appréhender correctement les effets de la température sur la cinétique de la période dormante du béton ou du mortier, il est recommandé d'avoir, immédiatement après gâchée, au moins 10 °C d'écart entre les histoires thermiques extrêmes.

L'enregistrement de la température du béton doit être effectué au cœur de l'éprouvette dès la mise en place dans le calorimètre et avec une précision inférieure à 0,5 °C.

Remarque : quel que soit le type d'essai utilisé, sa durée ne devra pas être inférieure à 72h.

- Exploitation des résultats

Deux méthodes d'exploitation sont possibles sous l'aspect théorique :

- ✓ la méthode « des vitesses » qui est essentiellement un outil d'analyse
- ✓ la méthode « de superposition ». la plus utilisée en pratique pour déterminer l'énergie d'activation apparente

La méthode des vitesses vient parfois compléter la méthode de superposition :

- en confirmant la valeur obtenue, ou
- en expliquant une mauvaise qualité de superposition des courbes par une forte variation de E_a en fonction de la chaleur dégagée, ou encore,
- en révélant, le cas échéant, la nécessité d'utiliser un doublet d'énergies d'activation apparentes...

Il est donc le plus souvent intéressant d'appliquer les deux méthodes car elles se complètent en quelque sorte. Elles sont présentées ci-dessous en distinguant, comme précédemment, les bétons classiques des bétons à longue période dormante.

➤ Cas des bétons courants

Les résultats se présentent là aussi sous la forme de couples d'enregistrements (autant qu'il y a d'histoires thermiques différentes) :

- courbe de chaleur en fonction de l'âge du béton ou du mortier ;
- courbe de température correspondante.

On ne parle ici que de la méthode de superposition pour la détermination de E_a . : L'application de cette méthode se fait comme pour l'exploitation de données mécaniques, en cherchant la valeur de E_a minimisant, sur l'intervalle de chaleur $[Q_{inf}; Q_{sup}]$, l'écart entre les courbes donnant la chaleur en fonction de l'âge équivalent. La borne supérieure Q_{sup} est celle calculée conformément au paragraphe III.3.6. La borne inférieure Q_{inf} se calcule de la même façon en remplaçant la valeur $R_{c_{sup}}$ de la borne supérieure de la plage de résistances visée par la valeur $R_{c_{inf}}$ de la borne inférieure de la même plage définie au paragraphe III.3.5.2.

$$Q_{inf} = Q(\infty) \cdot \left(0,16 + 0,88 \cdot \frac{R_{c_{inf}}}{R_{c28}} \right)$$

➤ Cas des bétons à période dormante longue

On procède ici exactement comme pour l'exploitation des données mécaniques en ne considérant que les résultats des mesures effectuées après l'âge t^* et en procédant à un décalage de l'origine des temps, en retranchant, pour chaque histoire thermique, la valeur t^* aux échéances de mesure.

Les deux méthodes précédentes, vitesse et superposition, s'appliquent ensuite aux données ainsi obtenues.

La distinction entre période dormante et jeune âge ne modifie pas le calcul des valeurs $E_a(Q)$ dans la méthode des vitesses mais peut permettre d'améliorer la superposition des courbes en fonction de l'âge équivalent.

2.2.2. Essais mécaniques complémentaires pour l'estimation de la courbe d'étalonnage du béton

Les résultats d'essais calorimétriques d'étalonnage en laboratoire ne permettent de déterminer que la valeur de l'énergie d'activation apparente du béton.

Si l'on souhaite également, lors de cette étape préliminaire, avoir une estimation de la courbe d'étalonnage du béton, il est alors possible d'effectuer des essais mécaniques complémentaires, sachant que pour construire la courbe d'étalonnage, qui deviendra la courbe de référence après les contrôles de conformité nécessaires, des essais mécaniques devront de toute façon être réalisés lors de l'étalonnage sur chantier.

➤ Exploitation des résultats d'essais

L'exploitation des résultats mécaniques se fait en transformant, pour chaque échéance de mesure de la résistance, l'âge réel du béton en âge équivalent à 20 °C à l'aide de la loi d'Arrhenius et en utilisant la valeur de E_a préalablement déterminée.

La courbe donnant la résistance en fonction de l'âge équivalent constitue une première estimation de la courbe d'étalonnage du béton.

Ces résultats seront, par la suite, exploités conjointement avec les résultats de l'étalonnage sur chantier pour déterminer la courbe d'étalonnage définitive du béton.

III.3.7. Contrôles de conformité initiaux : Validation de l'étalonnage et établissement de la courbe de référence

La courbe d'étalonnage obtenue par la méthode de superposition ne doit pas être confondue avec la courbe de référence. Il faut en effet intégrer un facteur de sécurité rendant compte des variations de performance au jeune âge.

On établit cette marge sécuritaire à partir des données recueillies en début de chantier lors d'une période d'observation où l'on équipe l'ouvrage et des éprouvettes d'information (soumises à écrasement) de sondes de température pour vérifier régulièrement la corrélation maturité/résistance.

Le fuseau de points obtenus permet alors d'établir une courbe de référence par défaut. On recommande une période d'observation d'au moins trois semaines et composées d'au minimum 6 bétons différents répartis sur cette période.

III.3.8. Contrôles de conformité et de régularité en cours de chantier

Les contrôles de conformité peuvent être :

- initiaux : ils permettent la validation de l'étalonnage et l'établissement de la courbe de référence, ou
- en cours de chantier en vue de contrôler la régularité.

Il est en effet nécessaire d'effectuer des contrôles de conformité périodiques pour vérifier qu'il n'y a pas de dérive dans les performances du béton au jeune âge.

Par ailleurs, si les conditions de température s'écartent du domaine correspondant à celui de l'étalonnage (5° d'écart), il est nécessaire de vérifier les résultats

d'étalonnage par un contrôle de conformité. En effet, et en particulier si les températures sont plus faibles que lors de l'étalonnage, des divergences sont possibles en fonction des spécificités de l'adjuvantation du béton.

III.4. LES MOYENS PERMETTANT DE REGLER LA RESISTANCE A COURT TERME

Chacun des constituants déterminants sur la résistance au jeune âge doit être étudié et considéré en tant que moyen de régler la résistance à court terme par la formulation :

- ❖ Le ciment (type et classe) ;
- ❖ Les additions (pouzzolanes naturelles, cendres volantes, laitier et fumées de silice) ;
- ❖ Les accélérateurs de prise et de durcissement.

Le rapport E/C, par exemple, est un facteur prépondérant dans la mesure ou il permet d'ajuster la porosité du mélange de béton

III.4.1. Rapport E/C

La résistance est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment, cette porosité résultant principalement de la valeur du rapport E/C, les études ont montré qu'à une échéance donnée, la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue.

Il faut toutefois être prudent quant au rôle de ce paramètre sur les résistances à court terme. En effet, pour diminuer le rapport E/C et conserver au béton une bonne ouvrabilité, la formulation peut faire appel à des adjuvants qui améliorent la rhéologie du béton frais.

III.4.2. Le dosage en ciment à même maniabilité

Un moyen d'accroître les résistances à court terme d'un béton peut être d'augmenter son dosage en ciment.

En effet, pour une même maniabilité, une augmentation du dosage du ciment aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

III.4.3. Le type et la classe du ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du ciment : son type (ciments portland, portland composé, de haut fourneau, pouzzolanique, au laitier et aux cendres), sa classe (32.5-42.5-52.5) et sa résistance au jeune âge qui peut être soit ordinaire, soit élevée.

Par exemple, un ciment CPA-CEM I52.5R développera, à dosage identique dans un béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM 35.5R.

De même, un CPA-CEM I 52.5 développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPJ-CEM I 52.5.

III.4.4. Les additions minérales

III.4.4.1. Pouzzolanes

Dans le cas des pouzzolanes naturelles, l'effet pouzzolanique ne semble se produire qu'au delà du 7^{ème} jour après la fabrication du béton. Donc, avant cet âge, les résistances évoluent comme si le liant était constitué de ciment seul. Ainsi, dans le cas d'une substitution d'une partie du ciment par une pouzzolane naturelle, les résistances au jeune âge sont d'autant plus faibles que le taux de pouzzolane est élevé.

III.4.4.2. Cendres volantes

La substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes aurait tendance à affaiblir les résistances à court terme. Cependant, il faut se garder de généraliser ce résultat dans la mesure où les caractéristiques des cendres (finesse et composition) semblent jouer un rôle prépondérant sur le développement de l'activité pouzzolanique.

III.4.4.3. Laitier

La formulation d'un béton peut avoir recours au laitier. Plusieurs facteurs influencent le rendement du laitier dans un béton, parmi lesquels nous pouvons citer la finesse du laitier, son pouvoir hydraulique, son pourcentage de substitution du ciment, le rapport E/C du mélange et le type de ciment utilisé.

En règle générale, il semble que l'acquisition de résistance du béton au laitier par rapport au béton témoin est lente au cours des 5 premiers jours.

La difficulté majeure dans l'étude de l'influence des additions minérales à court terme résulte de la démarche de la formulation elle-même.

En effet, trois cas sont à envisagés :

- ❖ L'addition est dosée afin d'obtenir une résistance caractéristique garantie à 28 jours. Dans ce cas, les résistances à court terme du béton sont liées aux proportions de ciment et à l'addition utilisées ;
- ❖ L'addition est dosée en substitution d'une partie du ciment, ce qui se traduit généralement par une perte de résistance à 28 jours. Dans ce cas, la résistance à court terme est d'autant plus réduite que la proportion d'addition est importante ;
- ❖ L'addition est dosée en ajout au ciment pour améliorer, par exemple, la maniabilité du béton. Dans ce cas, la résistance à 28 jours augmente, alors que les résistances à court terme restent identiques ou augmentent légèrement.

III.4.4. Fumées de silice

Plusieurs études ont montré que la présence de fumées de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment portland. Cet effet accélérateur des fumées de silice sur

l'hydratation du ciment, combiné à l'effet de remplissage dû à leur extrême finesse peut conduire à de meilleures résistances à court terme.

III.4.4.5. Les accélérateurs de prises et de durcissement

Les accélérateurs de prises et de durcissement sont souvent utilisés dans le béton pour compenser, en période froide, l'influence de la température sur les résistances à court terme. Les accélérateurs constituent aussi un moyen efficace d'obtenir, à des températures voisines de 20°C, les résistances à très court terme nécessaires pour optimiser le cycle de production sur le chantier.

Remarques

Les retardateurs de prise ont pour rôle principal de retarder la prise du béton. Les retards de prise du béton se traduisent alors nécessairement par une diminution des résistances à court terme du béton. Bien que certains adjuvants permettent d'abaisser le rapport E/C du béton, ils peuvent aussi retarder la prise du béton et provoquer, par conséquent, une diminution des résistances à court terme du béton.

III.5. ADAPTATION DES BETONS AUX TRAITEMENTS THERMIQUES

Différents modes de traitement peuvent être envisagés :

- Traitements actifs s'il y a apport de chaleur ou
- Traitements passifs s'il n'y a pas d'apport de chaleur autre qu'un préchauffage du béton.

Les plus importants sont les suivants:

- Le calorifugeage du moule qui permet de conserver au sein du béton la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation ;
- Le chauffage du béton avant sa mise en place ;
- Le chauffage du béton après sa mise en place (étuvage) :
 - chauffage par l'intérieur : dans la masse ou
 - chauffage externe : moule chauffant ou air chaud.

L'élévation de la température ne se traduit pas seulement par une accélération de la réaction chimique d'hydratation du ciment. Elle provoque des désordres au sein du béton qui conduisent, pour une même maturité, à des résistances différentes à long terme selon la température de mûrissement.

De façon générale, il y a deux causes qui sont à l'origine des réductions de résistances observées sur les bétons mûris au jeune âge à des températures élevées.

Ce sont :

- les causes d'origine physique;
- les causes d'origine chimique.

Les principales causes physiques sont l'augmentation de la porosité et de la microfissuration de la pâte de ciment hydraté

Quant aux principales causes chimiques, les modifications de la nature des hydrates formés et du degré d'hydratation de la pâte du ciment durcie diminuent les résistances d'un béton à la suite d'un traitement thermique au jeune âge.

Pour limiter ces désordres au sein du béton, il est préférable de respecter les précautions suivantes:

- appliquer au béton, après sa mise en place dans le moule, une période de préprise avant de démarrer le cycle thermique;
- limiter la vitesse de montée en température pour éviter de forts gradients thermiques dans la pièce pouvant engendrer des fissures et une hétérogénéité de la microstructure;
- limiter la température maximale de traitement;
- empêcher les chocs thermiques lors du refroidissement pour éviter les gradients thermiques, sources de fissuration;
- assurer pour les surfaces non coffrées une cure hygrométrique la plus proche possible de 100% d'humidité relative.

PARTIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV

OBJECTIFS
ET
PROGRAMME
DE
L'ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : OBJECTIFS ET PROGRAMME DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction

Cette partie expérimentale, qui a pour objet de valider et d'illustrer les notions et les données de la partie théorique, consiste à effectuer un certain nombre d'essais qui permettent d'une part de déduire l'influence de certains paramètres sur la résistance du béton au jeune âge tels que le type de ciment, l'utilisation des additions en substituant du ciment avec des proportions variables et d'autre part de contrôler l'évolution de la température au sein des éprouvettes confections avec des bétons différents.

Pour ce faire, nous avons varié quelques paramètres qui interviennent dans la formulation des différents types des bétons et d'estimer la résistance à la compression à différentes échéances s'écoulant du 2^{ème} jour de coulage jusqu'au 7^{ème} jour.

Le contrôle de l'évolution de la température s'est fait à l'aide d'un thermomètre à béton qu'on a mis au sein de l'éprouvette pendant 24 h après le coulage.

Les résultats de compression obtenus sont ensuite comparés avec ceux d'un béton confectionné avec un ciment composé CPJ CEM II, le ciment le plus utilisé en Algérie et dans la plupart des pays du monde.

Les essais ont été réalisés au Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) de Hussein Dey d'Alger.

IV.2. Variables d'étude

- Les granulats

Les cinq types de béton ont été confectionnés avec les mêmes granulats, sable gravier et gravillon, provenant de la carrière de SI MUSTAPHA de Boumerdes.

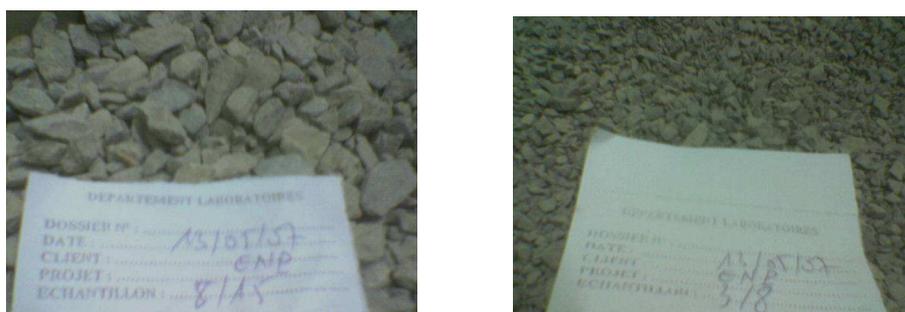


FIG IV.1 : Les graviers utilisés

- Eau de gâchage

Généralement, c'est l'eau potable qu'on utilise pour gâcher le béton. Si l'eau n'est pas potable, le formulateur de béton doit prendre un soin particulier pour la vérification par des analyses appropriées les pourcentages des éléments nuisibles.

- Un supprplastifiant haut réducteur d'eau, MEDAFLOW RC 20, fourni par l'entreprise GRANITEX ;
- Fillers calcaires fournis par l'entreprise ENG d'EL KHROUB.
 - ▶ Les constituants qu'on a varié sont :
 - ❖ Le type de ciment : les deux types de ciment utilisés sont :
 - un ciment CPJ CEM I 42.5
 - un ciment CPA CEM II 42.5
 - ❖ la substituant d'une certaine partie du ciment par les fillers calcaires ;
 - ❖ Le dosage d'un adjuvant supprplastifiant haut réducteur d'eau, MEDAFLOW RC 20.

Nous nous sommes limités seulement à ces trois variables, type de ciment, l'addition filler calcaire, et le dosage en adjuvant à cause de l'insuffisance des moules nécessaires à la confection du nombre considérable d'éprouvettes dû lui-même au nombre important des échéances de cassure de ces éprouvettes.

A partir de la variation de ces trois paramètres qui sont le type de ciment et le pourcentage des fillers calcaires, et le dosage en superplastifiant, nous avons élaboré cinq types de béton :

- ❖ **B1** confectionné avec un ciment portland naturel CPJ CEM II 42.5 (béton témoin)
- ❖ **B2** confectionné avec un ciment portland composé CPACEM I 42.5
- ❖ **B3** dont 20 % du ciment CPJ est substitué par les fillers calcaires
- ❖ **B4** dont 30 % du ciment CPJ est substitué par les fillers calcaires
- ❖ **B5** élaboré avec un ciment CPJ et un dosage en supeplastifiant

Ce travail nous a demandés d'élaborer :

- ▶ 120 éprouvettes cylindriques de dimensions 16×32 cm utilisées aux essais de compression aux échéances 4h, 8h, 24h, 2j, 3j, 4j, 5j et 7j après le démoulage ;
- ▶ 4 éprouvettes cylindriques pour le contrôle de l'évolution de la température pendant 24h après de coulage du béton ;
- ▶ 5 éprouvettes cubique (10 × 10 × 10 cm) pour l'estimation de la masse volumique à son état frais et durci.

PARTIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV

IDENTIFICATION
DES MATERIAUX
ET
FORMULATION
DES BETONS

CHAPITRE V : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET FORMULATION DES BETONS

V.1. INTRODUCTION

Avant d'entamer les formulations des bétons, il est nécessaire de connaître les caractéristiques des matériaux utilisés à cet effet. Leurs caractéristiques sont déterminées au moyen d'un certain nombre d'essais qui sont, pour la plupart, normalisés. La convenance de ces matériaux étant établie grâce aux spécifications.

V.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX

V.2.1. Echantillonnage (NF P18-553)



Cette opération consiste à prélever un échantillon qui sera représentatif du matériau utilisé dans les essais.

l'échantillonnage peut se faire de deux manières, soit par quartage, soit au moyen d'un échantillonneur.

Figure V.1 : Echantillonneur. [SOC 06]

V.2.2 Analyse et courbe granulométrique

V.2.2.1. Analyse granulométrique

La granulométrie permet de fractionner le matériau, au moyen de tamis, aux différents grains qui le composent pour déterminer sa classe. Les résultats de l'analyse granulométrique, effectuée pour chaque fraction sur un échantillon de 2000g, sont présentés dans les tableaux V.1, V.2, et V.3.

Gravier 8/15			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
20	0	0	100
16	28	1.4	98.6
12.5	768	38.4	61.6
10	1441	72.05	27.95
8	1910	95.5	4.5
6.3	1975	98.75	1.25
5	1992	99.6	0.4

Tableau V.1 : Analyse granulométrique. Gravier 8/15

Gravier 3/8			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
10	0	0	100
8	240	2	88
6.3	1045	52.25	47.75
5	1422	71.1	28.9
2.5	1965	98.25	1.75
1.25	1983	99.15	0.85
0.63	1993	99.65	0.35

Tableau V.2 : Analyse granulométrique. Gravier 3/8

Sable 0/5			
Ouvertures des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
6.3	0	0	100
5	35	1.75	98.25
2.5	595	29.75	70.25
1.25	1131	56.55	43.45
0.63	1547	77.35	22.65
0.315	1867	93.75	6.25
0.16	1947	96.35	2.65
0.08	1987	99.35	0.65

Tableau V.3 : Analyse granulométrique du sable (0/5)

V.2.2.2. Courbes granulométriques :

En abscisse on porte les dimensions des tamis, l'échelle étant logarithmique.

En ordonnées, sur une échelle graduée de 0 à 100 où figurent on porte les fractions cumulées, passant à une maille déterminée. On obtient ainsi une série de points que l'on relie par les segments de droites, l'ensemble ainsi obtenu s'appelle : *courbe granulométrique* et représente ce que la terminologie officielle appelle la granularité.

La courbe obtenue est représentée sur la figure suivante (V.2) :

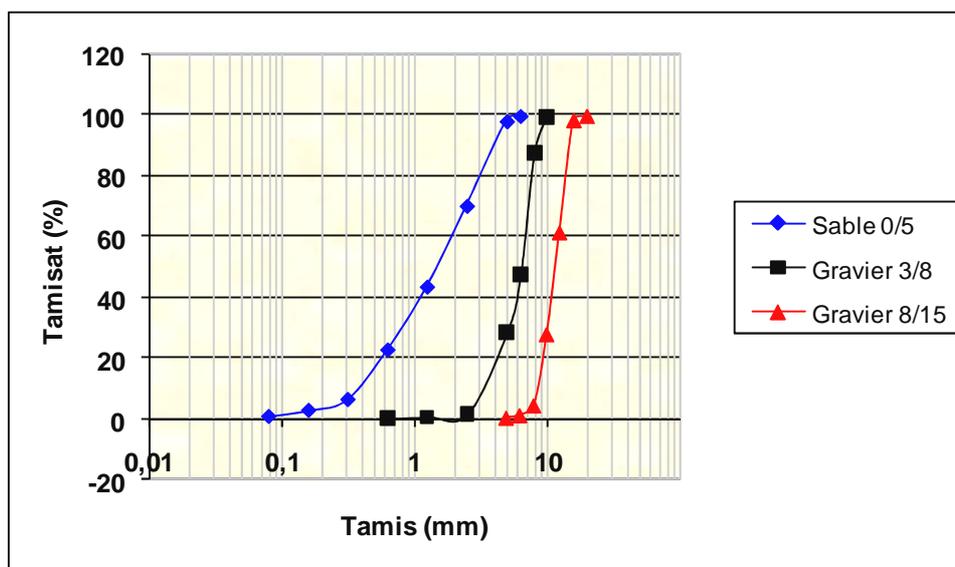


Figure V.2 : Courbes granulométriques des granulats utilisés

V.2.3. Densités absolue et apparente (NF P18-554)

La densité absolue est le rapport de la masse spécifique à la masse d'un égal volume d'eau, tandis que la densité apparente est le rapport de la masse volumique à la masse d'un égal volume d'eau.

Les matériaux testés ont les densités suivantes :

Granulat	Gravier	Gravillon	Sable
Densité absolue	2.67	2.64	2.66
Densité apparente	1.48	1.95	1.53

Tableau V.4 : Densités absolue et apparente (NF P18-554)

V.2.4 Propreté superficielle (NF P18-591)

Il s'agit de déterminer le pourcentage des éléments fins dont la dimension est inférieure à 0.5 mm qui se trouvent sur la périphérie des matériaux

Les résultats sont présentés dans le tableau V.5.

Granulat	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
Propreté superficielle	0.97	1.44	≤ 2 %

Tableau V.5 : Propreté superficielle (NF P18-591)

V.2.5. La résistance à la fragmentation -essais Los- Angeles (NF P 18-573)

Cet essai renseigne sur la dureté des roches en se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles LA, et sur le principe de l'effritement par abrasion.



Figure V.3 : Appareil de Los Angeles. [SOS 11]

La machine utilisée comporte un cylindre creux pouvant tourner de son axe et où on introduit l'échantillon ainsi que des boulets d'acier jouant le rôle de charges abrasives.

L'essai permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments sous le choc de boulets, il est pratiqué sur la classe granulaire 6.3-10 pour le gravier 8/15, et sur la classe granulaire 4-6.3 pour le gravillon 3/8.

Le coefficient Los Angeles est le rapport en % du poids du tamisât passant au tamis de 1.6 mm au poids initial.

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai :

Fraction (mm)	Gravier 8/15	Gravier 3/8	Spécifications
LA %	18	18	< 15 très bon à bon 15-20 bon à moyen 20-30 moyen à faible >30 médiocre

Tableau V.6 : Résistance à la fragmentation (NF P 18-573)

V.2.6 Résistance à l'attrition et à l'usure- essai Micro Deval (NF P18-572)

Cet essai a pour objet de mesurer la résistance des granulats à l'usure par leur frottement les uns aux autres.



Le coefficient Micro Deval (MDE) est le pourcentage d'éléments passant au tamis de 2 mm par rapport au poids total de l'échantillon.

Les résultats de l'essai, effectué sur la classe 6.3/10 pour le gravier et la classe 4/6.3 pour le gravillon sont présentés dans le tableau V.7.

Figure V.4 : Dispositif d'essai Micro Deval. [SOC 11]

Fraction (mm)	6.3/10	4/6.3	spécifications
MDE (%)	19	19	<13 très bon à bon 13-20 bon à moyen 20-25 moyen à faible >25 médiocre

Tableau V.7 : Résistance à l'usure (MDE) (NF P18-572)

V.3. Essais sur sable

V.3.1 Module de finesse (NF P18-304)

Le module de finesse permet d'évaluer la grosseur du sable. Le sable est grossier si son module de finesse est élevé, il est fin dans le cas contraire.

Le tableau V.8. résume le résultat obtenu

Granulat	Sable 0/5
Module de finesse M_f	3.56

Tableau V.8 : Module de finesse du sable (NF P18-304)

V.3.2 Equivalent de sable (NF P18-598)

Cet essai permet de déterminer le pourcentage de fines contenues dans le sable.

Le pourcentage des fines ne doit pas être trop faible, car il diminuerait la résistance mécanique du béton, ni trop élevé ce qui demanderait une plus grande quantité d'eau, donc un rapport E/C élevé.

Les mesures ont été effectuées de deux manières, à vue et à piston. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau V.9. :

Granulat		Sable 0/5	Spécifications
Equivalent de sable%	à vue	88.77	Sable très propre
	piston	82.16	

Tableau V.9 : Valeurs de l'équivalent de sable (NF P18-598)

V.4. Composition chimique

Les composants chimiques des granulats avec leurs proportions sont résumés dans le tableau suivant :

échantillon	Insolubles (silices+silicates)	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Sulfates	NaCl	CaCO ₃	Co ₂	H ₂ O	Perte au feu
sable	84.05	3.3	traces	0.29	8.47	3.72	2.11	5.83
gravier	7.07	7.3	traces	0.17	8.75	37.29	2.86	40.15

Tableau V.10 : Composition chimique des granulats

V.5. Essais sur le ciment

V.5.1 Résistance mécanique du ciment (NF EN 196-1)

Cet essai a pour but de déterminer la résistance réelle de ciment, à 2 jours et à 28 jours, soit par traction, soit par compression.

Les spécifications qui permettent de déterminer la classe vraie du ciment sont indiquées sur le tableau suivant (V.10):

Classe	Résistance à la compression R (N/mm ²)			Temps de début de prise (mn)
	R à 2j	R _{min} à 28j	R _{max} à 28j	
32.5	/			>90
32.5R	≥ 13.5	>32.5	<52.5	
42.5	≥ 12.5			>60
42.5R	≥ 20	>42.5	<62.5	
52.5	≥ 20			
52.5R	≥ 30	>52.5	/	

Tableau V.11 : Différentes classes de ciment (NF EN 196-1)

Les résultats obtenus pour le ciment CPJ CEM II 42.5 sont :

- Résistance à la compression à 2 jours : de l'ordre de : 16.5 N/mm \geq 20 N/mm
- Résistance à la compression à 28 jours : de l'ordre de : 45 N/mm \geq 42.5 N/mm

On en déduit que le ciment est de classe 42.5

En ce qui concerne le deuxième type de ciment CPA CEM I 42.5, les résultats correspondants sont les suivants :

- Résistance à la compression à 2 jours = 18 N/mm
- Résistance à la compression à 28 jours = 48 N/mm

Ces résultats permettent de classer le ciment en classe : 42.5

V.5.2 Temps de prise (NF P15-473)

L'essai de prise est précédé par l'essai de consistance qui permet de déduire la quantité d'eau optimale.

Le CPJ CEM II a donné, en ce qui concerne l'essai de consistance, les résultats présentés dans le tableau suivant :

Quantité d'eau (ml)	120	125	135	140	145	146
Enfoncement de la sonde de Vicat (cm)	7	9	10	20	30	35

Tableau V.12 : Temps de prise du ciment CPJ CEM II (NF P15-473)

Les spécifications précisent pour cet essai que la distance qui sépare la sonde et le fond du moule doit comprise entre 3 et 5 cm.

Donc la quantité d'eau optimale est 146 ml.

Quant aux essais de prise, on a obtenu les résultats suivants :

Durée de l'essai : 3heures (de 11h.25 à 15h.05)

- Début de prise : 13h.10
- Fin de prise : 15h.05
- Temps de début de prise : 1h 45mn
- Temps de fin de prise : 3h 40mn

V.5.3 Analyse chimique

Les différents composants chimiques sont :

- Silice..... SiO₂
- Chaux..... CaO
- Magnésie..... MgO
- Carbonates..... CaCO₃
- Anhydride carbonique..... CO₂
- Eau de constitution..... H₂O
- Oxyde ferrique..... Fe₂O₃

- Oxyde d'alumine..... AL₂O₃
- Insolubles..... INS
- Perte au feu..... PAF

La composition chimique des deux types de ciment est indiquée dans le tableau suivant :

Composition	CPJ CEM II 42.5 R Teneurs en %	CPA CEM II 42.5 R Teneurs en %
Silice totale (SiO ₂)	20.56	22.09
Oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	5.15	6.15
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	4.20	4.20
Chaux (CaO)	62.44	60.06
Magnésie (MgO)	1.55	1.45
Anhydride sulfurique(CO ₃)	2.39	2.67
Perte au feu	4.12	5.07
Bilan chimique pondéral	100.44	100.24
Résultats analytiques intermédiaires	3.73	
Anhydride carbonique (CO ₂)	0.39	4.47
Eau de constitution (H ₂ O)		0.6
Insoluble	2.26	1.81
Carbonate (Carbonate CO ₂)	8.47	

Tableau V.13 : Composition chimique des ciments utilisés

A partir de la composition chimique du ciment, on peut connaître sa composition minéralogique, ainsi que les pourcentages des principaux composés minéralogiques par les formules de BOGUE suivantes :

$$C_3A = 2.65Al_2O_3 - 1.69Fe_2O_3$$

$$C_3S = 4.07CaO - 7.6SiO_2 - 6.72Al_2O_3 - 1.43Fe_2O_3 - 2.85SO_3$$

$$C_2S = 2.87SiO_2 - 0.754C_3S$$

$$C_4AF = 3.04Fe_2O_3$$

Le tableau V.13 donne la composition minéralogique des deux ciments utilisés.

Type de ciment	Composition minéralogique (%)			
	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ AF
CPA CEM I	9.2	47.1	21.62	12.77
CPJ CEM II	6.45	21.22	50.23	12.77

Tableau V.14 : Composition minéralogique des ciments

V.6. Caractéristiques des ajouts

V.6.1. Fillers calcaires

Les fillers utilisés sont produits et commercialisés par l'entreprise E.N.G. Ce sont les fillers Alcal F15. Leurs principales caractéristiques chimiques et physiques sont données dans leurs fiches techniques, jointes en annexe

V.6.2. Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 30.concu à base de poly carboxilates. Cet adjuvant n'a aucun effet retardateur.

La fiche technique de ce superplastifiant, donnant ses caractéristiques techniques, est jointe en annexe

V.7. FORMULATION DES BETONS

V.7.1. La méthode Bolomey

En 1907 Bolomey propose une loi continue qui reprend celle de Fuller, avec un coefficient permettant d'étendre la granulométrie vers en y englobant le ciment.

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

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

Avec :

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

D : diamètre du plus gros grain ;

A : coefficient variant de 8 à 16 (Annexe I), sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage de ciment plus fort. [TEC 05]

V.7.1.1 Formulation du béton avec le ciment CPJ CEM I

Données de l'étude :

- ☉ Courbes granulométriques des granulats secs : figure III.1 ;
- ☉ Masses volumiques (absolues et apparentes) des granulats et du ciment ;
- ☉ Dosage en ciment : 350kg/m³ de béton en œuvre ;

Détermination de la courbe optimale

- Le tableau des valeurs de A (tableau : Annexe I) donne : A=12 à 14 ; on prend :
A=13 ;
- Détermination de la valeur de D :
D = 16 mm
- L'équation de la courbe optimale :

$$\begin{aligned}
 P\% &= A + (100 - A)\sqrt{d/D} \\
 &= 13 + (100 - 13)\sqrt{d/D} \\
 &= 13 + 87\sqrt{d/D}
 \end{aligned}$$

Elle représente la droite qui passe par les points : (0 ; 13) et (16 ;100)

Détermination des pourcentages des constituants

Les constituants sont : ciment, sable, gravillon et gravier, qui permettent de faire un mélange sec dont la courbe granulométrique se rapproche autant que possible de la courbe optimale.

- Pourcentage de ciment :

$$C = \frac{\text{Masse du ciment}}{\text{Masse total des éléments secs}} * 100$$

Pour 1m³ de béton

- Masse du ciment : C'est le dosage 350 kg ;

L'expérience montre que, pour 1m³, la masse totale des éléments secs est 2200 kg

- Masse totale des éléments secs : 2200 Kg.

Nous établirons les calculs sur cette base :

$$C = \frac{350}{2200} * 100 = 15.9\%$$

- Pourcentage de granulats :

C + S = 50 % d'où S = 34.1 %, à partir des courbes granulométriques

C + S + G(3/8) = 70 % donc G(3/8) = 20%

C + S + G(3/8) + G(8/15) = 100 % d'où G(8/15) = 30%

Donc on a un mélange sec composé de:

$$\left\{ \begin{array}{l} 15.9\% \text{ de ciment} \\ 34.1\% \text{ de sable} \\ 20\% \text{ de gravier } 3/8 \\ 30\% \text{ de gravier } 8/15 \end{array} \right. \quad 100\% \text{ Total des pourcentages en masse}$$

Détermination de la courbe de mélange

Les pourcentages de tamisats seront déterminés par le calcul .Préparons un tableau comportant une colonne par élément du mélange et une ligne par tamis, indiquons dans la ligne correspondante les pourcentages à gauche, et calculons le tamisât de chaque élément à travers chaque tamis :

Mailles des tamis	Ciment	Sable 0/5	Gravillon 3/8	Gravier 8/15	%des tamisât en poids
20	15.9	34.1	20	30	100
16	15.9	34.1	20	29.58	99.58
12.5	15.9	34.1	20	18.48	88.48
10	15.9	34.1	20	8.38	78.38
8	15.9	34.1	17.6	1.35	68.95
6.3	15.9	34.1	9.55	0.375	59.92
5	15.9	33.50	5.78	0.12	55.3
2.5	15.9	23.95	0.35	0	49.2
1.25	15.9	14.81	0.17	0	30.88
0.63	15.9	7.72	0.07	0	23.69
0.315	15.9	2.13	0	0	18.03
0.16	15.9	0.90	0	0	16.8
0.08	15.9	0.22	0	0	16.12

Tableau V.15 : Détermination de la courbe de mélange

Composition à la courbe optimale

La courbe trouvée n'est pas une droite; elle doit approcher la forme des courbes des granulats. Il y a donc des parties au-dessus de la courbe optimale, et des parties au-dessous. La courbe trouvée doit passer sensiblement par le point d'intersection de la courbe optimale.

Donc le résultat est considéré comme satisfaisant. Les pourcentages de constituants secs trouvés peuvent donc être retenus comme base de calculs.

Détermination de la composition d'1m³ de béton

Cette composition devra indiquer la masse et le volume apparent de chacun des constituants d'1m³ de béton.

Détermination de la quantité d'eau dans 1m³ de béton :

On sait :

- qu'il n'existe pas de méthode rigoureuse pour cette détermination ; il nous faudra donc faire une 2^{ème} hypothèse :
- qu'un praticien expérimenté peut évaluer directement la quantité d'eau nécessaire, qu'une détermination expérimentale est aléatoire, et que le calcul peut donner un ordre de grandeur acceptable.

Le calcul n'est pas le même pour les petits constituants et pour les gros.

Et la quantité d'eau se calcule comme suit :

- $D < 0.16 \text{ mm}$
 $E = 0.23 * P$
 $= 0.23 * 0.16863 * 2200 = 85.326 \text{ Kg.}$

- $D \geq 0.16 \text{ mm}$

$$\text{Eau} = \frac{K.P}{1.17 \sqrt[3]{d_1 d_2}}$$

Avec : d_1 = diamètre des plus petits granulats à mouiller ($d_1 = 0.16 \text{ mm}$) ;
 d_2 = diamètre des plus gros granulats à mouiller ($d_2 = 16 \text{ mm}$) ;
 K = constante, donnée par le tableau 1 (voir annexe) ;
 P = masse des matériaux à mouiller
 $P = 0.83137 * 2200 = 1829 \text{ Kg}$

$$\text{Eau} = \frac{0.1 * 1829}{1.17 \sqrt[3]{0.08 * 16}}$$

$$= 114.27 \text{ kg}$$

$$E_{\text{tot}} = 199.60 \text{ kg} \quad \%E = 9.07\%$$

D'où C = 15.9% S = 34.1% G(3/8) = 20% G (8/15) = 30% E = 9.07%

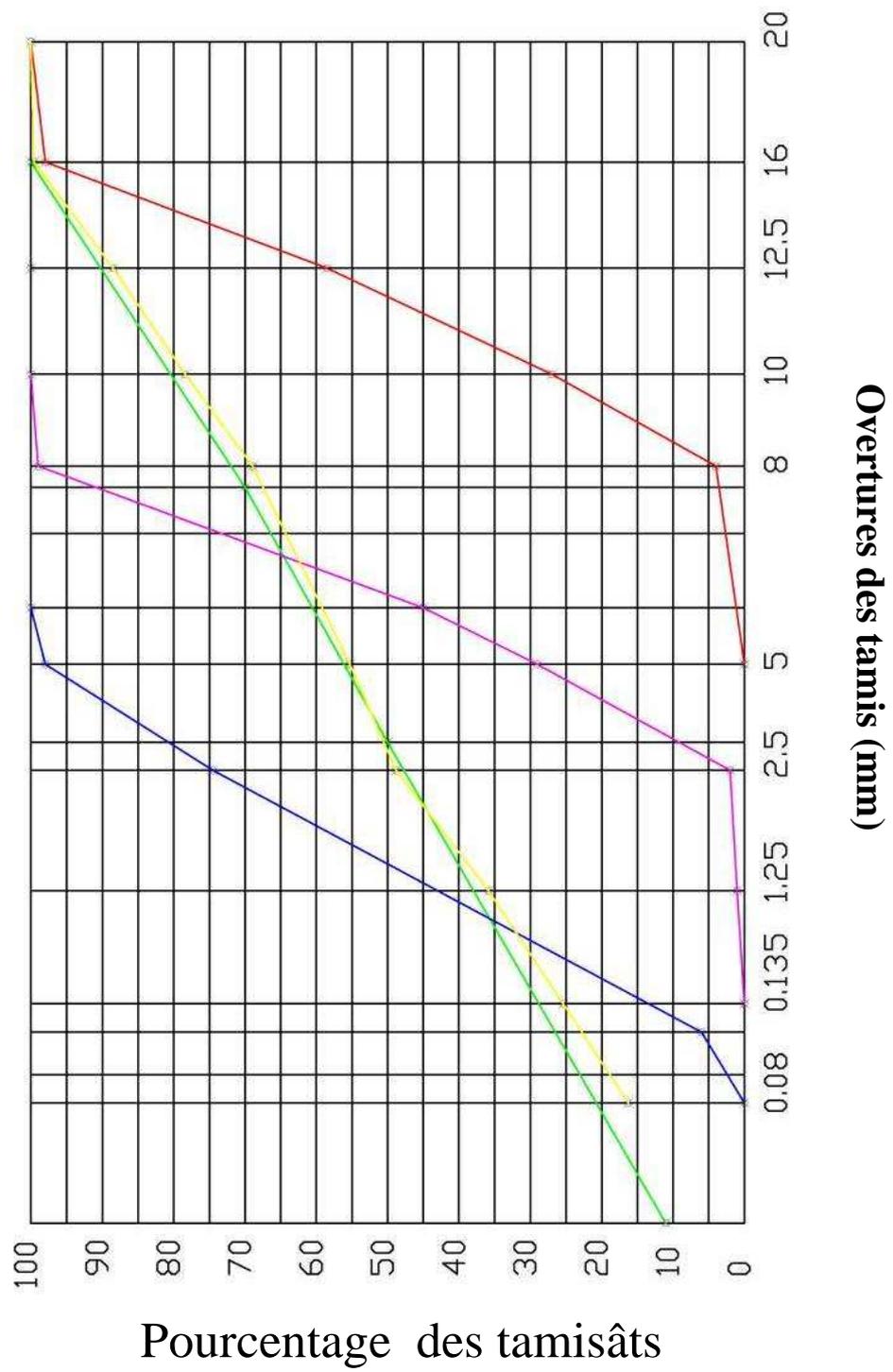
Composants	Composant en %	M.V Absolue	Composant en volumes absolus	MV du béton Kg/dm ³	Poids en %	Composition en poids
Ciment	15.9	3.1	5.13	2.393	14.58	350
Sable	34.1	2.66	12.91		31.26	748.05
Gravier 3/8	20	2.64	7.782		18.33	438.63
Gravier 8/15	30	2.67	10.67		27.5	658.07
Eau	9.07	1	9.07		8.31	199.6
Totaux	109.07		45.56		100	

Tableau V.16 : Composition en poids du béton témoin

Donc, dans 1 m³ de béton, on a besoin de :

C = 350 Kg; S = 748 Kg; G (3/8) = 439 Kg; G (8/15) = 658 Kg; E = 199.6 l Kg

Figure V.5 : Composition granululaire du béton



V.7.1.2. Formulation du béton avec 20% de fillers calcaires

En substituant 20% du ciment par les fillers calcaires, on aura :

$$FC = 20\%C = 70\text{kg} = 70/2.7 = 25.92 \text{ l/m}^3$$

Le mélange contient les constituants suivants :

$$G + g + S + E + C + FC = 1000 \text{ l}$$

Avec :

- ❖ $C = 280\text{kg/m}^3 = 280/3.1 = 90.32 \text{ l/m}^3$
- ❖ $E = 200 \text{ l/m}^3$
- ❖ $FC = 25.92 \text{ l/m}^3$

On peut calculer les proportions du gravier, du gravillon et du sable après la substitution d'une partie du ciment (20%) par les fillers calcaires :

$$G + g + S = 1000 - (200 + 25.92 + 90.32) = 683.76 \text{ l/m}^3$$

A partir des courbes granulométriques les proportions du sable, du gravier, et du gravillon dans le mélange qui le composent (683.76 l) sont :

$$S = 40.55 \% = 277.26 \text{ l}$$

$$G (3/8) = 23.77 \% = 162.53 \text{ l}$$

$$G (8/15) = 35.67 \% = 243.89 \text{ l}$$

Finalement, on retient les résultats résumés dans le tableau suivant (V.16) :

Composant	Composant (l/m ³)	Densité absolue	Composant (Kg/m ³)
Gravier 3/8	162.53	2.64	429.07
Gravier 8/15	243.89	2.67	651.18
Sable	277.26	2.66	737.51
Ciment	90.32	3.1	280
Eau	200	1	200
Fillers calcaires	25.92	2.7	70

Tableau V.17 : Composants du béton avec 20 % de fillers calcaires

V.7.1.3. Formulation du béton avec 30 % de fillers calcaires

La substitution de 30% du ciment par le filler calcaire, nous donnons :

$$FC = 30\% C = 105 \text{ Kg} = 105/2.7 = 38.88 \text{ l/m}^3$$

Le mélange contient les constituants suivants :

$$G + g + S + E + C + FC = 1000 \text{ l}$$

Avec :

- ❖ $C = 245 \text{ Kg} \Rightarrow C = 245/3.1 = 79.03 \text{ l/m}^3$
- ❖ $E = 200 \text{ l/m}^3$
- ❖ $FC = 38.88 \text{ l/m}^3$

On peut calculer les proportions du gravier, du gravillon et du sable après la substitution de 30% du ciment par des fillers calcaires :

$$G + g + S = 1000 - (200 + 38.88 + 79.03) = 682.09 \text{ l/m}^3$$

A partir des courbes granulométriques, les proportions du sable, du gravier, et du gravillon dans le mélange qui le composent (683.76 l) sont :

$$S = 40.55 \% = 276.58 \text{ l}$$

$$G (3/8) = 23.77 \% = 162.13 \text{ l}$$

$$G (8/15) = 35.67 \% = 243.30 \text{ l}$$

Finalement, on résume tous les résultats dans le tableau suivant :

Composant	Composant (l/m ³)	Densité absolue	Composant (Kg/m ³)
Gravier 3/8	162.13	2.64	428.02
Gravier 8/15	243.30	2.67	649.61
Sable	276.58	2.66	735.7
Ciment	79.03	3.1	245
Eau	200	1	200
Fillers calcaires	38.88	2.7	105

Tableau V.18: Composants d'un béton avec 30 % de fillers calcaires

V.7.1.4. Formulation du béton avec superplastifiant

Le dosage en superplastifiant varie entre 1.25% C et 1.6% C :

On prend un pourcentage d'adjuvant de l'ordre de $A = 1.4 \% C$

Ce qui donne $A = 4.9 \text{ l/m}^3$

Dans 1m^3 de béton, nous avons les constituants suivants :

$$G + g + S + C + A + E = 1000 \text{ l}$$

Avec:

$$A = 4.9 \text{ l/m}^3$$

$$E = 200 \text{ l/m}^3$$

$$C = 350 \text{ Kg/m}^3 = 112.9 \text{ l/m}^3$$

$$\text{Donc } G + S + g = 682.2 \text{ l/m}^3$$

Les proportions du gravier, du sable et du gravillon deviennent :

$$S = 40.55 \% = 225 \text{ l/m}^3 = 598.5 \text{ Kg/m}^3$$

$$G (8/15) = 35.67 \% = 243.34 \text{ l/m}^3 = 649.72 \text{ Kg/m}^3$$

$$G (3/8) = 23.77 \% = 162.15 \text{ l/m}^3 = 428.09 \text{ Kg/m}^3$$

V.7.2 Préparation de la gâchée

Après avoir déterminé les proportions des constituants du mélange pour chaque type de béton, on passe au mode opératoire suivant qui permet de faire le gâchage du béton :

- La vérification de l'état des éprouvettes, (dans notre cas ce sont des éprouvettes cylindriques 16×32 cm), puis graissage à l'aide de l'huile pour faciliter le démoulage ;
- Préparation de tous les matériaux nécessaires pour faire le mélange ;
- Introduction des matériaux selon cet ordre : gravier, gravillon, sable, puis le ciment et les fillers selon le cas correspondant ;
- Mise en marche du malaxeur pendant 3 minutes pour homogénéiser le mélange sec ;
- Ajout d'eau continuellement pendant le malaxage du mélange ;
- Essais sur béton frais ;
- Remplissage des éprouvettes en deux couches avec vibration à l'aide d'une table vibrante ;
- Après 24h, démoulage des éprouvettes et conservation dans l'eau jusqu'au jour de l'écrasement.

PARTIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE VI

RESULTATS
ET
INTERPRETATIONS

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

VI.1 INTRODUCTION

Au cours de nos essais de formulation des différentes variétés des bétons, que nous avons nommés B1, B2, B3, B4 et B5 avec :

- ❖ **B1** confectionné avec un ciment portland composé CPJ CEM I 42.5 (béton témoin).
- ❖ **B2** confectionné avec un ciment portland naturel CPA CEM II 42.5
- ❖ **B3** dont 20 % du ciment CPJ est substitué par les fillers calcaires
- ❖ **B4** dont 30 % du ciment CPJ est substitué par les fillers calcaires
- ❖ **B5** élaboré avec un ciment CPJ et un dosage en superplastifiant.

Nous avons réalisé les essais suivants :

❖ Les essais sur béton frais

- l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ;
- la détermination de la masse d'une éprouvette et de la densité de son béton frais.

❖ Les essais sur béton durci

- l'estimation de la masse et de la densité du béton durci à chaque échéance de sa période de son jeune âge ;

- l'évaluation de la résistance à la compression du béton durci aux différentes échéances à partir du jour de démoulage des éprouvettes jusqu'au septième jour.

En plus, un suivi de la variation de la température, au sein des éprouvettes, a été effectué à l'aide d'un thermomètre à béton pendant 42 h après le coulage.

VI.2 ESSAIS SUR BETON FRAIS

VI.2.1. Essais d'affaissement

La consistance du béton est une grandeur qui sert à caractériser son aptitude à la mise en œuvre. Sa mesure s'effectue avec différents dispositifs dont le plus utilisé est le cône d'Abrams. Cet essai consiste à :

- remplir le cône en trois couches, chacune tassée avec une tige pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- soulever le cône avec précaution et mesurer l'affaissement.

Les résultats de la consistance obtenus pour les différents types des bétons sont résumés dans le tableau suivant :

Type de béton	B1	B2	B3	B4	B5
Quantité d'eau (l)	9.3	9.6	10	10.9	7.72
Affaissement (cm)	9.2	9.3	9.1	8.9	9.1

Tableau IV.1 Affaissement de cinq types de bétons

La quantité d'eau nécessaire au gâchage correspond à une gâchée dont le volume est de l'ordre de 1/20 d'un mètre cube.

VI.2.2 Mesure de la masse volumique du béton frais

La mesure de la masse volumique s'effectue de la manière suivante :

- peser le poids du récipient à vide, soit M_0 , dont on connaît le volume ;
- mettre le béton dans le récipient jusqu'au remplissage de celui-ci ;
- subir le béton à la vibration et araser les surfaces, et peser l'ensemble du béton et du récipient, soit M_1 .

La masse volumique du béton frais est :

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{V} \text{ (Kg/m}^3\text{)} \text{ avec } V = D^3 \text{ (le volume d'un moule cubique)}$$

$$= 0.1^3 = 0.001 \text{ m}^3$$

Les résultats obtenus sont réunis dans le tableau suivant :

Type de béton	M_0 (Kg)	M_1 (Kg)	V (m^3)	ρ (Kg/m^3)
B1	9.650	11.987	0.001	2337
B2	9.650	11.986		2336
B3	9.650	11.975		2325
B4	9.650	11.907		2257
B5	9.650	12.002		2397

Tableau IV 2 Masse volumique des bétons frais

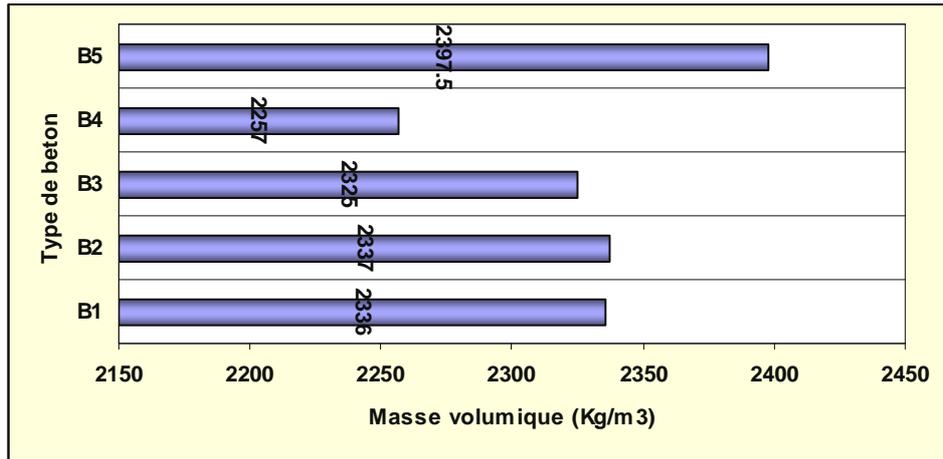


FIG VI.1 : Masse volumique des bétons frais

VI.3. ESSAIS SUR BETON DURCI A SON JEUNE AGE

VI.3.1. Mesure de la masse volumique du béton durci

Les masses volumiques de différents types du béton durci calculées à chaque jour depuis le démoulage sont représentées dans le tableau suivant :

Le temps (j)	B1	B2	B3	B4	B5
1	2324	2322	2310	2250	2348
2	2286	2285	2272	2180	2300
3	2264	2264	2255	2175	2282
4	2255	2255	2245	2175	2265
5	2251	2250	2237	2167	2260
6	2245	2245	2232	2160	2255
7	2242	2242	2287	2155	2248

Tableau VI.3 Masses volumiques des bétons durcis

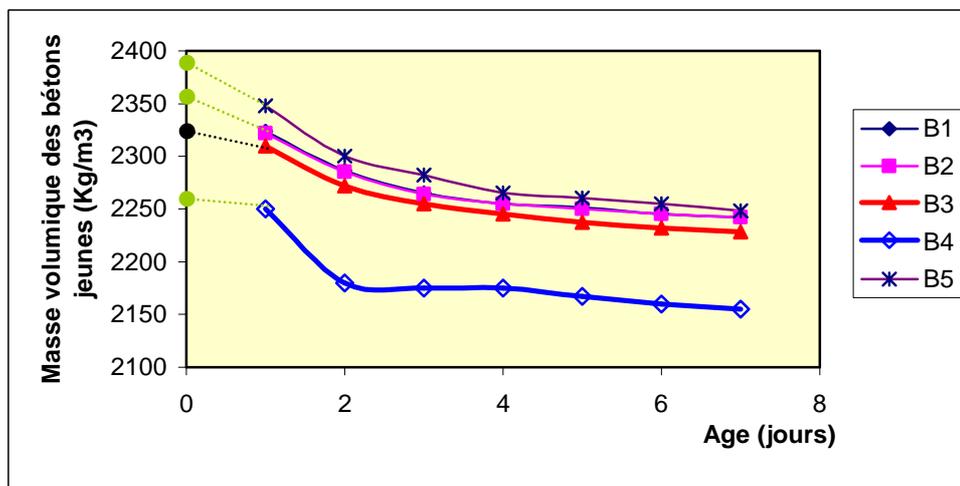


FIG VI.2 : Variations de masse volumique des bétons en fonction du temps

VI.3.2. La résistance à la compression

Le but de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance, pour chaque type de béton élaboré, pendant les premiers jours après le coulage des éprouvettes. L'essai consiste à soumettre l'éprouvette cylindrique (16×32 cm) à l'écrasement entre deux plats de la machine de compression.

La résistance à la compression est déduite comme suit : $\sigma_c = \frac{P}{S_{ep}}$

P : Charge de rupture ;
 S_{ep} : La surface de l'éprouvette cylindrique (16×32 cm)
 σ_c : Résistance à la compression



FIG VI.3 : Essai de compression

Les résultats obtenus sont représentés des le tableaux suivant :

Les délais de l'écrasement (+24h)		4h	8h	24h	48h	72h	4j	5j	7j
La charge à la rupture (Kg)	B1	7200	8000	11533	27000	38333	31000	33000	38000
	B2	10200	12000	15000	30667	33333	34500	36000	41000
	B3	6052	7761	10113	19764	2278	25133	26902	31164
	B4	5831	7640	8042	12566	16105	21111	22117	24951
	B5	14798	17392	20508	31667	36333	40716	44200	45000

Tableau IV.4 Charge à la rupture du béton (compression).

Les délais de l'écrasement (+24h)		4h	8h	24h	48h	72h	4j	5j	7j
La résistance à la rupture (Mpa)	B1	3.65	3.98	5.74	13.43	14.59	15.42	16.41	18.89
	B2	5.07	5.96	7.46	15.25	16.58	17.16	17.9	20.39
	B3	3.01	3.86	5.03	9.83	11.33	12.5	13.38	15.5
	B4	2.9	3.8	4.0	6.25	8.01	10.2	11	12.41
	B5	7.36	8.65	10.2	16.57	18	20.25	22.15	24.78

Tableau IV.5 Résistance à la compression des bétons

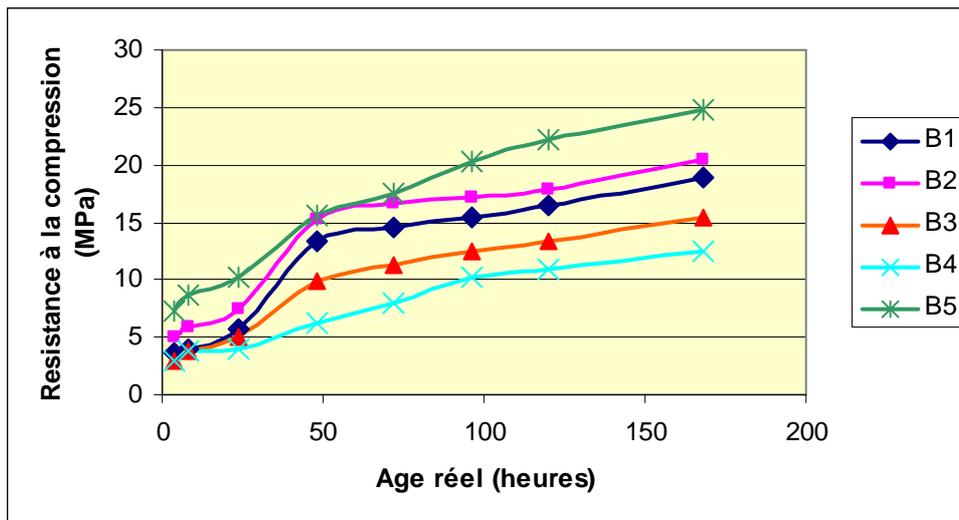


FIG VI.3 : Résistance des bétons jeunes en fonction du temps

Dans le cas d'une substitution d'une partie du ciment par le filler calcaire, les résistances au jeune âge sont d'autant plus faibles que le taux de filler calcaire est élevé.

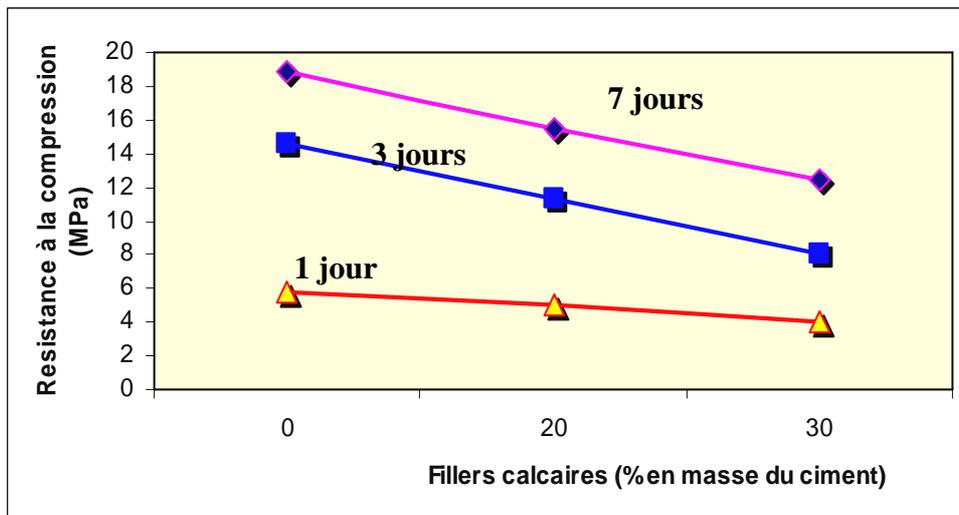


FIG VI.4 .Influence des pourcentages de la substitution de fillers calcaires sur la résistance à court terme

Cette figure montre que la présence de fillers calcaires retarde la réaction d'hydratation du ciment portland.

VI.3.3. Le suivi de la température

Le suivi s'effectue, sur quatre éprouvettes de compositions différentes, en mettant un thermomètre au sein de chaque éprouvette avant que le béton durcisse, et d'enregistrer

les valeurs de la température chaque 15 minutes durant 42 h. les résultats trouvés sont réunies dans le tableau ci-dessous :

Le temps (heures)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
B1	22	22	22.25	22.25	22.5	22.75	23	24.5	24	25	26.5
B3	21	21	21	21	21.25	21.75	22.75	23	23.5	24	24.5
B4	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.75	21	22	23
B5	22.5	22.5	22.75	23	24	26	27.5	29.5	32	30.5	29

Le temps (heures)	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
B1	28	30	29	28	28.25	27	26.5	26	25.5	25.5	25
B3	25	26	27	27.5	27.5	27	26.5	26.25	26	25.75	25.5
B4	23.75	24.25	24.75	25	25.5	26	26	25.75	25.5	25.25	25
B5	28	27	26.5	26	25.5	25	24.75	24.75	24.5	24	24

Tableau VI.6 Variation de la température des bétons en fonction du temps

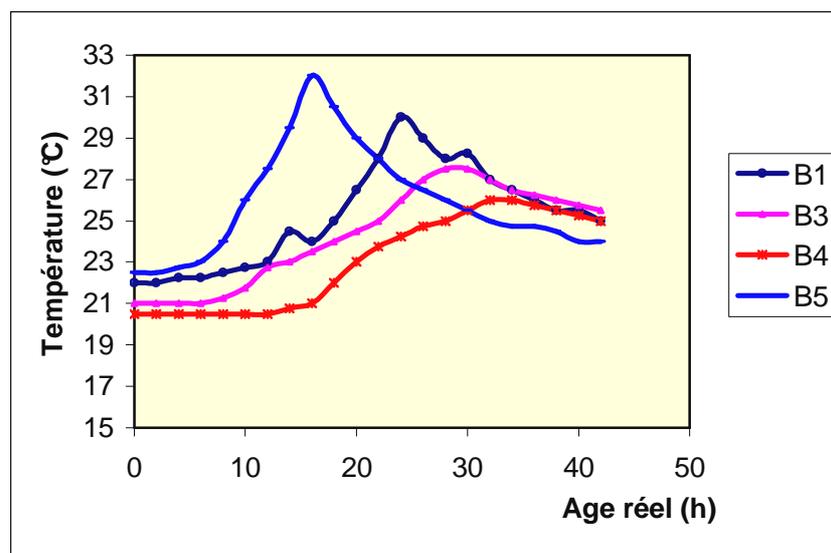


FIG VI.5 : Variation de la température des bétons en fonction du temps

En comparant les courbes traduisant l'évolution de la température en fonction de l'âge réel avec celles données par la littérature spécialisée, on remarque qu'elles sont très semblables. Les courbes obtenues présentent une augmentation de la température pendant les premières heures du suivi, jusqu'à un certain temps où elles atteignent leurs maximums, puis elles descendent au fur et à mesure du temps, tout en convergeant vers la température environnante.

La seule anomalie remarquée pour la courbe correspondante au béton témoin, c'est qu'on s'aperçoit une diminution de la température à l'âge de 15h ou 16h, puis elle augmente normalement, Même remarque à l'âge de 29h.

Les remarques citées pour les allures d'évolution de la température en fonction du temps sont valables pour celles traduisant l'évolution de la résistance par rapport le temps en ce qui concerne leur conformité à celles de littérature.

VI.4 EXPLOITATION DES RESULTATS

VI.4.1 Vérification expérimentale de la relation de Bolomey

La relation de Bolomey s'écrit sous la forme suivante :

$$F_c = f_m \cdot k_b \cdot (k_v C/E - 0.5)$$

Pour le béton B1, on a les données suivantes :

$E = 186 \text{ l/m}^3$ et $C = 350 \text{ kg/m}^3$, ce qui nous donne un rapport $C/E = 1.88$

Le ciment utilisé possède une résistance à 28 jours de l'ordre de 45 Mpa

$K_b = 0.45$ (granulats siliceux, avec un diamètre maximale comprise entre 10 et 20 mm)

$K_v = 0.9$ (béton à consistance plastique)

$$\text{D'où : } f_{c28} = 48 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \times 1.88 - 0.5) = 23.04 \text{ Mpa}$$

Et à 2 jours $f_m = 16.5 \text{ Mpa}$

La valeur de la résistance à 2 jours est : $f_{c2} = 8.49 \text{ Mpa}$

Pour le béton B2

$E = 192 \text{ l/m}^3$, $C = 350 \text{ kg/m}^3$, $C/E = 1.82$, $f_{m28} = 48 \text{ Mpa}$, $f_{m2} = 18 \text{ Mpa}$

La résistance à 28 jours est : $f_{c28} = 48 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \cdot 1.82 - 0.5) = 24.75 \text{ Mpa}$

La résistance à 2 jours est : $f_{c2} = 18 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \cdot 1.82 - 0.5) = 9.21 \text{ Mpa}$.

Pour le béton B3

$E = 200 \text{ l/m}^3$, $C = 280 \text{ kg/m}^3$, $C/E = 1.4$, $f_{m2} = 16.5 \text{ Mpa}$, $f_{m28} = 45 \text{ Mpa}$

La résistance à 28 jours est : $f_{c28} = 45 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \times 1.4 - 0.5) = 15.39 \text{ Mpa}$

La résistance à 2 jours est : $f_{c2} = 16.5 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \times 1.4 - 0.5) = 5.64 \text{ Mpa}$

Pour le béton B4

$E = 218 \text{ l/m}^3$, $C = 245 \text{ kg/m}^3$, $C/E = 1.12$, $f_{m2} = 16.5 \text{ Mpa}$, $f_{m28} = 45 \text{ Mpa}$

La résistance à 28 jours est : $f_{c28} = 45 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \times 1.12 - 0.5) = 10.28 \text{ Mpa}$

La résistance à 2 jours est : $f_{c2} = 16.5 \cdot (0.45) \cdot (0.9 \times 1.12 - 0.5) = 3.76 \text{ Mpa}$

Pour le béton B5

$E = 154.4 \text{ l/m}^3$, $C = 350 \text{ kg/m}^3$, $C/E = 2.26$, $f_{m2} = 16.5 \text{ Mpa}$, $f_{m28} = 45 \text{ Mpa}$

La résistance à 28 jours est : $f_{c28} = 45. (0.45). (0.9 \times 2.26 - 0.5) = 31.06 \text{ Mpa}$

La résistance à 2 jours est : $f_{c28} = 16.5. (0.45). (0.9 \times 2.26 - 0.5) = 11.38 \text{ Mpa}$

On voit que les résultats obtenus expérimentalement et ceux déduits de la formule de Bolomey à l'échéance de 48 h ne sont pas trop éloignés.

VI.4.2. Calcul de l'âge équivalent à 20°C

Le calcul de l'âge équivalent se fait par la loi d'Arrhenius, pour les différents types de bétons, en prenant pour l'énergie d'activation, qu'à titre indicatif, la valeur $E_a = 45 \text{ kJ/ mole}$. Mais en réalité, la valeur de E_a doit être calculée pour chaque type de béton.

La loi d'Arrhenius s'écrit : $t_{eq} = \int_0^{t_0} \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) d\tau$

B1		B3		B4		B5	
t _{reel} (h)	t _{eq} (h)						
0	0	0	0	0	0	0	0
4	4.6	4	4.26	4	4.12	4	4.75
8	9.2	8	8.65	8	8.25	8	10.26
12	14.47	12	14.25	12	12.38	12	17.92
16	20.52	16	19.9	16	17.03	16	33.10
20	29.86	20	26.45	20	25.65	20	36.80
24	44.16	24	34.77	24	31.25	24	36.94
28	45.76	28	44.41	28	38.17	28	40.57
32	49.25	32	49.25	32	43.63	32	43.63
36	52.16	36	49.84	36	51.37	36	48.34
40	56.22	40	57.08	40	55.37	40	51.30
42	57.26	42	59.03	42	57.26	42	53.87

Tableau VI.7 : Les valeurs des temps équivalents calculés à partir des temps réels.

VI.4.3. Taux d'accroissement des résistances

Si l'on considère le taux d'accroissement (t) des résistances le rapport suivant :

$$t = \frac{R_i - R_1}{R_8 - R_1}$$

Avec :

R_i : la résistance du béton à l'échéance i

R_1 : la résistance du béton à l'échéance de 4h

R_8 : la résistance du béton à l'échéance de 7j

On trouve les résultats suivants :

Délai d'écrasement après démoulage		4h	8h	24h	48h	3j	4j	5j	7j
Taux d'accroissement (%)	B1	0	2.16	13.71	64.17	71.78	77.23	83.72	100
	B2	0	5.8	15.60	66.44	75.13	78.91	83.74	100
	B3	0	6.8	16.17	54.6	66.66	75.98	83.82	100
	B4	0	9.46	11.56	35.22	53.37	76.76	85.17	100
	B5	0	7.4	16.30	52.64	61.07	73.99	83.79	100

Tableau.VI.8 : Taux d'accroissement de résistance pour les différents bétons

D'après les résultats trouvés, quant au taux d'accroissement des résistances, on remarque que sa valeur est variable d'un béton à un autre, et pour le même béton elle est variable d'un intervalle de temps à un autre, par exemple :

Pour l'intervalle s'écoulant de 4h jusqu'à 24h, le béton B5 possède la valeur la plus grande. Puis de 24h jusqu'à 4j, le béton B1 et B2 présentent un taux d'accroissement plus grand que ceux des autres bétons. Et enfin, les bétons B3 et B4 ont les taux d'accroissement les plus grands.

Ces remarques montrent que le béton B5 présente un développement des résistances plus vite que les autres bétons.

VI.5. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus à l'issue de nos essais nous permettent de bien constater l'influence des différents paramètres intervenants dans la composition des différents bétons élaborés sur leurs propriétés rhéologique (l'affaissement) et mécanique (résistance à la compression).

La méthode la plus appropriée pour comprendre l'influence de chaque paramètre sur les propriétés du béton, et plus particulièrement, ce qui nous intéresse, à son jeune âge, est de varier son pourcentage d'un essai à un autre. Mais malheureusement, et comme nous avons précisé précédemment, l'insuffisance des moules n'a pas permis de procéder de cette manière.

VI.5.1 Propriétés rhéologiques

L'essai que nous avons effectué et, qui a permis de simuler l'action des différents paramètres sur les propriétés rhéologiques des bétons, c'est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

VI.5.1.1 Effet du type de ciment

Pour le même dosage des deux ciments dans leurs bétons (350 kg/m^3), et pour même valeur d'affaissement fixée auparavant (9 cm), les quantités d'eau nécessaires pour le malaxage de chaque béton à base de ces deux ciments ne sont pas les mêmes.

Ceci est expliqué par le fait que leurs compositions chimiques sont différentes, et aussi, qui est le point essentiel, leurs surfaces spécifiques différentes. Elle est plus élevée pour le ciment CPA CEM I que pour le ciment CPJ CEM II, ce qui conduit à un besoin de l'eau de gâchage pour couvrir tous les grains de ciment et aussi ceux des autres constituants. A partir de ces données, on peut déduire que le béton B2 consomme une quantité d'eau plus importante que celle consommée par le béton B1.

VI.5.1.2 Effet du superplastifiant

En comparant les deux quantités d'eau utilisées pour le gâchage des deux bétons B1 (béton témoin) et B5 avec un superplastifiant, on remarque qu'il y a un écart sensible entre les deux valeurs. La raison est que le superplastifiant joue un rôle de défloculation des grains de ciment et permet de libérer l'eau piégée entre eux. Cette quantité d'eau est suffisante pour obtenir la même fluidité que celle obtenue à partir d'un béton sans incorporation.

VI.5.1.3 Effet de filler calcaire

L'introduction des particules fines du filler calcaire en substituant du ciment dans le mélange permet d'avoir l'une des deux conséquences :

- favorable : si sa granularité comble les vides et chasse d'eau de ceux-ci ;
- défavorable : s'il faut plus d'eau pour disperser ses particules.

Dans notre cas de figure, l'introduction du filler calcaire à proportions variables a permis de remarquer qu'il y a une augmentation d'eau de gâchage avec augmentation de ce dernier. Et cela s'explique par le rôle défavorable que joue le filler dans nos bétons, où celui-ci n'a pas comblé les vides à cause de la grande teneur en éléments fins présents dans le mélange, cette teneur a nécessité une grande quantité d'eau.

VI.5.2 Propriétés mécaniques

Le seul essai réalisé, et pour lequel on explique l'effet des trois paramètres sur les propriétés mécaniques c'est l'essai de la compression.

Le rapport E/C joue un rôle prépondérant sur l'évolution de la résistance du béton à la compression.

VI.5.2.1 Effet du type du ciment

L'évolution de la résistance à la compression est plus vite pour le béton B2 que pour le béton B1, bien que le rapport E/C de B2 soit plus élevé que celui de B1. Cela se justifie par la composition chimique du ciment CPA CEMI en silicates et aluminates permettant une cristallisation des produits de leurs hydratations, et un dégagement de chaleur conduisant à une élévation de la chaleur d'hydratation importante. Ces deux phénomènes sont importants pour le ciment CPA CEMI que pour le ciment CPJ CEMII.

VI.5.2.2 Effet du superplastifiant

L'incorporation du superplastifiant dans le béton réduit le rapport E/C, ce qui permet d'augmenter la compacité du béton, et donc d'améliorer les performances du béton et notamment sa résistance à la compression. Ces performances sont d'autant meilleures que le dosage en adjuvant est plus grand, cependant on ne doit pas dépasser certain seuil pour éviter les effets secondaires du superplastifiant(retard de prise, entraînement d'air).

VI.5.2.3 Effet de filler calcaire

Un rapport E/C plus élevé a causé une chute considérable de la résistance du béton au jeu ne âge.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La résistance au jeune âge du béton est un but que cherchent à atteindre les formulateurs de béton, les entrepreneurs dans certains pays la mentionnent de plus en plus dans les cahiers des charges.

La vérification des exigences spécifiées dans les cahiers des charges permet l'exécution en toute sécurité de plusieurs opérations de construction.

En laboratoire, on peut satisfaire à ces spécifications en disposant des moyens classiques tels que le choix de constitutions (ciments, ajouts, adjuvants) et leurs dosages (rapport E/C...), tandis que sur site, le développement des résistances dépend essentiellement des conditions environnementales, la température et la géométrie de l'ouvrage étant prépondérants. La non-représentativité des éprouvettes pour caractériser la résistance au niveau de l'ouvrage justifie l'intérêt et l'importance de la maturométrie.

La méthode de la maturométrie consiste à :

- caractériser la formulation du béton au laboratoire en termes d'énergie d'activation apparente et courbe de résistances de référence ;
- suivre des histoires de températures en différents points critiques de l'ouvrage ;
- convertir les résultats obtenus en temps équivalent, manuellement à l'aide de la loi d'Arrhenius.

La maturométrie a fait ses preuves depuis plus de dix ans dans de nombreux pays, sur de nombreux chantiers d'ouvrage d'art, permettent des exécutions plus rapides en anticipant les valeurs des résistances sans qu'aucun majeur n'ait été recensé.

Plusieurs paramètres, intervenant dans la formulation du béton, peuvent améliorer la résistance de celui-ci, et ainsi écourter les délais de fabrication. Des problèmes de durabilité méritent un contrôle sérieux, en particulier, les risques de fissuration d'origine thermique.

Ce travail nous a permis de comprendre les principes de la maturométrie et de mesurer les difficultés liées à l'expérimentation, surtout lorsque les cadences des essais sont très rapprochées.

Le matériel dont nous avons disposé pour effectuer nos expériences s'est avéré insuffisant. En particulier un meilleur contrôle de la température, au cœur des éprouvettes, au bout du temps (thermocouples) aurait permis de tirer des conclusions plus significatives

Les résultats de nos mesures permettent néanmoins de conforter les valeurs établies dans la littérature spécialisée.

Il aurait été nécessaire de vérifier également, si le temps l'avait permis, les résistances atteintes à des âges plus avancés de maturation.

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- [DRE 81] **DREUX Georges** : *Nouveau guide du béton*. Editions Eyrolles. 1981.
- [BAR 99] **J. BARON** et **J-P. OLLIVER** : *LES BETONS : Bases et données pour leur formulation* Eyrolles. 8^{ème} édition, 1999.
- [HAD 06] **N. HADDAOU** : *Estimation de la poussée du béton frais dans les parois de coffrage*. Projet de fin d'études, ENP 2006.
- [JEF 05] **JEF APERS** : *ABC du ciment et du béton*. Association belge des ciments et des bétons [FEBELCEM]
- [DEG 03] **R.DEGEIMBRE** *Technologie des bétons*. 2^{ème} édition.Université de Liège, Edité par la centrale des cours de l'A.E.E.S. 2003
- [SHE 99] **A. TAGHNIT-HAMOU** *Cours de matériaux de construction* Chapitre 6 : L'hydratation du ciment portland Université de Scherbrooke (en ligne)
- [GHI 01] **PROJET NATIONAL CALIBE** : *Résistance du béton dans l'ouvrage-Guide d'utilisation de la maturométrie* – (en ligne)
- [ACK 04] **P.ACKER** : *Comportement au jeune âge du béton*. 1^{ier} édition *germes science*
- [SOC 06] **SOCIETE CONTROLS** : *Catalogue : Appareils et matériels d'essais pour le bâtiment et les travaux publics*, 2005.
- [TEC 05] **Techniques de l'Ingénieur** : *Composition des bétons* N° C2220.
- [KEJ 03] **N.KEDJOUR** : *Le laboratoire du béton*. OPU. Mars2003.
- [HAM 07] **A.HAMOUINE**: *Matériaux de construction* .Cours 2004-2005(en ligne) Centre Universitaire de Béchar
- [GAB 07] **F.GABRYSIAK** **MATÉRIAUX** -Les granulats]
- [PIC 07] **J.F.PICARDAT**: *Le béton* .Site web: brutdebeton.com

ANNEXES

ANNEXE I : Fiches techniques

I.1 : Fiche technique de MEDAFLOW SR20

NOTICE TECHNIQUE

2 1 4 2

MEDAFLOW SR20

Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW SR20** est un superplastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas suivi d'un maintien d'ouvrabilité remarquable.

Le **MEDAFLOW SR20** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

CARACTERISTIQUES

- Forme Liquide
- Couleur Ocre clair
- pH 6.0/ 6.5
- Densité $1,05 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 20%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW SR20** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- l'amélioration considérable de la fluidité
- de faciliter la mise en œuvre du béton
- décoffrage rapide

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules,
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

1,0 à 2,5 % du poids de ciment soit 1 litres à 2,50 litres par 100kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Il est recommandé d'ajouter le **MEDAFLOW SR20** dans le béton après que 3/4 de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1mn/m^3

Par temps chaud, le **MEDAFLOW SR20** peut être combiné au retardataire de prise **MEDARETARD GR**.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW SR20** est conditionné en bidon de 11 Kg et en fût de 210 Kg..

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^\circ\text{C} < t < 35^\circ\text{C}$).

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Ils sont donnés à titre indicatif. Il appartient au client de s'assurer que le produit convient à l'utilisation envisagée.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: 213 (0) 21 51 66 81 / 82 Fax: 213 (0) 21 51 64 22 / (0) 21 51 65 23

Site Web: www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au nord-est de Constantine il est constitué de calcaire d'origine biochimique nérotique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

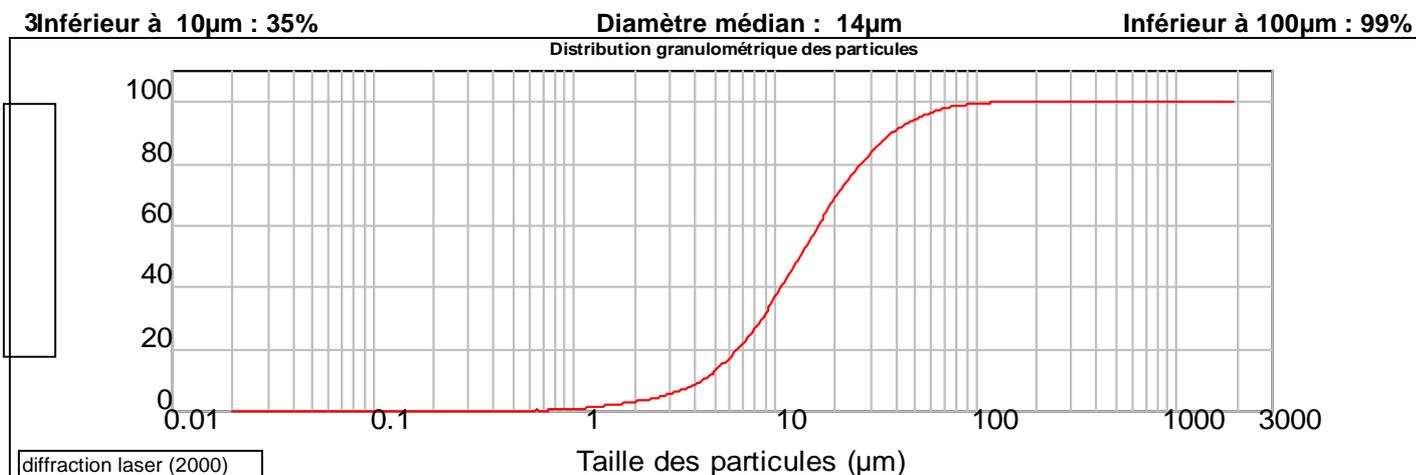
Caractéristiques chimiques

CaCO ₃	98 +/-1
CaO	55.5% - 56.33 %
SiO ₂	0.04% - 0.06%
Na ₂ O	0.05% - 14%
Al ₂ O ₃	0.03% - 0.08%
Fe ₂ O ₃	0.025% - 0.03%
Perte au feu	43%
PH	9

Caractéristiques physiques

Dureté (MOHS) :	3
Poids spécifique :	2,7
Densité apparente non tassée :	0,98g / cm ³
Blancheur (CR310 MINOLTA) :	L : 94,03 a+0,43 b+3,35
Prise D O P (N.F.T 30.022) :	21g/100g de poudre
Humidité à l' ensachage :	31g/100g de poudre
Indice de réfraction :	0,01%
Prise d'huile (N.F.T 30.022) :	1,71

Répartition granulométrique



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

Conditionnement

En vrac
Big-bag (1tonne)

Principales utilisations

Peinture mate en phase aqueuse et phase solvant
Peinture hydrodispersible

ANNEXE II :

Tableau 1 : La valeur de coefficient A (Formulation par la méthode Bolomey)

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 à 8	8 à 10
Béton armé	10	12 à 14
Béton coulé	12	14 à 6

Tableau 2 : Valeur de k_b

Nature pétrographique des granulats	D (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux, légèrement altérés	0.45	0.50	0.55
Siliceux, roulés	0.5	0.55	0.60
Siliceux, durs	0.55	0.60	0.65

Tableau 3 : Valeur de k_v en fonction de la consistance du béton

Consistance	Ferme	Plastique	Très plastique
k_v	0.87	0.90	0.93

ANNEXE III: PHOTOS



Ecrasement



Surfaçage



Pycnomètre



Essais de prise de ciment



Thermomètre du béton



Essai de cone d'abrahme

