

**UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
Département de Génie Mécanique

# **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Sciences des matériaux

## **ETUDE DES POSSIBILITES DE RENFORCEMENT SUR LE BETON**

Par

**AISSIOU HACENE**

Devant le jury composé de

|                |                     |               |            |
|----------------|---------------------|---------------|------------|
| M : T.SAHRAOUI | Professeur          | U.Blida       | Président  |
| M : S.KENAI    | Professeur          | U.Blida       | Examineur  |
| M : R.BADJI    | Maitre de recherche | C.S.C Chéraga | Examineur  |
| M : M.HADJI    | Professeur          | U.Blida       | Rapporteur |

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail , je tiens à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux , qui m'a donné la force d'achever cette réalisation .

En particulier , je remercie vivement mon promoteur , Dr HADJI , pour l'intérêt qu'il a porté à mon projet de Magister , je tiens à remercier également l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université SAAD Dahleb de Blida , qui ont contribué à ma formation en Post Graduation .

A tout le personnel du laboratoire du béton à Blida en particulier M.HADJERSI et Melle Fatiha

A M.Toumi Abdelghani du A.D.L.E.P de Blida pour son assistance dans la partie expérimentale ( sur chantier ) .

A M.Abbed Noureddine , M YACINE entrepreneurs à Blida et M Ramda Fatah d'Alger qui m'ont proposé les différents matériaux ( sable , gravier , ciment , acier,.. ) pour réaliser la partie expérimentale .

A M.Nasreddine de la bibliothèque centrale de l'université et M.Touati de la bibliothèque de la faculté pour leurs aides ( documentation ) .

A tous mes collègues de l'USTHB en particulier Melle AISSIOU et M.Zenati pour les documents qui m'ont prêtés .

A tous mes collègues enseignants de tous les départements qui s'inquiétaient réellement pour ma situation .

Mes vifs remerciements vont aussi à tous les membres examinateurs qui m'ont honoré par leur participation dans le jury qui prendra tout le soin à examiner avec attention cette modeste contribution .

## **DEDICACES**

Je Dédie ce modeste travail , fruits d'énormes sacrifices à :

Mes chers parents ,

Mon épouse ,

Mes chers enfants ( Sonia et Zaky ) ,

Ma large et grande famille ,

Tous ceux qui de près ou de loin et de quelque forme que ce soit ont contribué à cette  
réalisation .

## RESUME

Le bilan lourd et catastrophique du séisme de Chlef en 1980 et surtout Boumerdes en 2003 a confirmé les conclusions des études menés sur la qualité du béton produit en Algérie : « Les performances des bétons produits sur chantiers sont très loin de celle prises en compte dans les calculs de béton armé par les bureaux d'études » .

Il est évident que notre travail s'est orienté vers la recherche d'un béton qui répond aux préoccupations des bureaux d'études Algériens a savoir une contrainte de rupture en compression moyennant 30 MPa .

De ce fait nous avons jugé utile de donner une large étude bibliographique sur l'ensemble des paramètres essentiels qui influent sur la qualité du béton .

Et pour se rapprocher plus des conditions de nos chantiers , nous avons confectionné des éprouvettes en bétons sur un chantier à Blida dans des conditions semblables à celles des autres chantiers a savoir : Mêmes matériaux , même cure , même malaxage , en plus des aciers de ferrailage de différentes tailles disponibles , et l'ajout d'adjuvant , ainsi que le remplacement du ciment CEMI (350) par celui du CEMI (400 ),et en testant les éprouvettes par écrasement dans un labo de béton à Blida.

Cette étude expérimentale nous a montré qu'il est possible d'obtenir un béton de bonne qualité sans modifié la nature du squelette du béton a savoir ( sable ,granulats , ciment ) ,mais seulement en assurant la qualité et continuité de la granulométrie , ainsi que la bonne mise en ouvre du béton .

## ملخص

النتائج الثقيلة و الكارثية لزلزال الشلف عام 1980 و بومرداس بالخصوص سنة 2003 اثبتت الاستنتاجات بالنسبة للدراسات التي اجريت حول نوعية الخرسان المنتج في الجزائر «المردودية للخرسان المنتج في الورشات للبناء بعيدة كل البعد عن تلك التي اخدت في الحسبان في مكاتب الدراسات» .  
بطبيعة الحال ، عملنا يتجه نحو إيجاد خرسان يستجيب إلى إنشغالات مكاتب الدراسات بحيث يكون الإجهاد الضغطي الاقصى في حدود 30 MPa.

و حتى نقتررب اكثر عن الشروط الموجودة في ورشات البناء ،قمنا بإعداد قوالب الخرسان في ورشة من ورشات البناء بالبليدة و بنفس الإمكانيات الموجودة في الورشات البناء الاخرى و بنفس المواد المستعملة ،نفس العلاج للخرسان،نفس الخلاط ،بزيادة قطع من الحديد المستعمل في البناء الموجود في جميع الورشات و بتعويض الإسمنت العادي (ECMI(350 بالإسمنت ( ECMI(400 ،كما قمنا بتجارب الضغط على قوالب الخرسان في إحدى مخابر الخرسان بالبليدة.

هذه الدراسة التجريبية بينت بانه بإمكان إنتاج خرسان جيد بدون تغيير طبيعة هيكل الخرسان ( رمل ،حصى،إسمنت ...) لكن بإحترام جودة و تواصل المنخنيات و كذا حسن إستعمال وسائل إنتاج الخرسان .

## ABSTRACT

The heavy casualties and disaster that resulted from the 1980 earth quake that took place in Chlef and in particular in Boumerdes in 2003 confirmed the conclusions of the studies under taken on the quality of the concrete produce in Algeria: " the performances and the results of the concretes produced on sites are far from those taken into consideration by the Algerian study offices when they design the reinforced concrete".

It is obvious that our work is directed towards a research of a concrete which meet the concerns of the Algerian office studies namely Failure stress using compression considering 30MPa.

This we thought it was useful to give a detailed research bibliography on the whole basic parameters which had an effect on the quality of the concrete produce.

To be as close as possible to the conditions prevailing on our sites , we have prepared specimen concrete taken from on site in Blida in similar conditions to those on the other sites namely : same materials, same curing , same mixing , in addition to iron framework from different sizes available, and admixture , as well as the substitution of ordinary concrete CEMI (350 ) by the CEMI (400 ).The concrete specimen were analysed through crushing in a concrete laboratory in Blida.

This experimental study revealed it is possible to obtain a concrete of good quality without altering the nature of the concrete skeleton (sand, aggregates, cement), but only by maintaining the quality and continuity of granulometry, as well as the processing of the concrete.

## LISTES DES TABLEAUX

| Tableau N° | Titre  | Page |
|------------|--|------|
| 1.1        | Les constituants du béton par ordre de grandeur des proportion.....  | 19   |
| 1.2        | Classification des bétons en fonction de la grosseur des granulats.....  | 23   |
| 1.3        | Dimension admissible D pour les plus gros granulats.....   | 24   |
| 1.4        | Relation entre la valeur de Dmax. et l'épaisseur d'enrobage.....   | 25   |
| 1.5        | Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX.....  | 26   |
| 1.6        | Forme des granulats.....   | 27   |
| 1.7        | Dimensions nominales des tamis.....  | 28   |
| 1.8        | Quantités maximales de matières en suspension et de sels autorisées dans l'eau de gâchage.....                                       | 39   |
| 2.1        | Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.....  | 43   |
| 2.2        | Relation entre compacité, porosité et qualité du béton.....  | 45   |
| 2.3        | Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures.....   | 50   |
| 2.4        | Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes cylindriques....   | 52   |
| 2.5        | Coef.Relians les résistances d'un même béton et de moules différents.  | 53   |
| 2.6        | Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes prismatiques....   | 54   |
| 2.7        | Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes cubiques.....  | 54   |
| 2.8        | Coef. Relians les résistances d'un même béton et de moules différents..  | 55   |
| 3.1        | Influence qualitative des paramètres d'état de surface sur la facilité de mise en oeuvre du béton et l'adhérence pâte-granulats..... | 66   |
| 3.2        | Influence du dosage en ciment sur le retrait du béton.....   | 69   |
| 3.3        | Rôles et utilisations des principaux adjuvants.....  | 74   |
| 3.4        | Influence de l'hygrométrie de conservation sur la résistance .....   | 91   |
| 4.1        | Composition du béton B1.....   | 106  |
| 4.2        | Résultats des essais d'écrasements du béton B1.....  | 107  |
| 4.3        | Composition du béton B2 .....  | 108  |
| 4.4        | Résultats des essais d'écrasements du béton B2.....  | 109  |
| 4.5        | Composition du béton B3 .....  | 110  |
| 4.6        | Résultats des essais d'écrasements du béton B3.....  | 111  |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.7  | Composition du béton B4.....                          | 113 |
| 4.8  | Résultats des essais d'écrasements du béton B4.....   | 113 |
| 4.9  | Composition du béton B5.....                          | 115 |
| 4.10 | Résultats des essais d'écrasements du béton B5.....   | 115 |
| 4.11 | Composition du béton B6.....                          | 117 |
| 4.12 | Résultats des essais d'écrasements du béton B6.....   | 117 |
| 4.13 | Composition du béton B7.....                          | 119 |
| 4.14 | Résultats des essais d'écrasements du béton B7.....   | 119 |
| 4.15 | Composition du béton B8.....                          | 121 |
| 4.16 | Résultats des essais d'écrasements du béton B8.....   | 121 |
| 4.17 | Composition du béton B9 .....                         | 123 |
| 4.18 | Résultats des essais d'écrasements du béton B9.....   | 123 |
| 4.19 | Composition du béton B10.....                         | 125 |
| 4.20 | Résultats des essais d'écrasements du béton B10 ..... | 125 |
| 4.21 | Tableau récapitulatif .....                           | 127 |



## LISTES DES FIGURES

| <b>Figure N°</b> | <b>Titre</b>   | <b>Page</b> |
|------------------|--|-------------|
| 1.1              | Détermination de l'équivalent de sable piston.....   | 25          |
| 1.2              | Forme d'un granulat.....   | 27          |
| 1.3              | Variation de la résistance en compression , de la porosité et de l'eau en fonction du module de finesse.....                       | 29          |
| 1.4              | Four rotatif incliné ou kiln.....  | 33          |
| 1.5              | Détermination du temps de début de prise.....  | 36          |
| 1.6              | Détermination du temps de fin de prise.....  | 36          |
| 1.7              | Evolution du temps de prise en fonction de la température.....   | 37          |
| 1.8              | Influence de la température sur la prise des ciments.....  | 38          |
| 1.9              | Influence du E/C sur le temps de prise.....  | 38          |
| 2.1              | LE CONE D'ABRAMS.....  | 43          |
| 2.2              | Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....   | 43          |
| 2.3              | Mesure de la consistance (Essai vébé).....   | 44          |
| 2.4              | Emplacement des différents types de fissures.....  | 49          |
| 2.5              | Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression.....                                | 53          |
| 2.6              | Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....  | 56          |
| 2.7              | Chargement et déchargement. (Déformation réactive de retour).....  | 60          |
| 2.8              | Le retrait du béton est pris en compte dans la conception des ouvrages (Exemple: joints de retrait des dallages et planchers)..... | 71          |
| 3.1              | La courbe granulométrique des différents sables et graviers.....   | 63          |
| 3.2              | Influence du diamètre maximale des granulats sur la résistance en compression du béton à 28 jours d'âge.....                       | 64          |
| 3.3              | Résistance à la compression en fonction du rapportgravier sable(G/S)64   | 64          |
| 3.4              | Retrait et gonflement des bétons confectionnés avec différents granulats .....   | 65          |
| 3.5              | Influence de la nature du ciment sur l'évolution des résistances en compression Rc.....  | 67          |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.6  | L'évolution de la résistance en compression du béton en fonction de la finesse du ciment.....   | 68 |
| 3.7  | Courbes de résistance à la compression jusqu'à 28 jours de béton dosés de 200 à 450 Kg/m <sup>3</sup> .....                                     | 69 |
| 3.8  | Influence de la teneur en eau sur la cohésion.....  | 70 |
| 3.9  | Exemple de l'influence de la teneur en eau et en ciment sur l'affaissement au cône.....   | 71 |
| 3.10 | Résistance à la compression du béton en fonction du rapport E/C.....  | 72 |
| 3.11 | Développement de la contrainte du béton avec différents teneurs en eau E/C.....   | 73 |
| 3.12 | Abaque permettant d'évaluer le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée ( Affaissement au cône).....   | 73 |
| 3.13 | Apport d'un adjuvant fluidifiant sur l'ouvrabilité d'un béton routier.....  | 75 |
| 3.14 | Effet d'un adjuvant superplastifiant sur l'ouvrabilité d'un béton.....  | 76 |
| 3.15 | Résistance en compression de deux bétons (un béton témoin sans adjuvant et l'autre avec adjuvant fluidifiant ).....                             | 76 |
| 3.16 | Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances.....   | 77 |
| 3.17 | Relation entre la résistance à la compression simple à 28 jours et le temps de malaxage à maniabilité constante d'après Boussion et Brunet..... | 79 |
| 3.18 | Différentes zones dans un béton soumis à l'action d'une aiguille vibrante.....  | 84 |
| 3.19 | Vibrateur interne.....  | 87 |
| 3.20 | Influence de la chaleur sur l'évolution de la résistance à la compression du béton.....   | 89 |
| 3.21 | Influence des faibles températures sur l'évolution de la résistance à la compression du béton .....   | 90 |
| 3.22 | Influence conditions de cure sur la résistance à la compression du béton .....  | 92 |
| 3.23 | Accroissement de la température du béton en fonction de celles des constituants .....   | 93 |
| 3.24 | Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.....  | 94 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.25 | Evolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.....  | 94  |
| 3.26 | Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température...  | 95  |
| 3.27 | Evolution des résistances en compression en fonction de la température.....  | 95  |
| 3.28 | abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton)..... | 96  |
| 3.29 | début de prise du béton en fonction de la température.....   | 98  |
| 3.30 | Délai de décoffrage en fonction de la température.....   | 99  |
| 4.1  | Le malaxage des constituants du béton avant le coulage.....  | 103 |
| 4.2  | Conservation des éprouvettes dans un bassin (sous l'eau ).....   | 104 |
| 4.3  | Eprouvette en béton cylindrique avant l'essai d'écrasement .....   | 105 |
| 4.4  | Presse à béton .....   | 105 |
| 4.5  | Courbe granulométrique du mélange du béton B1.....   | 107 |
| 4.6  | Evolution de la résistance à la compression du béton B1.....   | 108 |
| 4.7  | Evolution de la résistance à la compression du béton B2.....   | 109 |
| 4.8  | Evolution de la résistance à la compression des bétons B1 et B2....  | 110 |
| 4.9  | Evolution de la résistance à la compression du béton B3.....   | 111 |
| 4.10 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B3 ,B2 et B.112   |     |
| 4.11 | Evolution de la résistance à la compression du béton B4 .....  | 114 |
| 4.12 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B4 et B3.....   | 114 |
| 4.13 | Evolution de la résistance à la compression du béton B5.....   | 116 |
| 4.14 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B3, B4 et B5.116  |     |
| 4.15 | Evolution de la résistance à la compression du béton B6.....   | 118 |
| 4.16 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B3,B4 , B5 et B6.....   | 118 |
| 4.17 | Evolution de la résistance à la compression du béton B7.....   | 120 |
| 4.18 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B6 et B7 .....  | 120 |
| 4.19 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B7 et B8.....   | 122 |
| 4.20 | Evolution de la résistance à la compression des bétons B5 , B8 et B9.....  | 124 |
| 4.21 | Evolution de la résistance à la compression du béton B10.....  | 126 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.22 | Evolution de la résistance à la compression du béton B10 Comparée à celle des bétons B9 et B8..... | 126 |
|------|--|-----|



# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION

|                       |    |
|-----------------------|----|
| Généralités .....     | 16 |
| But du travail.....   | 17 |
| Plan de travail ..... | 17 |

## CHAPITRE 1 COMPOSANTS DU BETON

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Généralités.....   | 19 |
| 1.2 Granulats ( Gravier et Sable ).....                                    | 19 |
| 1.2.1 Les granulats naturels.....  | 21 |
| 1.2.1.1 Origine minéralogique.....   | 21 |
| 1.2.1.2 Granulats roulés et granulats de carrières.....                    | 21 |
| 1.2.2 Les granulats artificiels.....                                       | 21 |
| 1.2.2.1 Sous-produits industriels, concassés ou non.....                   | 21 |
| 1.2.2.2 Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement..... | 22 |
| 1.2.2.3 Granulats allégés par expansion ou frittage.....                   | 22 |
| 1.2.2.4 Les granulats très légers.....                                     | 22 |
| 1.2.5 Dimension maximale D des granulats.....                              | 24 |
| 1.2.6 Propreté et forme des granulats.....                                 | 25 |
| 1.2.6.1 Propreté des granulats.....  | 25 |
| 1.2.6.2 Forme des granulats.....   | 26 |
| 1.2.7 Module de finesse.....   | 28 |
| 1.3 Ciment.....  | 29 |
| 1.3.1 Les différents ciments.....  | 30 |
| 1.3.2 Fabrication du ciment courant, ou ciment Portland.....               | 32 |
| 1.3.2.1 Extraction.....  | 32 |
| 1.3.2.2 Préhomogénéisation.....  | 32 |
| 1.3.2.3 Séchage et le broyage.....   | 33 |
| 1.3.2.4 Cuisson.....   | 34 |
| 1.3.2.5 Refroidissement.....   | 34 |
| 1.3.2.5 Broyage.....   | 35 |
| 1.3.3 Les caractéristiques du ciment portland.....                         | 35 |
| 1.3.3.1 La prise.....  | 35 |
| 1.4 Eau .....  | 38 |
| 1.4.1 Rôle de l'eau.....   | 38 |
| 1.4.2 Dosage en eau .....  | 39 |
| 1.4.3 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau.....                     | 39 |
| 1.5 Les Adjuvants.....   | 40 |
| 1.5.1 Classification des adjuvants.....                                    | 41 |

## CHAPITRE 2 PRINCIPALES QUALITES DU BETON

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Généralités .....  | 42 |
| 2.2 Ouvrabilité .....  | 42 |
| 2.3 Compacité et porosité .....  | 42 |
| 2.3.1 Relation entre la compacité et les propriétés du béton .....                       | 45 |
| 2.4 Perméabilité .....   | 46 |
| 2.5 Durabilité .....   | 47 |
| 2.5.1 La Fissuration.....  | 48 |
| 2.5.1.1 Classification des types de fissures.....  | 48 |
| 2.5.1.2 Causes d'apparition des fissures sur le béton .....                              | 49 |
| 2.5.2 Le vieillissement du béton .....   | 51 |
| 2.6 Résistance .....   | 51 |
| 2.6.1 Résistance à la compression du béton .....   | 52 |
| 2.6.2 Résistance à la traction du béton .....  | 55 |
| 2.6.2.1 Essais de résistance à la traction .....   | 56 |
| 2.6.3 Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction ..... | 57 |
| 2.7 Déformation .....  | 58 |
| 2.7.1. Le retrait .....  | 58 |
| 2.7.2. La dilatation .....   | 59 |
| 2.7.3. Le fluage .....   | 59 |
| 2.7.4. Élasticité du béton .....   | 60 |
| 2.7.5. Effet «Poisson» .....   | 61 |
| 2.7.6. Mécanisme de la fissuration .....   | 61 |

## CHAPITRE 3 PARAMETRES INFLUANTS SUR LES QUALITES DU BETON

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Généralités .....  | 62 |
| 3.2 Le choix de la granularité.....  | 62 |
| 3.2.1 Influence du Dimension maximale D des granulats sur la résistance du béton ..... | 63 |
| 3.2.2 Influence du rapport gravier sable ( G/S ) sur la résistance du béton.....       | 64 |
| 3.2.3 Influence de la nature des granulats .....                                       | 65 |
| 3.2.4 Influence des états de surface des granulats.....                                | 66 |
| 3.3 Le dosage en ciment.....   | 67 |
| 3.3.1 Influence de la nature du ciment.....  | 67 |
| 3.3.2 Influence de la finesse de mouture .....   | 68 |
| 3.3.3 influence du dosage du ciment .....  | 68 |
| 3.4 Dosage en eau .....  | 70 |
| 3.4.1 Influence du rapport E/C .....   | 70 |
| 3.4.1.1 Influence du rapport E/C sur la cohésion d'un béton .....                      | 70 |
| 3.4.1.2 Influence du rapport E/C sur l'ouvrabilité du béton .....                      | 71 |
| 3.4.1.3 Influence du rapport E/C sur la résistance du béton .....                      | 72 |
| 3.5 L'ajout d'adjuvants divers .....   | 74 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| 3.5.1       | Influence des adjuvants ( fluidifiants , superplastifiants ) sur l'ouvrabilité du béton .....            | 75 |
| 3.5.1.1     | Adjuvants fluidifiants .....   | 75 |
| 3.5.1.2     | Adjuvants superplastifiants .....  | 75 |
| 3.5.2       | Influence des adjuvants (fluidifiants , accélérateurs et retardateurs ) sur la résistance du béton ..... | 76 |
| 3.5.2.1     | Adjuvants fluidifiants .....   | 76 |
| 3.5.2.2     | Adjuvants accélérateurs et redartateurs .....  | 77 |
| 3.6         | Confection du béton .....  | 77 |
| 3.6.1       | Le malaxage des constituants .....   | 78 |
| 3.6.2       | transport du béton .....   | 79 |
| 3.7         | Mise en œuvre du béton .....   | 81 |
| 3.7.1       | L'approvisionnement du béton .....   | 81 |
| 3.7.2       | La mise en place .....   | 82 |
| 3.7.2.1     | Préparation des coffrages .....  | 82 |
| 3.7.2.2     | Le déversement du béton .....  | 83 |
| 3.7.2.3     | Le serrage du béton ( vibration ).....   | 83 |
| 3.7.2.3.1   | Effet de la vibration .....  | 85 |
| 3.7.2.3.2   | Durée de vibration .....   | 85 |
| 3.7.2.3.3   | Matériels de vibration .....   | 86 |
| 3.7.2.3.3.1 | Vibrateurs internes .....  | 86 |
| 3.7.2.3.3.2 | Vibrateur externe .....  | 87 |
| 3.7.3.4     | Le décoffrage .....  | 87 |
| 3.7.3.5     | La cure du béton .....   | 88 |
| 3.7.3.5.1   | Influence de la chaleur .....  | 89 |
| 3.7.3.5.2   | Influence des faibles températures .....   | 90 |
| 3.7.3.5.3   | Influence de l'hygrométrie de conservation .....   | 91 |
| 3.7.3.5.4   | Influence des conditions de cure et du rapport E/C sur la résistance du béton .....                      | 91 |
| 3.7.3.5.5   | Influence de la durée de cure humide sur la résistance du béton.....                                     | 92 |
| 3.7.3.6     | Le bétonnage par temps chaud .....   | 92 |
| 3.7.3.6.1   | Conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons .....                                   | 93 |
| 3.7.5.6.2   | Préconisations pour le bétonnage par temps chaud .....   | 97 |
| 3.7.3.7     | Le bétonnage par temps froid .....   | 98 |
| 3.7.3.7.1   | Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais .....                                      | 98 |
| 3.7.3.7.2   | Conséquences du gel sur le béton frais .....   | 99 |
| 3.7.3.7.3   | Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid .....  | 99 |

## **CHAPITRE 4**

### **ETUDE EXPERIMENTALE**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4-1   | Introduction .....                     | 101 |
| 4-2   | Méthode de confection des bétons ..... | 101 |
| 4-3   | Matériaux utilisés .....               | 102 |
| 4-3-1 | Présentation .....                     | 102 |
| 4-3-2 | Le liant .....                         | 102 |
| 4-3-3 | Les aciers .....                       | 102 |
| 4-3-4 | Autres produits ( Adjuvants ) .....    | 102 |



|  |     |
|--|-----|
| 4-4 Confection des éprouvettes .....                 | 103 |
| 4- 4 -1 Préparation des mélanges .....               | 103 |
| 4- 4 -2 Mise en place du béton dans les moules ..... | 104 |
| 4- 5 Conservation .....                              | 104 |
| 4- 6 Type d'essai utilisé .....                      | 104 |
| 4- 7 Différents bétons étudiés .....                 | 106 |
| 4- 7- 1 Béton type B1 .....                          | 106 |
| 4- 7- 2 Béton type B2 .....                          | 108 |
| 4- 7- 3 Béton type B3 .....                          | 110 |
| 4- 7- 4 Béton type B4 .....                          | 112 |
| 4- 7- 5 Béton type B5 .....                          | 115 |
| 4- 7- 6 Béton type B6 .....                          | 117 |
| 4- 7- 7 Béton type B7 .....                          | 119 |
| 4- 7- 8 Béton type B8 .....                          | 121 |
| 4- 7- 9 Béton type B9 .....                          | 122 |
| 4-7-10 Béton type B10 .....                          | 124 |
| 4-7-11 Tableau récapitulatif .....                   | 127 |

## **CONCLUSION et RECOMMANDATIONS**

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Conclusions générales ..... | 128 |
| Recommandations .....       | 129 |

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments industriels, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore .

Ce choix universel est fondé sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité, c'est-à-dire le bon comportement dans le temps face aux actions des charges et aux agressions physico-chimiques de l'environnement, constituent les principaux critères techniques. Les critères économiques sont évalués à partir de la disponibilité et du coût des matières premières, de la facilité d'emploi et du prix de revient du matériau en œuvre.

Les caractéristiques du béton sont assez mal connues , et ses possibilités , largement sous-estimées , on ignore parfois que moyennant un choix et un dosage convenables de ses composants , le béton peut voir ses propriétés profondément modifiées , de façon à mieux répondre à nos besoins .

La connaissance de toutes les caractéristiques du béton est loin d'être complète car l'étude de ce matériau, poreux et hétérogène à toutes les échelles est loin d'être facile. De plus la structure au niveau moléculaire change irréversiblement avec l'hygrométrie, la température et la charge appliquée.

Le présent travail montre que ce n'est pas en changeant la nature du squelette du béton, le ciment ou encore moins les adjuvants qui entrent en jeu dans la valeur de la qualité du béton , mais qu'il faut tenir compte plus , de la composition et la qualité du sable ,du granulats et de la quantité d'eau de gâchage ainsi que du mode de confection et des conditions pratiques de leur mise en œuvre sur chantier .

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses

propriétés. Aux États-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 mégapascals (MPa) (environ 1 000 kg/cm<sup>2</sup>), et même 140 MPa (1 400 kg/cm<sup>2</sup>) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa (6 000 kg/cm<sup>2</sup>). Par contre dans plusieurs de nos chantiers (en Algérie) la valeur de la résistance à la compression du béton ne dépasse pas 27 à 30 MPa à 28 jours d'âge.

### **But de travail**

Le but de ce travail est de chercher un béton qui satisfait un certain nombre de critères auquel les spécialistes du domaine ont besoin.

L'objectif est donc d'avoir une résistance à la compression supérieure à celle qu'on trouve dans nos chantiers et une durabilité plus que séculaire ainsi une bonne ouvrabilité.

Le travail se voulant proche des conditions pratiques de réalisation, le choix des matériaux s'est fait en conséquence, à savoir des ciments commerciaux et des granulats classiques habituellement utilisés par les entreprises de construction. Tout en variant le dosage du ciment, type de granulats, l'apport de l'adjuvant ainsi que la teneur en eau et l'ajout des aciers dans la constitution du béton modifié.

Afin d'arriver à des conclusions que nous avons jugées importantes et satisfaisantes, il a été nécessaire de réaliser un grand nombre d'éprouvettes pour confectionner des bétons de compositions différentes en agrégats, en teneur en eau, en dosage de ciment et en présence des morceaux d'aciers de ferrailage de différentes tailles.

### **Plan du travail**

Après une introduction générale, le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique sur les composants du béton (Granulats, Ciment, Eau et Adjuvants).

Le second chapitre évoque les principaux critères du béton à savoir l'ouvrabilité , durabilité , compacité , perméabilité , résistance, déformation .

Dans le troisième chapitre nous évoquerons les facteurs qui influent sur les principaux critères sus cités

Quant au quatrième chapitre a été consacré à l'étude expérimentale et discussions des résultats. Nous avons donné dans ce chapitre l'ensemble des compositions et des résultats obtenus pour 10 types de bétons que nous avons confectionnés puis testés .

Ce travail s'achève par une conclusion générale et quelques recommandations que nous avons jugées utiles pour l'obtention d'un meilleur béton du point de vu résistance , durabilité et ouvrabilité .

# **CHAPITRE 1**

## **COMPOSANTS DU BETON**

## CHAPITRE 1

### COMPOSANTS DU BETON

#### 1.1 Généralités :

Le béton se compose de granulats ( sable , gravier , cailloux ) collés entre eux par un liant hydraulique : le ciment . Lorsque le ciment se trouve en présence d'eau il fait prise , puis durcit progressivement .Un béton hydraulique est constitué de :

- D'une pate pure ( ciment + eau ),
- D'un mélange granulaire ,
- De produit additionnels ( adjuvants , additions minérales, ...)

On désigne habituellement sous le vocable :

- De matrice ou de mortier : le mélange ( liant + eau + ciment )
- De squelette solide ou de squelette granulaire : le mélange des granulats .

Les constituants du béton sont donnés par ordre de grandeur des proportions suivant le tableau 1.1 [1].

**Tableau1.1Les constituants du béton par ordre de grandeur des proportions[1].**

|        | Eau % | Air % | Ciment % | Granulats % |
|--------|-------|-------|----------|-------------|
| Volume | 14-22 | 1-6   | 7-14     | 60-78       |
| Poids  | 5-9   | -     | 9-18     | 63-85       |

#### 1.2 Garanulats ( Gravier et Sable ) :

Les granulats (sables, gravillons et cailloux) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air.

Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent. La courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passant dans des tamis et passoires de dimensions normalisées.

Par convention, on nomme:

1. sables les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 5 mm,
2. gravillons ceux dont les dimensions sont comprises entre 5 mm et 25 mm
3. cailloux ceux de dimensions supérieures à 25 mm.

Le poids volumique de ces granulats est de l'ordre de 25 à 35 kilonewtons par mètre cube (kN/m<sup>3</sup>, soit environ 2 500 à 3 500 kg/m<sup>3</sup>) et leur poids volumique apparent d'environ 14 à 16 kN/m<sup>3</sup>. On utilise en général, pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par du sable et des gravillons.

On emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes (argiles expansées) et les silicates (vermiculite et perlite). Les premiers permettent la fabrication de bétons de structure légers, dont la résistance peut atteindre de 40 à 50 MPa. Les seconds servent à la fabrication de parois en béton très léger, à fort pouvoir d'isolation thermique. Le poids volumique apparent de ces granulats varie d'environ 0,6 à 8 kN/m<sup>3</sup>. Malgré leur intérêt technique, leur coût énergétique de fabrication en réduit l'emploi à des applications particulières.

Les granulats lourds sont soit des riblons ou de la grenaille de fer, soit des minéraux naturels comme la magnétite, la limonite ou la barytine. Ils sont utilisés dans les bétons destinés à assurer une protection contre les rayonnements atomiques. Leur poids volumique apparent varie de 30 à 50 kN/m<sup>3</sup>.



Les granulats utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificiels.

### 1.2.1 Les granulats naturels

#### 1.2.1.1 Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartz et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

#### 1.2.1.2 Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories:

1. Les granulats alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et cribléton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.
2. Les granulats de carrière sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donnent des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage ... . La sélection de ce type de granulats devra donc être faite avec soin et après accord sur un échantillon.

### 1.2.2 Les granulats artificiels

#### 1.2.2.1 Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau. La masse volumique apparente est supérieure à  $1\,250\text{ kg/m}^3$  pour le laitier cristallisé concassé,  $800\text{ kg/m}^3$  pour le granulé.

Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers. Les différentes caractéristiques des granulats de laitier et leurs spécifications font l'objet des normes NF P 18-302 et 18-306.

### 1.2.2.2 Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

### 1.2.2.3 Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressantes. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé (norme NF P 18-309) et le laitier expansé (NF P 18-307). D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m<sup>3</sup> selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.2.2.4 Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé).

Très légers - 20 à 100 kg/m<sup>3</sup> - ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m<sup>3</sup>.

On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers: blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants.

Les granulats trop durs, et surtout ceux de dimensions trop importantes, peuvent provoquer des concentrations de contraintes. Selon de nombreux auteurs, les meilleurs bétons sont réalisés avec des granulats de dimensions inférieures à 15 mm ; le rapport adhérence/résistance augmente en effet lorsque la taille des granulats diminue [2].

Pour les granulats autres que les sables, les plus recommandés sont ceux concassés assez durs, de taille moyenne, de bonne adhérence et de forme la plus cubique possible.

Dans la pratique la désignation granulats d/D se rapporte grossièrement à un gravier dont la dimension des grains s'étale de d à D.

Du point de vue de la grosseur maximale des granulats les bétons sont classés de la manière suivante :

**Tableau 1.2 : Classification des bétons en fonction de la grosseur des granulats [3]**

| Valeurs de Dmax (mm)  | Classification des bétons |
|-----------------------|---------------------------|
| D= 8                  | Béton très fin            |
| $10 \leq D \leq 16$   | Béton fin                 |
| $20 \leq D \leq 25$   | Béton moyen               |
| $31.5 \leq D \leq 50$ | Béton gros                |
| $63 \leq D$           | Béton très gros           |

La qualité et la nature des roches ainsi que la forme des grains ont une grande importance : Les calcaires tendres, les feldspaths, les schistes, les matériaux poreux (absorption d'eau supérieure à 3 ou 5%) et les grains en forme de plaquettes et aiguilles (coefficient volumétrique supérieur à 0.20) sont prohibés.

Par contre les matériaux présentant une bonne adhérence au mortier et au liant sont très recherchés. On peut citer par ordre préférentiel : les calcaires, le silex et les roches éruptives) [3].

Les granulats comportant une présence d'impuretés telles que la gangue argileuse ou des poussières fines risquent de compromettre l'adhérence pâte-granulats.

Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, un béton confectionné avec des graviers calcaires présente en traction une résistance supérieure à celle d'un béton de graviers siliceux de meilleure dureté car la pâte de ciment adhère si bien au calcaire que la rupture se fait à l'intérieur des graviers calcaires eux-mêmes, alors que dans le cas des graviers siliceux la rupture se fait par décollement.

Par ailleurs, la résistance d'un béton, (comme il a été déjà cité), dépend de la forme des granulats. En effet, la mise en place d'un béton exige un excès d'eau pour lubrifier les grains du mélange de façon à atteindre une ouvrabilité

normale. Cet excès d'eau sera d'autant plus faible que les grains seront plus arrondis.

A titre d'exemple, un béton à granulats roulés exige un rapport E/C de 0.45 pour atteindre une consistance plastique ( $a = 6$  cm), alors qu'il nécessite, toutes choses égales par ailleurs, un rapport E/C = 0.55 avec les granulats anguleux.

Comme la résistance dépend du facteur E/C, les granulats "sphériques" permettront de fabriquer des bétons de meilleures résistances que ceux réalisés avec des granulats plats ou en aiguille [4].

### 1.2.5 Dimension maximale D des granulats

Pour définir approximativement une valeur admissible de D on préconise l'application des règles résumées dans le tableau 1.2

Le rayon moyen  $r$  d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre.

Le rayon moyen  $R$  du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton.

**Tableau 1.3 : Dimension admissible D pour les plus gros granulats [5].**

| Caractéristiques de la pièce à bétonner |  | Valeur maximale de D |
|---|--|----------------------|
| e                                       | espacement entre armatures principales | $e$                  |
| r                                       | rayon moyen des mailles de ferrailage  | $0.8 r$              |
| R                                       | rayon moyen du moule                   | $R$                  |
| Hm                                      | épaisseur minimale de la pièce         | $Hm/5$               |

Pour tenir compte de la couverture "c", (épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage), on pourra adopter les recommandations du comité euro-international du béton (C. E. B) données au tableau 1.4.

**Tableau 1.4 : Relation entre la valeur de Dmax. et l'épaisseur d'enrobage [5].**

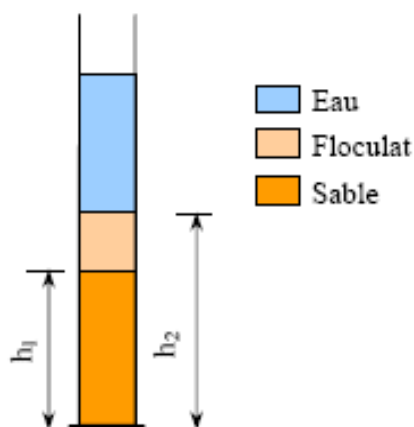
| Milieu ambiant   | c minimal | D maximal |
|--|-----------|-----------|
| Locaux couverts et clos  | 1 cm      | 2 c       |
| Exposition aux intempéries   | 2 cm      | 1.5 c     |
| Milieu agressif  | 3 cm      | c         |
| Milieu très agressif   | 4 cm      | c - 5 mm  |
| <b>Nota :</b> c doit, par ailleurs, être supérieur ou égale au diamètre des des Armatures (ou à la largeur du paquet d'armatures). |           |           |

### 1.2.6 Propreté et forme des granulats :

#### 1.2.6.1 Propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte.

La propreté désigne: d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.



**figure. 1.1: Détermination de l'équivalent de sable piston**

Dans le cas des **sables**, le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de **sable** piston PS" (norme P 18-597) qui consiste à séparer le **sable** des particules très fines qui remontent par **floculation** à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de **sable** 0/2 mm. La valeur de PS doit selon les cas être supérieure à 60 ou 65. L'essai dit "équivalent de **sable** piston" permet de mesurer le degré de propreté du **sable** [ 7 ] .

$$PS = 100 \frac{h_1}{h_2}$$

**Tableau 1.5 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX [ 7 ]**

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

#### 1.2.6.2 Forme des granulats

La forme d'un granulat est défini par trois grandeurs géométriques:

La longueur L, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat,

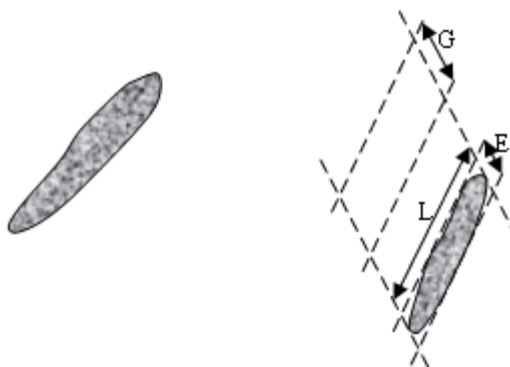
L'épaisseur E, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,

La grosseur G, dimension de la maille carrée minimale du **tamis** qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'**aplatissement** A d'un ensemble de granulats est le pourcentage

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

pondéral des éléments qui vérifient la relation:



**figure 1.2 : Forme d'un granulat**

Dans les mêmes conditions  $L \leq G \leq E$ , on peut déterminer aussi:

- l'indice d'allongement  $\beta = \frac{G}{L} \leq 1$
- l'indice d'aplatissement  $\alpha = \frac{E}{G} \leq 1$

La forme des granulats influence:

La facilité de mise en oeuvre et le compactage du béton.

La **compacité** du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

L'état de surface des grains influence:

La **compacité** du mélange.

L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube:

**Tableau 1.6: Forme des granulats**

|                 |  |
|-----------------|--|
| Cubes , spheres | Trois dimensions à peu près égales<br>(Bonne compacité)                              |
| Plaquettes      | Une dimension beaucoup plus petite que les deux autres<br>(Mauvaise compacité)       |
| Aiguilles       | Une dimension beaucoup plus grande que les deux autres<br>(Très mauvaise compacité ) |

### 1.2.7 Module de finesse

Les **sables** doivent présenter une **granulométrie** telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Si il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le **sable** est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un **sable** peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les **tamis** de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des **sables** à bétons [7].

Les dimensions nominales normalisées des **tamis**, seuls appareils utilisés actuellement, sont les suivantes:

**Tableau 1.7 Dimensions nominales des tamis**

|        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Module | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29   | 30    |
| Tamis  | 0.08  | 0.1   | 0.125 | 0.160 | 0.2   | 0.25  | 0.315 | 0.4   | 0.5   | 0.63 | 0.8   |
| Module | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    | 37    | 38    | 39    | 40   | 41    |
| Tamis  | 1.00  | 1.25  | 1.60  | 2.00  | 2.50  | 3.15  | 4.00  | 5.00  | 6.30  | 8.00 | 10.00 |
| Module | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49    | 50    |      |       |
| Tamis  | 12.50 | 16.00 | 20.00 | 25.00 | 31.50 | 40.00 | 50.00 | 63.00 | 80.00 |      |       |

Des études expérimentales ont montré qu'un bon sable à béton est celui dont le module de finesse est proche de 2.5 [8].

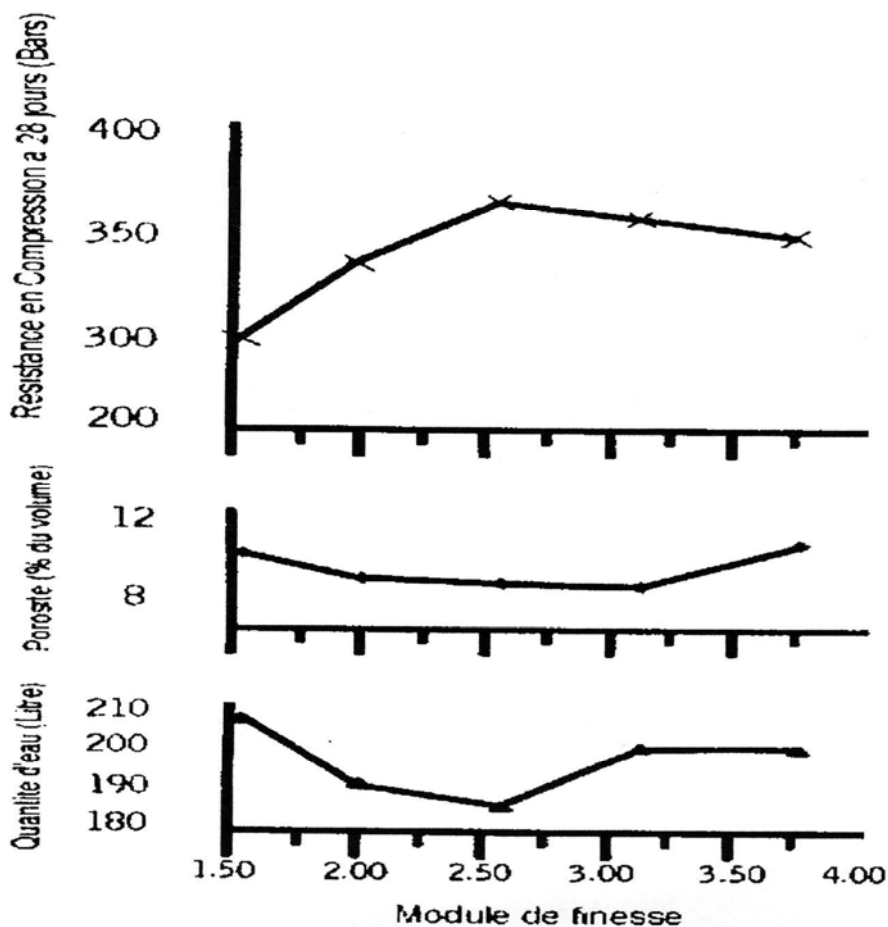
La courbe d'un tel sable doit donc se situer à l'intérieur d'un fuseau recommandé pour la granulométrie des sables à béton de structures dont le module de finesse est de 2.2 à 2.8 [9].

Les sables de modules de finesse compris entre 1.8 et 2.2, sont à majorité d'éléments fins et très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau pour la facilité de mise en oeuvre du béton.

Les sables à module de finesse allant de 2.8 à 3.2, correspondent à des sables qui conduisent à des résistances élevées, mais donnent en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation [10].

La figure 1.3 montre la variation de la résistance en compression de la porosité et de la quantité d'eau en fonction du module de finesse.





**Figure 1.3** Variation de la résistance en compression , de la porosité et de l'eau en fonction du module de finesse [ 8 ] .

### 1.3 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau . Il forme une pâte faisant prise qui durait progressivement à l'air ou dans l'eau.C'est le constituant fondamentale du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide .

Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse ( 5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination

vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%, est composé de :

- Silicate tricalcique :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$  ( 60-65%)
- Silicate dicalcique :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$  ( 20-25%)
- Aluminate tricalcique :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$  ( 5-10%)
- Ferro-aluminate tétracalcique:  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$  ( 5-10%)

L'eau est avec le ciment l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à la fois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction d'hydratation du ciment et par la suite à la résistance mécanique du béton.

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ou siliceuses ( $\text{SiO}_2$ ) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.

### 1.3.1 Les différents ciments

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et 27 variantes principales [11]

- Ciment Portland (noté CEM I)

- Ciment Portland composé (noté CEM II)
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEM III)
- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV)
- Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)
- Ciment blanc (différent des précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication)

la méthode de fabrication)

La désignation des ciments est normalisée

### 1.3.2 Fabrication du ciment courant, ou ciment Portland

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

La fabrication du ciment se distingue en cinq étapes principales :

- l'extraction
- la préhomogénéisation
- le séchage et le broyage
- la cuisson
- le refroidissement
- le broyage

#### 1.3.2.1 Extraction

L'extraction consiste à extraire les matières premières vierges (comme le calcaire et l'argile) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Ces matières

premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est acheminée par des dumpers ou des bandes transporteuses vers un atelier de concassage. Les matières premières doivent être échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition régulière dans le temps. La prise d'échantillons en continu permet de déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice).

#### 1.3.2.2 Préhomogénéisation

La phase de préhomogénéisation consiste à créer un mélange homogène. Cette opération peut être réalisée soit dans un hall un mélange préhomogène en disposant la matière en couches horizontales superposées, puis en la reprenant verticalement à l'aide d'une roue-pelle soit dans un silo vertical par brassage par air comprimé .

#### 1.3.2.3 Séchage et le broyage

Le séchage et le broyage est l'étape visant à favoriser les réactions chimiques ultérieures. Les matières premières sont séchées et broyées très finement (de l'ordre du micron) dans des broyeurs à boulets (ou plus récemment, dans des broyeurs verticaux à meules, plus économes en énergie).

On distingue trois types principaux de "voies" en fonction du type de préparation :

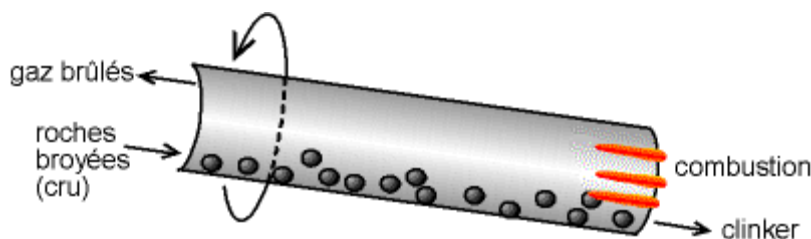
- la voie humide : c'est la technique la plus ancienne. Elle est aussi la plus gourmande en énergie, nécessaire à l'évaporation de l'excédent d'eau.

Dans les deux techniques suivantes, les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées sous forme de « cru » ou « farine ».

- la voie sèche : la farine est introduite directement dans le four sous forme pulvérulente, après un préchauffage dans une tour à échangeurs thermiques.

- la voie semi-sèche : avant introduction dans le four, la farine est transformée en “granules” par humidification dans de grandes « assiettes » rotatives inclinées.

Le cru est ensuite introduit dans un long four (60m à 200m) rotatif (1.5 à 3 tours par minute) tubulaire (jusqu'à 6m de diamètre), légèrement incliné (2 à 3 % d'inclinaison ) figure 1.4 .



**Figure 1.4 Four rotatif incliné ou kiln**

#### 1.3.2.4 Cuisson

Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa lente progression dans le four vers la partie basse à la rencontre de la flamme. Cette source de chaleur est alimentée au charbon broyé, fuel lourd, gaz, ou encore en partie avec des combustibles de substitution provenant d'autres industries, tels que le coke de pétrole, les pneus usagés, les farines animales, les huiles usagées.

La température nécessaire à la [clinkerisation] est de l'ordre de 1450C°. L'énergie consommée se situe entre 3200 et 4200 kJ par tonne de [clinker], qui est le produit semi fini obtenu à la fin du cycle de cuisson. Il se présente sous forme de granules grises.

À la sortie du four, le clinker doit être refroidi et broyé avant d'être stocké dans des silos de clinker.

Le clinker est le résultat d'un ensemble de réactions physico-chimiques progressives (clinkerisation) permettant :

- La décarbonatation du carbonate de calcium (donnant la chaux vive)
- La scission de l'argile en silice et alumine
- La combinaison de la silice et de l'alumine avec la chaux pour former des silicates et des aluminates de chaux.

#### 1.3.2.5 Refroidissement

Dans le cas des **ciments gris**, le clinker est refroidi dans la plupart des cimenteries actuelles par un refroidisseur à grilles:

- le clinker va avancer à l'intérieur du refroidisseur grâce aux coups répétés des grilles sur lesquelles celui-ci repose,
- au travers des grilles, de puissants ventilateurs vont souffler sous le clinker afin de le refroidir,
- au début ou à la fin du refroidisseur (cela dépend du modèle utilisé), un concasseur à un ou plusieurs rouleaux va broyer de manière grossière le clinker.

Dans le cas du ciment blanc, plus fragile que le gris car il doit rester immaculé, un refroidisseur rotatif est inséré entre le four rotatif et le refroidisseur à grilles. Il s'agit d'un cylindre légèrement incliné qui tourne sur lui-même à l'intérieur duquel de l'eau est pulvérisée à l'aide de multiples buses. Bien que sa composition chimique soit légèrement différente, c'est grâce au refroidisseur rotatif que le ciment peut rester blanc : en effet, son but est de refroidir très rapidement le clinker en sortie du four avant que celui-ci ne se soit oxydé au contact de l'air. De plus, la taille des refroidisseurs à grilles utilisés sur les lignes de ciment blanc est considérablement réduite, le refroidisseur rotatif leur enlevant une partie de leur travail .

### 1.3.2.5 Broyage

Le clinker est ensuite finement broyé pour donner un ciment aux propriétés hydrauliques actives. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, dispositifs cylindriques chargés de boulets d'acier et mis en rotation.

Lors de cette étape, le gypse (3 à 5 %), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment Portland.

Les ciments à ajouts sont obtenus par l'addition lors de la phase de broyage d'éléments minéraux supplémentaires contenus dans des matériaux tels que :

- le laitier de hauts fourneaux (résidus de la sidérurgie)
- les cendres volantes de centrales électriques
- les fillers calcaires (granulats)
- les pouzzolanes naturelles ou artificielles

### 1.3.3 Les caractéristiques du ciment portland

#### 1.3.3.1 La prise

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de **viscosité** et se raidit, on dit qu'il se fait **priser**.

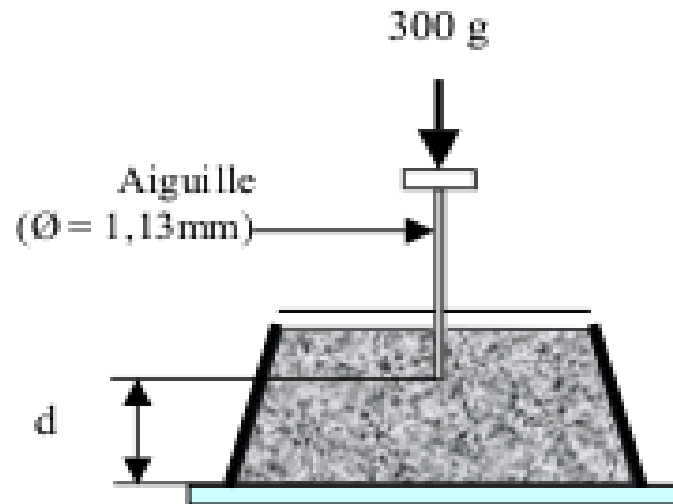


figure 1.5: Détermination du temps de début de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ( $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

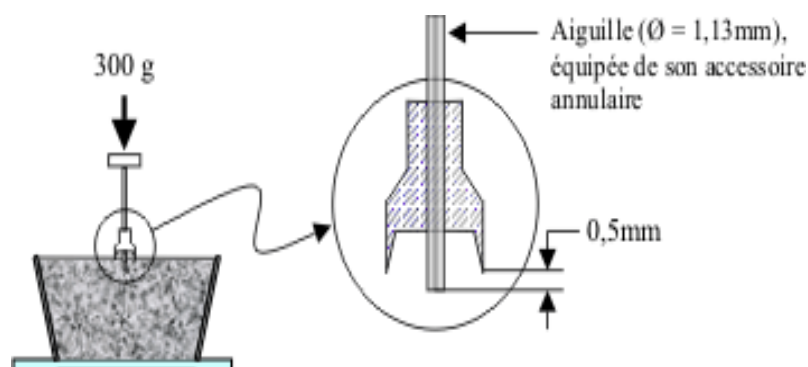


figure 1.6 : Détermination du temps de fin de prise



Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- la nature du ciment,
- la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C (figure 1.7 ),
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise,
- l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise (figure1.9 )

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de:

1h30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55 et HP.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

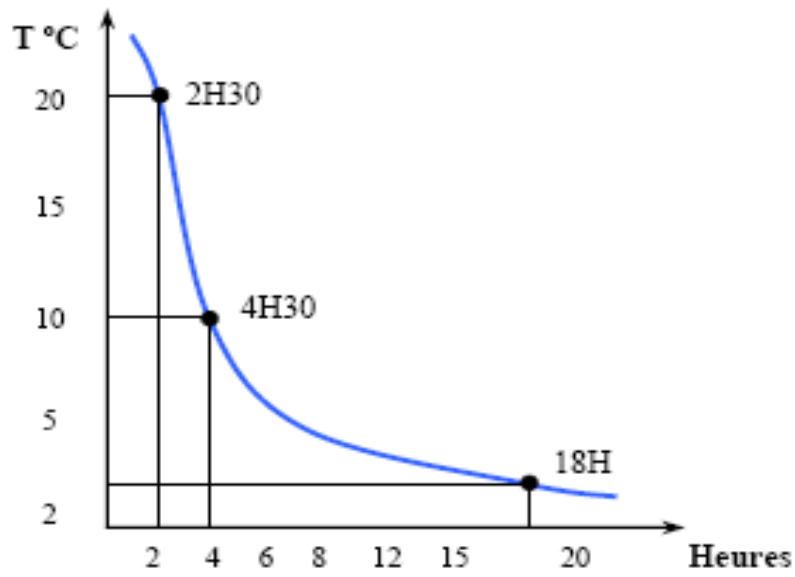


figure1.7: Evolution du temps de prise en fonction de la température

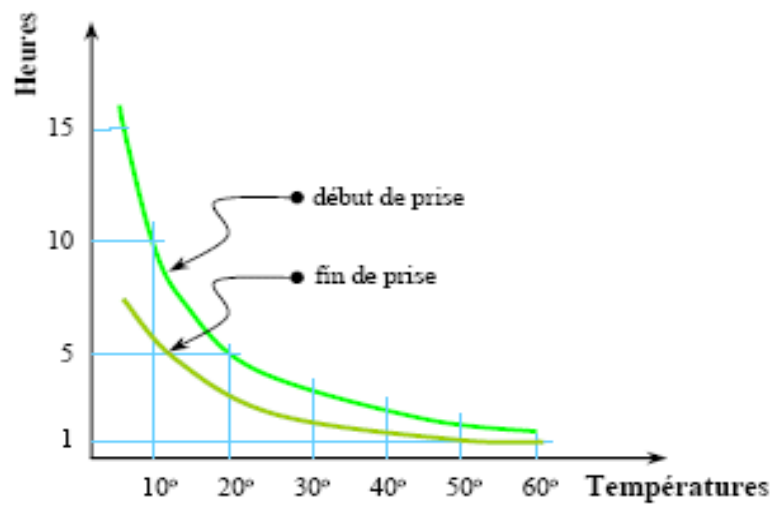


figure1.8: Influence de la température sur la prise des ciments

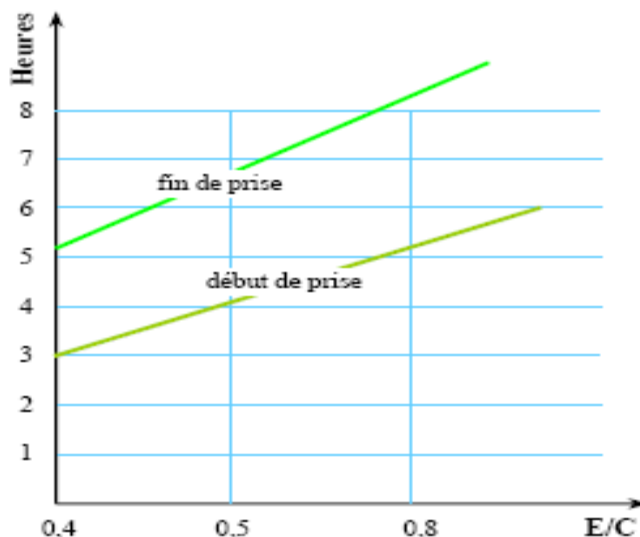


figure 1.9 : Influence du E/C sur le temps de prise

## 1.4 Eau

### 1.4.1 Rôle de l'eau

L'eau est un facteur capital, trop négligé par le bétonnier. Elle joue un rôle multiple. Elle sert :

- A L'hydratation du ciment,
- Au mouillage des granulats (car la pâte de ciment colle mal à des granulats secs),
- A faciliter le malaxage et la mise en oeuvre (améliore la maniabilité du béton).

### 1.4.2 Dosage en eau :

L'eau est le fluidifiant de base des bétons. Il est bien connu qu'un excès d'eau est néfaste et provoque une perte d'homogénéité, donne lieu au ressuage et de la ségrégation, à un retard de prise, à une baisse des résistances mécaniques et d'une façon générale un amoindrissement de la pérennité du béton et aussi un mauvais aspect des surfaces brutes au décoffrage [12].

Le dosage en eau peut s'effectuer soit pondéralement, soit volumétriquement. Les deux systèmes s'utilisent couramment sur les chantiers et dans les usines de préfabrication, mais ce sont les techniques pondérales qui sont les plus précises.

### 1.4.3 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

L'eau de gâchage des bétons doit être propre : ne pas contenir de matières en suspension ou des sels au-delà des valeurs citées dans le tableau 1.8 qui suit :

**Tableau 1.8 : Quantités maximales de matières en suspension et de sels autorisées dans l'eau de gâchage [7].**

| Quantités maximales de | Béton A et B | Béton C |
|------------------------|--------------|---------|
| Matières en suspension | 2g/l         | 5 g/l   |
| Sels dissous           | 15g/l        | 30 g/l  |

Avec :

- Béton A : Béton à hautes qualités à forte résistance.
- Béton B : Béton à grande imperméabilité.
- Béton C : Béton courant peu ou non armé.

Ceci à condition que ces sels dissous ne puissent nuire à la conservation des bétons (acides, sulfates, matières organiques, etc.). Toute eau douteuse doit être soumise à l'analyse chimique.

Enfin l'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf avec les ciments alumineux ou le ciment de laitier à la chaux. Son emploi est aussi déconseillé avec les ciments spéciaux, pour les travaux à la mer. Il est proscrit pour les bétons armés, les bétons très armés et les bétons précontraints dont les armatures fortement tendues sont très sensibles à la corrosion [13].

### 1.5 Les Adjuvants

L'adjuvant est un produit qu'on incorpore au béton au moment du malaxage afin de modifier les propriétés du mélange à l'état frais et/ou durci. Son dosage doit être inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment .

Les adjuvants peuvent modifier l'ouvrabilité d'un béton ou d'un mortier, leur prise et le durcissement, la perméabilité ou la répartition de l'air occlus.

Les fabricants d'adjuvants développent aussi des produits de cure et des agents de démoulage. Ces derniers sont destinés à être appliqués sur les surfaces des moules et des coffrages pour faciliter le démoulage des éléments en béton. Les produits de cure sont appliqués à la surface d'un béton ou d'un mortier exposés à l'air pour réduire l'évaporation de l'eau pendant la phase de prise et de durcissement.

#### 1.5.1 Classification des adjuvants

Chaque adjuvant se définit par une seule fonction principale, selon la modification majeure qu'il apporte aux propriétés du béton ou du mortier. Cependant, l'efficacité de cette fonction principale peut varier selon le dosage et les composants du béton. Certains adjuvants développent des fonctions secondaires. Les principaux adjuvants sont [10]:

- **Accélérateurs de durcissement**

Ils accélèrent la vitesse de montée en résistance du béton ou du mortier. Ils conviennent à tous les bétons nécessitant une résistance à court terme, aux bétons pour décoffrages rapides et bétons précontraints.

- **Accélérateurs de prise**

Ils diminuent les temps de début et de fin de prise du ciment. Ils permettent de mettre le béton hors gel, ainsi que d'augmenter la rotation des coffrages.

Certains accélérateurs de prise contiennent des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque. D'autres sont à base de chlore, ils sont alors soumis à une norme spécifique.

- **Entraîneurs d'air**

Ils permettent d'entraîner un volume d'air plus important dans le béton et de le répartir uniformément. Ainsi, la résistance au gel et aux sels de déverglaçage du béton durci se trouve considérablement améliorée.

- **Hydrofuges de masse**

Ils sont destinés à diminuer la perméabilité et l'absorption capillaire des bétons. Ils permettent de réduire l'apparition des efflorescences. Leur action est

variable selon leur composition, dosage et les types de bétons auxquels ils sont incorporés.

- **Plastifiants**

Ils permettent d'améliorer des résistances du béton en augmentant sa compacité (réduction de la teneur en eau) et, par conséquent, sa durabilité. Ils sont utilisés dans l'industrie du béton pour les bétons des éléments à démoulage rapide, dans les grands ouvrages d'art nécessitant des résistances élevées et pour les bétons coulés dans les coffrages glissants.

- **Retardateurs de prise**

Ils augmentent le temps de début de prise. Introduits dans l'eau de gâchage, ils sont à base de ligno-sulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb.

Ils sont utilisés pour les bétonnages par temps chaud, pour les ouvrages de masse, pour le coulage en continu ou pour les longs transports.

- **Superplastifiants**

Appelés autrefois fluidifiants, ils sont introduits peu avant la mise en oeuvre du béton ou du mortier. Ils apportent une importante augmentation de leur maniabilité en réduisant très fortement la quantité d'eau. Ils permettent de réaliser des bétons à compacité élevée.

Ils sont utilisés pour la réalisation des fondations, dallages, radiers ou sols industriels, pour le béton prêt à l'emploi pompé et pour les bétons hautes performances, des bétons de fibres ou des bétons autoplaçants.

# **CHAPITRE 2**

## **PRINCIPALES QUALITES DU BETON**

## CHAPITRE 2

### PRINCIPALES QUALITES DU BETON

#### 2.1 Généralités :

La qualité du béton dépend de ses propriétés , un béton est défini par trois critères principaux à savoir la résistance à la compression et la durabilité du béton durci qui garantissent la sécurité et la pérennité des ouvrages et la consistance ou la maniabilité du béton frais qui mesure sa facilité de mise en œuvre . Nous consacrons dans ce chapitre a définir quelques propriétés du béton dont :

#### 2.2 Ouvrabilité :

l'ouvrabilité ou La consistance d'un béton est un facteur important. Elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage et influe sur le dosage en ciment et en eau dans le béton. Elle a donc indirectement une conséquence sur le prix du béton. Plus l'ouvrabilité demandée est grande plus le béton contient d'eau et de ciment, plus son coût est élevé. Le choix de la consistance est donc un équilibre entre le coût du béton et l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

- Affaissement au cône d'Abrams ( figure 2.1 ).

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure 2.2. Il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.





Figure 2.1 LE CÔNE D'ABRAMS

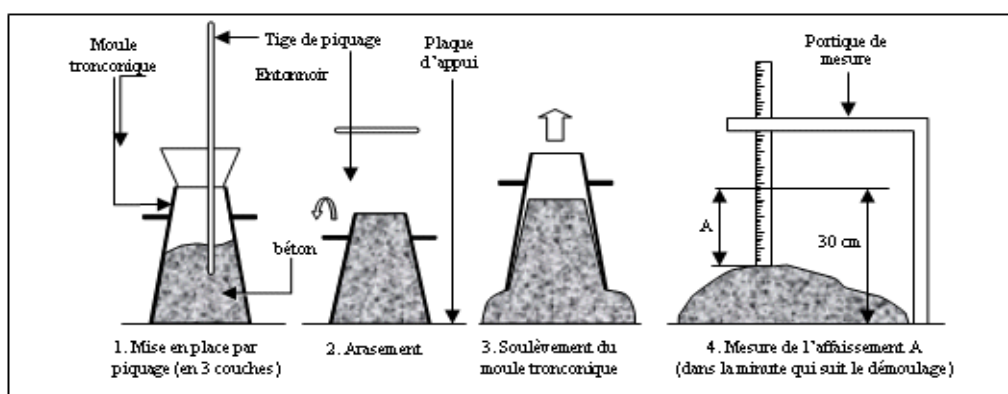


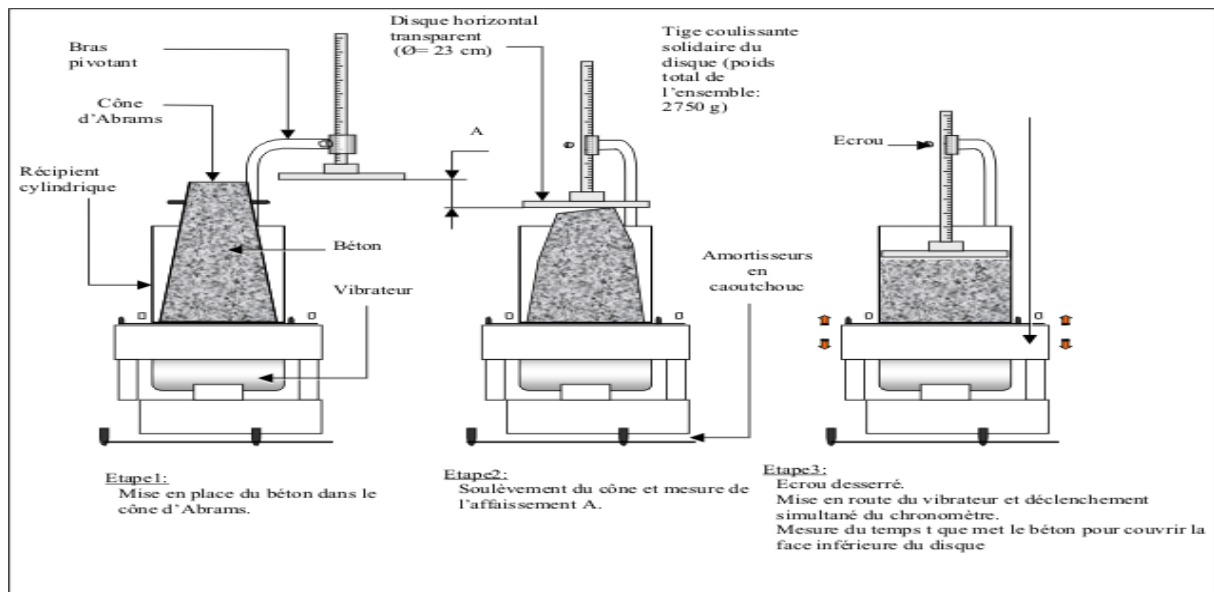
Figure 2.2 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la **consistance** d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau 2.1

Tableau 2.1 : Appréciation de la **consistance** en fonction de l'affaissement au cône

| Classe de consistance | Affaissement (cm) | Tolérance (cm) |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| Ferme F               | 0 à 4             | ± 1 cm         |
| Plastique P           | 5 à 9             | ± 2 cm         |
| Très plastique TP     | 10 à 15           | ± 3 cm         |
| Fluide F1             | ≥ 16              |                |

Malheureusement, cet essai ne convient pas pour tester les bétons qui seraient encore plus fermes, plus secs qu'un béton donnant un affaissement presque nul. Dans ce cas-là, il convient de déterminer la **consistance** du béton frais par une autre méthode, qui s'appelle l'essai Vébé, schématisé sur la figure 2.3 ci-dessous.



**Figure 2.3 Mesure de la consistance (Essai vébé)**

En conclusion l'ouvrabilité du béton est une caractéristique importante qui est trop souvent négligée. Elle est pourtant essentielle car elle conditionne non seulement la mise en place correcte du matériau, mais l'ensemble de ses propriétés à l'état durci [12].

### 2.3 Compacité et porosité :

La détermination de la porosité du béton durci s'effectue selon des spécifications conventionnelles, c'est-à-dire que le volume absolu obtenu dépend des conditions d'essais qui comportent essentiellement deux phases :

- Séchage pour obtenir un certain état sec,
- Imbibition pour introduire dans les pores accessibles un certain volume d'eau dont la détermination de la masse permettra de déduire le volume des vides.

Cette notion de volume des vides, liée au volume des pores accessibles à l'eau, dépend de plusieurs paramètres :

- l'intensité du séchage (durée, température, hygrométrie, ventilation, masse du volume de prélèvement, etc.)
- l'âge du béton au moment de sa mise en séchage (c'est-à-dire degré d'hydratation du ciment) etc...

L'imprégnation des vides par l'eau s'effectue jusqu'à un certain état conventionnel de saturation. L'imbibition peut être réalisée par simple immersion, par un remplissage lent sous vide (dépression de 700 mm Hg  $\approx$  0.75 bar) ou même par un remplissage sous pression hydraulique jusqu'à 120 bars (norme DIN).

Il en résulte que, selon les processus de spécifications expérimentales, les valeurs de porosité et de compacité obtenues ne pourront pas être comparées.

Les valeurs numériques du coefficient de compacité du béton peuvent varier de 0.75 à 0.90. Certains auteurs ont donné pour la compacité et la porosité les valeurs indiquées au tableau 2-2.

**Tableau 2-2 : Relation entre compacité, porosité et qualité du béton [4].**

| Compacité   | Porosité  | Qualité du béton |
|-------------|-----------|------------------|
| 0.89 à 0.90 | 10 à 11%  | Excellente       |
| 0.85 à 0.86 | 12 à 15 % | Bonne            |
| 0.82 à 0.84 | 16 à 18%  | Satisfaisante    |
| 0.78 à 0.81 | 19 à 22 % | Médiocre         |
| < à 0.78    | > à 22%   | Mauvaise         |

### 2.3.1 Relation entre la compacité et les propriétés du béton :

La compacité du béton est le critère essentiel de la qualité du béton. Féret a établi, à la suite de nombreuses études expérimentales, que le volume absolu de matière solide contenu dans un mélange unitaire donné était l'élément principal dont dépendait la résistance à la compression du béton

$$R_c = k. \left( \frac{V_c}{V_c + V_e + V_v} \right)^2 \quad [4]$$

**Avec k constante qui est fonction de la qualité du liant**

$V_c$  volume absolu du ciment

$V_e$  volume total d'eau incluse pour la confection

$V_v$  volume d'eau ou vide existant après confection.

En posant  $V_e + V_v = 1 - C$

$C$  étant la compacité, c'est-à-dire le volume absolu de matière, on voit que la résistance en compression pour un dosage donné de ciment a pour valeur :

$$R_c = k. \left( \frac{V_c}{V_c + 1 - C} \right)^2$$

$$R_c = k\lambda^2$$

Avec  $\lambda$  degré de concentration.

La résistance est donc étroitement liée à la compacité.

L'importance du facteur de compacité est essentielle, non seulement pour la recherche de la meilleure résistance mécanique du béton, mais aussi pour plusieurs autres propriétés du béton

- Le module d'élasticité du béton : la rigidité du béton croît avec la compacité ;
- La durabilité du béton : la compacité est un facteur essentiel qui s'oppose à l'altération du béton laquelle peut être engendrée par les intempéries ou par l'action des eaux agressives.

Une forte compacité est de nature à éviter ou réduire la pénétration de l'eau dans les pores du béton qui peut entraîner sa désagrégation par le gel et favoriser la corrosion des armatures.

#### 2.4 Perméabilité :

La perméabilité du béton à un fluide (eau, air etc.) est une propriété très importante en pratique pour les éléments en béton et pour leur durabilité.

L'étude et la mesure expérimentale de cette caractéristique présentent plusieurs difficultés. Dans un milieu poreux, la perméabilité est influencée par l'importance des espaces, des vides, des discontinuités (fissures) de la structure et du réseau de pores.

Dans un matériau artificiel hétérogène comme le béton (granulat, liant hydraulique, vide d'air), le milieu poreux est très complexe : forme, dimensions des vides, interconnexion. Globalement, ce milieu poreux est caractérisé par sa porosité mais la dimension des pores et des vides joue un rôle très important vis-à-vis de la circulation et de la rétention des liquides.

Cette notion du volume des vides égal au volume d'eau d'imprégnation est alors conventionnelle, elle dépend des vides accessibles.

Par ailleurs, la notion de perméabilité d'un milieu poreux par rapport à un fluide ne peut avoir un sens physique précis que si tous les pores du milieu sont remplis par le fluide.

Il résulte de ces remarques générales que la notion de perméabilité pour des matériaux poreux comme le béton ne repose pas sur des bases physiques précises : c'est une notion essentiellement empirique.

#### 2.5 Durabilité :

La durabilité d'un matériau traduit la capacité de ce matériau à pouvoir supporter les conditions auxquelles il est exposé dans le temps et dans l'espace. Dans ce sens, le matériau béton présente quelques avantages par comparaison aux autres matériaux usuels tels que l'acier ou le bois.

Cependant, les dégradations de ce matériau dans différents types de structures et sous des environnements variés montrent clairement que le béton n'est pas synonyme de permanence dans la durée. Les problèmes de détérioration de ce matériau dans les structures sont liés à des facteurs tels que la fissuration, la

mauvaise qualité du béton ou encore la mauvaise qualité d'exécution, même si les deux derniers facteurs induisent forcément le premier. La fissuration apparaît donc comme un inconvénient majeur du béton dans le sens où elle représente des voies de passage à tous les corps étrangers nuisibles, liquides ou gazeux, vers l'intérieur du béton. Suit par la suite le processus de détérioration du béton lui-même ou des aciers noyés à l'intérieur qui corrodent. Le dépôt de corrosion, à son tour, fait éclater le béton qui enveloppe les aciers et l'on assiste à un processus continu de dégradation du matériau béton armé et donc de la structure. Ainsi

donc Les ouvrages usuels, réalisés en bétons courants, tels que les plates-formes off-shore en milieu marin, les autoroutes sollicitées par un trafic intense, les viaducs soumis à l'action de gel et des sels de déverglaçage, résistent au fil des années aux multiples agressions physico-chimiques auxquelles ils sont soumis. Néanmoins, il arrive que par suite de causes accidentelles, des défauts de conception ou de mise en oeuvre soient à l'origine de désordres. La notion de durabilité est donc indissociable de celle de qualité à tous les niveaux et, en particulier, de celle du matériau béton mais ne concerne pas uniquement le béton mais aussi ses composants. L'objectif visé à travers une construction durable est que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile.

La durabilité du béton est aussi dépendante des conditions de mise en oeuvre et que toute négligence à ce niveau peut remettre en cause des matériaux de bonne qualité.

Puisque la fissuration peut compromettre la durabilité du béton en permettant aux agents agressifs d'y pénétrer, il est pertinent de passer brièvement en revue les différents types de fissuration.

### 2.5.1 La Fissuration :

La fissuration des ouvrages en béton correspond généralement à une altération des propriétés mécaniques, ou physiques du matériau. La connaissance exacte de ce type de désordre doit permettre en outre d'en comprendre la cause et de définir le type de réparation à envisager. Les fissures peuvent survenir dans le béton non durci, le béton en phase de durcissement ou le béton durci.

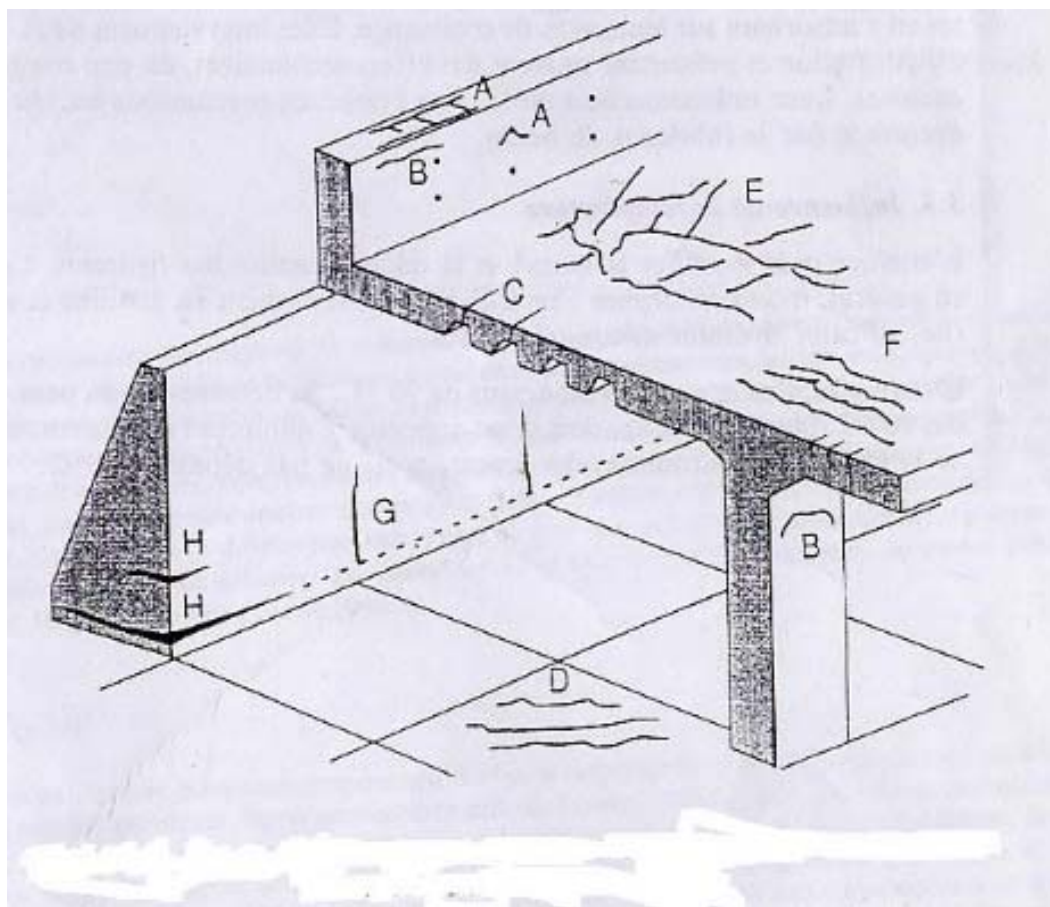
### 2.5.1.1 Classification des types de fissures :

Puisque la fissuration peut compromettre la durabilité du béton en permettant aux agents agressifs d'y pénétrer, il est pertinent de passer brièvement en revue les différents types de fissuration.

On peut classer la fissuration du béton en deux catégories [14] :

- les fissures causées par les charges externes appliquées à la structure
- les fissures causées par le retrait et celles causées par les effets thermiques

La figure 2.4 ci-dessous nous montre un exemple d'identification de l'emplacement de différents types de fissures sur un ouvrage en béton .



**Figure 2.4 Emplacement des différents types de fissures [15]**

A, B, C : fissures par ressuage ou par tassement du béton frais.

D, E, F : fissures par retrait plastique.

G, H : fissures par retrait thermique après prise ou par auto-dessiccation

### 2.5.1.2 Causes d'apparition des fissures sur le béton :

Plusieurs facteurs , ou leur combinaison , peuvent être la cause de la fissuration , le tableau 2.3 nous résume les différentes causes les périodes d'apparition des fissures

**Tableau 2.3: Tableau résumant les différentes causes et périodes d'apparition des fissures**

| Causes |  | Période d'apparition                |                                   |                                   |
|--------|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1      | Tassement du béton frais                       | quelques heures                     |                                   |                                   |
| 2      | Retrait plastique                              | après le bétonnage                  |                                   |                                   |
| 3      | Déformations imposées                          | Retrait thermique                   | quelques jours après le bétonnage |                                   |
|        |  | Retrait hydrique                    | endogène                          | quelques jours après le bétonnage |
|        |  |                                     | de dessiccation                   | quelques mois ou années           |
|        |  | Tassement des fondations            | selon nature du sol               |                                   |
|        |  | Température, variations climatiques | durant l'utilisation              |                                   |
| 4      | Charges (poids propre, permanentes, variables) | durant l'utilisation                |                                   |                                   |
| 5      | Corrosion de l'armature                        | quelques années                     |                                   |                                   |
| 6      | Réactions chimiques (alcali-granulats)         | après la construction               |                                   |                                   |
| 7      | Gel  | -                                   |                                   |                                   |

Les fissures précoces apparaissant sur le béton frais, immédiatement ou quelques heures seulement après le bétonnage ; cas (1) et (2) du tableau 2.3.

Ces fissures ont des causes générales liées aux variations dimensionnelles du béton:

- Avant la prise c'est le ressuage
- Pendant la prise c'est le retrait plastique
- Après la prise c'est la contraction thermique



- Et l'auto-dessiccation (phénomène important seulement à faible rapport E/C).

Ces causes correspondent à des conditions particulières liées aux conditions de fabrication et de mise en œuvre qui codéterminent la fissuration. Les principales sont :

- Pour le ressuage, les obstacles au tassement
- Pour le retrait plastique, c'est plutôt le vent et les températures élevées.
- Et pour la contraction thermique, l'épaisseur des pièces.

Ces fissures sont d'autant plus préjudiciables à la durabilité qu'elles sont précoces car, se produisant avant que l'armature ne joue pleinement son rôle. Elles sont alors souvent ouvertes.

Les fissures d'origine mécanique apparaissant sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci (quelques mois ou années après la construction) ; ces fissures sont la conséquence de l'apparition de sollicitations excédant la contrainte de déformation du béton ou sa résistance à la traction ; cas (3) et (4) du tableau 2.3.

Les fissures d'origine physico-chimique apparaissant quelques années après la construction, elles sont la conséquence de phénomènes de gonflement dus à des réactions chimiques (corrosion des armatures, réaction alcali-granulats) ou à des effets physiques (gel de l'eau dans les pores du béton) qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement superficiel du béton d'enrobage ; cas (5), (6) et (7) du tableau 2.3.

### 2.5.2 Le vieillissement du béton :

Sans mettre réellement en cause la durabilité, le vieillissement de la surface visible du béton reste un facteur préjudiciable sur le plan esthétique. Il convient de souligner que, comme tous les matériaux, le béton subit un vieillissement qui doit être considéré comme naturel. L'entretien des ouvrages en béton est donc une opération qui doit être prévue, au même titre qu'elle l'est pour les ouvrages dont on souhaite conserver les qualités esthétiques.

### 2.6 Résistance :

La résistance mécanique du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité peuvent être plus importantes. Néanmoins, la résistance mécanique projette une image globale de la qualité d'un béton et elle présente un paramètre majeur et indispensable pour le dimensionnement et la conception des ouvrages.

De ce fait, les propriétés mécaniques du béton ont toujours fait l'objet de multiples études en vue de comprendre la réponse du béton aux actions mécaniques qui lui sont appliquées.

La résistance à la compression est la propriété du béton la plus communément considérée dans le calcul des structures ; cependant pour certaines applications, la résistance à la traction est intéressante comme c'est le cas des bétons d'autoroutes, de dalles flottantes, des efforts de cisaillement et de résistance à la fissuration. Ces deux types de résistance mécaniques (compression-traction) sont intimement liés. Le rapport de ces deux résistances dépend du niveau de résistance global du béton. En d'autres termes, la résistance à la traction  $f_t$ , augmente avec la résistance à la compression  $f_c$ , mais à un taux allant en diminuant avec la maturation du béton .

#### 2.6.1 Résistance à la compression du béton :

La résistance à la compression constitue, dans l'état actuel des connaissances et de la technologie concernant les essais mécaniques, la valeur la plus significative pour caractériser la qualité générale du béton [16].

Un béton est donc essentiellement caractérisé par la contrainte de rupture en compression mesurée, le plus souvent sur des éprouvettes cylindriques dont la hauteur est double du diamètre (norme NF P 18-400) [3].

Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 ( $\phi = 15.96$  cm) dont la section est de  $200\text{cm}^2$  [10]. D'autres dimensions peuvent être employées. On peut citer les 11/22, les 20/40, les 25/50, les 30/60 et les 40/80 pour les éprouvettes cylindriques. Le format de moule cylindrique dépend de la dimension  $D_{\max}$  du granulat :

Le diamètre du moule ou de l'éprouvette cylindrique, ne doit pas être inférieur à 4D [10].

Le tableau 2.4 qui suit résume les dimensions géométriques des moules cylindriques utilisés pour la mesure des résistances du béton.

**Tableau 2.4 : Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes cylindriques [10].**

| Format         | Dimensions de Fabrication (mm) |         | Section (cm <sup>2</sup> ) par un plan |           | D (mm) |
|----------------|--------------------------------|---------|--|-----------|--------|
|                | Diamètre a                     | Hauteur | Orthogonal                             | Diamétral |        |
| Cylindre de 11 | 112.8                          | 220     | 100                                    | 248       | ≤ 25   |
| Cylindre de 16 | 159.6                          | 320     | 200                                    | 511       | ≤ 40   |
| Cylindre de 25 | 252.5                          | 500     | 500                                    | 1262      | ≤ 63   |

D'après une proposition de l'I.S.O (International Standard Organisation) on peut adopter les coefficients ci-après pour relier les résistances trouvées (pour un même béton) sur des éprouvettes de dimensions différentes, x/2x l'éprouvette 16/32 (200cm<sup>2</sup>) étant prise comme base de référence

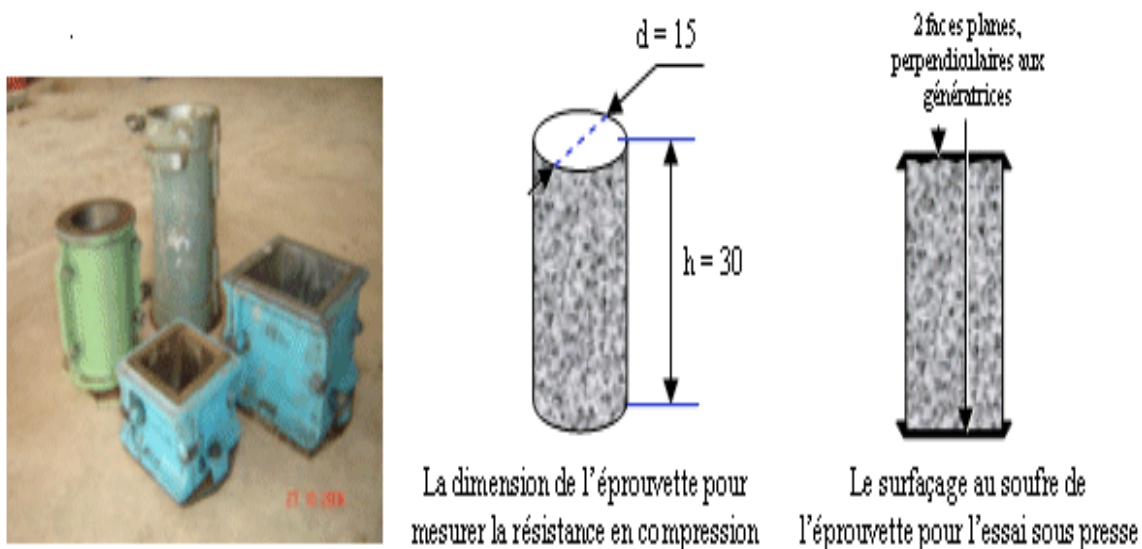
$$f_c \text{ x/2x} = \varphi_{\text{cyl}} \cdot f_c \text{ 16/32} \text{ [3].}$$

Les valeurs du coefficient  $\varphi_{\text{cyl}}$  qui relie les résistances d'un même béton mesurées sur des cylindres différents sont regroupées dans le tableau 2.5 suivant.

**Tableau 2.5 : Coef. Reliants les résistances d'un même béton et de moules différents [10].**

| Cylindre (cm)          |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x/2x                   | 11/22 | 16/32 | 20/40 | 25/50 | 30/60 | 40/80 |
| $\varphi_{\text{cyl}}$ | 1.02  | 1.00  | 0.97  | 0.95  | 0.91  | 0.85  |

On peut aussi utiliser des moules et des éprouvettes prismatiques qui sont constituées de prismes à section carrée de côté  $a$  et de longueur  $L = 4a$  [10] comme le montre la figure 2.5 ci-dessous .



**Figure 2.5 Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression**

Le tableau 2.6 résume les dimensions géométriques de ces moules.

**Tableau 2.6 : Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes prismatiques [10].**

| Prisme de | Dimensions de Fabrication (mm) |                   | Section $A^2$ ( $\text{cm}^2$ ) | Distance Entre appuis Intérieurs $l = 3a$ (mm) | Abouts $\frac{L-l}{2}$ (mm) | D (granulats) |
|-----------|--------------------------------|-------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|---------------|
|           | arête $a$ de la base           | Longueur $L = 4d$ |                                 |  |                             |               |
| 7         | 70.7                           | 282.8             | 50                              | 212.1  | 35.3                        | $\leq 16$     |
| 10        | 100                            | 400               | 100                             | 300  | 50                          | $\leq 25$     |

|    |       |       |     |       |      |        |
|----|-------|-------|-----|-------|------|--------|
| 14 | 141.4 | 565.6 | 200 | 424.2 | 70.7 | ≤ 31.5 |
| 20 | 200   | 800   | 400 | 600   | 100  | ≤ 50   |

Nous pouvons également utiliser des moules et éprouvettes cubiques pour lesquelles nous donnons les dimensions de fabrication au niveau du tableau 2.7.

**Tableau 2.7 : Dimensions de fabrication des moules et éprouvettes cubiques [10].**

| Format cube de | Dimension de fabrication<br>Arête a (min) | Section (cm <sup>2</sup> ) | D (mm) |
|----------------|---|----------------------------|--------|
| 10             | 100                                       | 100                        | ≤ 25   |
| 14             | 141.4                                     | 200                        | ≤ 31.5 |
| 20             | 200                                       | 400                        | ≤ 50   |
| 30             | 300                                       | 900                        | ≤ 80   |

Toujours d'après l' I.S.O on peut relier les résistances trouvées (pour un même béton) sur des éprouvettes de dimensions différentes, avec le cube de 14 cm (200 cm<sup>2</sup>) étant pris comme base de référence.

$$f_{cx} = (\varphi_{ub}.f_c 14 [10]).$$

Les valeurs du coefficient  $\varphi_{cube}$  sont regroupées dans le tableau 2.8.

**Tableau 2.8 : Coef. Reliants les résistances d'un même béton et de moules différents [10].**

| Cube (cm)        | 10   | 14   | 20   | 25   | 30   |
|------------------|------|------|------|------|------|
| $\varphi_{cube}$ | 1.10 | 1.00 | 0.95 | 0.92 | 0.90 |

Concernant la contrainte de rupture en compression, on réalise en général plusieurs éprouvettes pour contrôler la production d'un béton donné et l'on observe une certaine dispersion entre les valeurs trouvées pour chacune d'elles. C'est pourquoi on définit comme suit la résistance dite caractéristique qui constitue la base contractuelle concernant la résistance d'un béton donné (avec les notations des règles BAEL) : « La résistance caractéristique  $f_{ck}$  applicable à un lot de béton est celle pour laquelle on ne risque pas de trouver plus de  $p\%$  de valeurs inférieures à cette valeur  $f_{ck}$  ; de plus aucune valeur ne doit être inférieure à une valeur minimale  $f_{cmin}$  fixée.

Le pourcentage maximal  $p$  de valeurs inférieures à  $f_{ck}$  est ainsi choisi :

$$\begin{array}{lll} f_{ck} < 30 & p = 10\% & (0.10) \\ f_{ck} \geq 30 & P = 5\% & (0.05) \end{array}$$

### 2.6.2 Résistance à la traction du béton :

Bien que le béton ne soit pas normalement conçu pour résister à des efforts de traction directe, la connaissance de cette dernière permet d'estimer la charge qui entraînera la fissuration. L'absence de fissuration est extrêmement importante pour assurer la durabilité d'une structure en béton et, dans de nombreux cas, pour éviter la corrosion des armatures.

Des problèmes de fissuration apparaissent à la suite d'un effort de traction dû à des charges appliquées, mais aussi causé par le retrait gêné et par les gradients thermiques. Une évaluation de la résistance à la traction du béton aide à appréhender le comportement du béton armé subissant des variations dimensionnelles.

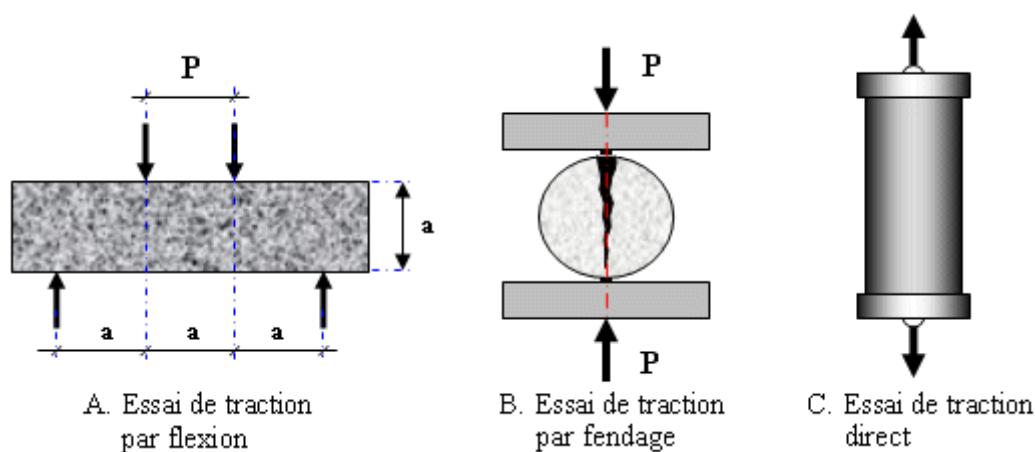
Il est également intéressant de connaître la résistance à la traction du béton dans les structures de masse, telles que les barrages, les chaussées d'autoroute ou les pistes d'aéroport, car souvent soumises à des retraits et à des effets de températures élevés .

La résistance à la traction du béton est gouvernée par les trois paramètres suivants :

- La résistance des gros granulats, c'est-à-dire la capacité des granulats à résister aux contraintes de traction qui lui sont appliquées.
- L'adhérence entre le granulat et la pâte de ciment durcie.
- La forme des granulats ; les formes allongées et plate, ne résistent pas à la fissuration.

### 2.6.2.1 Essais de résistance à la traction :

Trois types d'essai permettent de mesurer la résistance à la traction d'un béton : (Figure 2.6 ) .



**Figure 2.6 Différents essais sur les résistances d'un béton en traction**

- L'essai de traction directe : L'essai de traction directe est l'essai le plus représentatif du phénomène de la traction mais, il est entre autre, très délicat à réaliser. L'application directe d'un effort de traction pure, en dehors de toute excentricité, est très difficile car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite

- L'essai de flexion : Dans cet essai, un prisme de béton non armé, élancement 4, reposant sur deux appuis, est soumis à un effort de flexion ; soit par application :

- D'une charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre). La charge étant placée au centre du prisme, l'essai est dit « flexion à trois points » .

- De deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges). Les points d'applications de la charge étant placés aux tiers de la portée, l'essai est dit « flexion quatre » .

- L'essais de fendage : Lors de l'essai de fendage, le cylindre du béton est placé à l'horizontale entre les plateaux de la presse et la charge est augmentée jusqu'à la rupture par traction indirecte, qui apparaît sous forme de fendage le long du diamètre vertical du cylindre

### 2.6.3 Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction :

La résistance du béton est également définie par la résistance caractéristique à la traction  $f_{tj}$  à j jours qui est conventionnellement introduite par la relation :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad [3]$$

Dans cette relation,  $f_{tj}$  et  $f_{cj}$  sont exprimés en MPa et elle n'est valable que si :

$f_{cj} \leq 60\text{MPa}$ . Cela donne:

|             |         |         |         |         |         |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>fc28</b> | 16MPa   | 20MPa   | 22MPa   | 25MPa   | 30MPa   |
| <b>ft28</b> | 1.56MPa | 1.80MPa | 1.92MPa | 2.10MPa | 2.30MPa |



## 2.7 Déformation :

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en oeuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en oeuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

### 2.7.1. Le retrait :

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

| Causes et constatation  | Remèdes   |
|---|---|
| Le retrait avant-prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse. | Ils s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par :<br>- la protection contre la dessiccation.<br>- l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure. |
| Après la prise, il se produit :<br>- Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après   | Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de   |

|   |   |
|---|---|
| dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.  | durcissement plus rapide.   |
| - Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage. | Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons). |

Estimation du retrait :  $\Delta l = 3 \text{ ‰} \times L$ .

$\Delta l$  : est le raccourcissement.

L : est la longueur de l'élément.

Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 m, le retrait est de l'ordre de:  $3 \text{ ‰} \times 15000 \text{ cm} = 0,45 \text{ cm}$ .

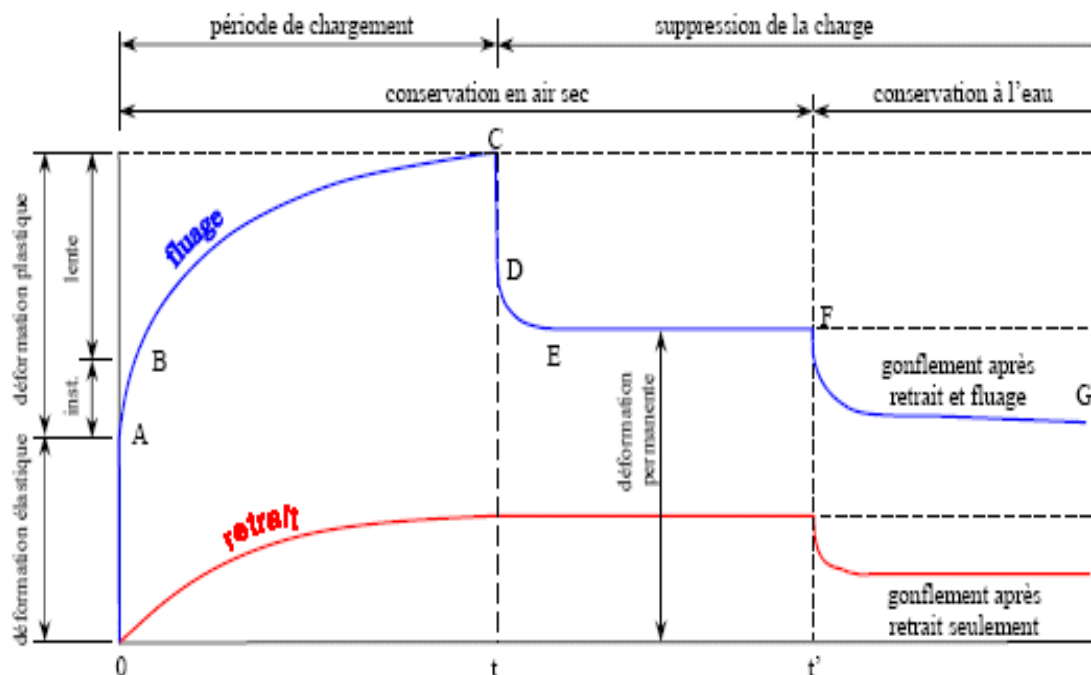
### 2.7.2. La dilatation :

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à  $1 \times 10^{-5}$ , pour une variation de  $\pm 20 \text{ °C}$  on obtient:  $\Delta l = \pm 2 \text{ ‰} \times \text{longueur}$ .

Pour chaînage en B.A. de 20 m de longueur et un écart de température de  $20 \text{ °C}$ , on a une dilatation de :  $2 \text{ ‰} \times 2000 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}$ .

### 2.7.3. Le fluage :

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau VISCO-ELASTIQUE. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le **fluage** voir (Figure 2.7 ) ci-dessous



**Figure 2. 7: Chargement et déchargement. (Déformation réactive de retour).**

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Estimation de la déformation de fluage:

$\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰ longueur.}$

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

#### 2.7.4. Élasticité du béton

Le module d'élasticité E est défini par le rapport:

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courant, on admet:

$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$  (module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec  $f_{cj}$  = résistance caractéristique à « j » jours.  $E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$  (module de déformation différée) avec  $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$ . Il s'ensuit que :

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij}.$$

Notes :  $E_{ij}$ ,  $E_{vj}$ ,  $f_{c28}$ ,  $f_{cj}$  sont exprimés en MPa.

Le module d'élasticité de l'acier est de l'ordre de :  $200\,000 \text{ N/mm}^2$ , soit  $2\,000\,000 \text{ daN/cm}^2$ .

### 2.7.5. Effet «Poisson»

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale .

Le coefficient « Poisson » est le rapport :

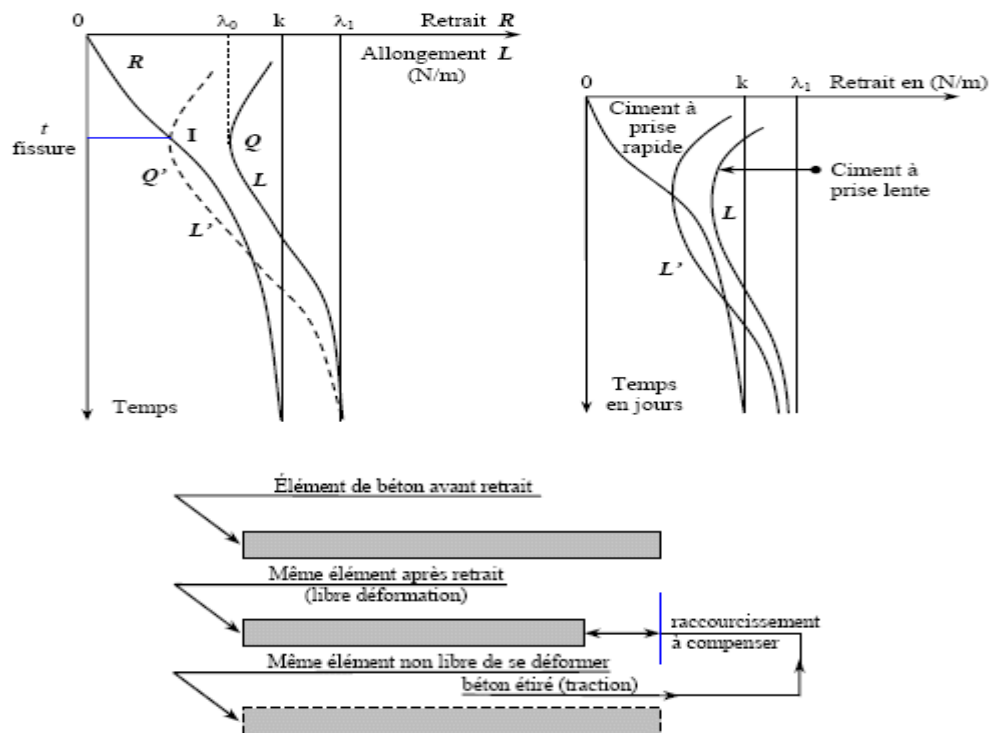
$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad \text{dont la valeur varie entre } 0,15 \text{ et } 0,30$$

### 2.7.6. Mécanisme de la fissuration

Deux bétons ayant un même retrait final peuvent se comporter très différemment du point de vue de la fissuration (figure. 2.8) :

- le béton correspondant à L ne se fissure pas ;
- le béton correspondant à L' se fissure en I au temps t.

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



**Figure 2.8 : Le retrait du béton est pris en compte dans la conception des ouvrages (Exemple: joints de retrait des dallages et planchers).**

# **CHAPITRE 3**

## **PARAMETRES INFLUANTS SUR LES QUALITES DU BETON**

## CHAPITRE 3

### PARAMETRES INFLUANTS SUR LES QUALITES DU BETON

#### 3.1 Généralités :

La qualité du béton est bien entendu fonction de celle de ses constituants : ciment, granulats, eau. L'idée de base des recherches entreprises depuis fort longtemps est d'effectuer une sélection suffisante de composants pour obtenir la résistance souhaitée, sans pour autant renchérir de façon prohibitive le coût du matériau.

La résistance mécanique est une qualité fondamentale d'un béton. En effet, le béton est en général employé comme matériau porteur ; le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique. Cette dernière est fonction de plusieurs paramètres dont les principaux sont :

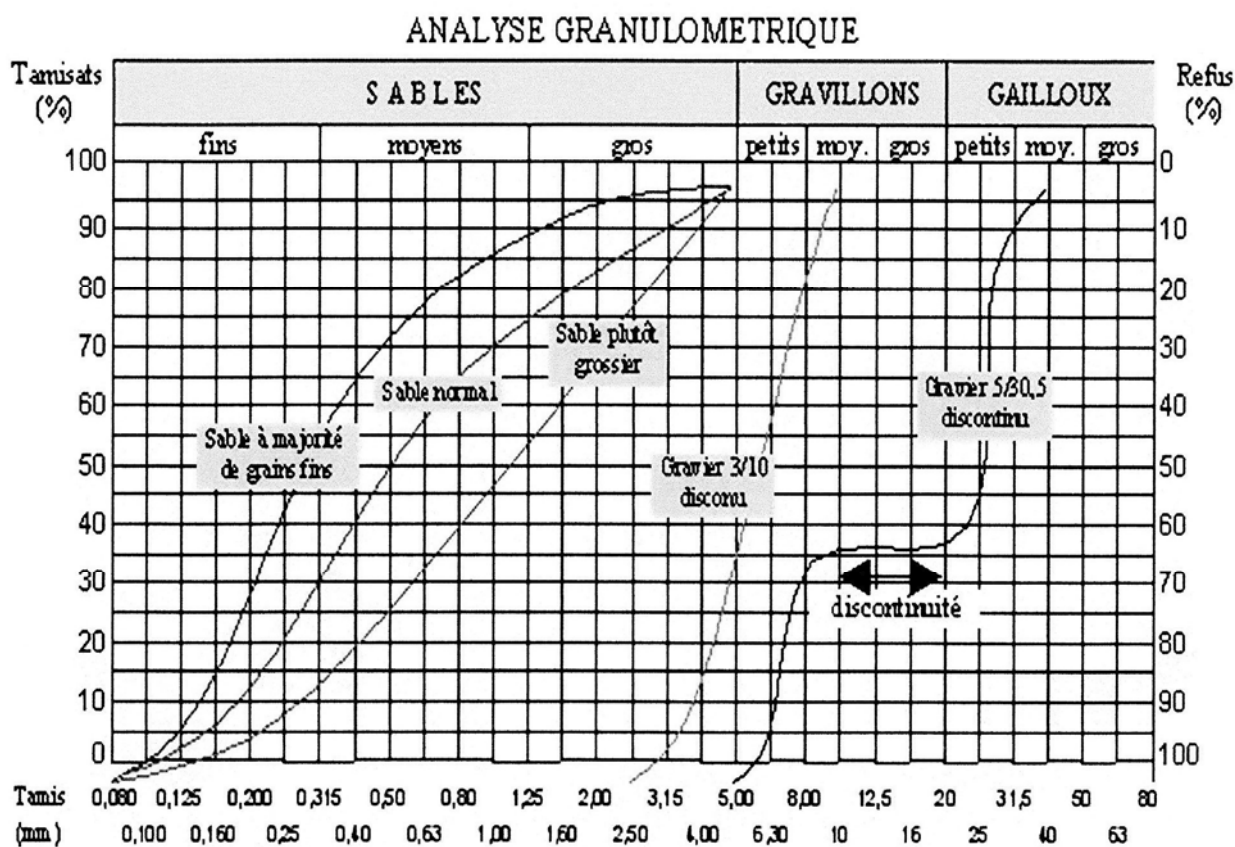
- Le choix de la granularité
- Le dosage en ciment
- La quantité d'eau de gâchage
- L'ajout d'adjuvants divers
- Les moyens de fabrication, de transport et de mise place
- La cure du béton
- Hygrométrie et température .

#### 3.2 Le choix de la granularité :

Les granulats sont constitués de grains minéraux (naturels ou artificiels) dont les caractéristiques influent sur la qualité des bétons. Leur forme et leurs dimensions (comprises entre 0 et 125 mm) jouent un rôle important pour la mise en oeuvre et la compacité du béton . Leurs caractéristiques sont définies dans la norme XP P 18-540 « Granulats. Définitions, conformité, spécifications ». Le choix des granulats est un facteur important de la composition du béton puisqu'ils représentent les deux tiers du volume de béton. Afin d'obtenir le granulat recherché, il est impératif de connaître sa granulométrie en traçant la courbe granulométrique comme le montre la figure 3.1 ci-dessous .

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Le ciment devra combler les vides entre les grains pour obtenir un béton de compacité maximale. Or le ciment est le constituant le plus

cher dans la composition de béton. Il donc est souhaitable de laisser le moins de vides entre les grains. Pour cela on recherchera un dosage optimum de gravier, sable, ciment.



**Figure 3.1 La courbe granulométrique des différents sables et graviers**

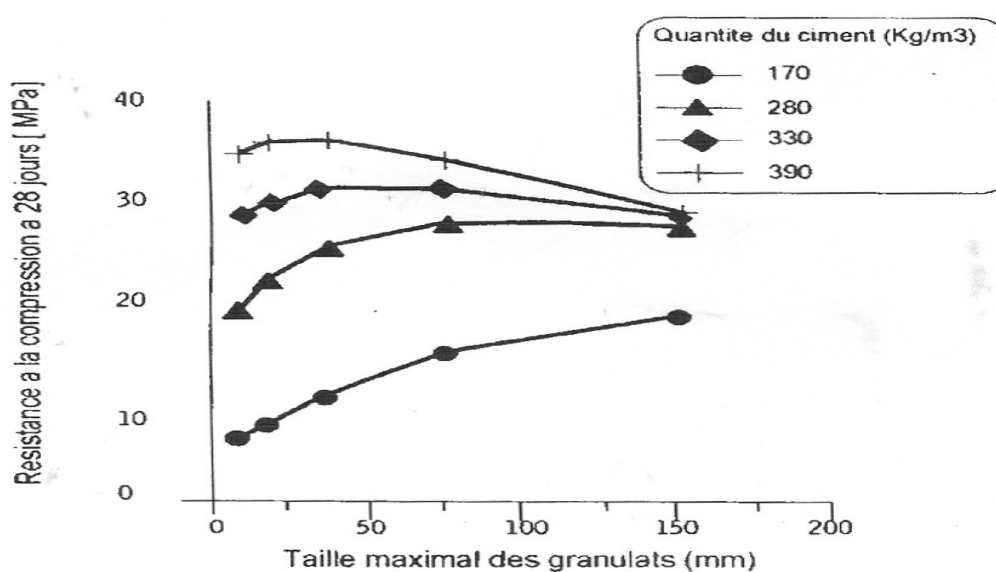
### 3.2.1 Influence du Dimension maximale D des granulates sur la résistance du béton :

La résistance globale de l'association granulat-liant est surtout fonction de la qualité des gros granulates, d'où l'intérêt d'utiliser des granulates de qualité et de dimensions maximales compatible avec une bonne facilité de mise en oeuvre tenant compte de l'épaisseur de la pièce, de la densité du ferrailage, de l'espacement des armatures, de la complexité du coffrage, et la qualité des granulates dont dépend la résistance globale du béton est liée à la propreté, à la dureté et à la forme des grains.

La résistance globale du béton dépend également de la résistance propre des grains d'un granulat. L'influence est notable surtout en compression. Mais d'un autre côté l'adhérence peut même être plus importante que la résistance et la dureté des grains d'un gravier lui-même.

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

La figure 3.2 ci-dessous montre l'influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance à la compression du béton à 28 jours [4]

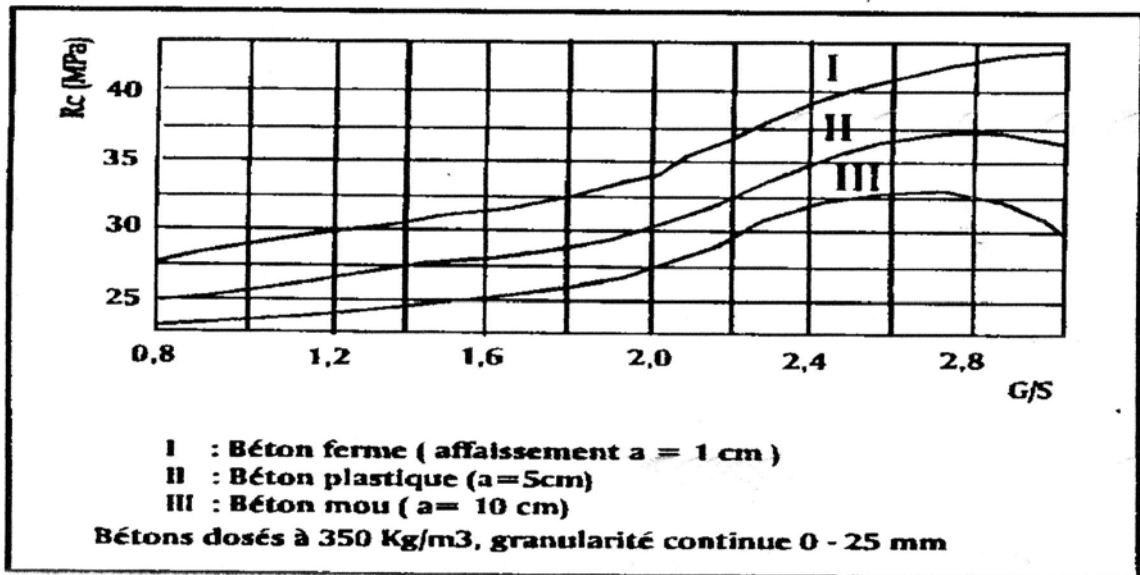


**Figure 3.2 : Influence du diamètre maximale des granulats sur la résistance en compression du béton à 28 jours d'âge [ 4 ] .**

### 3.2.2 Influence du rapport gravier sable ( G/S ) sur la résistance du béton :

La résistance d'un béton dépend de la composition granulométrique du mélange ; le rapport G/S a une influence notable. La figure 3.3 ci-dessous illustre l'influence du rapport G/S sur la résistance en compression du béton.





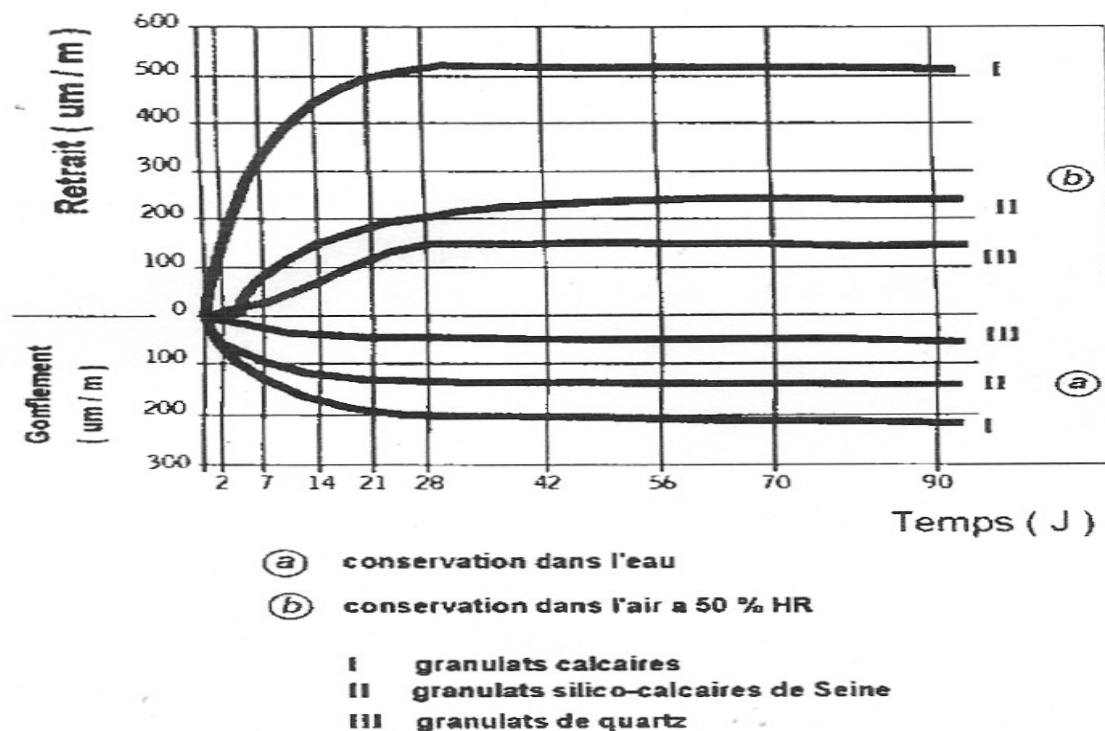
**Figure 3.3 : Résistance à la compression en fonction du rapport gravier sable ( G/S ) [ 4 ] .**

On peut remarquer sur cette même figure que pour les rapports les plus courants de G/S (compris entre 1.2 et 2.0) l'influence est relativement faible. A long terme, la résistance du liant durci est moindre que celle des granulats.

La résistance augmente plus sensiblement pour des valeurs élevées de G/S surtout pour les bétons fermes ; mais pour des raisons d'ouvrabilité il ne convient pas de dépasser  $G/S = 2.0$  à  $2.2$  pour les bétons courants sauf si des précautions particulières sont prises lors de la mise en oeuvre. La tendance actuelle est de ne pas dépasser, en général des valeurs de G/S de 1.5 à 1.6 ; c'est un léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité [10].

### 3.2.3 Influence de la nature des granulats :

Les granulats constitués de roches de module d'élasticité élevé conduisent à des retraits plus faibles. Sur la figure 3.4 est représentée l'influence de la nature minéralogique des granulats sur le retrait et le gonflement. On constate que le retrait est plus important pour un béton confectionné de granulats calcaires relativement tendre par rapport à un béton utilisant du quartz. Les essais ont montré que l'augmentation du module d'élasticité des granulats dans un rapport de 1 à 8 entraîne une réduction retrait du béton dans un rapport de 1 à 3 [4] .



**Figure 3.4 Retrait et gonflement des bétons confectionnés avec différents granulats [ 4 ] .**

### 3.2.4 Influence des états de surface des granulats :

Dans le béton, les grains d'un granulat sont liés par la pâte de ciment qui constitue une matrice pour ces derniers. L'adhérence pâte-granulats est alors un facteur important du point de vue résistances mécaniques du béton. On conçoit donc que l'état de surface des granulats, surtout du sable, est un paramètre qui influence beaucoup sur les performances physico-chimiques des bétons. Par ailleurs l'état de surface d'un granulat n'influe pas uniquement sur l'adhérence, mais également sur l'ouvrabilité du béton.

Du fait de l'impossibilité de la caractérisation précise de l'état de surface des granulats, on ne peut évaluer l'influence de la forme, de l'angularité et de la rugosité que par des tendances estimées par l'observation de la mise en œuvre du béton et des surfaces de ruptures des éprouvettes d'essais mécaniques. Ces tendances qualitatives sont données au tableau 3.1 [16].

**Tableau 3.1 : Influence qualitative des paramètres d'état de surface sur la facilité de mise en œuvre du béton et l'adhérence pâte-granulats[16].**

| <b>Caractéristique du granulat</b>          | <b>Mise en oeuvre</b> | <b>Adhérence</b> |
|---|-----------------------|------------------|
| Mal propreté du granulat                    | Défavorable           | Très défavorable |
| Granulat roulé (angularité faible ou nulle) | Favorable             | Défavorable      |
| Granulat concassé (angularité maximale)     | Défavorable           | Favorable        |
| Forme mauvaise (granulats roulés)           | —                     | Défavorable      |
| Forme mauvaise<br>(granulats concassés)     | Défavorable           | Très défavorable |

### Le dosage en ciment :

Le choix du ciment est fonction de la destination du béton. Le choix du liant porte principalement sur les éléments suivants :

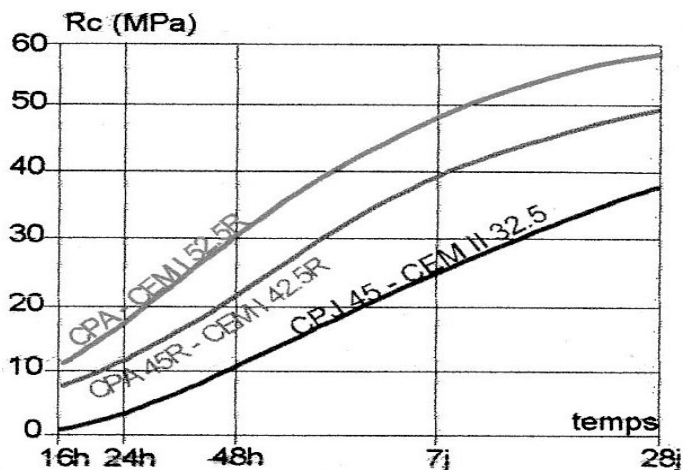
- la nature, la teinte,
- les performances mécaniques,
- les délais de prise,
- la composition chimique,
- la chaleur d'hydratation...

La classe et la nature du ciment doivent convenir tant du point de vue de la résistance mécanique escomptée que de la vitesse de durcissement, de la résistance aux attaques chimiques, du retrait, du fluage, etc. Il ne faut pas oublier que le béton est attaqué par de nombreux agents chimiques qui agissent en général sur le liant à savoir : les sulfates, les sels de magnésie, les eaux de mer, les eaux organiques et les eaux très pures. Certains ciments (par exemple CLK : ciment de laitier au clinker) sont mieux adaptées que d'autres pour résister à ces attaques [3].

### 3.2.5 Influence de la nature du ciment :

Le ciment est l'élément qui a la plus grande influence sur la résistance du béton. Il intervient principalement par la composition chimique du clinker, les ajouts éventuels (laitier, cendres volantes pouzzolanes) et la finesse.

La figure 3.5 ci dessous montre l'évolution des résistances en compression d'un béton gâché avec trois ciments de nature différente : un CPA HPR, un CPA 45R et un CPJ 45 [4].



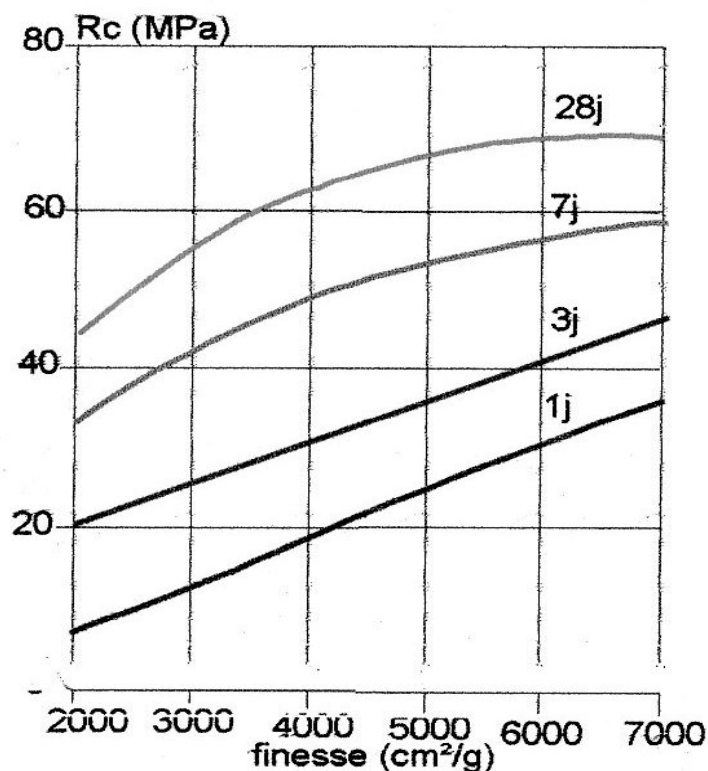
Dosage en ciment 350Kg/m<sup>3</sup>, affaissement 6cm , convection à 20°C et 95% d'humidité relative

**Figure 3.5 : Influence de la nature du ciment sur l'évolution des résistances en compression  $R_c$  .**

### 3.2.6 Influence de la finesse de mouture :

Pratiquement les résistances du béton croissent linéairement aux jeunes âges en fonction de la finesse de mouture du liant et ce jusqu'à 7 jours. Par la suite l'influence de la finesse devient relativement moins importante [4].

La figure 3.6 montre l'évolution de la résistance en compression du béton en fonction de la finesse du ciment.



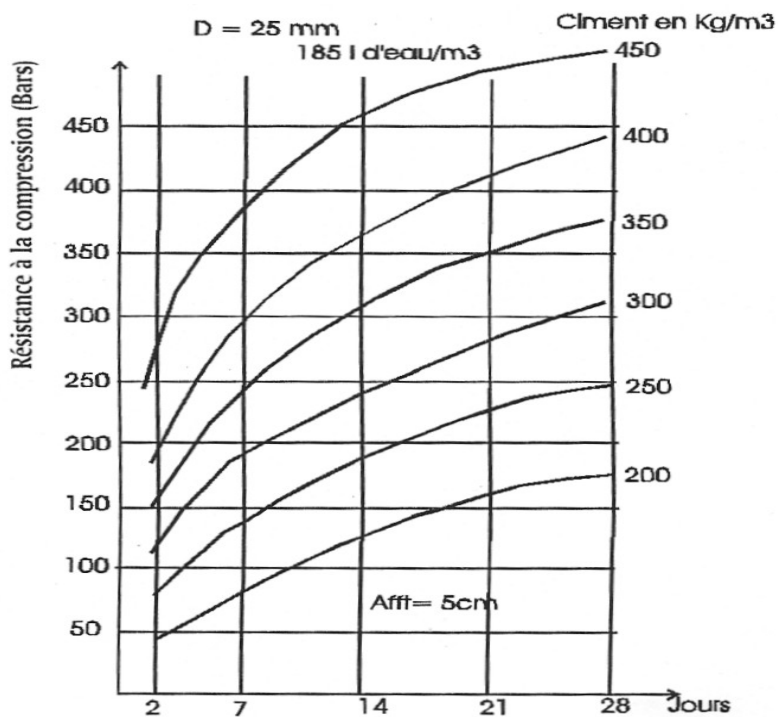
**Résistance en compression d'un béton en fonction de la finesse de mouture**

**Figure 3.6 L'évolution de la résistance en compression du béton en fonction de la finesse du ciment**

### 3.2.7 influence du dosage du ciment :

La figure 3.7 ci-dessous nous montre l'évolution de la résistance en compression d'un béton d'affaissement : 5 cm en fonction des différents dosages en

ciment de 200Kg / m<sup>3</sup> à 450 Kg / m<sup>3</sup> , en remarque l'importance du dosage en ciment puisqu'à 28 jours la résistance à la compression peut variée de 17 Mpa à 55 Mpa selon le dosage ,comme on peut remarquer que la différence est importante à partir du 14 jours d'écoulement du béton .



**Figure 3.7 Courbes de résistance à la compression jusqu'à 28 jours de béton dosés de 200 à 450 Kg/m<sup>3</sup> [ 7 ]**

Les retraits du mortier et du béton augmentent avec le dosage en ciment. Le tableau 3-2 donne quelques valeurs de retrait en fonction du dosage en ciment. Ces valeurs ont été obtenues sur des bétons conservés durant un an .

**Tableau 3.2 : Influence du dosage en ciment sur le retrait du béton [4].**

| Dosage en ciment<br>Kg/m <sup>3</sup> | Retrait du béton durci<br>µm/m |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| 250                                   | 250                            |
| 350                                   | 350                            |

|     |     |
|-----|-----|
| 450 | 400 |
|-----|-----|

Notons en fin que dans un climat chaud , tel que le notre, il est recommandé d'utiliser des ciments à faible chaleur d'hydratation [17].

### 3.3 Dosage en eau :

Le role de l'eau est prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci , l'eau donne au béton sa maniabilité , d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains , d'autre part par la cohésion due à la pate provoquée par l'association des grains fins ( ciment fines ) avec elle .

L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton , rappelons qu'un ciment portland demande environ 25% de son poids en eau pour s'hydrater complètement ( sous réserve des problèmes de floc et d'expansion ) , toute variation de la quantité d'eau entraine des modifications de la vitesse du durcissement et des performances mécanique du béton .

Le dosage en eau ne peut pas etre augmenté au dela d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entrainer des inconvénients .

Le dosage en eau donc doit etre limité au juste nécessaire à l'hydratation du liant et aux exigences de l'ouvrabilité .

#### 3.3.1 Influence du rapport E/C :

##### 3.4.1.1 Influence du rapport E/C sur la cohésion d'un béton :

Il existe, pour un béton donné, une teneur en eau telle que la cohésion soit maximale comme il est montré sur la figure 3-8. En effet pour une faible teneur en eau, l'attraction capillaire peut être importante. Généralement, pour des bétons classiques, on se situe dans la partie descendante de la courbe [12].

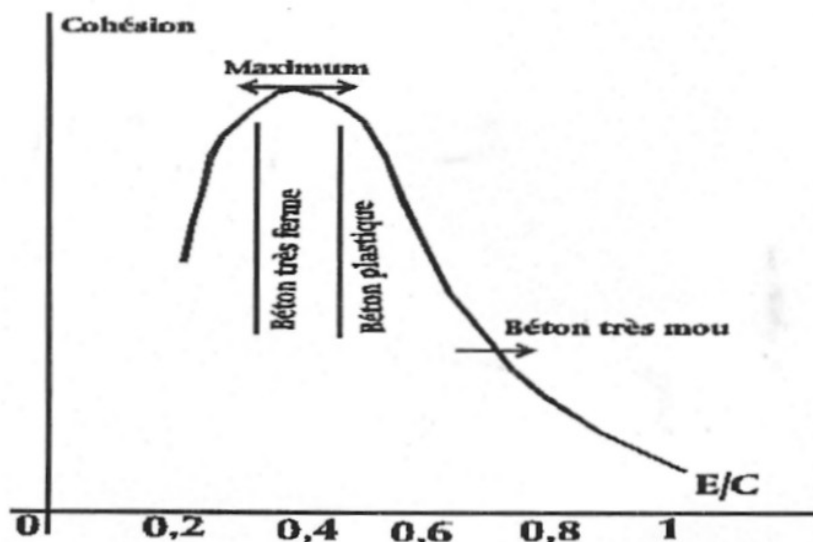


Figure 3-8 Influence de la teneur en eau sur la cohésion [ 12 ] .

#### 3.4.1.2 Influence du rapport E/C sur l'ouvrabilité du béton :

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides. Au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent [10].

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié à ses propriétés mécaniques et sa durabilité. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C qui représente un facteur très influent sur ses différents aspects. Aussi la formulation des bétons ordinaires passait par l'optimisation de ce paramètre.

La figure 3.9 montre l'influence de la teneur en eau et en ciment sur l'affaissement au cône sur un béton .



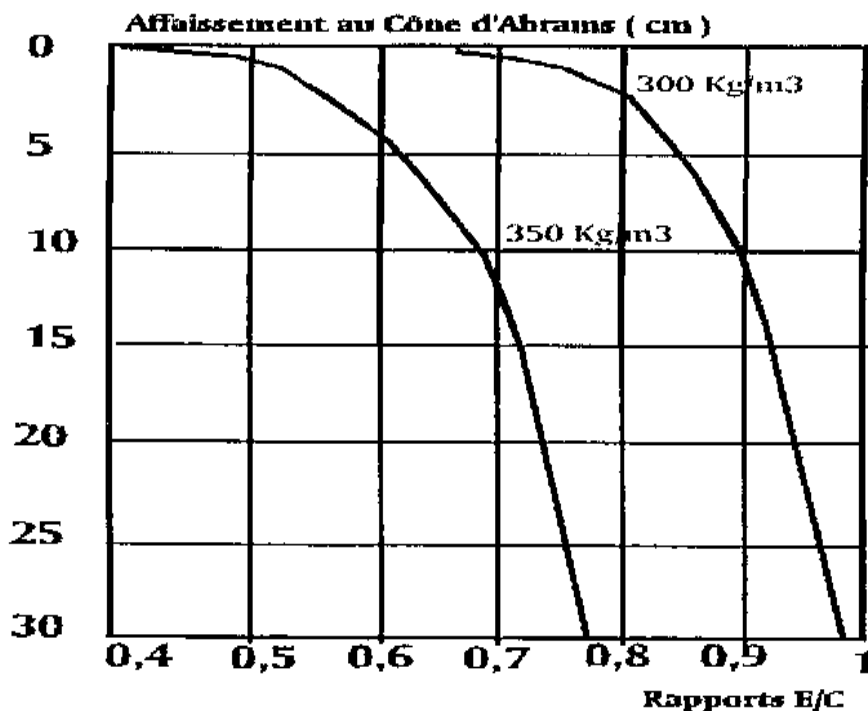


Figure 3-9 Exemple de l'influence de la teneur en eau et en ciment sur l'affaissement au cône [ 12 ]

#### 3.4.1.3 Influence du rapport E/C sur la résistance du béton :

La résistance du béton frais augmente avec le dosage en eau jusqu'à une valeur du dosage en eau dite optimale. Au-delà de cette valeur optimale l'augmentation du dosage en eau a un effet contraire [19].

La figure 3-10 montre la variation de la résistance en compression d'un béton sans adjuvant en fonction du rapport E/C, pour une énergie de mise en oeuvre donnée. On a donc intérêt, pour obtenir une bonne résistance, à mettre peu d'eau, mais les bétons secs sont très difficiles à mettre en oeuvre, et il y a des risques de trouver des vides ou des nids de cailloux dans le béton. Pour cette raison, la plasticité du béton doit être en rapport avec la puissance de vibration dont dispose le chantier.

De plus le manque d'eau peut empêcher l'hydratation complète du ciment, ce qui entraîne alors une baisse des résistances mécaniques finales.

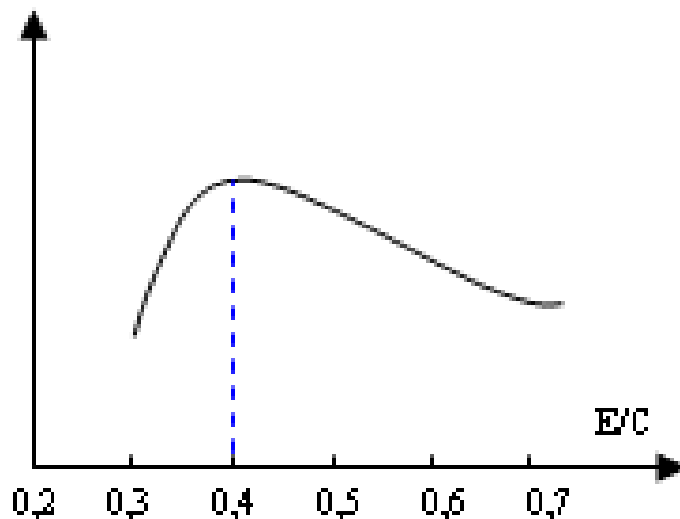


Figure 3.10 : Résistance à la compression du béton en fonction du rapport E/C

La figure 3-11 montre le développement de la contrainte du béton avec différents rapports E/C. Dans ces essais un ciment à forte teneur en aluminium a été utilisé ; les conditions de conservation ont été fixées à 18°C et 95% HR [20].

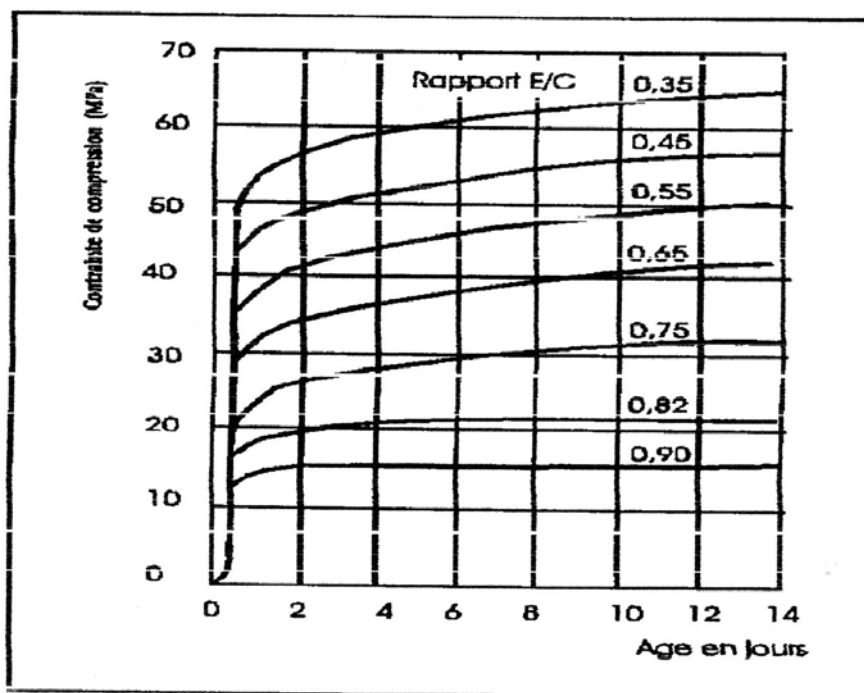
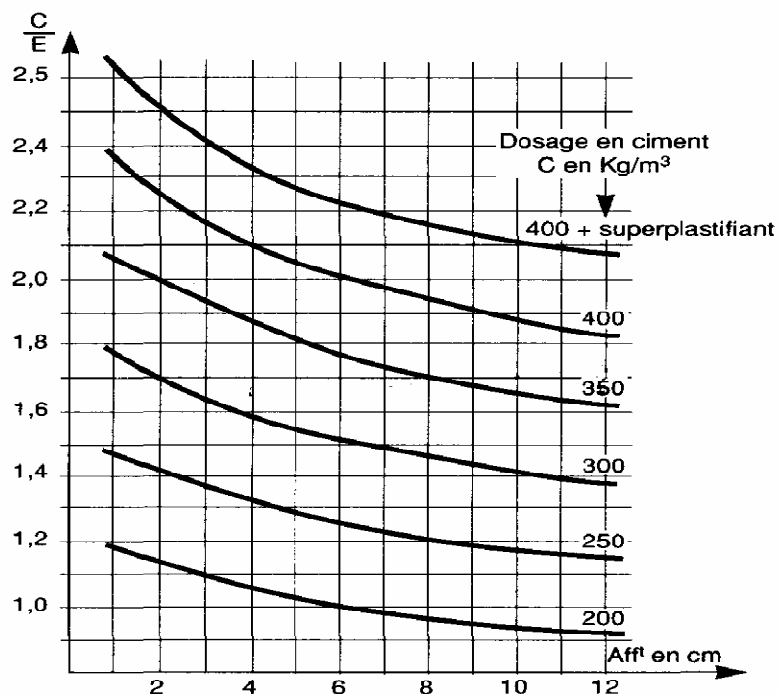


Figure 3.11 : Développement de la contrainte du béton avec différentes teneurs en eau E/C [20].

L'abaque de la figure 3-12 ci dessous permet d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) [10].



**Figure 3.12 : Abaque permettant d'évaluer le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée ( Affaissement au cône)**

### 3.5 L'ajout d'adjuvants divers :

Produit chimique incorporé à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés.

L'incorporation se fait soit avant, pendant le mélange, ou bien au cours d'une opération supplémentaire de malaxage ( voir chapitre 1.5 ) .

Le tableau 3.3 nous résume les rôles et utilisations des principaux adjuvants .

**Tableau 3.3 : Rôles et utilisations des principaux adjuvants [1]**

| Dénomination de l'adjuvant       | <i>Rôle de l'adjuvant</i>  | Utilisations de l'adjuvant (Quelque cas)   |
|----------------------------------|--|--|
| - Fluidifiant (Réducteur d'eau). | - Améliore la plasticité et l'ouvrabilité du béton.  | - Nécessité d'une bonne ouvrabilité.   |
| Plastifiant.                     | - Permet de diminuer la quantité de l'eau de gâchage, donc Améliore la résistance.   | - Préfabrication.<br>- Bétons à hautes résistances.  |
| - Accélérateur.                  | - Améliore la plasticité et l'ouvrabilité du béton.<br>- Diminue le ressuage.  | - Béton pompé.<br>- Béton routier.<br>- Sables manquants de fines.<br>- Béton très ferrillé.                         |
| - Retardateur.                   | - Accélère la prise ou le durcissement du béton ou les deux à la fois.   | - Temps froid et préfabrication.<br>- Réparation et décoffrage rapide.<br>- Scellements et pistes d'aérodrome.       |
| - Retardateur.                   | - Retarde plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment.  | - Coulage par temps chaud.<br>- Transport de béton sur de longues distances.<br>- Reprise de bétonnage.              |
| - Entraîneur d'air (Antigélif).  | - Améliore la plasticité et l'ouvrabilité du béton ainsi que sa résistance au gel .  | - Ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.<br>- Travaux maritimes.<br>- Routes, Barrages et ponts. |
| - Antigélif.                     | - Evite le gel du béton frais.   | - Bétonnage par temps très froid (jusqu'à - 10 °C).  |
| Hydrofuge.                       | - Améliore l'étanchéité du béton<br>- Empêche la pénétration de l'eau provenant de l'humidité du sol.  | - Enduits et chapes étanches.<br>- Citernes - Réservoirs - Piscines.<br>- Travaux souterrains et maritimes.          |
| - Produit de cure.               | - S'étend par pulvérisation et crée sur les surfaces exposées aux agents atmosphériques, un film s'opposant à l'évaporation de l'eau du béton, lui permettant un bon durcissement. | - Tous bétons pour lesquels l'évaporation peut porter préjudice.   |

### 3.5.1 Influence des adjuvants ( fluidifiants , superplastifiants ) sur l'ouvrabilité du béton :

#### 3.5.1.1 Adjuvants fluidifiants :

La figure 3-13 montre clairement l'apport du fluidifiant sur l'ouvrabilité d'un béton routier pour lequel l'affaissement au cône croit de 5 cm à 20 cm après 8 minutes de malaxage en toupie [21].

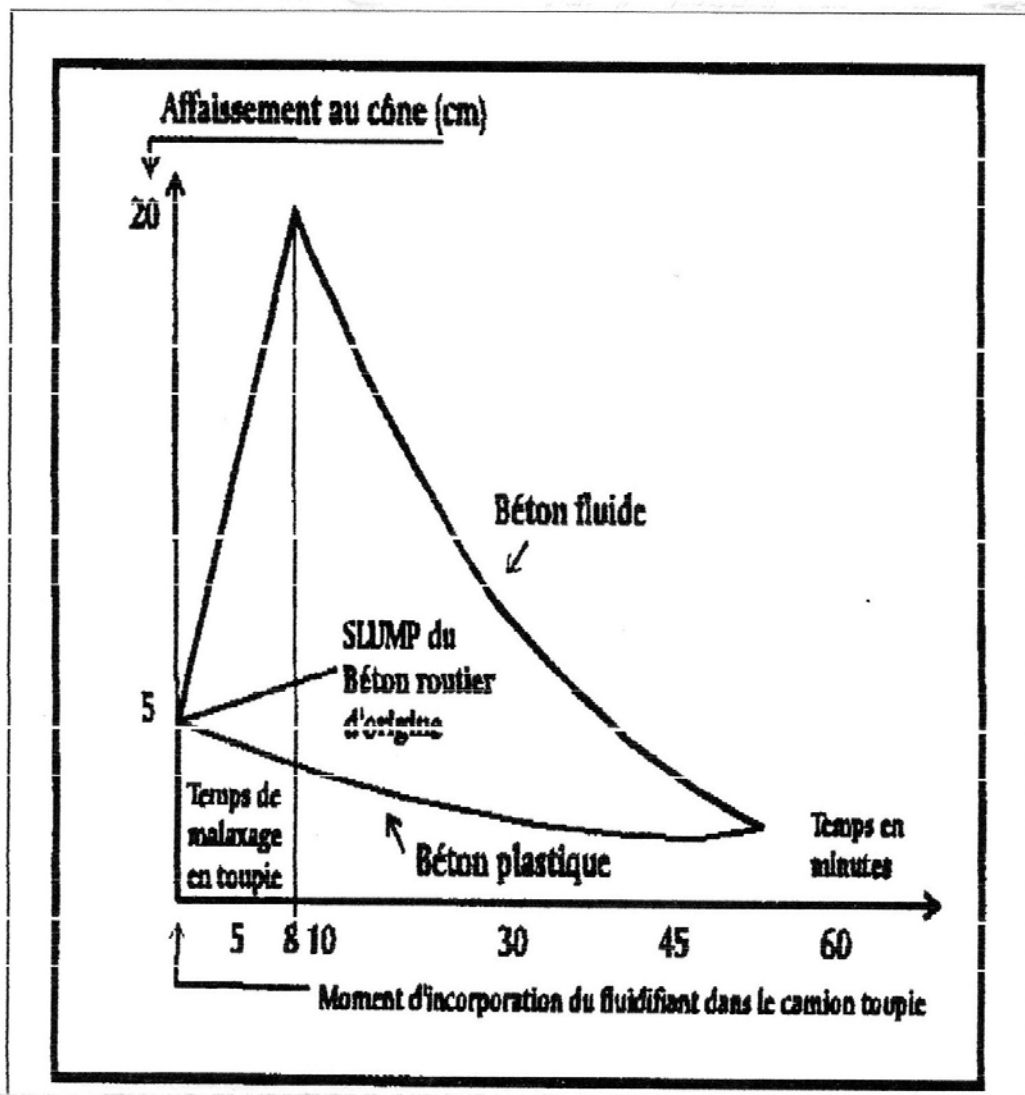


Figure 3.13 : Apport d'un adjuvant fluidifiant sur l'ouvrabilité d'un béton routier

[21]

### 3.5.1.2 Adjuvants superplastifiants :

La figure 3.14 ci-dessous reproduit aussi l'effet d'un adjuvant superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton. Ce dernier favorise la rapidité de mise en œuvre et de serrage du béton et facilite aussi le bétonnage des éléments fortement ferrillés.

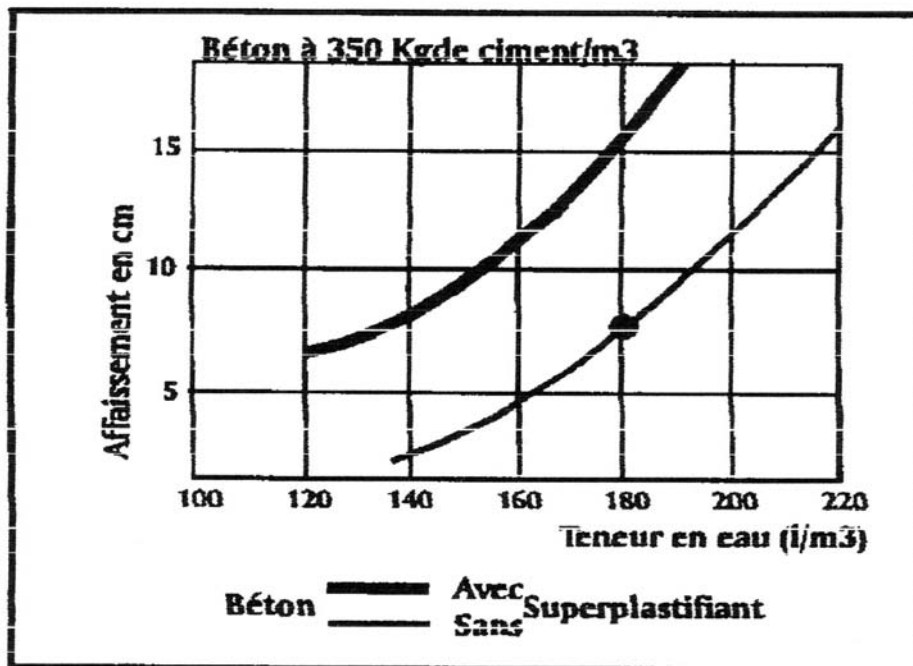
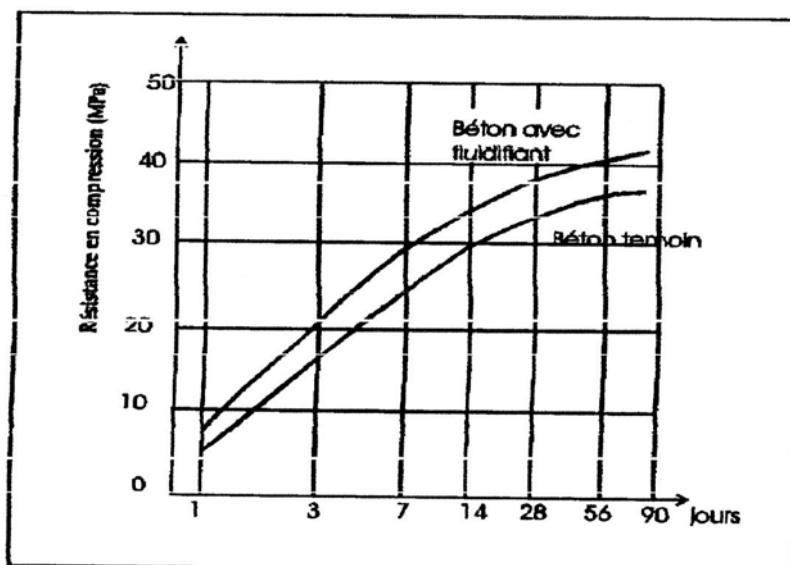


Figure 3.14 : Effet d'un adjuvant superplastifiant sur l'ouvrabilité d'un béton [21]

### 3.5.2 Influence des adjuvants (fluidifiants , accélérateurs et retardateurs ) sur la résistance du béton :

#### 3.5.2.1 Adjuvants fluidifiants :

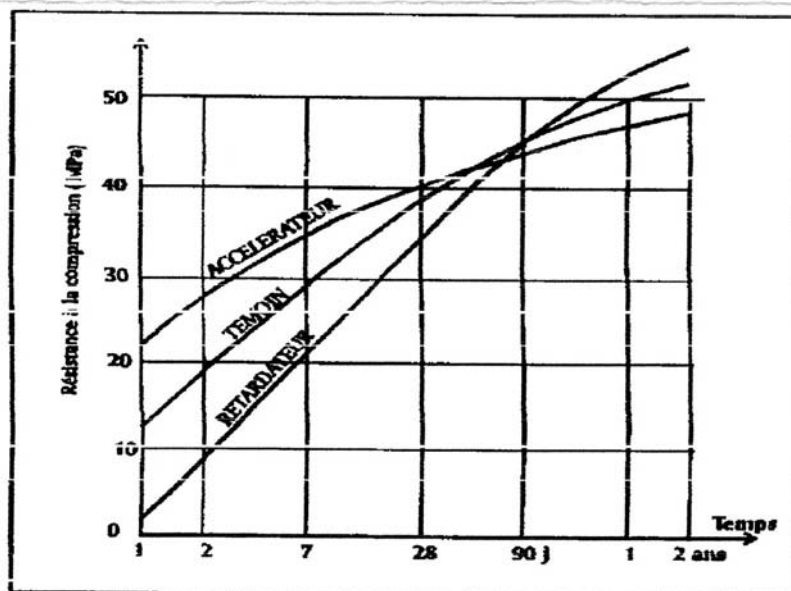
La figure 3.15 montre l'évolution des résistances en compression pour deux bétons ; un béton témoin et un béton avec fluidifiant lequel a permis de réduire le dosage en eau tout en conservant une plasticité satisfaisante [22] .



**Figure 3.15 : Résistance en compression de deux bétons (un béton témoin sans adjuvant et l'autre avec adjuvant fluidifiant ) [ 22] .**

### 3.5.2.2 Adjuvants accélérateurs et retardateurs :

La figure 3.16 montre l'influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances initiales, a moyen et a long terme, du béton [22].



**Figure 3.16 : Influence comparée d'un accélérateur et d'un retardateur sur l'évolution des résistances [22].**

Il faut signaler que ces adjuvants représentent une aide efficace pour le bétonnier et apportent dans certains cas difficiles des solutions à l'utilisateur, leur emploi doit être entouré de plus grandes précautions, du fait de leur action simultanée sur de nombreux paramètres. Il ne suffit donc pas qu'un adjuvant soit efficace, il faut aussi qu'il ne soit pas nocif [16].

### 3.6 Confection du béton :

Pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohésion.

Parmi les facteurs influant sur l'homogénéité du mélange béton, on peut notamment souligner :

- la régularité de chaque constituant : les données retenues pour fixer les paramètres de dosage ou de mélange ne doivent pas être remises en cause par d'éventuelles variations de ceux-ci ;
- la détermination d'une composition de béton tenant compte de sa destination et des constituants utilisés : type et classe de ciment, nature et granularité des granulats, adjuvants ;
- la teneur en eau ;
- le type de matériel utilisé pour le malaxage ;
- le temps de malaxage ;
- les conditions et temps de transport du béton entre sa fabrication et sa mise en oeuvre.

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

### 3.6.1 Le malaxage des constituants :

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

Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, plastiques, etc.) pour donner des bétons réguliers.

La durée de malaxage est importante. Elle doit être suffisante pour assurer une bonne homogénéité du mélange. Le temps varie de 30 secondes à 3 minutes suivant le type de bétonnières et peut être estimé à l'aide des formules suivantes :

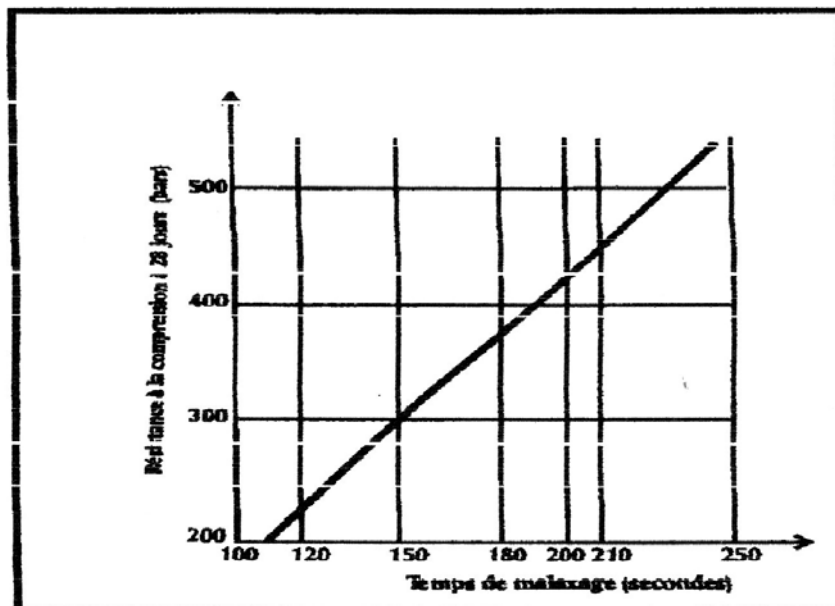
- $t/\text{sec.} = 90 \sqrt{D}$  pour bétonnières à axe horizontal,
- $t/\text{sec.} = 120 \sqrt{D}$  pour bétonnières à axe incliné [10].

La figure 3-17 montre bien la relation qui existe entre la résistance à la compression simple et le temps de malaxage à maniabilité constante d'après Boussion et Brunet. Dans certains procédés, le mélange se fait en deux phases. La



pâte de ciment est préparée d'abord dans un malaxeur à haute turbulence ce qui lui donne une grande homogénéité ensuite vient le reste du mélange à préparer.

Un malaxage correctement étudié permet d'obtenir un gain de résistances mécaniques (par exemple de l'ordre de 10%) [12].



**Figure 3-17 Relation entre la résistance à la compression simple à 28 jours et le temps de malaxage à maniabilité constante d'après Boussion et Brunet [ 12 ]**

### 3.6.2 transport du béton :

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication, parfois éloignée de plusieurs kilomètres. Pour que l'objectif d'une telle opération soit atteint, il est nécessaire qu'elle s'effectue rapidement et que les caractéristiques du béton (principalement l'homogénéité et la maniabilité) ne soient pas modifiées .

Pour que le béton conserve son homogénéité, il faut qu'il soit peu ségrégable que possible. La ségrétabilité du béton dépend :

- de la granularité retenue : les risques de ségrégation sont plus importants avec les mélanges à granularité discontinue ;

- De la taille du plus gros grain :  $D_{max}$  favorise la ségrégation ;
- De la plasticité du béton : la ségréabilité augmente avec la plasticité ;
- Du rapport S/G (Sable/Gravier) : elle augmente quand S/G diminue
- Du module de finesse du sable : la ségréabilité augmente avec ce dernier .

Actuellement, on peut remédier à la ségréabilité par des adjuvants qui permettent d'obtenir des bétons très fluides et pratiquement pas ségréables [18].

La maniabilité du béton frais est sensible à l'effet de différents facteurs propres au chantier :

- l'augmentation du temps de transport entre la centrale de fabrication et le chantier et des attentes sur chantier aggravent l'évaporation de l'eau de gâchage .
- Les conséquences (les réactions chimiques déclenchées dès le premier contact du ciment avec l'eau risquent de se manifester avant la fin de la mise en oeuvre .
- L'élévation de la température ambiante est également un facteur aggravant l'évaporation et favorisant l'accroissement de la cinétique de prise du béton .

***Cette perte de maniabilité est évidemment variable suivant les types de béton [24].***

Pour remédier à ce problème de perte de maniabilité du béton lorsqu'il arrive sur le chantier l'utilisateur est amené à rattraper cette perte de maniabilité par un ajout d'eau. L'ajout d'eau influe évidemment sur le rapport E/C lequel influe sur les qualités du béton.

Selon BURG [25] un excès de 8 à 10% de la quantité d'eau totale peut être ajouté sans aucune perte significative de la résistance. CORNELLE [26], lui,

indique qu'une variation de plus ou moins 5.55% de la quantité d'eau nominale suffit pour modifier sensiblement les caractéristiques rhéologiques du béton.

Mentionnons simplement l'emploi de camions à bennes fixes ou des classiques bétonnières portées (toupies) qui assurent le maintien de l'homogénéité pendant le transport. La capacité de ces bétonnières portées varie de 4 à 10 m<sup>3</sup>. Le temps cumulé de transport et de déchargement doit être limité à 1h 30min environ dans des conditions normales de température (voisines de 20 °C) [ 9 ].

Le pompage du béton est une technique qui se développe rapidement car il permet une importante productivité, la limitation du temps d'attente avant la mise en place du béton, la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites difficiles d'accès, la mise en place de quantités importantes en une seule coulée.

La technique se développe parallèlement à la croissance du BPE. Le camion-pompe équipé de flèches allant jusqu'à 60 m, peut envoyer le béton directement de la toupie au lieu de coulage.

L'évolution rapide des bétons pompés permet ainsi d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400 m, jusqu'à 100 m et plus en hauteur avec des bétons particulièrement adaptés .

### 3.7 Mise en œuvre du béton :

De la sortie de la bétonnière ou du malaxeur à l'ouvrage fini, le béton passe par différentes phases : transport, coulage dans un coffrage ou un moule, serrage, maturation, démoulage, cure. Ces différentes phases impliquent le recours à des techniques qui ont beaucoup évolué et qui doivent respecter des règles d'exécution .

#### 3.7.1 L'approvisionnement du béton :

Il faut rappeler les conditions à respecter pour ne pas modifier les caractéristiques du béton entre son lieu de fabrication et son lieu d'utilisation :

- Éviter les chocs ou manoeuvres brutales qui peuvent provoquer la réparation des constituants du béton : phénomène de ségrégation dû aux densités différentes des constituants.
- Veiller à ce que le temps de transport ou d'attente ne soit pas susceptible d'entraîner une perte d'ouvrabilité, voire un début de

prise du béton, surtout par temps chaud (l'emploi d'un retardateur de prise permet de compenser ce phénomène).

- À l'inverse, par temps froid, il convient de prendre des précautions pour protéger le béton contre le gel.
- Le matériel utilisé pour le transport doit être fréquemment nettoyé pour éviter tout risque de pollution (déchets végétaux ou organiques, restes de béton...).
- Les essais de contrôle des caractéristiques du béton effectués au point de livraison doivent avoir lieu juste avant son coulage ; les essais in situ, permettent d'approcher au maximum les caractéristiques du béton fabriqué, avec celles de l'ouvrage.

### 3.7.2 La mise en place :

#### 3.7.2.1 Préparation des coffrages :

Une propriété essentielle du béton est son aptitude à épouser la forme dans laquelle on le coule lorsqu'il est encore à l'état frais. Sur chantier, les outils utilisés pour le moulage du béton sont les coffrages.

Pour les ouvrages verticaux, tels que murs, voiles verticaux, poteaux, ces coffrages appelés banches ont donné lieu à l'expression « béton banché », qui désigne le béton coulé dans des banches.

Le coffrage constitue l'outil essentiel en matière de réalisation d'ouvrages en béton. Il a beaucoup évolué ces dernières années pour mieux s'adapter à des besoins de plus en plus complexes et variés .

Grâce aux coffrages, le béton coulé in situ demeure pour beaucoup d'ouvrages une solution économique et parfois la seule utilisable lorsque le volume de la réalisation est très important ou lorsque les éléments à réaliser ne sont pas suffisamment répétitifs pour justifier leur préfabrication.

Si le choix des coffrages dépend de l'ouvrage à réaliser et du nombre de ses réemplois, on peut néanmoins dégager un certain nombre d'exigences communes qu'ils doivent satisfaire :

- Un coffrage doit être indéformable sous l'effet de la poussée du béton et lors de la vibration. Le respect des tolérances dimensionnelles de l'ouvrage dépend directement de ce critère .

- La conception du coffrage doit donc s'attacher à respecter cette indéformabilité et cette stabilité en considérant la pression statique exercée par le béton (dans les cas courants 2 à 6 t/m<sup>2</sup> selon la hauteur du bétonnage) et les contraintes dynamiques qui découlent de la vibration (qui varient selon le mode de vibration et le type de vibrateurs et de leur répartition).
- La conception est fonction du nombre de réemplois. En particulier en cas de réutilisation fréquente, l'altération de certains types de coffrages (en bois notamment) est de nature à modifier leurs caractéristiques mécaniques et dimensionnelles ainsi que l'aspect final du béton.

### 3.7.2.2 Le déversement du béton :

Le béton doit être déversé d'une hauteur inférieure à 0,8 mètre et être réparti régulièrement. Les accumulations locales entraînent une surcharge sur les étalements, ainsi que des risques de ségrégation.

En plus des précautions précédentes, il peut être nécessaire d'utiliser des manchons ou des tubes, pour limiter la hauteur de chute libre du béton (à l'origine de phénomènes de ségrégation), surtout dans des coffrages hauts et profonds. Il faut éviter le ruissellement du béton sur les parois du coffrage ou le phénomène de cascade sur les armatures .

Le tube plongeur, le manchon ou la goulotte doivent permettre de déverser le béton au fond du coffrage. Ils sont remontés progressivement au fur et à mesure du bétonnage.

Les précautions à prendre lors du coulage sont les suivantes :

- limiter la hauteur de chute ;
- prévoir des couches horizontales successives n'excédant pas 60 à 80 cm de hauteur ;
- maintenir une vitesse de bétonnage aussi constante que possible ;
- éviter la mise en place lors de trop fortes pluies pouvant entraîner un lavage des gros granulats et un excès d'eau dans le béton, surtout à sa surface .

### 3.7.2.3 Le serrage du béton ( vibration ):

Le serrage est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques, durables, avec des parements réussis. Sauf dans le cas de béton autoplaçant, il est indispensable de faciliter la mise en place du béton grâce à des moyens de serrage .

Le serrage a pour objet de faciliter l'arrangement optimal des grains, permettant ainsi l'écoulement du béton, un bon remplissage des cavités et l'enrobage correct des armatures. Le serrage permet aussi d'évacuer une grande partie de l'air contenu dans le béton et d'améliorer ainsi sa compacité.

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton. Son rôle est double :

- la mise en place est facilitée : remplissage des moules, enrobage des armatures ;
- le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage).

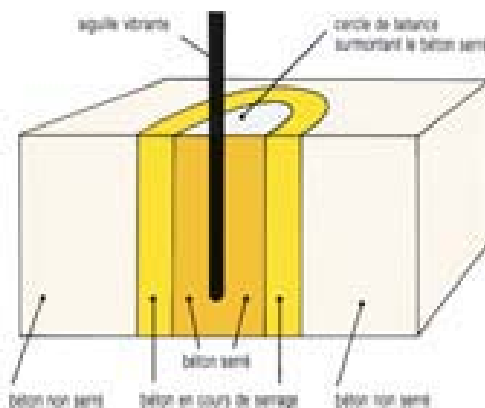
Par voie de conséquence, il est possible de faire des bétons avec un taux d'eau de gâchage plus faible, ce qui a pour effet de diminuer leur porosité, d'accroître leurs caractéristiques mécaniques et leur durabilité et d'améliorer leur aspect de surface [ 12 ] .

Soumis à la vibration, le béton se comporte comme un corps plastique caractérisé par une certaine viscosité et dont l'abaissement du seuil de cisaillement (valeur minimale de la force assurant le déplacement d'une surface par rapport à une autre dans un fluide plastique) facilite l'écoulement. Lors de la vibration, l'énergie absorbée par le béton est d'autant plus grande que sa structure est plus aérée, les bulles d'air jouant un rôle d'amortisseur .

Dans la Figure 3-18 ci-dessous on constate autour d'une aiguille vibrante plongée dans le béton, une succession de zones concentriques :

- la zone périphérique déjà serrée et désaérée ;
- une zone en cours de plastification qui absorbe la totalité de l'énergie au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vibratoire;
- une zone qui ne reçoit pratiquement pas d'énergie.

Les deux premières zones constituent le rayon d'action de l'aiguille vibrante .



**Figure 3.18 : Différentes zones dans un béton soumis à l'action d'une aiguille vibrante**

#### 3.7.2.3.1 Effet de la vibration :

L'abaissement des forces de frottement (effet de liquéfaction du béton) rend prédominantes les forces de gravité. L'air, qui a une densité très faible par rapport à celle du milieu environnant, se trouve par contre soumis à une force ascensionnelle importante, qui tend à le faire remonter à la surface.

Ce phénomène est nettement visible lors de la vibration. L'arrêt du dégagement d'air marque le moment où la vibration n'a plus d'effet sur le serrage du béton et peut même devenir néfaste en provoquant la ségrégation des granulats plus lourds par rapport à la laitance de ciment plus légère. Ce phénomène se trouve inversé avec les granulats légers qu'un excès de vibration peut faire remonter à la surface.

La vibration a pour effet d'améliorer la viscosité du béton ; il y a donc tout intérêt à réduire l'eau de gâchage, (par exemple en utilisant un adjuvant) dont une partie importante n'est pas nécessaire à l'hydratation du ciment, mais sert uniquement à rendre le béton plus plastique. Une vibration adaptée permet donc la mise en place efficace de bétons fermes contenant peu d'eau et, qui, une fois durcis, ont l'avantage d'avoir une faible porosité.

Les effets de la vibration sur le béton frais se traduisent, pour le béton durci, par des caractéristiques améliorées :

- une porosité réduite par l'effet cumulé du serrage, du départ de l'air et de la réduction d'eau nécessaire pour assurer la maniabilité du béton ;

- une homogénéité améliorée par une vibration transmise à la totalité de sa masse
- un enrobage efficace des armatures .

#### 3.7.2.3.2 Durée de vibration :

La durée de vibration est importante, car si elle est trop courte, le béton est insuffisamment serré, si elle est trop longue, elle peut entraîner une ségrégation de ses constituants.

Les effets de la vibration en fonction du temps se caractérisent par une action rapide qui diminue très vite, une fois obtenus l'arrangement des grains et l'expulsion de l'air. À titre indicatif, les temps nécessaires à la vibration d'un volume de béton (en pervibration, c'est-à-dire le temps où l'aiguille est laissée au même emplacement) sont de l'ordre de :

- 5 secondes pour les bétons mous ;
- 20 secondes pour les bétons plastiques ;
- 1 minute pour les bétons fermes.

#### 3.7.2.3.3 Matériels de vibration :

Les matériels de vibration se répartissent en deux catégories principales :

- ceux qui fournissent une vibration interne au béton (ou pervibration) , le vibrateur agit directement au sein du béton ;
- ceux qui apportent une vibration externe – le vibrateur agit sur le béton par l'intermédiaire d'un coffrage ou d'une poutre .

##### 3.7.2.3.3.1 Vibrateurs internes :

Simple et efficaces, couramment utilisés sur chantier, ils sont appelés aiguilles vibrantes et sont constitués par un tube métallique dans lequel la rotation d'une masselotte excentrée produit la vibration ( Figure 3.19 ). Différentes formes d'énergie sont utilisées qui conduisent à des conceptions différentes : pneumatique, électrique, thermique .

Le diamètre des aiguilles usuelles varie de 25 à 100 mm. Leur fréquence est comprise entre 10000 et 20000 vib./mn. Indépendamment du fait qu'une aiguille doit être choisie en fonction de sa masse qui la rend plus ou moins manoeuvrable et d'un



diamètre compatible avec l'espacement des armatures entre lesquelles elle doit pouvoir facilement se positionner, les principaux critères de choix restent le volume du béton à vibrer et sa granulométrie.

Les aiguilles de 25 à 70 mm sont plutôt utilisées pour des volumes de béton n'excédant pas 10 m<sup>3</sup> et dont le diamètre des plus gros granulats est inférieur à 25 mm. Les aiguilles de plus de 70 mm sont utilisées pour des volumes de 10 à 30 m<sup>3</sup> de béton avec de fortes granulométries.



**Figure 3.19 : Vibrateur interne**

#### 3.7.2.3.3.2 Vibrateur externe :

Pour les ouvrages de faible épaisseur ou, à l'inverse, de hauteur importante avec une forte densité d'armatures, la vibration interne est pratiquement impossible, on utilise des vibreurs fixés sur les coffrages. Il s'agit de moteurs à balourds, plus délicats à manipuler que les aiguilles et dont l'emplacement n'est pas toujours facile à déterminer.

L'épaisseur intéressée par les vibreurs n'excède pas 20 à 30 cm. Pour des pièces importantes, les vibreurs doivent être déplacés sur les coffrages au fur et à mesure de l'avancement du bétonnage.

Il y'a également la vibration externe par règle vibrante , cette technique est utilisée pour les dalles ou chaussées en béton de 20 à 25 cm d'épaisseur , elle consiste à déplacer à la surface du béton une règle (ou une poutre) équipée de vibreurs, qui assure son serrage à partir de sa surface .

#### 3.7.3.4 Le décoffrage :

Le décoffrage d'un ouvrage ne doit intervenir qu'en fonction de la satisfaction de deux exigences principales :

- La résistance mécanique du béton : sauf cas particuliers (coffrages glissants, traitements thermiques du béton, etc.), on ne décoffre pas, en règle générale un béton présentant une résistance à la compression inférieure à environ 8 MPa. Cette exigence est évidemment sensiblement augmentée pour des pièces soumises à des sollicitations (contraintes de flexion, chocs...).
- La recherche de l'homogénéité de la teinte peut entraîner des variations des temps de coffrage, en fonction des variations climatiques .

Les paramètres influant sur les délais de décoffrage :

- les conditions ambiantes ;
- les caractéristiques de l'ouvrage (dimension, contraintes imposées) ;
- les propriétés du béton à l'état frais (composition, évolution de son durcissement) ;
- la nature du ciment et son dosage ;
- la nature du coffrage et ses caractéristiques

#### 3.7.3.5 La cure du béton :

Il convient, en premier lieu, de souligner que la meilleure des cures est le maintien en place des coffrages. Cependant, pour des raisons économiques, le coffrage sera très généralement retiré dès que le béton aura atteint une résistance mécanique suffisante pour être auto stable. Dès lors, un autre système doit assurer la relève pour empêcher l'eau de s'évaporer et c'est l'objet principal de la cure.

La cure a également pour objet d'assurer la protection du béton contre :

- Le délavage par la pluie,
- Le froid en hiver,
- Les gradients thermiques internes, pour les éléments à fortes variations d'inertie géométrique.

Dans ces derniers cas, la cure doit consister non seulement à réaliser une barrière hydraulique, mais aussi thermique.

Il est par ailleurs évident que la cure des surfaces non coffrées doit débuter dès la fin du surfaçage, pour que le béton puisse atteindre de bonnes conditions de durabilité.

On évite ainsi, ou du moins on limite :

- L'apparition du retrait superficiel avec son cortège de faïençage et de fissures qui constituent un cheminement préférentiel pour la neutralisation du béton et donc la moins bonne protection des aciers ;
- L'hydratation incomplète du ciment ce qui conduit à une baisse des résistances.

Les éléments les plus perturbateurs, en dehors du risque de gel en hiver, sont les actions du soleil et du vent qui tous deux dessèchent la surface du béton.

Pour se prémunir contre ces actions, on utilise généralement l'un des procédés suivants:

- Emploi de films plastiques ou de bâches humides
- Arrosage en pluie fine ;
- Application d'un produit de cure.

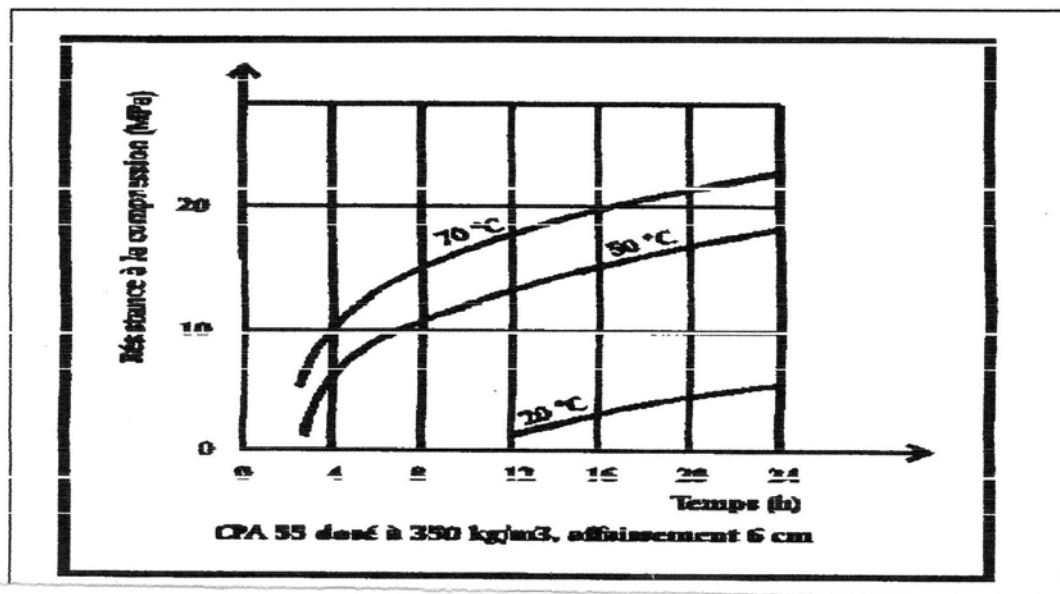
Un facteur important de la cure est la durée du traitement [27].

#### 3.7.3.5.1 Influence de la chaleur

La figure 3.20 montre l'influence de la chaleur sur les résistances entre 0 et 24 h. Cette influence est très importante au tout jeune âge ; en effet, les résistances des bétons à 50 et 70 °C augmentent très rapidement pendant les huit premières heures.

La réaction d'hydratation durant la prise et le durcissement du béton est favorisée par une élévation de température, mais la dessiccation, empêchant l'hydratation complète du ciment, est néfaste.

Il faut toutefois remarquer que les bétons dont le durcissement a été accéléré par la chaleur n'ont pas tout à fait la même structure que celle des bétons conservés à 20 °C. La porosité augmente (puisque l'air et l'eau contenus dans le béton frais se dilatent plus que le béton lui-même) et la cristallisation est légèrement différente. En conséquence, la résistance à long terme des bétons traités par la chaleur est souvent plus faible que celle des bétons non traités [4].



**Figure 3.20 Influence de la chaleur sur l'évolution de la résistance à la compression du béton [ 4 ]**

#### 3.7.3.5.2 Influence des faibles températures :

A l'inverse de la chaleur, le froid ralentit la prise et le durcissement du béton. La figure 3.21 montre l'influence de la température sur le durcissement du béton. L'évolution des résistances est donnée pour trois températures 10, 20 et 30 °C.

On remarque qu'à long terme les résistances en compression des bétons conservés à 10 °C et 20 °C sont du même ordre.

L'action du gel est très néfaste lorsqu'il intervient sur un béton dont le durcissement est insuffisant. En effet, à ce moment, le béton contient beaucoup d'eau et sa résistance est très faible. L'expansion de la glace perturbe alors la structure du béton. Pour que le béton résiste au gel, il faut donc qu'il subisse un temps de pré durcissement avant que la température ne descende au-dessous de 0 °C.

Ce temps de pré durcissement dépend de nombreux facteurs (température, quantité d'eau de gâchage, classe du ciment, etc.). En général, il faut que le béton atteigne un seuil de résistance critique de l'ordre de 5 MPa [4].

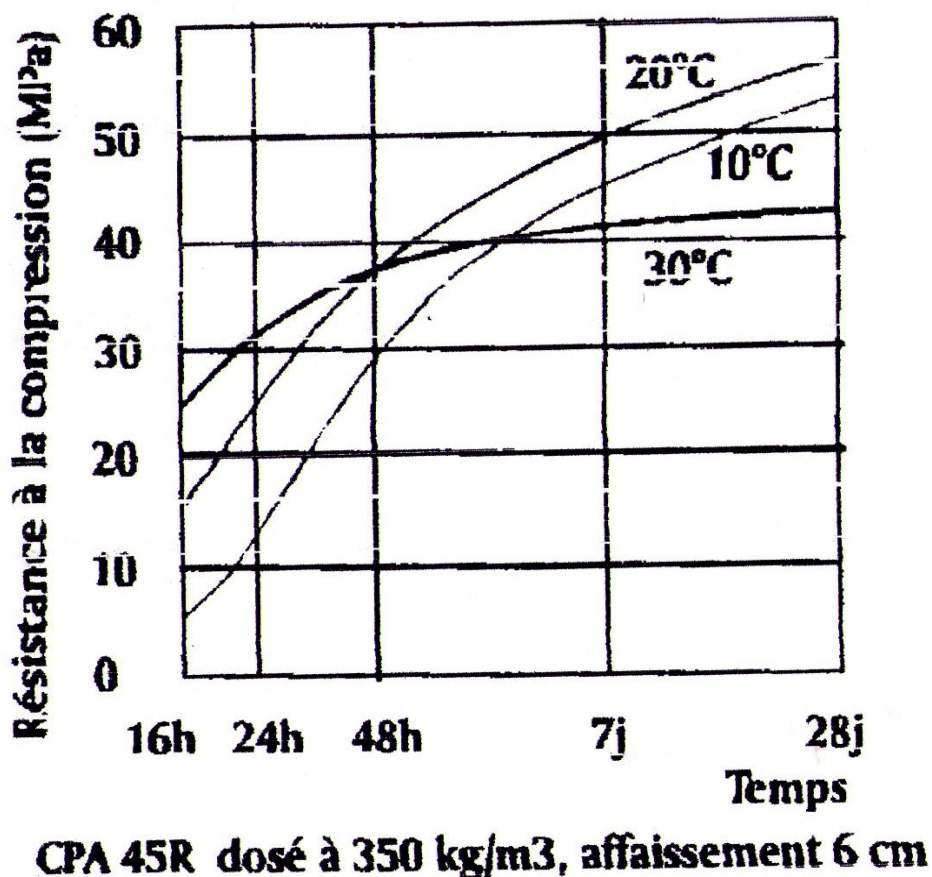


Figure 3.21 Influence des faibles températures sur l'évolution de la résistance à la compression du béton [ 4 ]

#### 3.7.3.5.3 Influence de l'hygrométrie de conservation :

Comme l'hydratation du béton est une réaction lente, le béton a besoin d'une ambiance humide pour bien durcir. Le degré d'hygrométrie de l'air est donc un facteur important influant sur la résistance du béton. C'est surtout dans les premiers jours que le béton doit être protégé de la dessiccation.

***Les pertes de résistances sont d'autant plus importantes que E/C plus grand [4].***

Le tableau 3.4 donne un aperçu sur les pertes de résistance en fonction de la durée d'exposition au soleil sans protection.

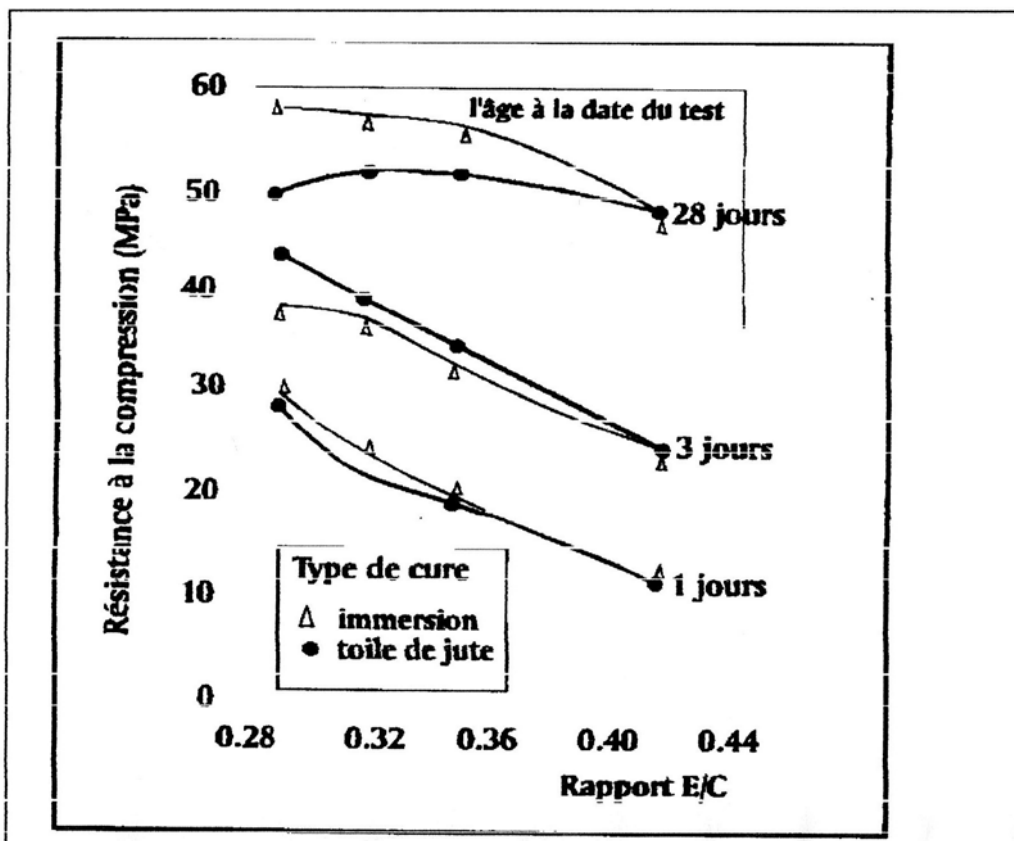
Ces résultats rapportés au tableau 3.4 ont été relevés sur un béton de E/C = 0.62.

**Tableau 3.4 : Influence de l'hygrométrie de conservation sur la résistance [6].**

| Durée d'exposition au soleil sans protection (jours) | Perte de résistance en Compression à 28 j |
|--|---|
| 1j   | 12%                                       |
| 2j   | 19 %                                      |
| 3J   | 21%                                       |
| 5 j  | 22 %                                      |
| 28j  | 44%                                       |

#### 3.7.3.5.4 Influence des conditions de cure et du rapport E/C sur la résistance du béton :

Le mode et la durée de cure sont des paramètres les plus importants, ils influent directement sur les performances mécaniques du béton. La figure 3.22 montre les développements des résistances mécaniques de bétons conservés dans deux conditions différentes.



### **Figure 3.22 Influence conditions de cure sur la résistance à la compression du béton [ 6 ]**

#### 3.7.3.5.5 Influence de la durée de cure humide sur la résistance du béton :

Le manque d'humidité (cure à l'air libre en zone méditerranéenne CNERIB-Alger ) a permis de déduire, selon les travaux de L. LACHEMAT et S. KENAI [28], que la résistance à 28 jours peut être réduite de 44% par rapport à une cure d'humidification par immersion (20°C et 100% HR).

La réduction observée sur la résistance à 28 jours est de 19% en zone steppique ou semi-aride (35°C et 70% HR), de 40% en zone aride ou chaude (45°C et 35% HR) toujours par rapport à une cure à 20°C et 100% HR selon [28].

#### 3.7.3.6 Le bétonnage par temps chaud :

Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

En règle générale, dès que la température mesurée sur chantier est durablement supérieure à 25 °C, des dispositions sont à prendre dans le programme de bétonnage, elles sont plus contraignantes encore, au-dessus de 35 °C.

##### 3.7.3.6.1 Conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons :

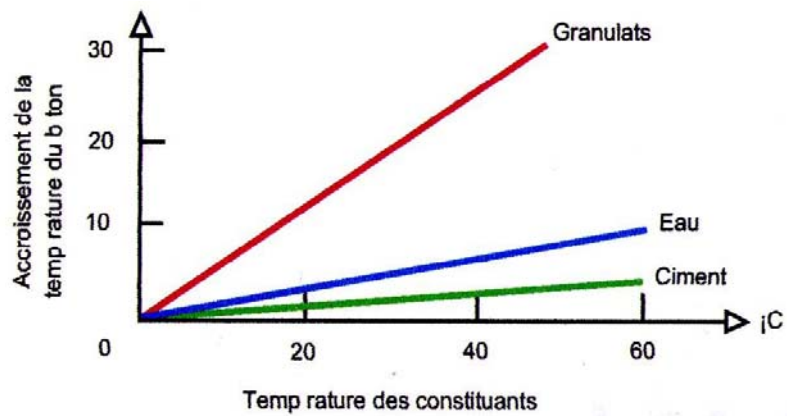
Le béton est sensible aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur :

- la rhéologie du béton et son évolution
- la vitesse de prise
- la cinétique de durcissement
- l'évaporation et la dessiccation du béton.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en fonction de son dosage et de sa chaleur massique. Par exemple comme le montre la figure 3.23 ci-dessous [29] :

- une augmentation de 10 °C du ciment élève de 1 °C la température du béton ;
- une augmentation de 10 °C de l'eau élève de 2 °C la température du béton ;

– une augmentation de 10 °C des granulats élève de 7 °C la température du béton

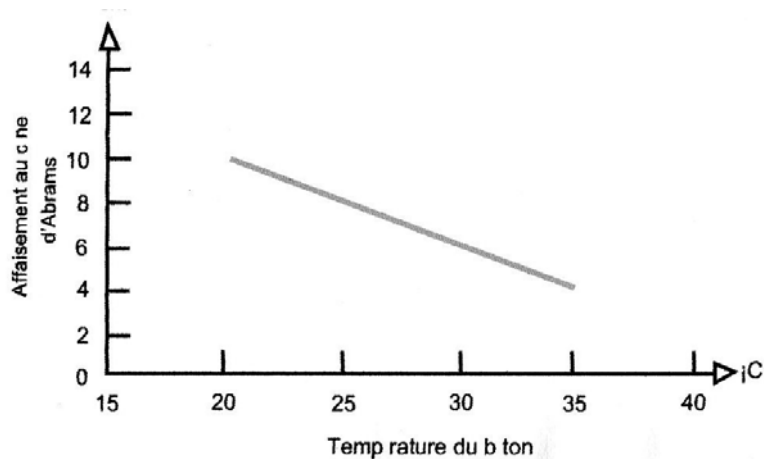


**Figure 3.23 : Accroissement de la température du béton en fonction de celles des constituants [29]**

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées .

### La rhéologie :

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams évolue ( Figure 3.24 ).





### Figure 3.24: Evolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.

Pour une élévation de la température du béton, il y a une importante perte de l'ouvrabilité qui, en outre, peut se manifester très rapidement après la préparation du béton. La solution de rajouter de l'eau pour palier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les

Echéances ( Figure 3.25 ) [ 29 ] .

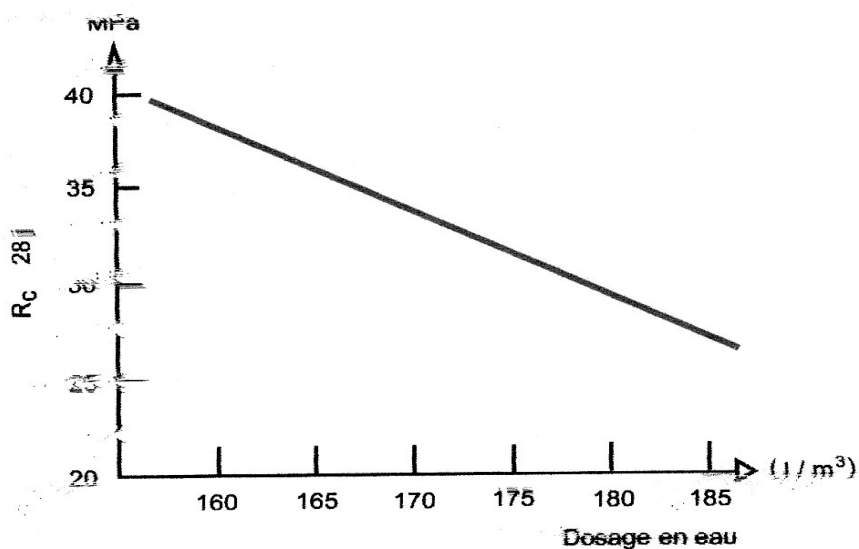


Figure 3.25 : Evolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau [29] .

### Les temps de prise :

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques : la prise du béton est plus rapide [29]

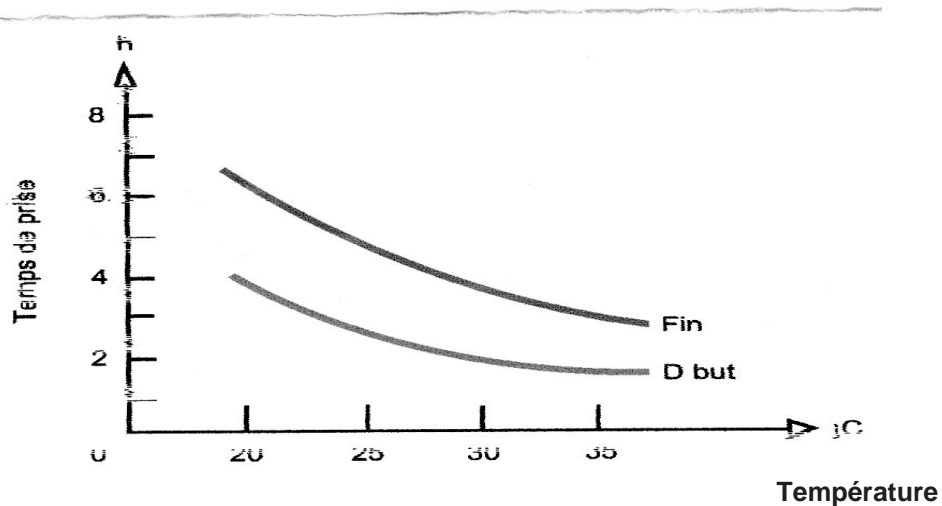


Figure 3.26 : Evolution du temps de prise du béton en fonction de la température [29]

### Les résistances mécaniques :

Une forte élévation de la température provoque aux échéances précoces (1 ou 2 jours) une augmentation de la résistance du béton. Cela se traduit généralement par une résistance du béton à 28 jours moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse .

Il est important de tenir compte de ce phénomène (figure 3.27) et il faut se souvenir que les réactions d'hydratation sont plus ou moins exothermiques selon les types de ciment et que cet effet se cumule avec celui de la température extérieure [29] .

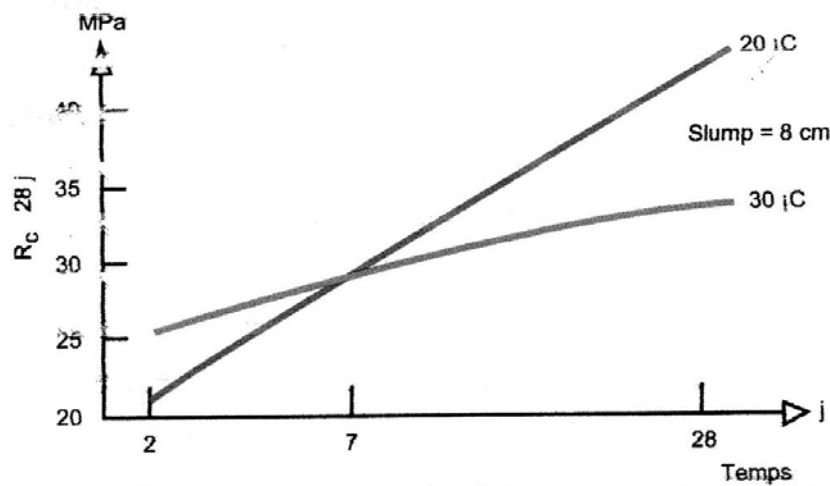


Figure 3.27 : Evolution des résistances en compression en fonction de la température [29].

### La fissuration :

Une évaporation trop rapide de l'eau du béton peut entraîner quelques heures après le décoffrage des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à 1 kg/m<sup>2</sup>/h. Elle est d'autant plus importante que :

- la température ambiante est élevée,
- la température du béton augmente,
- l'air est sec.

L'abaque de l'American Concrete Institute (ACI) permet d'estimer la quantité d'eau évaporée du béton en fonction de ces trois paramètres (voir Figure 3.28 ci-dessous )

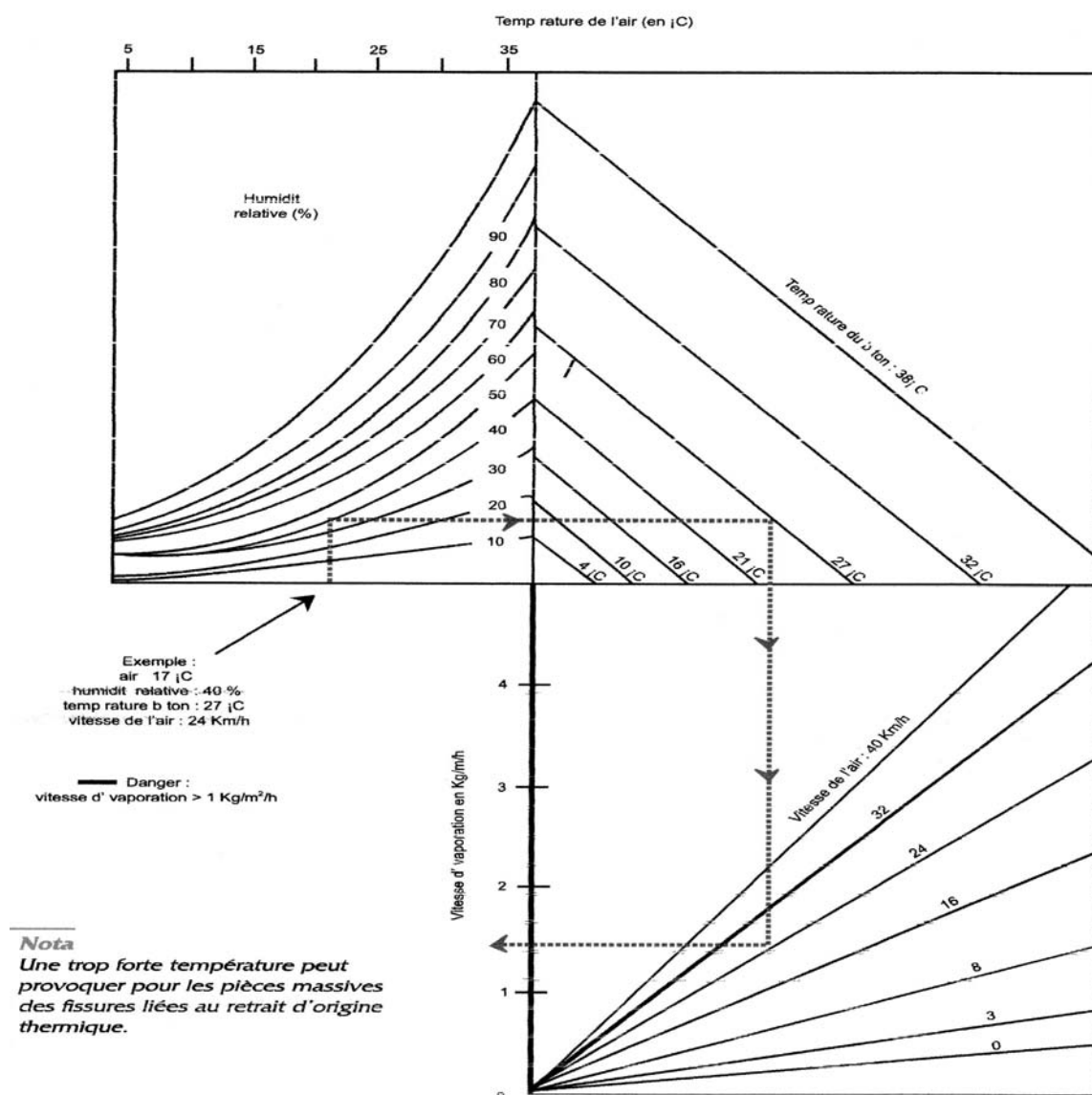


Figure 3.28: abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) [29].

### 3.7.5.6.2. Préconisations pour le bétonnage par temps chaud :

Les services météorologiques donnent des informations sur les conditions climatiques d'un site donné. Pour des chantiers importants, il peut être nécessaire de compléter l'information des services spécialisés par un suivi précis de l'évolution locale.

Par temps chaud, il conviendra de respecter quelques règles simples afin d'obtenir en oeuvre un béton dont les caractéristiques correspondent aux attentes des maîtres d'ouvrage. Des modifications de la formulation du béton peuvent dans les cas extrêmes s'avérer nécessaires. À l'égard des granulats (sable, gravillon) qui constituent l'essentiel de la masse du béton, c'est au niveau des conditions de stockage que des protections sont à mettre en place, elles peuvent être complétées par un arrosage plus ou moins intensif, apport d'eau dont il convient de tenir compte dans la composition du béton. Bien que le choix du type de ciment soit dicté par des considérations liées à l'ouvrage réalisé et aux conditions d'environnement, il peut être utile de rechercher un ciment faiblement exothermique. L'eau utilisée pourra être refroidie.

Au niveau de la formulation du béton, il est possible d'associer un ou plusieurs adjuvants, un retardateur de prise qui prolongera le temps d'utilisation, un plastifiant réducteur d'eau qui permet de maintenir le rapport E/C. Il est important dans cette hypothèse de réaliser des études préalables de compatibilité ciment-adjuvant en les menant dans les conditions climatiques proches de celles du chantier afin de vérifier que la maniabilité reste satisfaisante pendant une durée compatible avec les conditions de transport et de mise en oeuvre.

Lorsque le chantier est approvisionné par des centrales de béton prêt à l'emploi, il faut s'efforcer de réduire les temps de transport et d'attente et limiter le stationnement en plein soleil des camions malaxeurs.

Au niveau de la mise en oeuvre du béton, il peut être utile de refroidir les coffrages et il convient toujours de bétonner en dehors des heures les plus chaudes de la journée. En aucun cas, il ne faudra rajouter d'eau à un béton dont l'ouvrabilité s'avère médiocre.

Après coulage, le béton doit être protégé de la dessiccation, notamment les surfaces exposées au soleil et au vent, par un produit de cure ou par une bâche

(paillassons humides, films plastiques, etc.). Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques.

La qualité et la durée de vie du béton se jouent aux tous premiers âges, période où il est particulièrement sensible. Les précautions prises pour bétonner par temps chaud peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures .

#### 3.7.3.7 Le bétonnage par temps froid :

Les conditions climatiques ont une influence très importante sur la qualité finale du béton. On doit s'en préoccuper dès sa fabrication et jusqu'à sa maturité en passant par son transport, sa mise en oeuvre et sa cure .

En règle générale, lorsque la température mesurée sur chantier est inférieure à  $-5\text{ °C}$ , la mise en place du béton est déconseillée. Entre  $-5\text{ °C}$  et  $+5\text{ °C}$ , elle ne peut se faire qu'avec des moyens efficaces pour prévenir les effets dommageables du froid.

##### 3.7.3.7.1 Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais :

Sur béton frais, la baisse de température dans une plage n'atteignant pas le gel, ralentit les réactions exothermiques d'hydratation du ciment [ 29] . On constate:

- un retard du début de prise (figure 3.29) ;
- un allongement du temps de durcissement (figure 3.30).

On observe aussi une augmentation du ressuage.

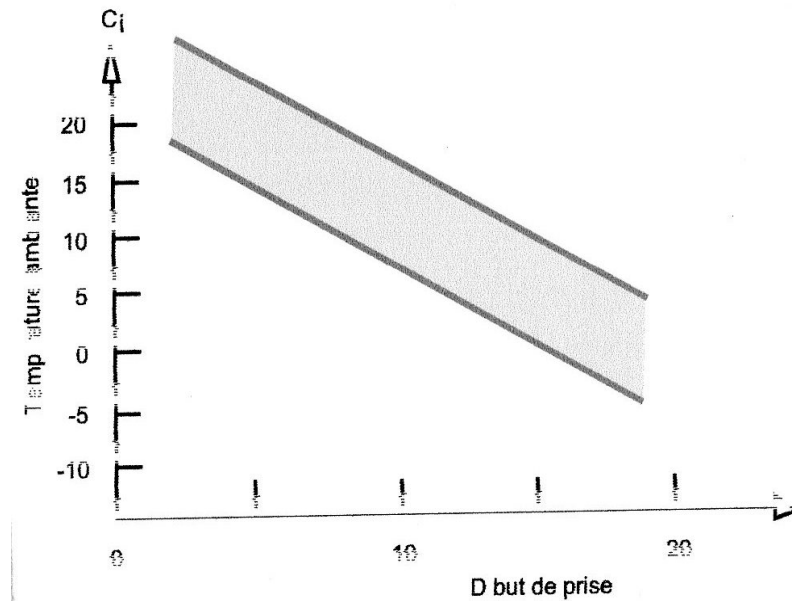


Figure 3.29 : début de prise du béton en fonction de la température [29]

#### 3.7.3.7.2 Conséquences du gel sur le béton frais :

Lorsque le béton frais gèle, les réactions d'hydratation cessent et le durcissement est complètement arrêté. Si le gel intervient avant le début de prise, il provoque uniquement un gonflement, le durcissement reprenant normalement dès que la température redevient positive (vers 5 °C). L'effet du gonflement conduit néanmoins à une baisse de résistance. Si le gel intervient au début du durcissement, la porosité est augmentée, l'adhérence pâte-granulat diminue et les résistances mécaniques sont fortement altérées. Dans ce cas, les dommages sont irréversibles, il est donc extrêmement important d'anticiper l'évolution climatique avant la mise en oeuvre et de prendre les dispositions nécessaires. La résistance finale du béton est d'autant plus affectée que le gel du béton est précoce [ 29 ] .

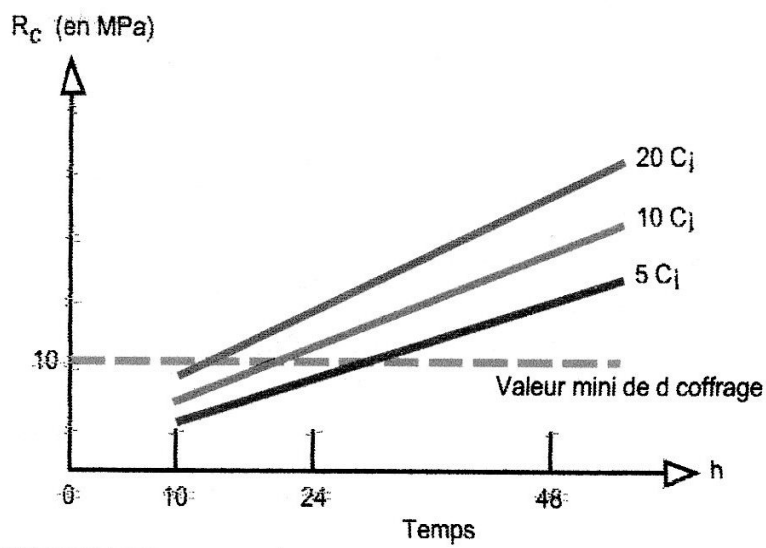


Figure 3.30 : Délai de décoffrage en fonction de la température [29]

### 3.7.3.7.3 Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid :

Pour mettre en oeuvre correctement par temps froid, il est indispensable :

- d'adapter la composition du béton
- d'apporter et de maintenir une quantité de chaleur au béton frais
- de maintenir ces dispositions de protection en place au-delà des délais habituels.

### Composition du béton :

La composition du béton devra être soigneusement étudiée notamment sur :

- **le choix du ciment** : un ciment de type CEM I de classe 52,5 ou 42,5 (ou de sous classe R) est recommandé;
  - **le dosage du ciment** : il est recommandé de se tenir à des dosages élevés supérieurs à 330 kg/m<sup>3</sup>,
  - **le choix des granulats** : les granulats seront non poreux, non gélifs, propres et non gelés,
  - **le dosage en eau** : le dosage en eau devra être le plus faible possible,
  - **l'adjuvantation** : l'emploi d'adjuvants tels que réducteurs d'eau, accélérateurs de prise et accélérateurs de durcissement est conseillé.
- Il est indispensable de réaliser des études préalables de compatibilité

ciment-adjuvant et de les mener dans les conditions voisines du chantier.

#### **Apport et maintien de chaleur :**

**Chauffage** : le béton peut être chauffé lors de sa fabrication par l'eau ou les granulats. Il peut être ensuite maintenu à température par chauffage de l'atmosphère ambiante ou du coffrage. Le ciment, l'eau et les granulats contribuent dans des proportions variables à l'élévation de la température du béton

**Calorifugeage** : les coffrages pourront comporter une isolation qui limitera les échanges thermiques avec l'extérieur.

**Transport** : le transport du béton frais ainsi que l'attente des toupies seront le plus court possible.

**Étuvage** : l'étuvage du béton au cours de son durcissement accélérera l'hydratation du ciment.

**Protection de surface** : la surface du béton en contact avec l'air devra être protégée du froid, par exemple avec une bâche isolante.

#### **Maintien des dispositions de protection :**

– les protections de surface doivent être maintenues au moins pendant 72 heures ;

– le décoffrage ne doit être effectué que si le béton a atteint une résistance mécanique suffisante de l'ordre de 10 MPa,

– les dispositifs d'étalement doivent être maintenus en place pendant la période froide en particulier en présence de gel.

Toutes ces mesures peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.



# **CHAPITRE 4**

## **ETUDE EXPERIMENTALE**

## **CHAPITRE 4**

### **PARTIE EXPERIMENTALE**

#### **4-1 Introduction :**

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal de composants conduisant à un béton dont les qualités soient celles recherchées . Cette composition peut varier suivant le type d'ouvrage envisagé .

Compte tenu de l'insuffisance des résistances tant en traction qu'en compression relevés sur les différents chantiers , nous nous sommes proposés dans ce travail de rechercher les éléments nécessaires pour palier aux imperfections observées .

Au cours de nos différentes manipulations nous avons cherché à être le plus proche des conditions de production du béton sur le site afin que nos résultats soient d'une quelconque utilité , autrement dit reproductibles sur chantier .

#### **4-2 Méthode de confection des bétons :**

Les méthodes de confection des bétons sont nombreuses . On peut citer les méthodes dites à granularité continue ou discontinue suivantes :

- Méthode de Bolomey ;
- Méthode d'Abrams ;
- Méthode de Faury ;
- Méthode de Valette ;
- Méthode de Baron et Lesage ;
- Méthode de Dreux et Gorisse ;
- Méthode simplifiée ;

Dans le cadre de notre travail nous avons opté pour la méthode de Dreux et Gorisse que nous donnons en annexe I .

### 4-3 Matériaux utilisés :

#### 4-3-1 Présentation :

Les granulats utilisés au cours de nos expériences sont ceux utilisés par la plupart des entreprises de bâtiment à savoir :

- 1- Sable fin
- 2- Sable gros concassé de carrière provenant de la carrière Keddara ;
- 3- Gravier 3/8
- 4- Gravier 8/15
- 5- Gravier 15/25

A noter que ces granulats sont , dans une large part , silicieux.

Le module de finesse du sable fin vaut 1.98 ( sable relativement grossier )

Les masses volumiques des granulats utilisés ont été de 2600 kg/m<sup>3</sup> et 2650 kg/m<sup>3</sup> pour les sables et les graviers respectivement .

Les valeurs des équivalents de sable ont été de :

- **89 %** pour le sable fin ;
- **86 %** pour le sable concassé de la carrière de Keddara (ce qui correspond à un sable très propre la classification du tableau 1-5 )

Les granulats sont les mêmes que ceux habituellement commercialisés

#### 4-3-2 Le liant :

Le liant utilisé est un ciment portland CEMI ( ex CPA 325 et CPA400 ) produits par la cimenterie de Rais –Hammidou ( Alger ) .

#### 4-3-3 Les aciers :

Les morceaux d'aciers utilisés sont les aciers de ferrailage habituellement utilisés dans le béton armé de différent diamètre et de 5mm de longueur.

#### 4-3-4 Autres produits ( Adjuvants ) :

Nous avons , durant nos expériences , utilisé l'adjuvant PLASTIMENT BV 40 qui est un plastifiant réducteur d'eau destiné selon le fabricant pour des bétons de hautes résistances mécaniques . Ce produit est commercialisé par Sika O.M Alger .

La fiche technique concernant cet adjuvant est donnée en annexe .

#### 4-4 Confection des éprouvettes :

Pour la formulation des mélanges nous avons donc utilisé la méthode dite de « Dreux Gorisse » qui est de loin la méthode la plus appréciable du point de vu pratique . Elle est la méthode la plus utilisée , dans notre pays , pour déterminer la composition des bétons .Ceci nous permet par ailleurs , d'aboutir à des résultats que l'on peut comparer à ceux relevés sur de différents chantiers .

##### 4- 4 -1 Préparation des mélanges :

Conformément à la norme NF 18.404 , les constituants après avoir été pesés, sont introduits du plus gros au plus fin à l'intérieur du malaxeur , le ciment étant introduit juste avant le sable ( Figure 4.1) . Le malaxage dure une minute à sec et se prolonge durant deux minutes après ajout de l'eau .

L'ajustement de la teneur en eau a été réalisé en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams .



**Figure 4.1 : Le malaxage des constituants du béton avant le coulage .**

#### 4- 4 -2 Mise en place du béton dans les moules :

Le remplissage des moules cylindriques se fait en deux couches successives systématiquement piquées à l'aide d'une tige métallique de 16 mm de diamètre .

#### 4- 5 Conservation :

Après la mise en place du béton les éprouvettes sont conservées dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  .Pour éviter tout échange hydrique avec l'extérieur , la face supérieure du moule est protégée par un film en plastique .

Les éprouvettes confectionnées sont démoulées 24 heures après leur mise en place puis conservées dans un bassin (sous l'eau ) ( Figure 4.2) .



**Figure 4.2 : Conservation des éprouvettes dans un bassin (sous l'eau )**

#### 4- 6 Type d'essai utilisé :

La résistance à la compression est la caractéristique la plus significative pour apprécier la qualité du béton .Nous avons donc retenu , pour principal essai , l'essai de compression simple . Les échéances des essais ont été de 3 , 7 et 28 jours.

Juste avant les essais on procède à la préparation des éprouvettes doivent présenter une planéité parfaite des faces de chargement ainsi qu'une orthogonalité par rapport aux génératrices du cylindre (voir figure 4.3).



**Figure 4.3 Epreuve en béton cylindrique avant l'essai d'écrasement**

Le surfaçage a été réalisé à l'aide d'une machine qui opère par ponçage des faces de chargement .

La mise en charge s'effectue avec une vitesse de montée en charge constante de 0.5 MPa ( 5 bars ) par seconde jusqu'à la rupture de l'éprouvette ( Figure 4.4) .



**Figure 4.4 : Presse à béton**

#### 4- 7 Différents bétons étudiés :

Ce travail consacré à l'étude des bétons modifiés par rapport aux bétons d'usage courant , nous intéressons principalement à la résistance à la compression et se veut proche condition pratique de réalisation . C'est pourquoi le choix des matériaux s'est fait en conséquence , à savoir des ciments commerciaux et des granulats classiques et les aciers habituellement utilisés par nos chantiers . De ce fait des combinaisons possibles des matériaux sont nécessaires pour la confection des bétons voulus .

Le but de ce chapitre est donc de mettre en évidence les paramètres de composition qui permettent une amélioration de la qualité du béton .

Nous avons alors confectionné plusieurs bétons qui diffèrent par leur composition , la nature des granulats les teneurs en eau les dosages en ciment et la présence des aciers ainsi que la présence des adjuvants .

#### 4- 7- 1 Béton type B1 :

Ce béton est confectionné avec les deux graviers 8/15 et 25/25 , le sable fin et le ciment CEMI( 350 ) . Ce béton a été considéré au cours de notre travail ,

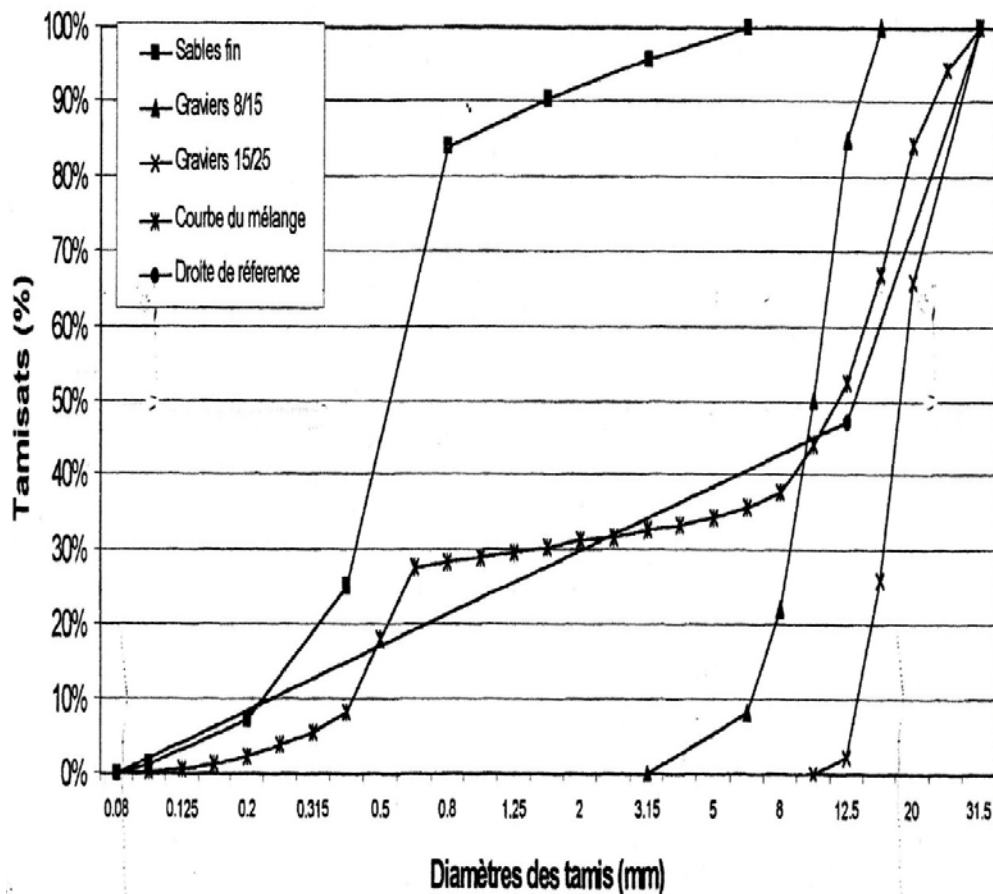
comme le béton de référence , c'est à partir de ce dernier que nous avons commencé notre tentative d'amélioration .

La composition de ce béton dit de « référence » est donnée dans le tableau 4-1ci –dessous .

**Tableau 4-1 : Composition du béton B1**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|------|------------------------|
| 642                 | 385                       | 886                        | 350             | 0.55 | 55                     |

La courbe granulométrique de ce mélange est élustrée sur la figure 4.5 ci-dessous.



**Figure 4.5 : Courbe granulométrique du mélange du béton B1**

Les résultats obtenus avec ce béton , sont regroupés au tableau 4-2 :

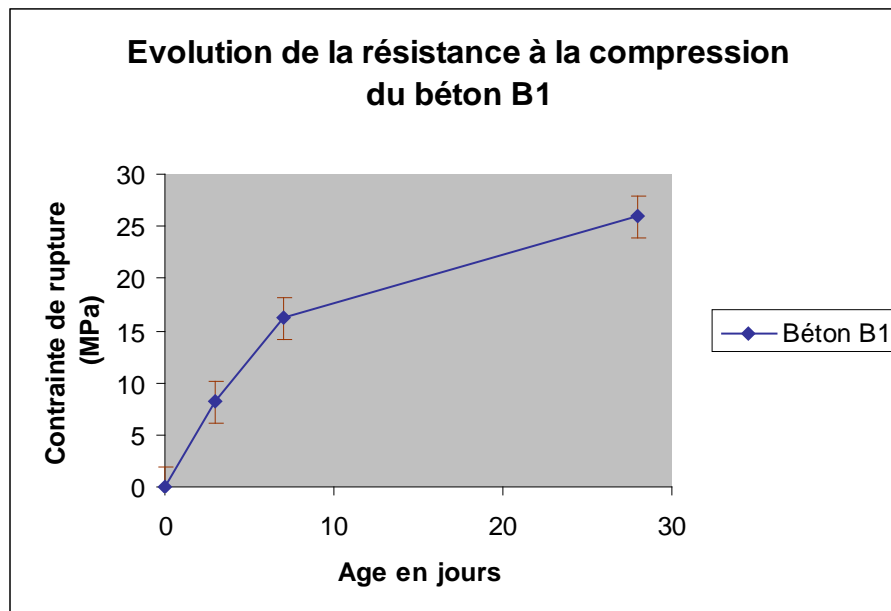


**Tableau 4-2 : Résultats des essais d'écrasements du béton B1**

| Agés d'essai                   | 3 jours |     | 7 jours |      | 28 jours |      |
|--------------------------------|---------|-----|---------|------|----------|------|
| Contraintes de Rupture ( MPa ) | 8.1     | 8.2 | 16.1    | 16.2 | 26       | 25.9 |
|                                | 8.4     |     | 16.5    |      | 26.1     |      |
|                                | 8.3     |     | 16.1    |      | 25.8     |      |
| Ecart type                     | 0.141   |     | 0.07    |      | 0.141    |      |

La figure 4-6 ci-dessous nous donne l'évolution de la résistance à la compression du béton B1.

Ecart type :  $S = [ ( 1/(n-1) * \sum (X_i - X)^2 ) ]^{1/2}$

**Figure 4-6: Evolution de la résistance à la compression du béton B1**

Après l'analyse des résultats obtenus avec le béton B1 dont l'affaissement est de (55 mm ) ce qui nécessite de bons moyens de vibration , nous avons penser à confectionner un béton qui soit le plus proche de celui commercialisé habituellement par l'entreprise ( affaissement de 110 mm ) , et qui répond très bien aux exigences de mise en œuvre .

#### 4- 7- 2 Béton type B2 :

Ce béton est confectionné de la même manière que le béton B1 à savoir les graviers 8/15 et 15/25 ainsi que le ciment CEMI (350 ) et le sable fin, seulement l'affaissement est de (110 mm ) comme l'indique le tableau 4-3 ci-dessous .

**Tableau 4-3 : Composition du béton B2**

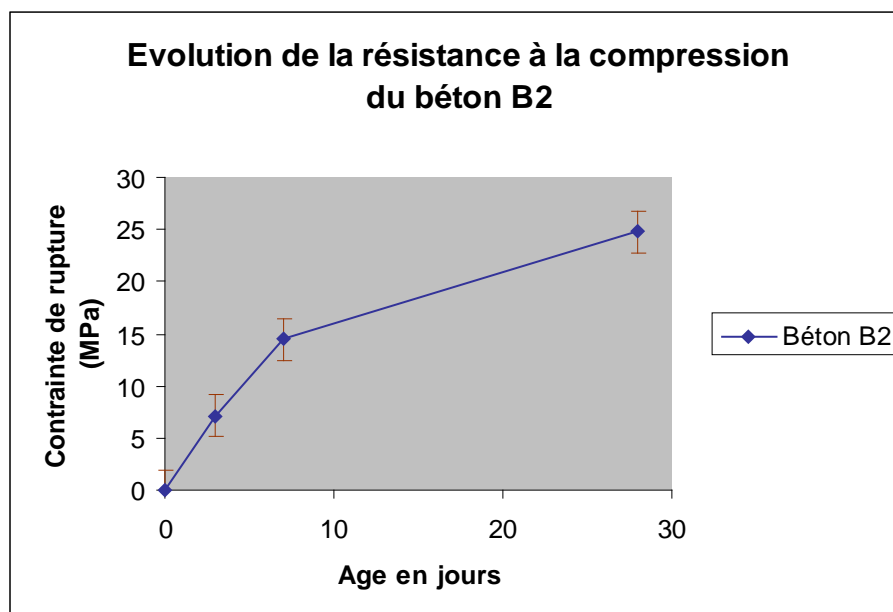
|                     |                           |                            |                 |      |                        |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|------|------------------------|
| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
| 642                 | 385                       | 886                        | 350             | 0.68 | 110                    |

Les résultats obtenus sont rapportés au tableau 4-4 suivant :

**Tableau 4-4 : Résultats des essais d'écrasements du béton B2**

| Ages d'essai                      | 3 jours |     | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|-----|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 7       |     | 14.8    |      | 24.6     |      |
|                                   | 7.2     | 7.1 | 14.2    | 14.5 | 25.1     | 24.8 |
|                                   | 7.2     |     | 14.5    |      | 25       |      |
| Ecart type                        | 0.07    |     | 0       |      | 0.212    |      |

Les figures (4-7 et 4-8 ) suivantes nous donnent l'évolution de la résistance du béton B2 , ainsi que la comparaison entre l'évolution de la résistance des béton B1 et B2.

**Figure 4-7 : Evolution de la résistance à la compression du béton B2**

On peut remarquer le rôle prépondérant de l'ouvrabilité .En effet , les résultats obtenus pour ce béton B2 d'affaissement (110 mm ) sont légèrement plus faibles par rapport à ceux du béton B1 d'affaissement ( 55 mm). Une diminution d'environ 4 % de la résistance à vingt huit jours a été observée .

On peut attribuer cette perte de résistance à l'augmentation du rapport E/C ( 0.68 contre 0.55 pour B1 ) .

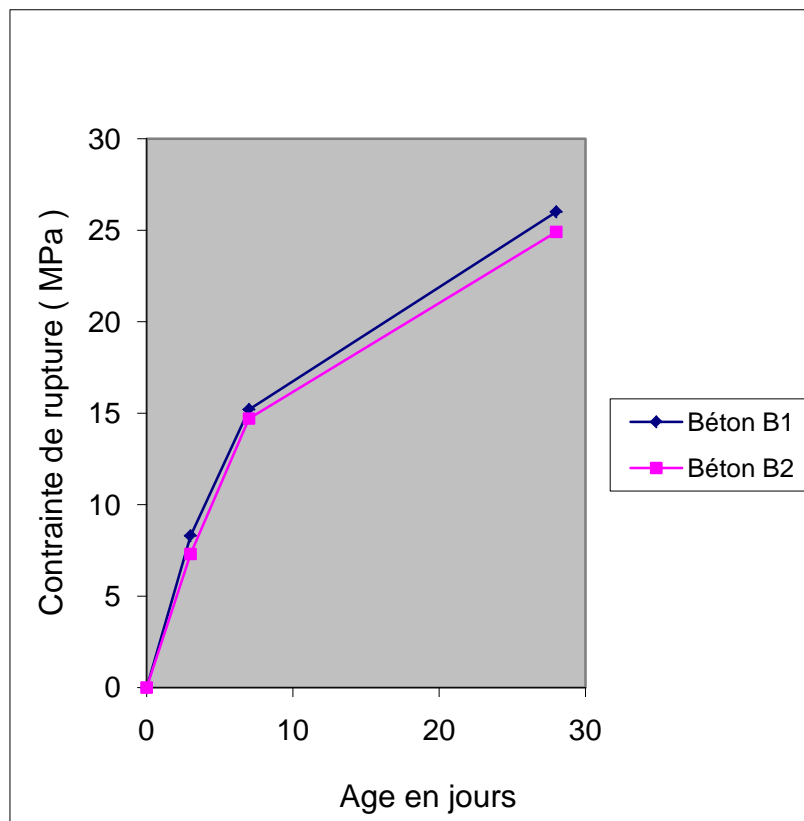


Figure 4-8 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B1 et B2

Les résultats obtenus avec les bétons B1 et B2 n'ayant pas atteint les performances souhaitées , nous avons , par la suite , été conduit à rechercher une autre composition qui nous rapproche du béton souhaité du point de vu résistance .

#### 4- 7- 3 Béton type B3 :

Pour ce béton nous avons remplacé une quantité de gravier 8/15 et une quantité de sable fin par une quantité d'acier de ferrailage de diamètre  $\varnothing=12$  mm , nous aurons donc pour ce béton B3 : du sable fin , du gravier 8/15 , du gravier 15/25 , de l'acier de ferrailage  $\varnothing 12$ , du ciment CEMI (350) , et de l'eau comme l'indique le tableau 4-5.

**Tableau 4-5 : Composition du béton B3**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>$\varnothing 12$<br>(kg) | Ciment<br>(kg) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 231                               | 350            | 0.55 | 55                     |

Les résultats d'écrasement de ce béton sont donnés dans le tableau 4-6 suivant :

**Tableau 4-6 : Résultats des essais d'écrasements du béton B3**

| Ages d'essai                      | 3 jours |     | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|-----|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 9       |     | 18.5    |      | 29.9     |      |
|                                   | 10      | 9.3 | 18.7    | 18.5 | 30.5     | 30.3 |
|                                   | 9.3     |     | 18.5    |      | 31       |      |
| Ecart type                        | 0.282   |     | 0.141   |      | 0.353    |      |

La figure 4-9 suivante montre l'évolution de la résistance du béton B3 .

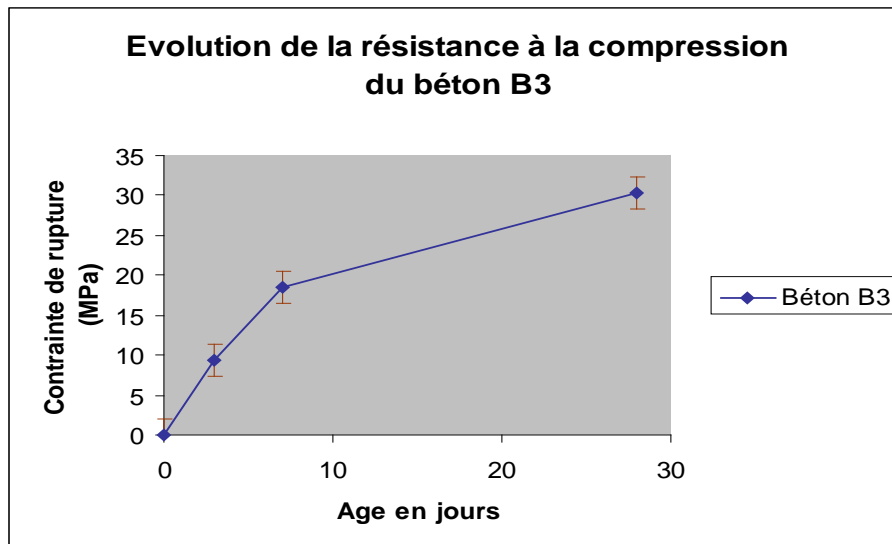


Figure 4-9: Evolution de la résistance à la compression du béton B3

La figure 4-10 suivante nous montre l'évolution comparée de la résistance de ce béton B3 à celle du béton B2 et B1 .

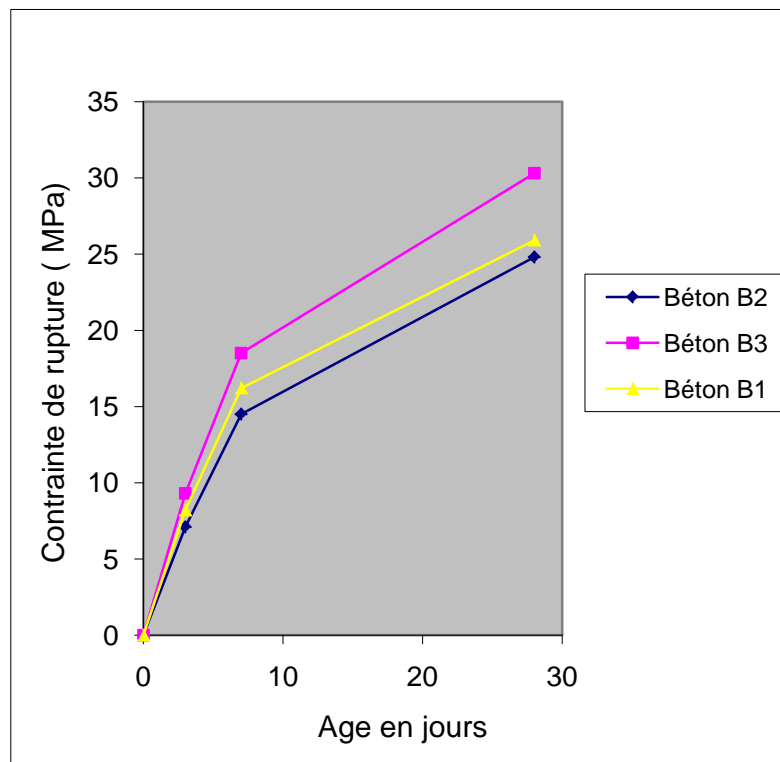


Figure 4-10 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B3 ,B2 et B1

Les résultats obtenus avec ce béton que l'on peut qualifier de béton de laboratoire de par sa consistance ( affaissement 55 mm ) sont meilleurs que ceux obtenus avec le béton B2 .Une meilleure comparaison peut être faite avec le béton B1 qui est de même consistance .

Si le gain de résistance obtenu avec ce béton d'affaissement 55 mm par rapport au béton B2 de consistance molle ( affaissement 110 mm ) peut s'expliquer par la différence des teneurs en eau , le gain de résistance d'environ 17 % à 7 jours par rapport au béton B1 qui est de même teneur en eau ( affaissement 55 mm ) ne peut être du qu'à l'apport de l'acier de ferrailage Ø12 qui a du conduire à une meilleure homogénéité et solidité du béton .

#### 4- 7- 4 Béton type B4 :

Ce béton B4 diffère du béton B3 par sa teneur en eau . Ceci pour des raisons de mise en œuvre et dans une moindre mesure pour reproduire à peu près le béton habituellement fabriqué au niveau des chantiers .

Le béton B4 est donc le béton B3 auquel nous avons ajouté environ 46 litres d'eau nécessaire a une consistance plastique .Le tableau 4-7 ci-dessous en donne la composition .

**Tableau 4-7: Composition du béton B4**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø12<br>(kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 231                   | 350             | 0.68 | 110                    |

Les résultats obtenus avec ce béton de meilleure ouvrabilité sont rassemblés dans le tableau 4-8 suivant :

**Tableau 4-8: Résultats des essais d'écrasements du béton B4**

| Ages d'essai                   | 3 jours |     | 7 jours |      | 28 jours |      |
|--------------------------------|---------|-----|---------|------|----------|------|
| Contraintes de Rupture ( MPa ) | 9.4     |     | 18      |      | 28.4     |      |
|                                | 8.8     | 9.1 | 17.5    | 17.7 | 28.8     | 28.5 |
|                                | 9.0     |     | 17.6    |      | 28.4     |      |
| Ecart type                     | 0.07    |     | 0       |      | 0.07     |      |

Les résultats obtenus avec ce béton que l'on peut qualifier maintenant de laboratoire de par son affaissement , sont légèrement plus faibles par rapport à ceux obtenus avec le béton B3 à 28 jours , mais à 3 et 7 jours les résultats sont pratiquement les mêmes .Ceci peut être principalement dû au rapport E/C qui est plus élevé dans le cas présent .

Par ailleurs on peut remarquer que la résistance du béton B4 est proche de la résistance moyenne désirée, fixée initialement à 30 MPa. Par contre celle du béton B3 peut être considérée satisfaisante, mais ce dernier se caractérise par une faible ouvrabilité.

La figure 4-11 suivante nous donne l'évolution de la résistance à la compression du béton B4 .

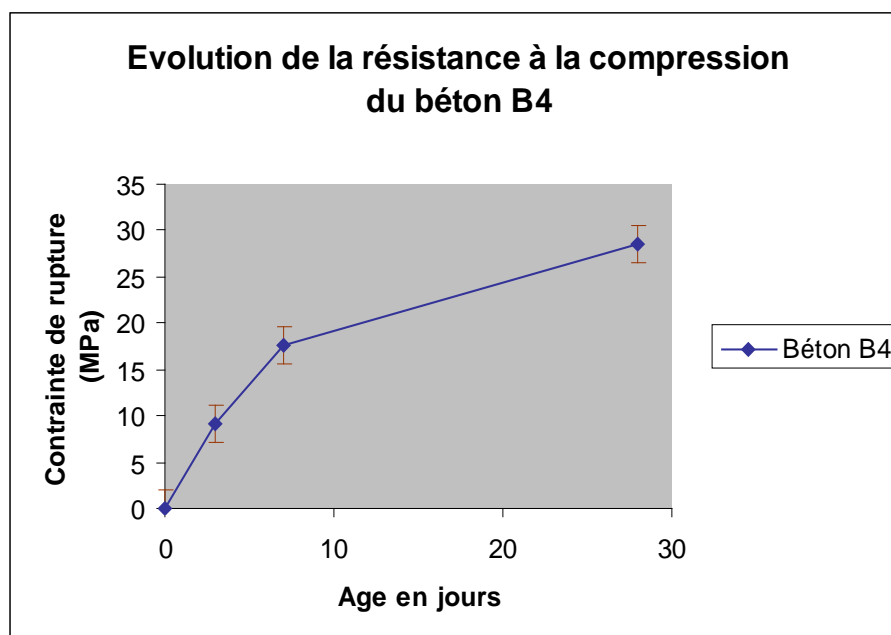


Figure 4-11 : Evolution de la résistance à la compression du béton B4

La figure 4-12 ci-dessous nous donne les évolutions comparées des résistances à la compression des bétons B4 et B3 , lesquels rappelons le ne diffèrent que par la teneur en eau .

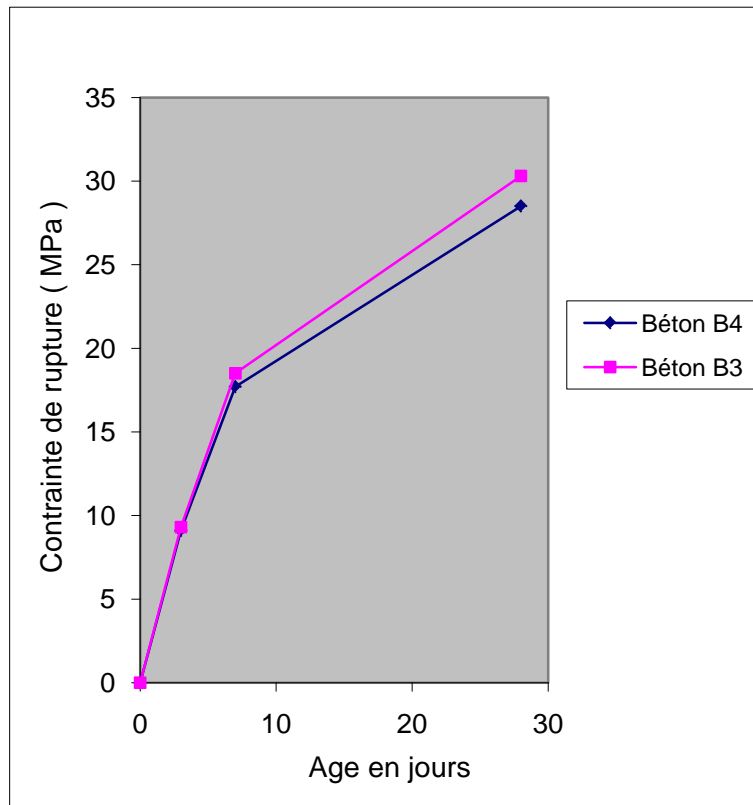


Figure 4-12 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B4 et B3

Nous allons donc tenter d'améliorer l'ouvrabilité de ce béton par un moyen autre que l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage qui comme le montrent les résultats obtenus avec le béton B4 , conduit à une diminution des résistances .

#### 4- 7- 5 Béton type B5 :

Compte tenu des résultats peu satisfaisants obtenus avec les bétons B3 et B4 et en vue d'améliorer leurs résistances nous allons remplacer l'acier de ferrailage  $\varnothing 12$  par celui de  $\varnothing 10$  afin d'avoir une meilleure compacité et réduire au maximum les vides . La composition de ce nouveau béton est donnée au tableau 4-9 suivant :



**Tableau 4-9: Composition du béton B5**

| Sable fin<br>(Samba )<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø10<br>(kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                             | 308                       | 886                        | 231                   | 350             | 0.68 | 110                    |

Les résultats obtenus de ce béton B5 , d'ouvrabilité acceptable , sont rapportés au tableau 4-10 ci-dessous :

**Tableau 4-10: Résultats des essais d'écrasements du béton B5**

| Agés d'essai                      | 3 jours |      | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 12.5    | 12.6 | 18.2    | 18.5 | 29.5     | 30.5 |
|                                   | 12.2    |      | 18.3    |      | 31       |      |
|                                   | 13      |      | 19.2    |      | 30.8     |      |
| Ecart type                        | 0.07    |      | 0.141   |      | 0.141    |      |

La figure 4-13 ci-dessous montre l'évolution de la résistance à la compression du béton B5 .

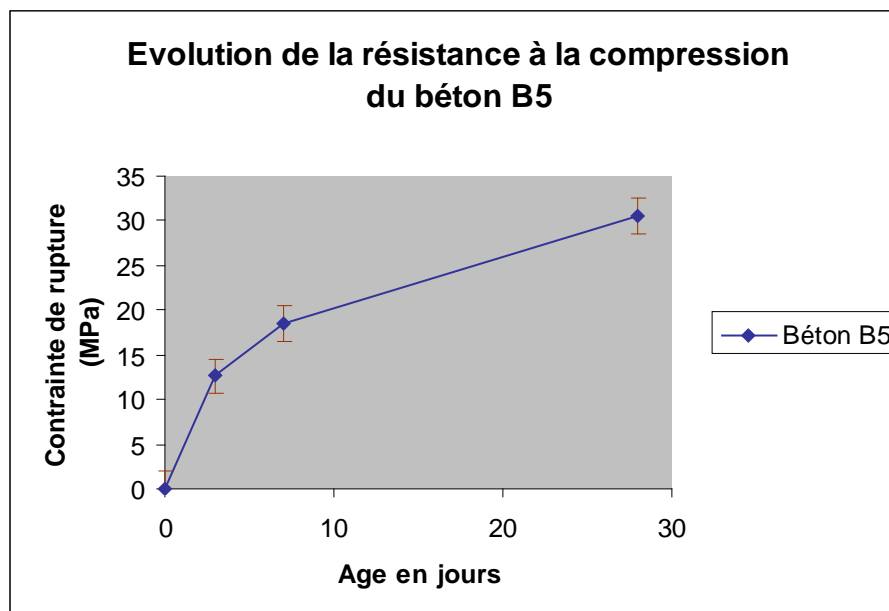


Figure 4-13 : Evolution de la résistance à la compression du béton B5

La figure 4-14 suivante nous montre l'évolution de la résistance à la compression du béton B5 comparée à celles des béton B3 et B4 .

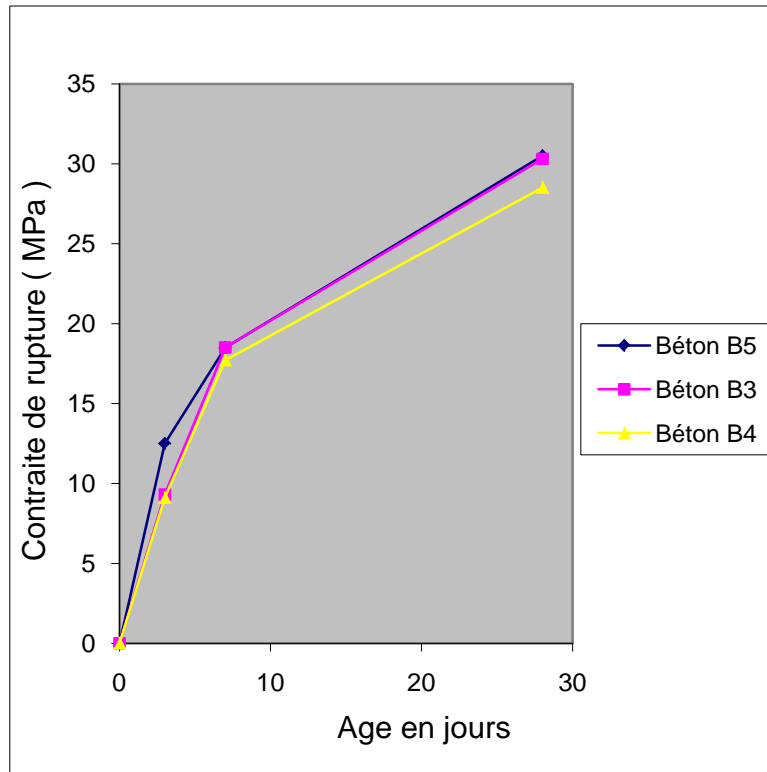


Figure 4-14 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B3 , B4 et B5

On peut constater sur la figure ci-dessus le rôle de l'acier de ferrailage  $\varnothing 10$  sur les résultats obtenus à 3 jours d'âge par rapport à celles obtenus pour les bétons B3 et B4 , une augmentation à 3 jours d'âge d'environ 30% , et la même résistance à la compression à 28 jours d'âge à celle du béton B3 qui a un affaissement de 55 mm par rapport au béton B5 qui a un affaissement de 110 mm . De ce fait le rôle de la granulométrie est important car elle réduit les vides entre les granulats , et de ce fait elle augmente la compacité du béton .

Pour améliorer encore plus la résistance à la compression du béton en va modifier la granulométrie du béton en rajoutant à l'acier du ferrailage  $\varnothing 10$  celui du  $\varnothing 8$  de ce fait on aura le nouveau béton B6 .

#### 4- 7- 6 Béton type B6 :

Pour ce béton en aura les mêmes composants du béton B5 en plus de l'acier de ferrailage  $\varnothing 8$  qui remplacera la moitié de celui de  $\varnothing 10$  , le tableau 4-11 suivant nous donne la composition de notre nouveau béton B6 :

**Tableau 4-11 : Composition du béton B6**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø8<br>(kg ) | Acier<br>Ø10<br>(kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 125                  | 125                   | 350             | 0.55 | 55                     |

Les résultats d'essais sont regroupés dans le tableau 4-12 suivant :

**Tableau 4-12: Résultats des essais d'écrasements du béton B6**

| Agés d'essai                      | 3 jours |      | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 18.1    |      | 24      |      | 31       |      |
|                                   | 18      | 18.1 | 24.2    | 24.1 | 31.5     | 31.2 |
|                                   | 18.1    |      | 24.1    |      | 31.2     |      |
| Ecart type                        | 0.07    |      | 0.07    |      | 0.07     |      |

La figure 4-15 suivante nous montre l'évolution de la résistance à la compression du béton B6 :

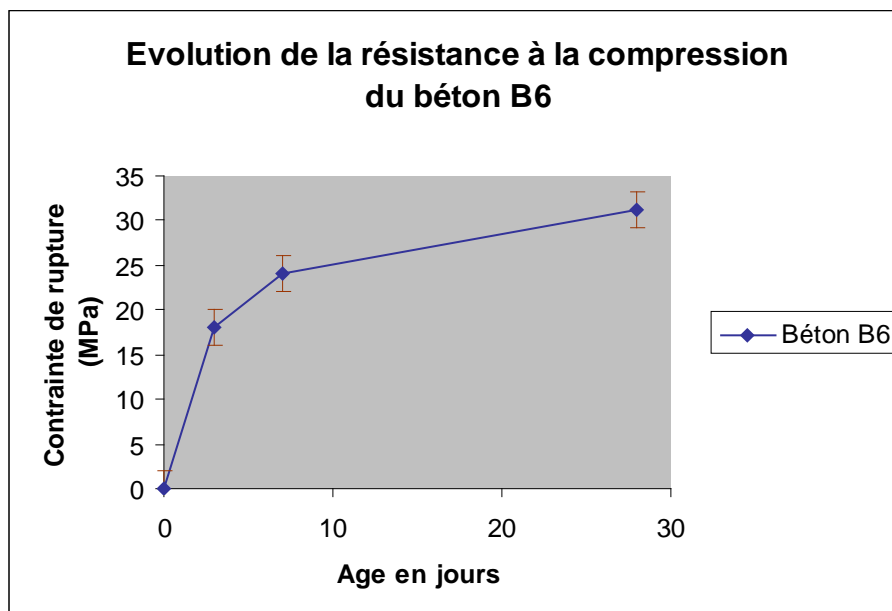


Figure 4-15 : Evolution de la résistance à la compression du béton B6

Le graphe 4-16 suivant nous donne l'évolution de la résistance à la compression du béton B6 comparée à celles des bétons B3 , B4 et B5 .

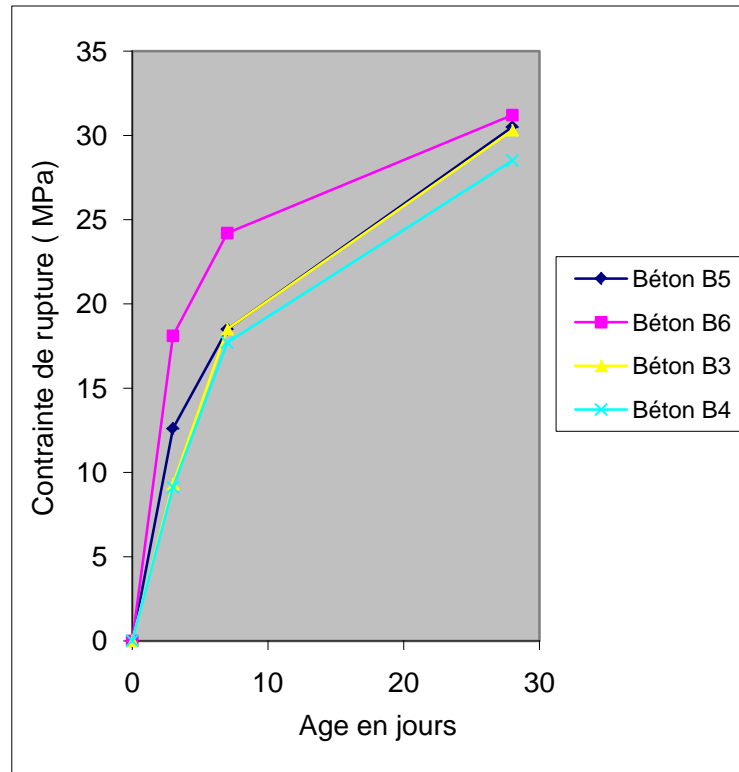


Figure 4-16 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B3,B4 , B5 et B6

On peut constater que les résultats obtenus pour le béton B6 à 3 jours d'âge sont supérieurs aux résultats obtenus à 7 jours d'âge pour les bétons B1 et B2 , cela nous montre le rôle de la granulométrie ainsi que le rôle de l'acier , les résultats obtenus à 28 jours d'âge pour le béton B6 sont satisfaisants  $\approx 31$  MPa .

Dans le but d'améliorer encore plus les propriétés mécaniques du béton , nous allons rajouter un adjuvant à la composition précédente et nous comparons les résultats obtenus a ceux déjà obtenus au paravent .

#### 4- 7- 7 Béton type B7 :

Le béton B7 est de même composition que celle du béton B6 du point de vu agrégats , aciers et ciment en plus d'un adjuvant « PLASTIMENT BV40 » dont la notice technique est placée en annexe .

La composition de ce nouveau béton est donnée dans le tableau 4-13 suivant :

**Tableau 4-13 : Composition du béton B7**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø8<br>(kg ) | Acier<br>Ø10<br>(kg ) | Adjuvant<br>( % ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 125                  | 125                   | 0.5               | 350             | 0.48 | 55                     |

Les résultats d'essais obtenus sont regroupés dans le tableau 4-14 suivant :

**Tableau 4-14: Résultats des essais d'écrasements du béton B7**

| Ages d'essai                   | 3 jours |      | 7 jours |      | 28 jours |      |
|--------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|
| Contraintes de Rupture ( MPa ) | 19.1    |      | 27      |      | 34       |      |
|                                | 19      | 19.1 | 26.9    | 27.1 | 34.5     | 34.2 |
|                                | 19.3    |      | 27.3    |      | 34.2     |      |
| Ecart type                     | 0.07    |      | 0.07    |      | 0.07     |      |

Le graphe 4-17 de l'évolution de la résistance à la compression du béton B7 est donné comme suit :

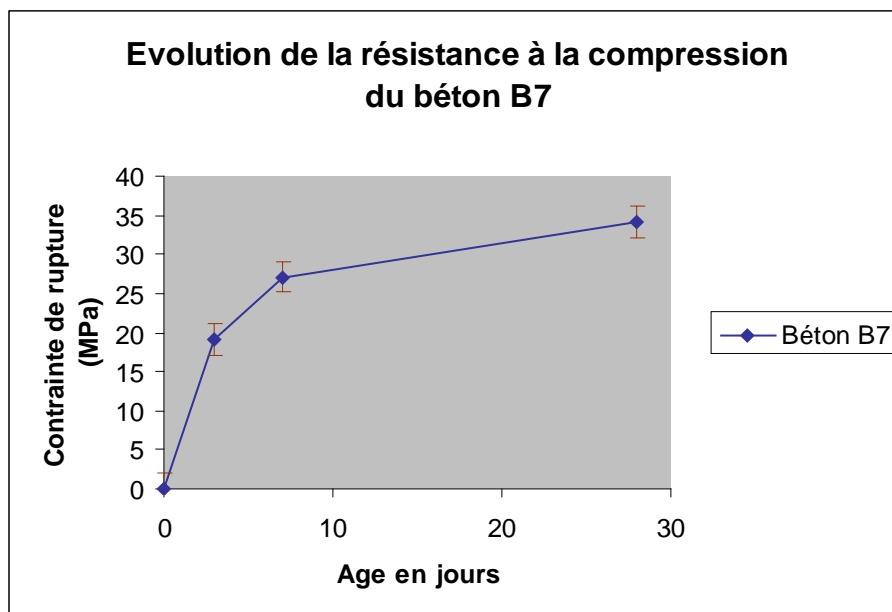


Figure 4-17 : Evolution de la résistance à la compression du béton B7

Le graphe 4-18 suivant nous donne l'évolution de la résistance comparée des bétons B6 et B7 .Cette comparaison est motivée par le fait que les deux bétons ne diffèrent que par leur teneur en eau , les affaissements mesurés au cône d'Abrams sont égaux .

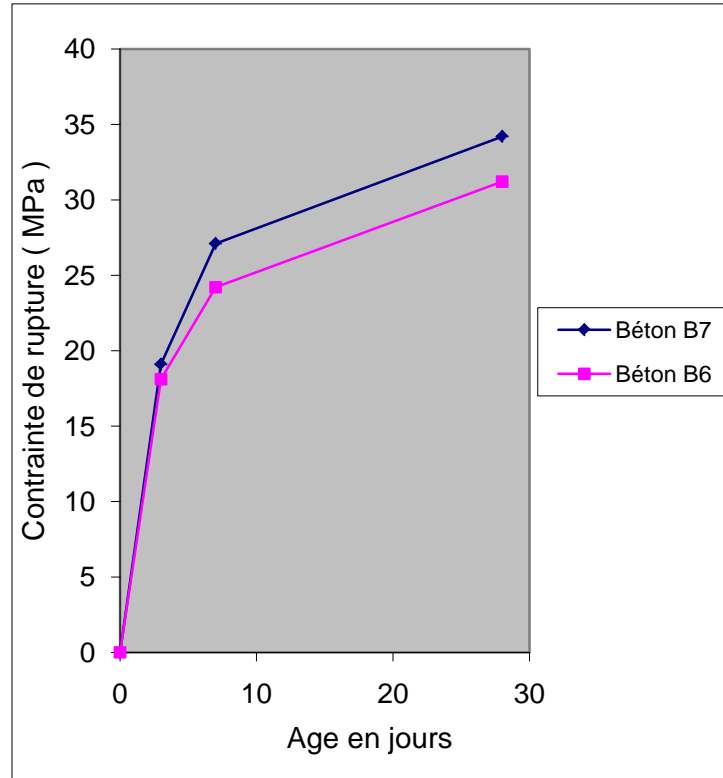


Figure 4-18 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B6 et B7

Le graphe 4-18 ci-dessus nous montre une augmentation assez importante dès 3 jours d'âge .L'ouvrabilité des bétons B6 et B7 est la même avec des rapports E/C différents (0.55 pour le béton B6 et 0.48 pour le béton B7).

Le rôle de l'adjuvant est positif pour l'amélioration de la qualité du béton comme le montre les résultats obtenus à 28 jours qui avoisine 35 MPa , (contrainte moyenne de rupture  $\approx 34.2$  MPa ), par rapport aux résultats habituellement constaté sur nos chantiers .

Pour ce béton B7 le problème de maniabilité a été ressenti vu le faible affaissement 55 mm .

#### 4- 7- 8 Béton type B8 :

En vu d'améliorer la maniabilité du béton B7 nous avons ajouté une quantité d'eau égale à 12 litres par mètre cube de béton soit 7.15 % . De ce fait la composition du béton B8 est donnée comme l'indique le tableau 4-15 suivant :

**Tableau 4-15 : Composition du béton B8**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø8<br>(kg ) | Acier<br>Ø10<br>(kg ) | Adjuvant<br>( % ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 125                  | 125                   | 0.5               | 350             | 0.51 | 75                     |

Les résultats obtenus sont donnés par le tableau 4-16 suivant :

**Tableau 4-16: Résultats des essais d'écrasements du béton B8**

| Agés d'essai                      | 3 jours |      | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 18.6    | 18.4 | 24.4    | 24.6 | 31.6     | 31.8 |
|                                   | 18.3    |      | 24.6    |      | 32       |      |
|                                   | 18.4    |      | 24.7    |      | 32.1     |      |
| Ecart type                        | 0.07    |      | 0.07    |      | 0.212    |      |

En effet la quantité d'eau de gâchage ajouté à permis l'obtention d'un béton d'ouvrabilité acceptable (affaissement qui avoisine 80 mm ) le rapport E/C est alors de 0.51 au lieu de 0.48 .

Le graphe 4-19 suivant nous montre les courbes d'évolution des résistances des deux bétons B7 et B8 pour voir explicitement l'influence de la teneur en eau sur les performances mécaniques du béton .

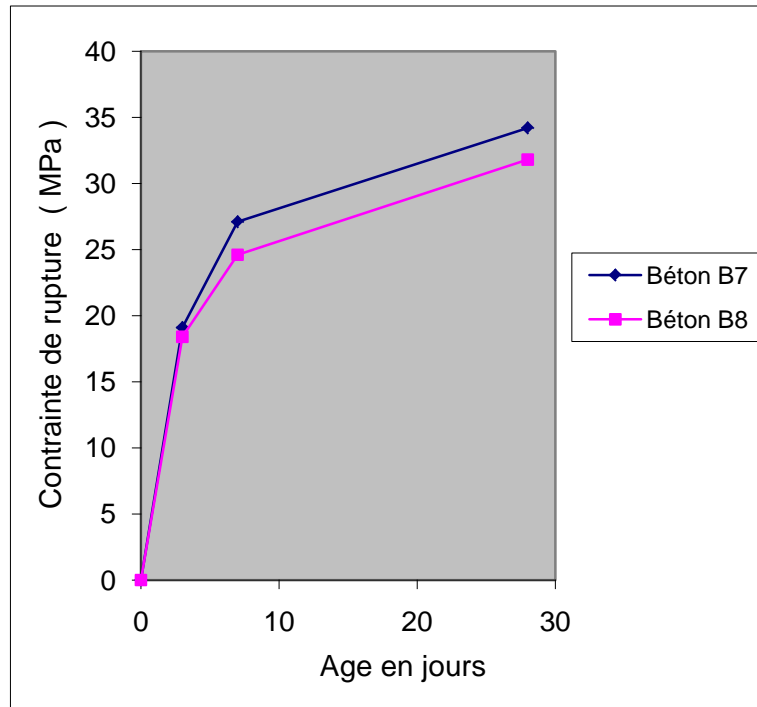


Figure 4-19: Evolution de la résistance à la compression des bétons B7 et B8

On remarque cette baisse logique de résistance à partir du 7 jours d'âge du béton B8 par rapport au béton B7 et qui est estimée à environ 10 % à 28 jours, et qui a fortiori due à l'augmentation de la teneur en eau de gâchage qui elle est estimée à 7.15 %.

Comme on remarque la satisfaction des performances projetées tout à fait au début de la recherche, c'est à dire l'atteinte de la résistance moyenne désirée qui a été fixée à 30 MPa.

L'utilisation d'adjuvant étant encore limitée dans nos chantiers, et afin de s'approcher plus des conditions pratiques de réalisation nous avons juger de reprendre le même béton B8 sans adjuvant, mais modifiant le dosage en ciment.

#### 4- 7- 9 Béton type B9 :

Ce béton étant le même que celui B8 mais sans l'adjuvant et le dosage en ciment est de 400 kg /m<sup>3</sup> au lieu de 350 kg/m<sup>3</sup> pour le béton précédent, l'affaissement est de 110 mm, la composition de notre nouveau béton est donnée dans le tableau 4-17 suivant :



**Tableau 4-17 : Composition du béton B9**

| Sable fin<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Acier<br>Ø8<br>(kg ) | Acier<br>Ø10<br>(kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|------|------------------------|
| 491                 | 308                       | 886                        | 165                  | 165                   | 400             | 0.55 | 110                    |

Au tableau 4-18 suivant sont regroupés les résultats numériques des essais d'écrasement .

**Tableau 4-18: Résultats des essais d'écrasements du béton B9**

| Agés d'essai                      | 3 jours |      | 7 jours |      | 28 jours |      |
|-----------------------------------|---------|------|---------|------|----------|------|
| Contraintes de<br>Rupture ( MPa ) | 21.4    | 21.3 | 27.9    | 27.7 | 32       | 32.2 |
|                                   | 21.4    |      | 27.5    |      | 32.1     |      |
|                                   | 21.2    |      | 27.5    |      | 32.4     |      |
| Ecart type                        | 0.07    |      | 0.141   |      | 0.07     |      |

Sur la figure 4-20 suivante est reproduite le courbe de l'évolution de la résistance du béton B9 comparée à celle des béton B5 et B8 .

On peut remarquer que le béton B9 offre de meilleurs résultats par rapport aux béton B5 et B8 dans les premiers jours ( 3 et 7 jours d'age ) , malgré que le béton B9 et B5 ont le même affaissement ( 110 mm ) , contre (75 mm ) pour le béton B8 .Ce résultat montre bien ce qui est énoncé au paragraphe **3.3.3** concernant l'influence du dosage en ciment sur les performances du béton . Les résultats des essais d'écrasements à 28 jours d'age nous donne de bon résultat  $\approx 32$  MPa , mais du point de vu économique , le béton B9 revient plus cher ( coût du ciment et l'acier ) , de ce fait l'utilisation de ce type de béton est peu propable , par conséquent nous allons confectionner un nouveau béton sans acier ni adjuvant et avec un ciment CEMI (350 ) .

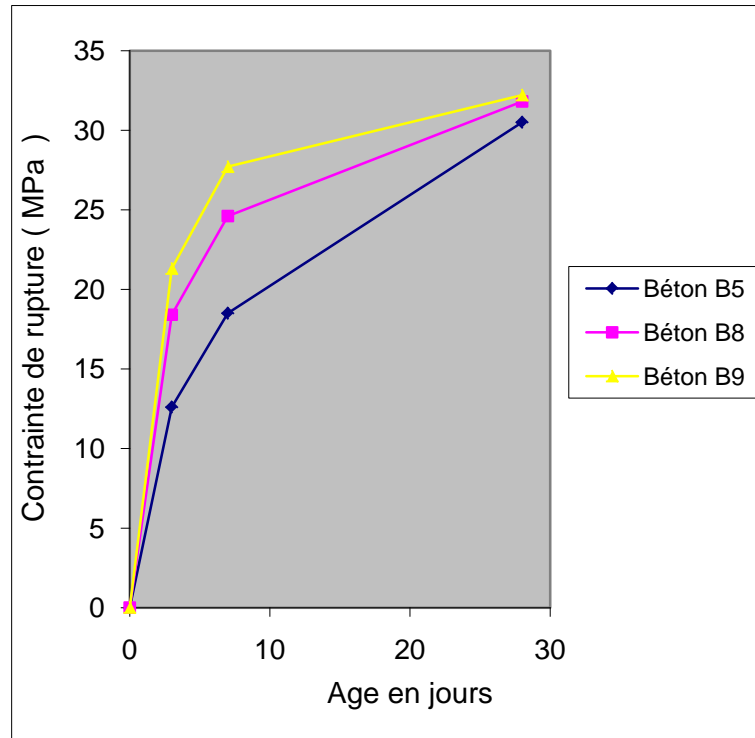


Figure 4-20 : Evolution de la résistance à la compression des bétons B5 , B8 et B9

#### 4-7-10 Béton type B10 :

Vu les résultats satisfaisants enregistrées sur les bétons type B7 , B8 et B9 , nous avons cherché à améliorer la granulométrie du sable . Nous avons donc été conduit à former un sable composé des deux sables dont nous disposons à savoir le sable fin et le sable gros de Keddara et on rajoute le gravier 3/8 afin d'avoir une granulométrie continue .

Sur la base des conclusions du paragraphe 1.2.7 du chapitre 1 concernant l'influence du module de finesse du sable sur les résistances du béton selon [ 8 ] , ( un bon sable est celui dont le module de finesse est proche de 2.5 ) , donc nous nous somme fixé la valeur de 2.5 pour le module de finesse du sable composé que nous voulons essayer .

Pour un module de finesse de sable corrigé fixé à  $M.f = 2.5$  , les proportions des deux sables à mélanger s'obtiennent aisément par les relations suivantes :

$$\text{Proportion du sable S1} = \frac{M.f - M.f2}{M.f1 - M.f2} \quad [ 8 ]$$

$$\text{Proportion du sable S2} = \frac{M.f1 - M.f}{M.f1 - M.f2} \quad [ 8 ]$$

Dans notre cas les sables à mélanger sont :

- Le sable fin de module de finesse  $M.f1 = 1.98$
- Le Sable gros de Keddara de module de finesse  $M.f2 = 2.7$

Les proportions à mélanger sont dans ce cas respectivement 28% et 72 % .

La composition du béton type B12 est donnée dans le tableau 4-19 qui suit.

Tableau 4-19 : Composition du béton B10

| Sable fin<br>( kg ) | Sable gros<br>(Keddara)<br>( kg ) | Gravier<br>3/8<br>( kg ) | Gravier<br>8/15<br>( kg ) | Gravier<br>15/25<br>( kg ) | Ciment<br>(kg ) | E/C  | Affaissement<br>( mm ) |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|------|------------------------|
| 185                 | 482                               | 201                      | 292                       | 802                        | 350             | 0.55 | 95                     |

Les résultats obtenus par l'écrasement de ce béton sont donnés dans le tableau 4-20 qui suit :

**Tableau 4-20 : Résultats des essais d'écrasements du béton B10**

| Ages d'essai                   | 3 jours |    | 7 jours |      | 28 jours |      |
|--------------------------------|---------|----|---------|------|----------|------|
| Contraintes de Rupture ( MPa ) | 22.8    | 23 | 29      | 28.7 | 35.6     | 35.3 |
|                                | 23      |    | 28.5    |      | 35.2     |      |
|                                | 23.1    |    | 28.7    |      | 35       |      |
| Ecart type                     | 0.07    |    | 0.07    |      | 0.07     |      |

La figure 4-21 et 4-22 suivantes nous montrent respectivement l'évolution de la résistance à la compression du béton type B10 , et l'évolution de la résistance à la compression du béton B10 comparée celle des bétons B9et B8.

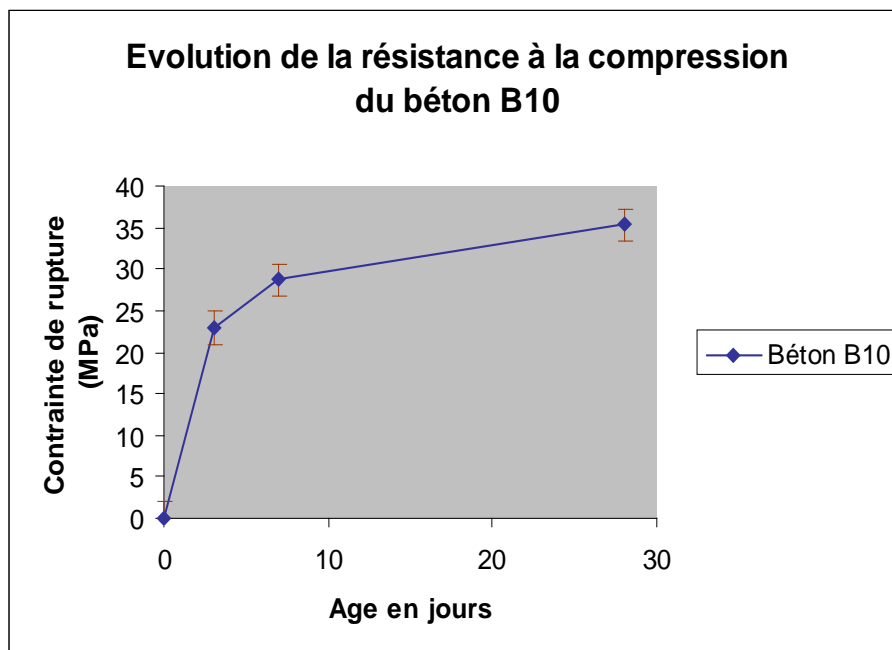
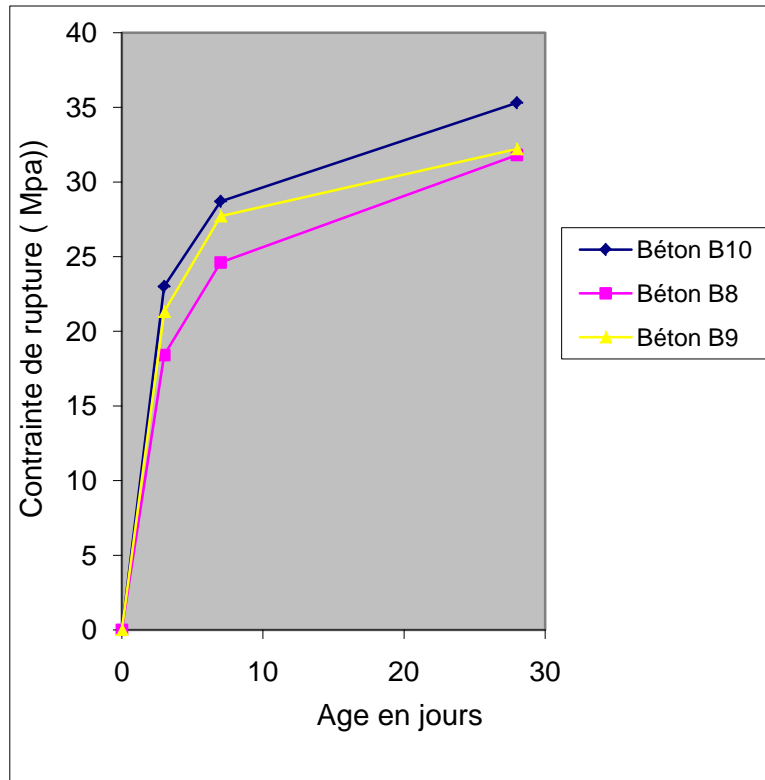


Figure 4-21 : Evolution de la résistance à la compression du béton B10



**Figure 4-22 : Evolution de la résistance à la compression du béton B10**

Comparée à celle des bétons B9 et B8

Les résultats obtenus par le béton B10 comme le montre le tableau 4-20 et le graphe 4-21 sont très satisfaisants car on dépasse largement la résistance recherchée ( 30 MPa ) à 28 jours d'âge puisque nous obtenons une moyenne de ( 35.3 MPa ) , ce qui nous fait dire que le béton B10 est un bon béton .

De même le graphe 4-22 illustre l'évolution de la résistance à la compression du béton B10 comparée à celle des bétons B9 et B8. On remarque que dès l'âge de 3 jours les résultats sont satisfaisants car elles dépassent celles obtenues par le bétons B8 et avoisinent à celles obtenues par le béton du type B9 qui est composé par un ciment CEMI (400 ) , mais à l'âge de 28 jours les résultats obtenus par le béton B10 sont supérieurs à celles du béton du type B9 .

Les résultats obtenus , nous montre que le sable fin a eu un effet positif sur la consistance du béton , ainsi que la granulométrie continue choisie a joué son rôle dans la compacité et la résistance à 28 jours du béton choisi .

4-7-11 Tableau récapitulatif :

Le tableau 4-21 suivant nous résume la partie expérimentale , Composition des différents béton confectionnés , résultats obtenus ( contrainte moyenne à 28 jours )

**Tableau 4-21 : Tableau récapitulatif**

| Comp<br>Bét | Sable       |              | Gravier     |              |               | Acier      |             |             | Ciment<br>(kg) | Adj  | E/C  | Aff<br>mm | <b><math>\sigma_{28}</math></b><br>Mpa |
|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|------------|-------------|-------------|----------------|------|------|-----------|--|
|             | fin<br>(kg) | Gros<br>(kg) | 3/8<br>(kg) | 8/15<br>(kg) | 15/25<br>(kg) | Ø8<br>(kg) | Ø10<br>(kg) | Ø12<br>(kg) |                |      |      |           |  |
| B1          | 642         | -            | -           | 385          | 886           | -          | -           | -           | 350            | -    | 0.55 | 55        | <b>25.9</b>                            |
| B2          | 642         | -            | -           | 385          | 886           | -          | -           | -           | 350            | -    | 0.68 | 110       | <b>24.8</b>                            |
| B3          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | -          | -           | 231         | 350            | -    | 0.55 | 55        | <b>30.3</b>                            |
| B4          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | -          | -           | 231         | 350            | -    | 0.68 | 110       | <b>28.5</b>                            |
| B5          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | -          | 231         | -           | 350            | -    | 0.68 | 110       | <b>30.5</b>                            |
| B6          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | 125        | 125         | -           | 350            | -    | 0.55 | 55        | <b>31.2</b>                            |
| B7          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | 125        | 125         | -           | 350            | Bv40 | 0.48 | 55        | <b>34.2</b>                            |
| B8          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | 125        | 125         | -           | 350            | Bv40 | 0.51 | 75        | <b>31.8</b>                            |
| B9          | 491         | -            | -           | 308          | 886           | 125        | 125         | -           | 400            | -    | 0.55 | 110       | <b>32.2</b>                            |
| B10         | 185         | 482          | 201         | 292          | 802           | -          | -           | -           | 350            | -    | 0.55 | 95        | <b>35.3</b>                            |

**CONCLUSION  
ET  
RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION et RECOMMANDATIONS

### Conclusions générales :

Le travail de recherche a visé à améliorer les performances mécaniques du béton , jusqu'à l'obtention d'un béton de bonne qualité .

La synthèse bibliographique du chapitre 1,2 et 3 que nous avons proposée a montré le grand nombre de facteurs qui peuvent influencer sur la qualité du béton .

L'ajout de l'acier de ferrailage de différent diamètre au gravier nous a permis l'obtention d'un béton dont les performances mécaniques sont appréciables , n'est au moins l'écrasement des éprouvettes du béton sus cité nous ont donné des résultats qui ne sont pas plus intéressants que ceux obtenus par un sable mélangé sans l'ajout de l'acier .

Le choix de la résistance comme critère de qualité du béton est motivé par la simplicité de la mesure de ce critère par rapport à d'autre critère comme la dureté , le retrait ou autre , de plus ce choix est retenu vu que la mesure d'une résistance est une opération parfaitement appréhendée en Génie Civil et elle est fiable .

Dans notre recherche du béton qui devait répondre à notre exigence ( contrainte de rupture du béton avoisinant 30 MPa ) nous nous sommes d'abord intéressés au changement de la squelette du béton en rajoutant une quantité de l'acier du ferrailage sous différent diamètre (12 , 10 et 8 )au gravier de différent diamètre ( 8/15 et 15/25 ) , lequel a donné de bons résultats (contrainte à le rupture  $\approx 31.2$  MPa pour le béton B6) par rapport au béton traditionnel ternaire à gravier 8/15 et 15/25 seulement ( 24.8 MPa ) .

Nous avons ensuite rajouté de l'adjuvant ( Plastiretard ) au béton du type B6 ( gravier + acier ) et nous avons atteint une contrainte de rupture  $\approx 34$  MPa ( béton B7 ) ,seulement nous avons constaté qu'il est désormais possible d'obtenir des résultats similaires sans l'adjonction d'adjuvants à condition de bien veiller à la composition granulométrique ( recherche d'une granulométrie la plus continue possible entre les granulats et le sable ). L'emploi des adjuvants étant encore limité dans nos chantiers.

Des résultats satisfaisants peuvent être obtenus aussi par l'incorporation d'un ciment à dosage de 400 Kg/m<sup>3</sup> à la place du CEMI à dosage de 350 (ordinaire ) ( béton B9 ) , mais elle est peu économique ( vu la cherté du ciment ) .



Au vu des résultats que nous avons obtenus sur l'ensemble des bétons confectionnés , les meilleurs bétons que nous avons obtenus dans notre étude expérimentale est ceux ou on a utilisé un sable mélangé de module de finesse égale à 2.5 et sans l'apport des aciers ,ni d'adjuvant et avec un ciment CEMI (350 ) , puisque les résultats obtenus sont supérieurs à tous les autres . Ce qui nous fait dire que le choix d'un sable propre et ayant un module de finesse égale à 2.5 favorise à l'obtention d'un bon béton du point de vu maniabilité et résistance.

En outre on a remarqué que l'affaissement à son rôle du point de vu consistance et maniabilité .

De ce fait on peut conclure qu'on peut obtenir un bon béton sans modifier la nature de sa squelette ( sable , gravier , ciment et eau ) , mais on veillant sur la qualité et la quantité de ses constituants ainsi la mise en œuvre .

#### Recommandations :

Sur la base de l'étude bibliographique dans les chapitres ( un , deux et trois ) , et sur la base de l'étude expérimentale ( chapitre quatre ) , nous donnons dans ce qui suit quelques recommandations que nous jugeons utiles pour l'obtention d'un béton jugé de bon qualité ( du point de vu résistance et mise en œuvre ) .

1. Choix des matériaux ( ciment , agrégats , adjuvants , et eau )
2. Il faut essayer d'utiliser des granulométries continues lesquelles peuvent donner des bétons à des teneurs en eau plus faibles par rapport à des bétons de granulométries discontinues pour une même ouvrabilité ( rechercher des sables de module de finesse voisin de 2.5 en mélangeant deux ou plusieurs sables et enrichir le squelette du béton avec un ou deux graviers intermédiaires comme nous l'avons fait dans notre travail .
3. L'eau est le facteur non négligeable : respecter le dosage en eau recommandé et utiliser une eau propre répondant aux recommandations ( contrôle de la teneur en sels ) .
4. Il faut renouveler l'étude de la composition du béton à chaque nouveau approvisionnement en matériaux et veiller à son strict respect .

5. Il faut malaxer les matériaux ( gravier , sables , ciment et l'adjuvant s'il est utilisé ) à sec pendant une à deux minutes avant l'ajout de l'eau .
6. L'emploi d'adjuvants en cas de besoin est plus recommandé que l'ajout d'eau en chantier pour faciliter la mise en œuvre ( l'emploi des adjuvants est encore limité dans nos chantiers ).
7. Un problème essentiel est rencontré dans les chantiers : c'est la mise en place qui nécessite les moyens et les efforts de vibration . Ces efforts sont vite épargnés par l'ajout d'eau qui améliore l'ouvrabilité au détriment de la résistance . Il faut éviter cette mauvaise alternative .

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 . **M.VENUAT** : La pratique des ciments et des bétons . Edition du moniteur des travaux publics et du bâtiment , Paris , 1976.
- 2 . **G.DREUX** : Bétons hydraulique-composition des bétons .Techniques de l'ingénieur 5-1982 , Traité construction , C2 220.
- 3 . **G.DREUX** : Nouveau guide du béton . 3° Edition Eyrolles , Paris , 1981.
- 4 . **Durabilité du béton** **Fiches techniques CIMBETON DB1 , Définitions et facteurs influents de la durabilité , Centre d'information de l'industrie cimentière , Paris , Edition Conseils 30/90 .**
- 5 . **P.ACKER** : Prise et durcissement des bétons – Les effets thermomécaniques . Techniques de l'ingénieur 2-1998 ,Traité construction , C2 235 .
- 6 . **P.ACKER , M.ADAM , M.MAMILLAN ,J.SAULNIER** : Béton hydraulique- Caractères du béton .Techniques de l'ingénieur 11-1986 , Traité construction , C2 240.
- 7 . **J.BARON , R.SAUTEREY** : Le béton hydraulique-connaissance et pratique .Presse de l'Ecole Nationale des ponts ET Chaussées , Paris 1982 .
- 8 . **M.ADAM , J.BENSIMHON , G.COQUILAT , G.DREUX , J.F. FERRIOT , F.GORISSE , R.LESAGE , A-M .PAILLERE , P.TERRIER , M.VENUAT** : Béton hydraulique –Variétés des bétons et constituants .Techniques de l'ingénieur 8-1984 , Traité construction , C2 210 .
- 9 . **R.LACROIX** : Béton hydraulique –Béton à haute résistance . Techniques de l'ingénieur 11-1986 , Traité construction , C2 212 .
- 10 . **E.OLIVIER** : Matériaux de construction .Entreprise Moderne d'Edition , 6° Edition actualisée 1978 .

- 11 . **J.J.BROUKS ,A.M.NEVILLE** : Concrete technologique .Longman scientific and technical ,London 1987 .
- 12 . **A.BRAHMA** : Le béton . Office des Publications Universitaires 10-1992 .
- 13 . **NT.NADIA** :La qualité du béton dans les chantiers de construction .Thèse de magister , Institut de Génie Civil de l'Université de Blida , Septembre 1996.
- 14 . **F.GORISSE** : Essais et contrôle des bétons .Edition Eyrolles , 1978 .
- 15 . **G.DREUX , F.GORISSE** : Contitution à l'étude de la finesse des sables sur diverses qualités du béton .Annales I.T.B.T.P N°261 , Septembre 1969.
- 16 . **H.C.ENTROY , R.E.FRANKLIN , D.C.TEYCHENNE** : Design of normal concrete mixes .University of Glasgow , Departement of Civil –engineering , Englend .
- 17 . **K.NASRI** : Etude sur la qualité du béton dans le sud ( Algérie ) .Proceeding du séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud , mars 1994 .
- 18 . **P.CORMON** : Béton hydraulique-fabrication et transport .Techniques de l'ingénieur 5-1982 , Traité de construction C2 225 .
- 19 . **M.VENUAT** : Les adjuvants des bétons . Revue des matériaux N° 626-627 Novembre-December 1967 .
- 20 . Applications du béton .Fiches techniques **CIMBETON AB4** , les bétons spéciaux , Centre d'Information de l'industrie Cimentière Paris , Edition Conseils 25/90
- 21 . **N.KEDJOUR** : Propriétés et pathologie du béton .Office des publications Universitaires 10-1991 .
- 22 . **M.ADAM** : Béton hydraulique-durabilité et pathologie du béton . Techniques de l'ingénieur 5-1990 , Traité de construction C2 250 .

**23 . A.M.NEVILLE** : Properties of concrete . 3<sup>e</sup>Edition , Edition Pitman , England 1982 .

**24 . D.T.R BE** , Document technique réglementaire .Règles d'exécution des travaux de construction d'ouvrage en béton armé .C.G.S 1991 .

**25 . J.M.GEOFFRAY** : Béton hydraulique –Mise en œuvre . Techniques de l'ingénieur 5-1996, Traité de construction C2 230 .

**26 . GURG** : Slump loss air loss and field performance of concrete , ACI journal , Technical paper N° 80-34 , 1983 .

**27 . A.CORNEILLE** : L'eau et la cure du béton . Proceeding du séminaire « Le béton et l'eau » organisé par le collège international des sciences de la construction .France , Juin 1985 .

**28 . L.LACHEMAT , S.KENAI** : Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés du béton en climat chaud . Proceeding du seminaire international sur la qualité du béton en climat chaud , Mars 1994 .

**29 . N.GOWRIPALAN , J.G. CABRERA , A.R.CUSENS , P.J. WAINWRIGHT** :  
**Effet of curing on durability , Concrete international , Février 1990 .**

# **ANNEXE I**

## **METHODE DE DREUX GORISSE**

## Formulation d'un béton faits sur chantier

La méthode de la formulation d'un béton consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin d'obtenir le béton avec les caractéristiques adaptées à l'ouvrage ou à la partie d'ouvrage.

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de Dreux-Gorisse.

Cette méthode permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Afin d'obtenir la meilleure formule il sera nécessaire de réaliser des essais d'affaissement et de résistance. A la suite de ces essais il sera éventuellement nécessaire d'effectuer certaines modifications.

### Méthode de Dreux-Gorisse

#### 1) Résistance souhaitée

On demande une résistance  $f_{c28}$  en compression à 28 jours. En tenant compte des dispersions et des écarts quadratiques, on adoptera la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c = f_{c28} + 6 \text{ MPa}$$

#### 2) Dosage en ciment

On évalue approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée  $f_c$  :

$$f_c = GFCE \cdot (C/E - 0,5)$$

$f_c$  : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa

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

C : dosage en ciment (en kg/m<sup>3</sup>)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m<sup>3</sup>)

G : coefficient granulaire

Valeurs approximatives du coefficient granulaire G (en supposant que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions, par vibration, en principe)

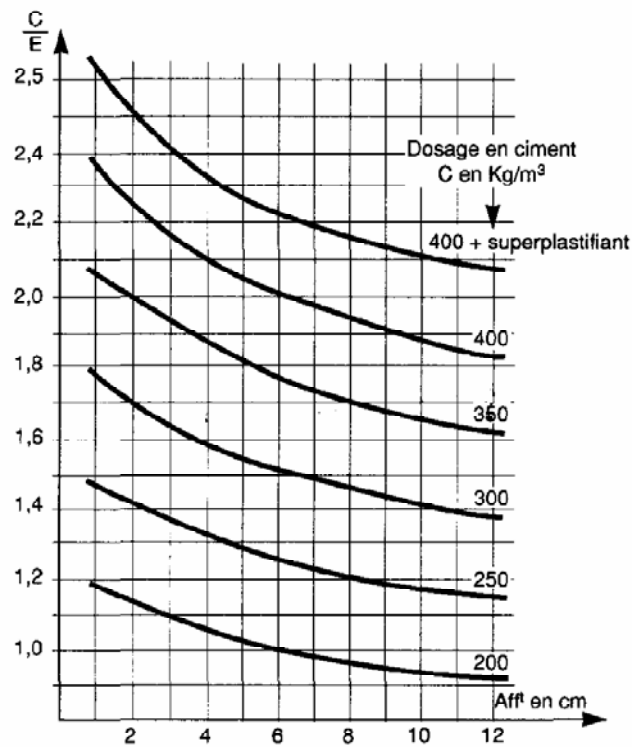


**Tableau- Valeurs approximatives du coefficient granulaire G**

| Qualité des granulats | Dimension D des granulats |                            |                     |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|
|                       | Fins<br>(D ≤ 16 mm)       | Moyens<br>(20 ≤ D ≤ 40 mm) | Gros<br>(D ≥ 50 mm) |
| Excellente            | 0,55                      | 0,60                       | 0,65                |
| Bonne, courante       | 0,45                      | 0,50                       | 0,55                |
| Passable              | 0,35                      | 0,40                       | 0,45                |

Afin de déterminer le dosage en ciment, il faut utiliser l'abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée .

**Figure - Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement**

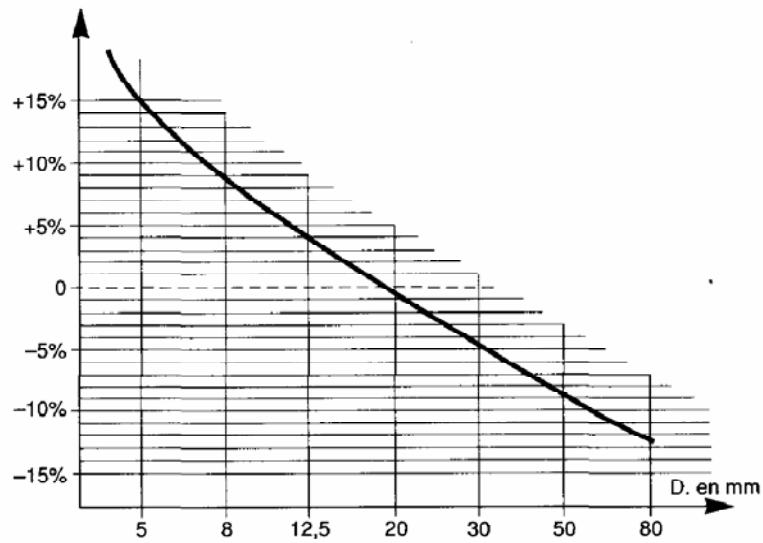


### 3) Dosage en eau

Ayant C et C/E il est facile de connaître approximativement le dosage en eau totale.

En fonction de la dimension maximale D des granulats il sera bon d'appliquer une correction sur le dosage en eau totale, donnée par le graphique ci-dessous :

**Figure - Correction sur le dosage en eau**

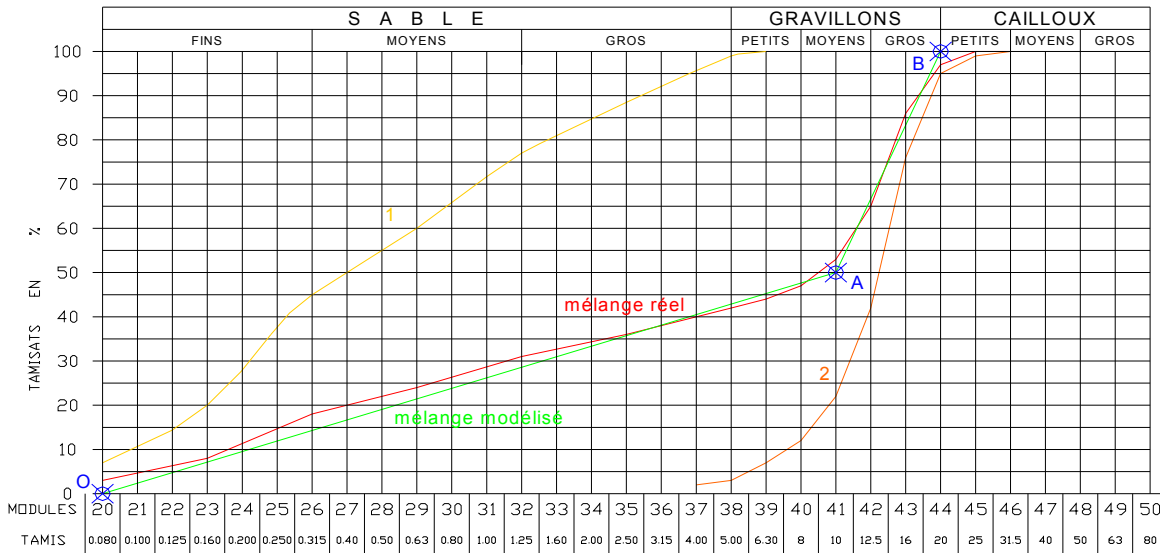


**4) Dosage des granulats**

**Tracé de la courbe granulaire de référence :**

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR, on trace une composition granulaire de référence O A B.

**Figure : La courbe du mélange granulaire**



Point B : ordonnée : 100%, abscisse : dimension D du plus gros granulat

Point A :

Abscisse :

Si  $D < 20$  mm, l'abscisse sera égale à  $D/2$

Si  $D > 20$  mm, l'abscisse sera située au milieu du segment gravier limité par

la dimension de tamis 5 mm

$$\text{Ordonnée : } Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.

**Tableau - Terme correcteur K**

| Vibration        |       | Faible |          | Normale |          | Puissante |          |
|------------------|-------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|
|                  |       | Roulé  | Concassé | Roulé   | Concassé | Roulé     | Concassé |
| Dosage<br>ciment | 400+f | -2     | 0        | -4      | -2       | -6        | -4       |
|                  | 400   | 0      | +2       | -2      | 0        | -4        | -2       |
|                  | 350   | +2     | +4       | 0       | +2       | -2        | 0        |
|                  | 300   | +4     | +6       | +2      | +4       | 0         | +2       |
|                  | 250   | +6     | +8       | +4      | +6       | +2        | +4       |
|                  | 200   | +8     | +10      | +6      | +8       | +4        | +6       |

$K_s$ , ajustement de la granularité du sable pour  $2,2 \leq M_f \leq 2,8$

$$K_s = 6 \times M_f - 15$$

( $M_f$  : **module de finesse du sable**)

$K_p$ , ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

$K_p = 0$  si béton non pompable

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

### 5) Coefficient de compacité

Ce coefficient  $\gamma$  est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en oeuvre.

**Tableau - Coefficient de compacité**

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

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

sable roulé et gravier concassé : -0,01

sable et gravier concassé : -0,03.

## **6) Dosage des granulats**

La courbe granulaire OAB de référence est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point 5% de la courbe du granulat suivant.

On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

Le volume absolu des grains de ciment est :  $c = C/3,1$  avec C le dosage en ciment. (3,1 étant la masse spécifique admise pour les grains de sable)

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :  $V = 1000\gamma - c$

On en déduit alors le volume absolu de chacun des granulats ainsi que les masses spécifiques de chacun des granulats.



# **ANNEXE II**

## **PHOTOGRAPHIE PARTIE EXPERIMENTALE**



**Malaxage des composants du béton**



**Remplissage des moules cylindrique**



**Eprouvettes cylindriques avant l'écrasement**



**Ecrasement des éprouvettes**





Eprouvettes cylindrique