

W. 843

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS

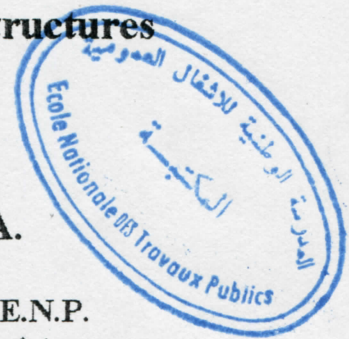
THESE DE MAGISTER

Spécialité : Matériaux et Structures

Présentée à l' E.N.T.P par :

Mébarek BELAOURA.

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'E.N.P.
En vue de l'obtention du titre de Magister.



THEME

**ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
DES BETONS A BASE DE CIMENT BLANC**

Soutenue publiquement le 01 Juillet 2000 devant le Jury composé de :

M	A. BALI	Professeur	E.N.P	Président
M	M. T. ABADLIA	Professeur	U.Boumerdes	Direct. de thèse
M	B. GUETTACHE	Chargé de cours	E.N.T.P	Examineur
M	R. BOUTEMEUR	Chargé de cours	E.N.P	Examineur
M	A. BENMOUNAH	Chargé de cours	U.Boumerdes	Examineur
M	R. OUMAAZIZ	Directeur général du C.N.E.R.I.B		Membre invité

A

- La mémoire de mon frère

ABDELHALIM

- Ma très chère mère.

- Mon cher père.

Remerciements

Mes plus vifs remerciements sont destinés à Monsieur **BERRICHE Yacine**, Directeur de l'Ecole Nationale des Travaux Publics (E.N.T.P) pour m'avoir permis d'entamer et d'activer ce cycle de Post-graduation.

Que Monsieur **ABADLIA Mohamed Tahar**, Professeur au département Génie des Matériaux, université de Boumerdes, Directeur de thèse, accepte mes meilleurs sentiments et mes sincères remerciements pour son aide si précieuse quant à l'élaboration de ce travail.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **BALI Abdelrahim**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury d'examen.

Je tiens à remercier Messieurs **GUETTACHE Brahim**, chargé de cours à l'Ecole Nationale des Travaux Publics (E.N.T.P), **BOUTEMEUR Ramdane**, chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) et **BENMOUNAH Abdelbaki**, chargé de cours au département Génie des Matériaux, université de Boumerdes, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner mon travail et de faire partie du jury de soutenance.

Ce travail a été réalisé aux laboratoires du L.C.T.P et du C.N.E.R.I.B. Nous tenons à remercier Monsieur le Directeur du Laboratoire Centrale des Travaux Publics (L.C.T.P) et Monsieur **OUMAAZIZ Rabah**, Directeur général du Centre Nationale des Etudes et Recherches Intensifiées en Bâtiment (C.N.E.R.I.B), le chef du laboratoire ainsi que le personnel technique et administratif du C.N.E.R.I.B pour l'aide qu'ils nous ont apporté à la réalisation pratique de ce travail.

Toute ma gratitude est présentée à Monsieur **ADEM Ahmed Ben Youcef**, chef de département Recherche et Post-Graduation de l'E.N.T.P, ainsi qu'à Monsieur **REMKI Boudjemaa**, Sous Directeur chargé des affaires pédagogiques de l'E.N.T.P.

Que Monsieur **BOUZIDI Cherif** trouvera ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir relu ce manuscrit.

Je ne puis mentionner tous ceux et toutes celles qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail. Que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.

ملخص

يتمحور بحثنا حول دراسة الخصائص الميكانيكية للخرسانة المكونة من الأسمنت الأبيض و مقارنتها بمثلتها من الأسمنت الرمادي. عدة تجارب أستعملت على الخرسانتين أثبتت أن الخرسانة المكونة من الأسمنت الأبيض أعطت نتائج أفضل من الخرسانة الرمادية.

كلمات مفتاحية

إسمنت أبيض، خرسانة، إجهاد ميكانيكي، معامل المرونة، انكماش، انتفاخ.

Abstract

The objective of this research work is to study the behaviour of concrete based white cement and to compare it to grey concrete.

Testing has been carried out on both concretes. The results have shown that the concrete based white cement offered better resistance with regard to grey concrete.

Keywords

White cement, concrete, mechanical resistance, young modulus, swelling, creep.

RESUME

Notre projet consiste à étudier le comportement mécanique des bétons à base du ciment blanc et le comparer à celui du béton gris.

Les essais mécaniques réalisés sur les deux bétons ont montré que le béton à base de ciment blanc présente des propriétés physiques et mécaniques plus performantes par rapport au béton gris.

Mots clés

Ciment blanc, béton, résistance mécanique, module d'élasticité, retrait, gonflement.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1.1 INTRODUCTION.....	4
1.2 GENERALITES.....	5
1.2.1 Historique.....	5
1.2.2 La fabrication du ciment gris.....	5
1.2.3 Constituants du ciment.....	7
1.2.4 Différentes catégories des ciments utilisés en Algérie.....	8
1.2.5 Ciment blanc.....	8
1.2.5.1 Composition et caractéristiques.....	8
1.2.5.2 Particularité technologique de la fabrication du ciment blanc.....	10
1.2.5.3 Domaine d'emploi.....	11
1.2.6 Processus d'hydratation du ciment.....	11
1.2.6.1 Hydratation du clinker.....	11
1.2.6.2 La microstructure de la pâte du ciment.....	12
1.2.6.3 Présentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland.....	14
1.3 BETON ET SES CONSTITUANTS.....	16
1.3.1 Généralités.....	16
1.3.2 Recherche et développement.....	16
1.3.3 Les constituants du béton.....	17
1.3.4 Formulation et méthodes de composition du béton.....	19
1.3.4.1 Introduction.....	19
1.3.4.2 Méthodes de composition du béton.....	22
1.4 PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES BETONS.....	25
1.4.1 Béton à l'état frais.....	25
- Ouvrabilité.....	25
- Thixotropie.....	26
- Ségrégation.....	26
- Ressuage.....	26
- Compacité.....	27
- Consolidation.....	27
1.4.2 Béton à l'état durci.....	28
1.4.2.1 Masse volumique absolue.....	28
1.4.2.2 Résistance mécanique.....	28
1.4.2.3 Paramètres influant sur la résistance à la rupture par compression...29	
- Influence de la nature des constituants.....	29
- Influence de la température de conservation.....	32

1.4.2.4 Retrait et gonflement.....	32
1.4.2.5 Elasticité.....	35
1.4.2.6 Fluage.....	36
1.4.2.7 Durabilité.....	36
 1.5 CONCLUSION.....	 39
 CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS.....	 40
 2.1 INTRODUCTION.....	 40
 2.2 CARACTERISATION DU CIMENT.....	 40
 2.3 CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS.....	 42
 2.4 CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON - METHODE DE FAURY.....	 47
 2.5 ESSAIS PHYSICO-MECANIQUES.....	 50
2.5.1 Essais sur ciments.....	50
2.5.1.1 <i>Classe vraie du ciment.....</i>	50
2.5.1.2 <i>Masse volumique absolue du ciment.....</i>	50
2.5.1.3 <i>Surface spécifique de Blaine.....</i>	51
2.5.2 Essais sur béton frais.....	51
2.5.2.1 <i>Mesure de la consistance.....</i>	51
2.5.2.2 <i>Mesure de l'air occlu.....</i>	51
2.5.2.3 <i>Masse volumique du béton frais.....</i>	52
2.5.3 Essais sur béton durci.....	52
2.5.3.1 <i>Rectification et surfacage.....</i>	52
2.5.3.2 <i>Détermination de la masse volumique du béton durci.....</i>	52
2.5.3.3 <i>Essais de résistance mécanique.....</i>	53
2.5.3.4 <i>Essai de retrait.....</i>	54
2.5.3.5 <i>Module d'élasticité et coefficient de Poisson.....</i>	54
2.5.3.6 <i>Essai ultrasonique.....</i>	54
 2.6 CONCLUSION.....	 56
 CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	 57
 3.1 INTRODUCTION.....	 57
 3.2 OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BETON	 58
 3.3 ESSAIS SUR BETON FRAIS.....	 59
3.3.1 L'ouvrabilité.....	60
3.3.2 L'air occlu dans le béton.....	60

3.3.3 La masse volumique absolue.....	60
* <i>Discussion et interprétation</i>	61
3.4 ESSAIS SUR BETON DURCI.....	62
3.4.1 La masse volumique absolue du béton durci.....	63
3.4.2 La résistance à la compression.....	63
3.4.2.1 <i>Discussion et interprétation</i>	66
3.4.2.2 <i>Traitement statistique des résultats d'essais de la résistance</i> <i>mécanique du béton</i>	67
* <i>Interprétation</i>	69
3.4.3 Effet du rapport E/C sur la résistance mécanique du béton.....	70
* <i>Interprétation</i>	70
3.4.4 La résistance à la traction.....	71
* <i>Discussion et interprétation</i>	75
3.4.5 Module d'élasticité.....	75
3.4.5.1 <i>Module d'élasticité statique</i>	75
* <i>Discussion et interprétation</i>	77
3.4.5.2 <i>Module d'élasticité dynamique</i>	78
- <i>Vitesse longitudinale du son</i>	78
- <i>Module d'élasticité dynamique</i>	79
* <i>Discussion et interprétation</i>	79
3.4.6 Retrait et gonflement.....	79
* <i>Discussion et interprétation</i>	85
3.4.7 Effets cycliques d'adsorption-désorption.....	86
* <i>Discussion et interprétation</i>	86
 CONCLUSION GENERALE.....	 88
RECOMMANDATIONS.....	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	91
ANNEXES.....	95

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton, matériau utilisé dans de nombreux cas de construction, doit répondre à un ensemble d'exigence de sécurité, de durabilité et d'esthétique. Dans ce contexte, il doit présenter une stabilité définie après durcissement, une durabilité intrinsèque, une protection contre la corrosion des armatures métalliques qu'ils enrobent, des règles esthétiques précises.

Selon l'architecte **Claude Parent**, (Extrait -CIMBETON-, 1989) : « Le béton, matière malléable, fournit une grande liberté de création : le béton libère l'imagination. Le béton sortant brut de son moule traduit la réalité de sa nature, de sa structure, de sa matière : le béton apporte la franchise de l'expression. Le béton ayant la possibilité de modifier son aspect final suivant la composition, le paroi du coffrage, le traitement de surface, propose aux architectes une infinité d'états de surface, le béton permet le jeu des apparences ».

Le béton présente alors, un aspect mécanique caractérisé par sa résistance à la compression et, un aspect esthétique qui dépend de la nature du liant utilisé et des granulats.

Pour la résistance, les chercheurs se sont toujours intéressés dans ces dernières années à l'amélioration des performances des bétons par différents procédés, soit par le bon choix des

granulats, soit par l'addition de certains ajouts, ou bien par l'utilisation des ciments spéciaux. Ces chercheurs, confirment qu'il semble difficile de dépasser 150 MPa avec les granulats naturels ou concassés qui sont couramment utilisés dans la fabrication des bétons ordinaires; à cause de la résistance limitée de ces derniers .

Pour l'aspect esthétique, et grâce à ses qualités expressives, le béton peut être beau et ne nécessite alors aucun revêtement. Trois facteurs essentiels déterminent la réussite d'un béton apparent :

- La forme

Les coffrages et les moules de nature très diverses permettent la réalisation de toutes les formes imaginées, grâce à la plasticité du matériau à l'état frais.

- La teinte

La teinte du parement est apportée par les composants du béton. Gris ou blanc, le ciment, mélangé aux éléments les plus fins du sable donne au béton brut de démoulage sa teinte de fond. Elle peut être modifiée par l'ajout de colorants.

- L'aspect

La surface peut être lisse ou rugueuse, comporter des creux et des reliefs, reproduire des motifs décoratifs. Les dispositions adoptées lors du moulage ou de la mise en oeuvre, les traitements de surface avant ou après démoulage, créent une variété infinie d'aspects qui seront accentués par la lumière.

De nos jours, tous les ouvrages sont construits avec des ciments gris. Exempt quelques ouvrages où l'aspect esthétique est demandé, on utilise le ciment blanc seul ou avec d'autres colorants.

En Algérie, l'utilisation du ciment blanc commence à connaître un essor considérable, d'où la prochaine ouverture d'une usine pour la fabrication de ce matériau très attrayant, et par conséquent, sa disponibilité dans le marché nous laisse penser à l'utiliser dans les travaux de béton. Mais l'absence des études sur ce matériau dans le génie civil et la construction diminue son champ d'utilisation.

Donc, que apporte le ciment blanc de plus par rapport au ciment gris ?

De point de vue minéralogique, la composition du ciment blanc est différente par rapport à celle du ciment gris. Cette composition a un effet considérable sur la résistance du béton aux différentes attaques, notamment au gradient de température qui provoque des fissures très importantes. De plus, la blancheur de ce ciment permet d'apporter un aspect esthétique au béton, ce qui ne nécessite pas des travaux d'entretien continus. Mais la particularité technologique de la fabrication de ce ciment rend le prix de revient un peu élevé, et donc son utilisation dans la construction doit être rationnelle et économique.

Tous ces paramètres nous ont amenés à choisir le thème ainsi traité pour apporter une contribution dans ce domaine et faire une comparaison avec le béton gris, et ainsi, nous aurons contribué à une meilleure connaissance du matériau par sa large utilisation dans le béton apparent (esthétique) dans notre pays.

La présente recherche consiste dans un premier chapitre, en une recherche bibliographique concernant les résultats des travaux antérieurs sur les bétons à base des ciments Portlands, et la technique de fabrication du ciment blanc.

Un deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essais et d'expérimentation, où nous avons donné les modes opératoires des différents essais effectués sur le ciment, les granulats et le béton, ainsi que la méthode de composition du béton.

Dans un troisième chapitre sont présentés les résultats expérimentaux relatifs au béton frais et durci, suivi des commentaires, des interprétations et des conclusions.

Le programme d'essais a été réalisé dans les laboratoires du LTPC et du CNERIB.

CHAPITRE 1

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 INTRODUCTION

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, pouzzolanes) et la finesse.

Depuis le début du siècle, les chercheurs se sont intéressés à la réalisation de divers types de ciments, afin d'améliorer ses performances ou diminuer le coût de fabrication, parmi ces ciments on trouve le ciment blanc.

Comme on le sait, les bétons courants ont généralement une teinte grise plus ou moins prononcée car, en l'absence de pigments, c'est elle qui détermine celle du béton. La teinte grise du béton est liée à la présence d'oxydes de fer, de manganèse et de chrome. Cette teinte grise peut être plus ou moins prononcée suivant la teneur en oxydes métalliques; le ciment blanc n'en contient que des traces infimes.

Le champ d'utilisation très limité du ciment blanc a fait qu'il n'a pas donné lieu à des recherches sur son comportement mécanique. Ceci revient, à son coût relativement élevé.

1.2 GENERALITES

1.2.1 Historique

La technique de joindre des blocs de pierre au moyen d'un liant plastique prenant et durcissant par la suite est connue depuis des milliers d'années.

Les Egyptiens sont les premiers à connaître l'art de cuire la chaux. Une analyse entreprise en 1865 sur la grande pyramide a démontré une teneur en CaSO_4 de 81.5% contre une teneur en CaCO_3 de 9.5%. Différentes analyses ont été effectuées par des spécialistes sur des échantillons de mortier prélevés de la grande pyramide ont trouvés deux mortiers dont un constitué pratiquement de carbonate de calcium pur avec des additions de sable plus ou moins important en cuisson, et l'autre en un mélange de gypse et de sable d'une cuisson très irrégulière.

Avant cette découverte, la cuisson de la chaux prenait son origine en Crète (île Grecque) de la Méditerranée d'où ce savoir faire s'étendait à la Grèce à une période précoce.

Les Romains furent sans doute les premiers à fabriquer des liants hydrauliques susceptibles de durcir sous l'eau. Pour cela, ils mélangeaient de la chaux et des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles. C'est de là qu'est venu le terme bien connu de « pouzzolanique » qui se dit d'un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux. En revanche, cette propriété d'hydraulicité du mélange ainsi constitué est restée totalement inexploquée jusqu'aux travaux de LOUIS VICAT qui élaborât en 1817 la théorie de l'hydraulicité et fait connaître le résultat de ses recherches, (Extrait -CIMBETON-, 1989).

Il donne des indications précises sur les proportions de calcaire et de silice nécessaires pour constituer le mélange, qui après cuisson au degré convenable donnera un véritable liant hydraulique fabriqué industriellement: le ciment artificiel. L'industrie du ciment est née.

Quelques années plus tard, en 1824, l'Ecossais ASPDIN donnait le nom de Portland au ciment qu'il fabriquait et qui égalait la pierre de cette région.

1.2.2 La fabrication du ciment gris

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80 ÷ 20 %.

Les différentes étapes de la fabrication sont les suivantes:

- Extraction et concassage

Les matières premières sont extraites de carrière généralement à ciel ouvert. Les blocs obtenus sont réduits dans des concasseurs situés généralement sur les lieux même de l'extraction en éléments d'une dimension maximale de 50 mm.

- Préparation de la matière première

Les grains de calcaire et d'argile sont intimement mélangés par broyage ou délayage, dans des proportions définies, en un mélange très fin, le « cru ». A cette occasion, des corrections de composition peuvent être effectuées en incorporant des ajouts en faible proportion : bauxite, oxyde de fer, ...etc.

Le mélange cru est préparé automatiquement sous forme de poudre (voie sèche) ou de pâte (voie humide) en fonction de la technique de fabrication utilisée.

- Cuisson du cru

Quelque soit la technique de fabrication utilisée pour élaborer le cru, les installations de cuisson sont similaires et comportent deux parties :

- Un échangeur de chaleur comportant une série de quatre à cinq cyclones dans lesquels la poudre déversée à la partie supérieure progressivement jusqu'à l'entrée du four, elle se réchauffe au contact des gaz chaud sortant de ce four, et se décarbonate en partie.

Une décarbonatation plus complète peut être obtenue par l'ajout d'un foyer complémentaire situé dans le cyclone inférieure (précalcination). La poudre est ainsi portée à un degré d'environ 800°C à 1000°C.

- Un four horizontal rotatif (avec un revêtement réfractaire intérieur) légèrement incliné. Le cru pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkerisation (environ 1450°C). Sous l'effet de la chaleur, les constituants de l'argile principalement composés de silicates d'alumine et d'oxyde de fer, se combinent à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

• *Broyage du clinker*

A la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de granules. Brusquement refroidi, puis finement broyé avec du gypse (3 à 5 %) pour régulariser la prise, il donne le ciment, appelé communément le ciment Portland artificiel C.P.A.

C'est lors du broyage et en ajoutant dans certains cas, en plus du gypse, d'autres constituants tel que laitier de haut fourneau, pouzzolanes, ou filler (calcaire ou tuf), qu'on obtient les différentes catégories du ciment.

1.2.3 Constituants du ciment

Le constituant principal du ciment est le clinker, ses compositions chimiques et minéralogiques sont données ci-dessous.

* *Composition chimique du clinker*

Les principaux oxydes sont (en % pondéral) :

- * - CaO : 62 à 68 %,
- SiO₂ : 21 à 24 %,
- Al₂O₃ : 4 à 8 %,
- Fe₂O₃ : 2 à 5 %.

Outre les oxydes ci-dessus, on peut rencontrer aussi d'autres oxydes dans le clinker tel que MgO, K₂O, Na₂O.

* *Composition minéralogique du clinker*

Les oxydes cités plus haut ne se trouvent pas à l'état libre dans le clinker, mais au cours de la cuisson quatre minéraux se forment :

- Le silicate tricalcique : 3 CaO , SiO₂ (ou C₃S), 45 à 65 %,
- Le silicate bicalcique : 2 CaO , SiO₂ (ou C₂S), 15 à 35 %,
- L'aluminate tricalcique : 3 CaO , Al₂O₃ (ou C₃A), 4 à 14 %,
- L'alumino-ferrite tetracalcique : 4 CaO , Al₂O₃ , Fe₂O₃ (ou C₄AF), 10 à 18 %.

Les ciments présentent l'une ou plusieurs des propriétés suivantes :

- Des propriétés hydrauliques: ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau.
- Des propriétés pouzzolaniques: ils ont la faculté de former à température ordinaire, en

présence d'eau, par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.

- Des propriétés physiques qui améliorent certaines qualités du béton (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de ressuage,...etc.).

1.2.4 Différentes catégories des ciments utilisés en Algérie

* *Le ciment Portland artificiel : C.P.A*

Il contient au moins 97 % de clinker et au plus 3 % de filler.

• *Le ciment Portland composé : C.P.J*

Il contient au moins 65 % de clinker et au plus 35 % d'autres constituants tel que laitier, pouzzolane, filler (calcaire, tuf, ...).

Il est à noter que les ciments Portlands CPA et CPJ englobent aussi bien les habituels ciments à coloration grise que les ciments blancs.

• *Le ciment de haut fourneau : C.H.F*

Il contient 40 à 75 % de laitier, le reste est constitué du clinker.

• *Le ciment de laitier au clinker : C.L.K*

Il contient au moins 80 % de laitier, le reste est constitué du clinker.

1.2.5 Ciment blanc

1.2.5.1 Composition et caractéristiques

Le ciment blanc se fabrique comme le ciment Portland mais à partir d'une matière première contenant le minimum d'oxyde de fer ou d'autres oxydes colorants. Les matières premières utilisées dans la fabrication du ciment blanc sont : calcaire, craie pure, argile à très faible teneur en fer ou bien du kaolin enrichi en Aluminium et silice, contenant une faible teneur en Fe_2O_3 .

Les roches carbonatées doivent contenir :

- $CaCO_3 > 90$ à 97% ,
- $MgCO_3 < 2$ à 2.5% ,
- $SO_3 : 1$ à 1.5% ,

- Fe_2O_3 : 0.15 à 0.25%,
- MnO : 0.015 à 0.03%.

Les matières premières sont enrichies après concassage. L'enrichissement est effectué par le concassage successif et le tamisage du menu pulvérulent qui contient l'oxyde de fer, la principale différence entre le ciment blanc et le ciment gris.

Tableau 1.1 : Composition chimique du ciment blanc, (ABADLIA. M.T).

Eléments	Teneur en masse (%)
CaO	64 à 67
SiO ₂	23 à 25
Al ₂ O ₃	4.5 à 7.0
MgO	0.8 à 1.5
Fe ₂ O ₃	0.25 à 0.5
MnO	0.02 à 0.03
TiO ₂	0.2 à 0.4
SO ₃	0.5 à 1.0

La composition chimique fait ressortir que le « clinker blanc » se caractérise par une teneur insignifiante en Fe_2O_3 et autres oxydes colorants.

Tableau 1.2 : Composition minéralogique du ciment blanc, (ABADLIA. M.T).

Composés minéraux	% (en masse)
C ₃ S + C ₂ S	jusqu'à 82 %
C ₃ A	15 à 18 %
C ₄ AF	1 à 1.5 %

La particularité du clinker blanc est sa blancheur, qui est caractérisée par un coefficient d'éclat. Le coefficient d'éclat est déterminé par rapport à la blancheur du sulfate de Baryum (BaSO_4 , prise égale à 100 %). Le coefficient d'éclat du ciment blanc varie entre 72 à 80%.

Tout au long de la fabrication, les précautions sont prises pour que le clinker ne soit pas pollué par des matériaux qui viendraient en altérer la couleur. C'est ainsi que la cuisson s'effectue à l'aide de combustible liquide ou gazeux et que les broyeurs sont garnis de pavés

de silex et remplis de galets de mer ou de boulets d'acier spécial très résistant à l'abrasion, (Adam. M, 1976).

Les caractéristiques sont analogues à celles des ciments portlands gris (NF P 15-301), sa teneur en Fe_2O_3 est négligeable.

1.2.5.2 Particularité technologique de la fabrication du ciment blanc

- Le broyage du mélange cru et du ciment s'opère dans des broyeurs munis de boulets et d'un revêtement intérieur métallique résistant à l'usure, ou bien non métallique (d'ouralité, pierre naturelle, porcelaine, grès siliceux).

La finesse de mouture du mélange cru doit être la plus élevée possible avec un refus de tamis 0.08 compris entre 12 et 15 %.

En qualité d'intensificateur de broyage, on peut utiliser des substances tensio-actives (pour éviter le colmatage).

- La présence en faible quantité de fer, rend difficile la clinkérisation. La température de cuisson doit être plus élevée que celle pour l'obtention du clinker Portland gris.

La phase liquide se forme entre 1425 à 1450° C et se compose essentiellement de C_3A . C'est pourquoi il est souhaitable d'avoir une température de cuisson entre 1600 et 1650° C (parfois entre 1500 et 1550° C).

- Le blanchissement du clinker est obligatoire. Ce processus consiste en la transformation de Fe_2O_3 en Fe_3O_4 et de Mn_2O_3 en Mn_3O_4 , car la couleur de Fe_2O_3 est marron et le sel ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$) est noir stable.

Le blanchissement du clinker est effectué soit par trempé dans l'eau, soit par refroidissement en atmosphère réductrice.

- Première méthode de blanchissement

Le clinker sortant du four est trempé dans l'eau froide, puis dirigé vers un séchoir. La température de séchage ne doit pas dépasser 400° C (car il y a réversibilité des réactions $\text{Fe}_2\text{O}_3 \longleftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$). Le refroidissement brusque permet de conserver à la température ambiante, la composition minéralogique du clinker formé dans la zone du clinkérisation.

- Deuxième méthode de blanchissement

Le clinker est traité dans des appareils de blanchissement dans lesquels, il est soumis (pendant quelques minutes) au blanchissement dans une atmosphère réductrice (en

présence de CO) à une température comprise entre 1100 et 1200° C. Ensuite il est refroidi (en présence d'oxygène) jusqu'à une température de 200° C.



1.2.5.3 *Domaine d'emploi*

Grâce à sa blancheur, le ciment blanc permet la mise en valeur des teintes des granulats dans les bétons apparents.

La pâte peut être elle même colorée à l'aide de pigments minéraux, ce qui fournit une grande variété de teintes pour les bétons de structure, architectoniques et les enduits décoratifs.

La composition du béton doit être bien étudiée en fonction des granulats et des effets recherchés.

Le dosage et la fabrication se font dans les conditions habituelles. Il importe toutefois de gâcher avec des granulats très propres et d'éviter l'emploi d'outils de fer, qui risquent de tacher le béton. La teinte du béton obtenue dépend dans une mesure importante de la couleur des granulats utilisés notamment des sables. Certains produits de cure peuvent altérer la teinte du béton.

En général, le ciment blanc est utilisé pour tous types de béton. Il est de teinte claire tant en parement que dans la masse, nous le trouverons aussi dans la préfabrication lourde et légère, signalisation routière, carreaux de ciment et carreaux mosaïque de marbre, peintures au ciment, jointoiement, travaux décoratifs et artistiques, enduits décoratifs.

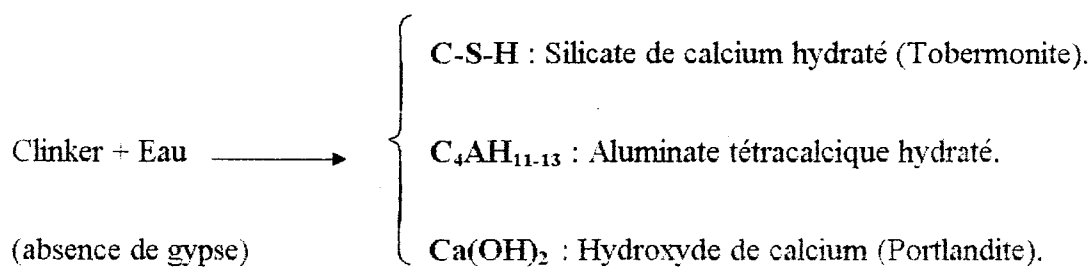
1.2.6 Processus d'hydratation du ciment

Selon la théorie de LE-CHATELIER, l'hydratation des liants hydrauliques se fait par l'intermédiaire d'un processus de dissolution des éléments du produit anhydre dans l'eau, suivi d'une cristallisation (ou précipitation) des hydrates par combinaison des ions présents dans la solution ainsi formée. Il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables, (Dreux. G, 1985).

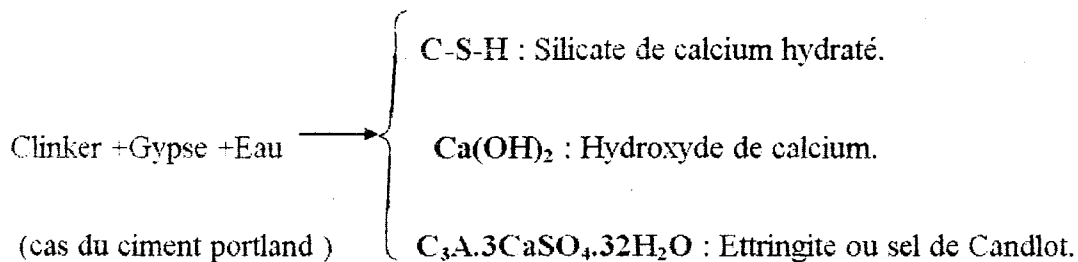
1.2.6.1 *Hydratation du clinker*

Le constituant le plus important en teneur, jusqu'à 65 % du clinker est le silicate tricalcique (C₃S). Il est considéré comme l'élément responsable de l'hydratation et du développement de la résistance, (Vernet. C et Demoulian. E, 1980).

Après hydratation et durcissement, les deux silicates (C_3S) et (C_2S) donnent les mêmes hydrates C-S-H (le silicate de calcium hydraté). Seulement les (C_3S) s'hydratent les premiers en donnant C-S-H et un excès de chaux sous forme de $Ca(OH)_2$. L'hydratation du clinker donne des aluminates tétracalciques hydratés (C_4AH_{13}). Les équations simplificatrices qui régissent cette hydratation sont les suivantes, (Soroka. I, 1993, Vernet. C et Demoulian. E, 1980) :



Si le gypse est présent on aura :



1.2.6.2 La microstructure de la pâte du ciment

La pâte de ciment, qui est un mélange de ciment et d'eau initialement fluide, se structure par hydratation pour former une pierre artificielle. La pâte de ciment durcie est un corps poreux qui contient deux catégories de pores :

- *Les capillaires*; qui sont les « vestiges » des espaces inter-granulaires de la pâte de ciment fraîche; la dimension de ces capillaires augmente avec le rapport (E/C), tableau 1.3 :

Tableau 1.3 : Variation de la dimension des capillaires en fonction de (E/C).

Rapport E/C	0.35	0.60	0.80
Dimension typique des capillaires en (microns)	0.05	0.20	0.40

- *Les micropores* qui constituent la porosité interne des hydrates. La microporosité qui est peu affectée par le rapport (E/C), provient surtout de l'hydrate principal des ciments, le C-S-H, dont la particule élémentaire est lamellaire.

La prise et l'hydratation des ciments s'accompagnent d'un remplissage progressif de capillaires par les amas d'hydrates. La porosité capillaire diminue et la microporosité augmente. Les résistances mécaniques des ciments dépendent principalement de la porosité capillaire, (Soroka. I, 1993, Folliot. A et Buil. M, 1982)

L'hydratation entraîne une diminution du volume absolu total. Le volume de l'hydrate formé est inférieur à la somme des volumes initiaux de l'anhydre et de l'eau, c'est le phénomène de la contraction de LE CHATELIER.

POWERS (1946) et CZERNIN estiment que cette contraction est approximativement égale à 25% du volume d'eau liée chimiquement. La masse d'eau liée chimiquement est elle-même de l'ordre de 20 % de la masse de ciment anhydre initial.

POWERS (1946) et GRANJU (1978) ont confirmé dans leurs études que le volume des amas d'hydrates (porosité comprise) est 2.2 fois plus grand que celui de l'anhydre, (Folliot. A et Buil. M, 1982, Granju. J.I et Maso. J.C, 1978).

Pour hydrater totalement l'anhydre il suffit de 20 % d'eau en masse, l'hydratation totale exige un rapport (E/C) supérieur à 0.35, l'hydrate mobilisant 15 % d'eau libre dans ses pores. Au dessous de (E/C) = 0.35 l'hydratation est incomplète et l'éprouvette contiendra du ciment anhydre. Au delà de 0.35, l'eau en excès reste dans les capillaires, (figure 1.1).

Le volume des produits hydratés résultants dans l'hydratation du ciment peut atteindre le double du volume initial, et par conséquent le vide entre les grains du ciment décroît avec l'évolution du taux d'hydratation (figure 1.2), (Soroka. I, 1993).

1.2.6.3 Présentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland

La figure 1.3, illustre d'une façon simple la formation progressive de la pâte du ciment hydraté.

La structure du gel produit par le ciment hydraté est schématisée dans la figure 1.2. Dans cette schématisation, les particules du gel sont représentées par deux ou trois lignes parallèles, pour indiquer la nature laminaire de leur structure, (Soroka. I, 1993).

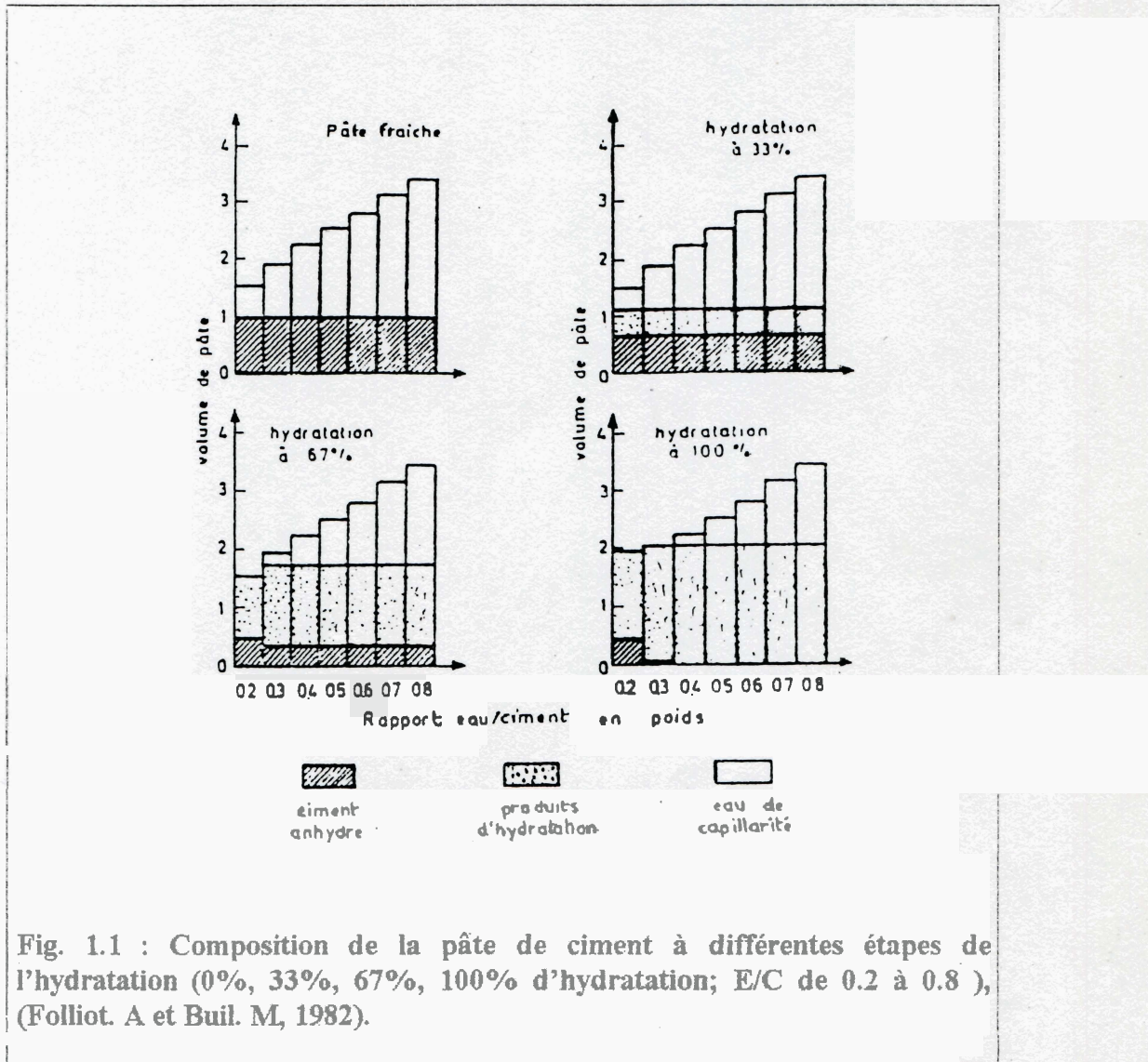


Fig. 1.1 : Composition de la pâte de ciment à différentes étapes de l'hydratation (0%, 33%, 67%, 100% d'hydratation; E/C de 0.2 à 0.8), (Folliot. A et Buil. M, 1982).

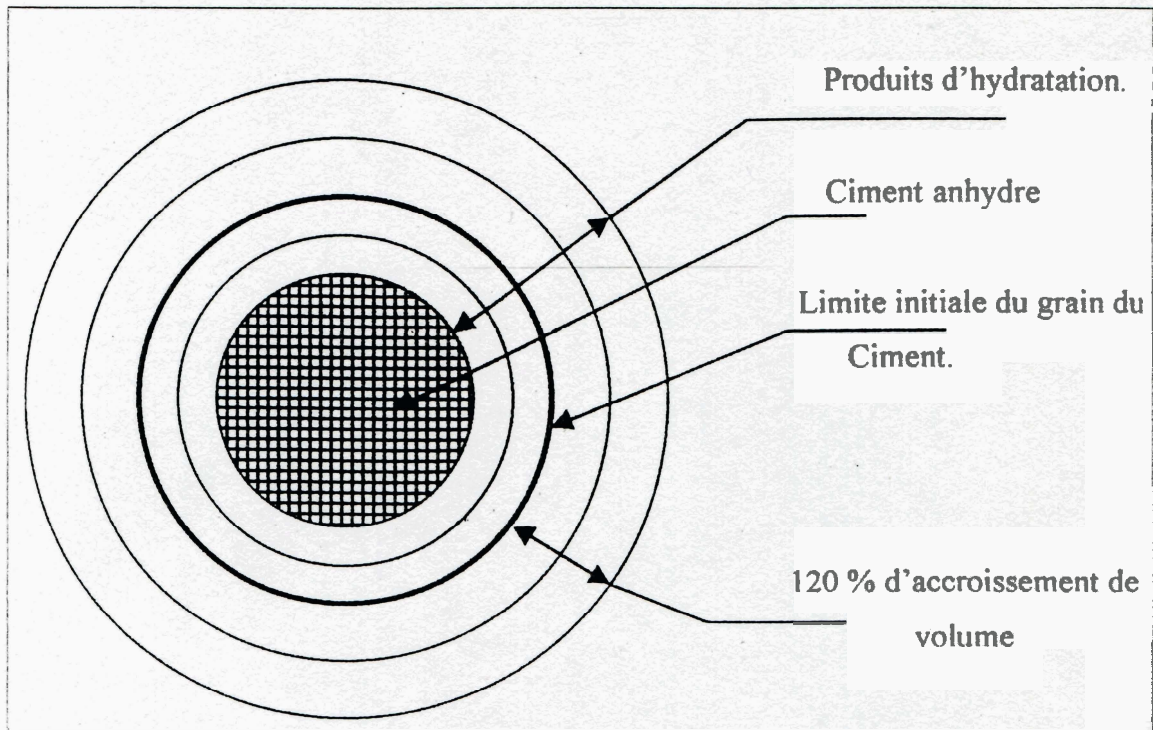


Fig. 1.2 : Modèle schématique de l'hydratation d'un grain de ciment, (Soroka. I, 1993).

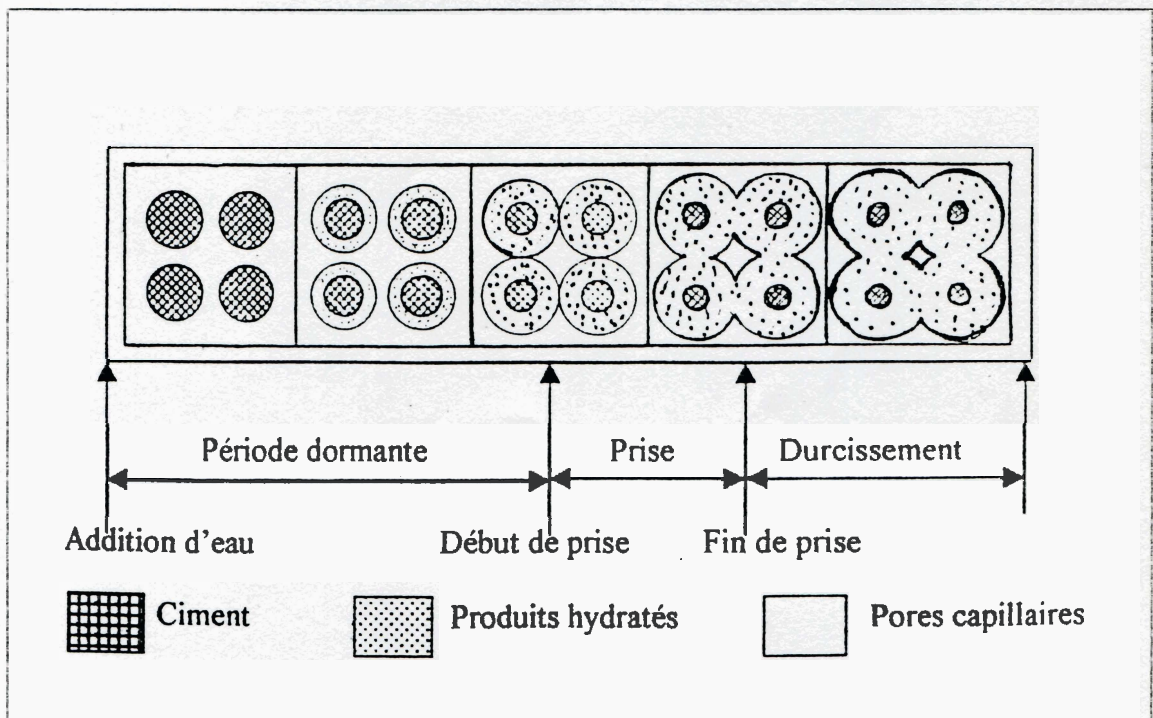


Fig. 1.3 : Modèle schématique de la formation de la structure dans la pâte de ciment, (Soroka. I, 1993).

1.3 BETONS ET SES CONSTITUANTS

1.3.1 Généralités

Le mot **béton**, fut introduit par l'ingénieur **BELIDOR** auteur de « l'architecture hydraulique » en 1737. Il étudia la composition du béton ,(Extrait -CIMBETON-, 1989).

C'est en 1824 que fut découvert le ciment Portland par **ASPDIN**, c'est en fait le mariage ciment- métal appelé ciment armé, puis béton armé qui va donner au béton son plein essor.

1.3.2 Recherche et développement

Le béton de ciment constitue un des matériaux les plus durables; par exemple, on peut admirer « le **PANTHEON** » édifice célèbre, de **La ROME ANTIQUE** qui fut pourtant construit avec un ciment naturel, la forteresse construite vers 1870 près de Copenhague et qui demeure en excellent état malgré son exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses (le bâtiment est attaqué par l'eau de mer et subit l'action de nombreux cycles de gel et dégel), (Tremblay, D, 1983).

Depuis ses origines, l'homme a toujours construit pour modifier le cadre de vie que lui offrait la nature. Il a cependant constamment voulu faire mieux, moins cher et plus durable. Ainsi est née, dans un passé relativement récent, la recherche en génie civil, qui occupe une place modeste dans le secteur de la recherche et pourtant l'effort de recherche est indéniable et son efficacité peut s'apprécier au haut degré d'innovation qui donne au génie civil une place des plus honorables dans le monde.

Par ses qualités :

- Le béton est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics grâce à ses performances et à sa souplesse d'emploi adapté aux formes voulues.

- Le béton fait partie de notre cadre de vie, il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, son imperméabilité etc... ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects.

- Le béton permet, grâce à la précontrainte de réaliser de très grandes portées, (pont, bâtiment industriel, etc...).

- Le béton est dans les routes et dans tous les types de voiries; telles que les autoroutes, les pistes d'atterrissages, etc...

- Et enfin, le béton possède une large disponibilité de ses constituants.

1.3.3 Les constituants du béton

Le mélange en proportions variables de ciment (C), d'eau (E), d'air (A), de sable (S) et de pierres (P) constitue un béton contenant approximativement 30 % de pâte de ciment et 70 % de granulats (S+P) en volume.

Proportion selon (Tremblay. D, 1983).

Composant	C	E	S	P	A
en masse (%)	9/18	6/9	23/35	35/55	/
en volume (%)	7/15	14/19	20/30	30/48	4/8

* Le ciment

Le ciment Portland est un liant hydraulique composé essentiellement de quatre oxydes :
Tableau 1.4, (Komar. A, 1983).

Tableau 1.4 : sa composition chimique

Constituants	Formule chimique	Teneur (%)
Chaux	CaO	62÷68
Silice	SiO ₂	21÷24
Alumine	Al ₂ O ₃	4÷8
Fer	Fe ₂ O ₃	2÷5

Tableau 1.5 : sa composition minéralogique

Composés minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
% (en masse)	45÷65	15÷35	4÷14	10÷18

La qualité du ciment Portland dépend de sa composition minéralogique. Les minéraux formés ont une influence remarquable.

Les propriétés du ciment qui caractérisent sa qualité sont déterminées par des essais normalisés telles que : la finesse de mouture, la consistance normale, le temps de prise, l'expansion, le retrait et le gonflement, et enfin les résistances mécaniques.

* Eau de gâchage

L'eau est aussi importante que le ciment et les granulats dans la constitution du béton. Elle remplit une double fonction lors du gâchage (Venuat. M, 1971).

- une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques.
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation.

L'eau, après gâchage du béton, est multiforme (Baron. J.A et Sauterey. R, 1982).

- libre,
- adsorbée à la surface des constituants solides,
- combinée dans les hydrates du ciment,
- absorbée par les granulats à porosité ouverte.

La norme AFNOR (NF P 18-303, 1941) spécifie les caractéristiques et tolérances de l'utilisation de l'eau de gâchage pour les bétons de construction.

Le tableau suivant nous donne approximativement les limites des concentrations permises pour chaque substance dans l'eau de gâchage (Baron. J.A et Sauterey. R, 1982).

Tableau 1.6 : Concentration maximale tolérée dans l'eau de gâchage pour différentes substances courantes.

Substances	Concentration (mg/l)
Bicarbonate (Na,K,Ca,Mg)	500
Chlorures	20000
Sels de Cu, SN, Zn, Pb et Ar	500
Particule en suspension (argile, poussière,etc...)	2000
Carbonates	1000
Sulfates	1000
Sucres	1000
Résidus d'égouts	100
Acides	10000
Sulfures	250
Sel de fer	2500

- La présence d'impuretés excédentaires pourrait engendrer des phénomènes d'efflorescence et de tâches, la corrosion de l'acier, la diminution de la résistance et une modification du temps de prise.
- Le contrôle de la qualité de l'eau de gâchage pour la préparation du béton s'établit sur l'analyse chimique de celle-ci d'une part, les essais de temps de prise et les essais d'influence pour évaluer l'effet des impuretés d'autre part.

* Les granulats

- Un granulat est défini comme étant un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 80 mm (AFNOR, NF P 18-101, 1980).
- Les granulats sont des matériaux granulaires inertes agglomérés par un liant. Ils constituent le squelette du béton (C. I. L. F, 1976), et occupent environ 80 % du volume du béton.
- Le granulat désigné dans le vocabulaire classique agrégat, possède des propriétés géométriques, physiques, chimiques et mécaniques qui permettent de l'identifier, de le classer selon sa destination et son utilisation (granulats pour bétons divers, granulats routiers diverses, granulats pour ballasts ferroviaires, etc...) (Seminaire, 1990).

1.3.4 Formulation et méthodes de composition du béton

1.3.4.1 Introduction

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

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes; elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférences pondéraux, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la masse volumique apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont dites à granularité continue lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe relevant d'une façon continue; autrement dit, du plus petit grain de ciment de dimension $d = 6.3 \mu\text{m}$ au plus gros grain D des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont présentes.

On dit par contre que l'on a une granularité discontinue lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaire.

La continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités; la granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité; par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant, en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité. Il semble toutefois que la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue, (Dreux. G, 1985).

Quelque soit la méthode utilisée, la formule de composition calculée ne peut correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influent directement sur la qualité du béton; forme, angularité, porosité, adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc... Le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais qui permettent de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré, et dont les critères clairement définis constituent l'énoncé du problème posé.

**Critères en fonction de la destination des bétons*

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leur dimension et toute étude de composition de béton doit en tenir compte; il convient d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

D'après (Dreux. G, 1985), quatre critères principaux doivent être retenus:

- La dimension maximale des granulats et le rayon du moule,
- La résistance,
- L'ouvrabilité,
- L'agressivité du milieu ambiant.

- Dimension maximale D des granulats

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

Pour définir approximativement une valeur admissible de D , on peut appliquer les règles résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1.7 : Dimensions admissibles D pour les plus gros granulats.

Caractéristique de la pièce à bétonner	Valeur max. de D
e : espacement entre armature principale	e
r : rayon moyen des mailles de ferrailage	$0.8 r$
R : rayon moyen du moule	R
h_m : épaisseur minimal de la pièce	$h_m / 5$

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 du coffrage et d'armature en contact avec le béton.

- Résistance souhaitée

D'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé. Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur éprouvettes de contrôle (soumise à la rupture) en déduisant de la moyenne K fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour K une valeur comprise entre 0.85 à 1.2 en général et selon les cas; il convient de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20% supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (catégorie, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvant. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S.

- Ouvrabilité

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en oeuvre pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et sans ségrégation.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau 1.8.

Tableau 1.8: Consistance du béton

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	Serrage nécessaire
Très ferme	≤ 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	> 16	Léger piquage

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition.

- Agressivité du milieu ambiant

Le milieu ambiant dans lequel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton.

La présence d'eau agressive (eaux de mer, silicieuses, acides, très pures, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrages soumises à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant.

1.3.4.2 Méthodes de composition du béton**- Méthode de Bolomey**

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

La formule de base est la suivante :

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

P : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : Diamètre de plus gros grain,

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

Cette méthode aboutit à une granulométrie continue.

- Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont réduits au minimum.

- Méthode de Faury

En 1942, J. FAURY proposa, suite à une étude générale des mélanges granulaires, une nouvelle loi de granulation de type continu. Il s'inspira pour cela d'une théorie des mélanges granulaires de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découla est fonction de ${}^5\sqrt{D}$, d'où le choix par Faury d'une échelle des abscisses graduée en ${}^5\sqrt{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est une droite. Cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites, si l'on opère sur une graphique graduée en abscisse en ${}^5\sqrt{D}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

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

A : coefficient numérique, fonction de la nature des matériaux et de la puissance de compactage (voir annexes) et D est exprimé en dimension passoire.

B varié de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R : rayon moyen du moule.

- Méthode de Valette

Valette. R a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calcul préparatoire. Cette méthode est souvent désignée par dosage des bétons à compacité maximale ou dosage des bétons à minimum de sable ou dosage du béton à granularité discontinue.

Voici sommairement résumé le principe de cette méthode.

Dans les cas les plus courants on partira de deux granulats : un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple.

On calcule d'abord le dosage du sable et du ciment devant donner, le mortier plein à minimum du ciment. Ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par une valeur égale de pâte pure du ciment.

On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en oeuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode, elle repose sur l'appréciation de l'opérateur en ce qui concerne la convenance du béton (Dreux. G, 1985), il doit donc être un praticien connaisseur en la matière.

On obtient alors le béton plein à minimum du sable et le moins dosé (en ciment). Les dosages en ciment auxquels on aboutit sont presque toujours très nettement au dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées, la plasticité nécessaire, l'étanchéité ou autre qualité.

e - Méthode de Dreux et Gorisse

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

Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée en tenant compte des paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, pompabilité, etc... Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose.

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

1.4 PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES BETONS

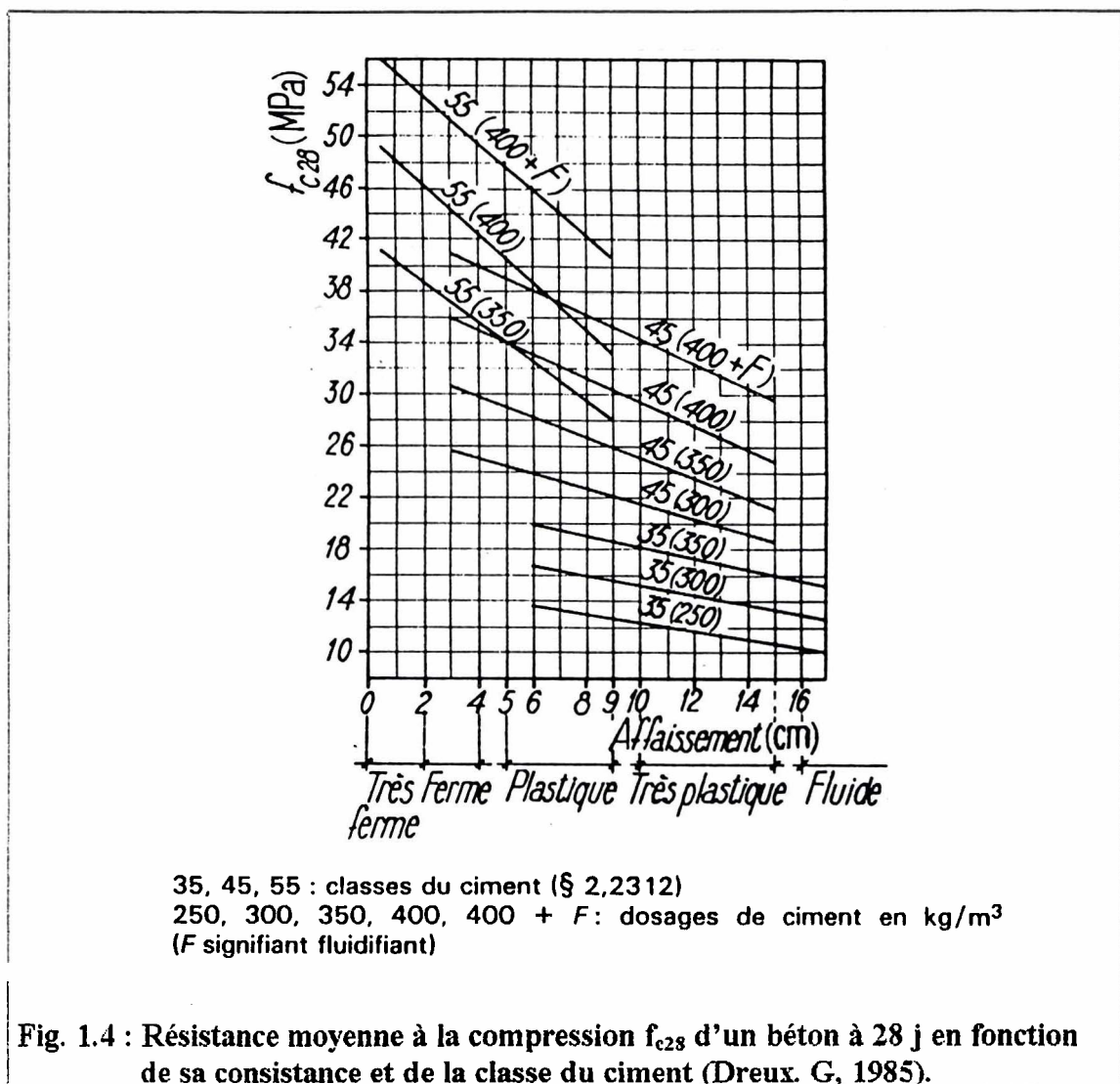
1.4.1- Béton à l'état frais

- Ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un béton correspond à son aptitude à une bonne mise en place compte tenu de son utilisation dans un ouvrage donné et en fonction des moyens de mise en oeuvre et des caractéristiques propres au béton lui-même; les caractéristiques propres du béton sont appréciées par divers moyens, en particulier par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (norme NF P 18-451) (Dreux. G, 1985).

L'ouvrabilité peut également se mesurer à l'aide du maniabilimètre LPC ou d'autres appareils (table à secousses, plasticimètre, etc.); dans ce cas, la valeur spécifiée devra être indiquée en tant qu'autres critères et, éventuellement, en remplacement de la référence d'affaissement au cône d'Abrams.

Le facteur qui agit de la façon la plus importante sur la plasticité du béton est le dosage en eau qui, lorsqu'il augmente, confère au béton une plus grande fluidité. La recherche d'une bonne plasticité favorable à la facilité de mise en oeuvre risque de conduire à un affaiblissement de la résistance; il y a un compromis raisonnable à réaliser dans la recherche simultanée de ces deux qualités fondamentales du béton : résistance et ouvrabilité (fig. 1.4).



- Thixotropie

C'est l'aptitude d'un mélange de passer à l'état quasi-liquide sous l'action des forces extérieures (efforts de malaxage) et de rétablir son état initial après achèvement.

- Ségrégation

C'est une propriété d'un mélange de se séparer en différents composants sous l'action des forces extérieures (malaxage insuffisant, vibration excessive, transport, etc...).

- Ressuage

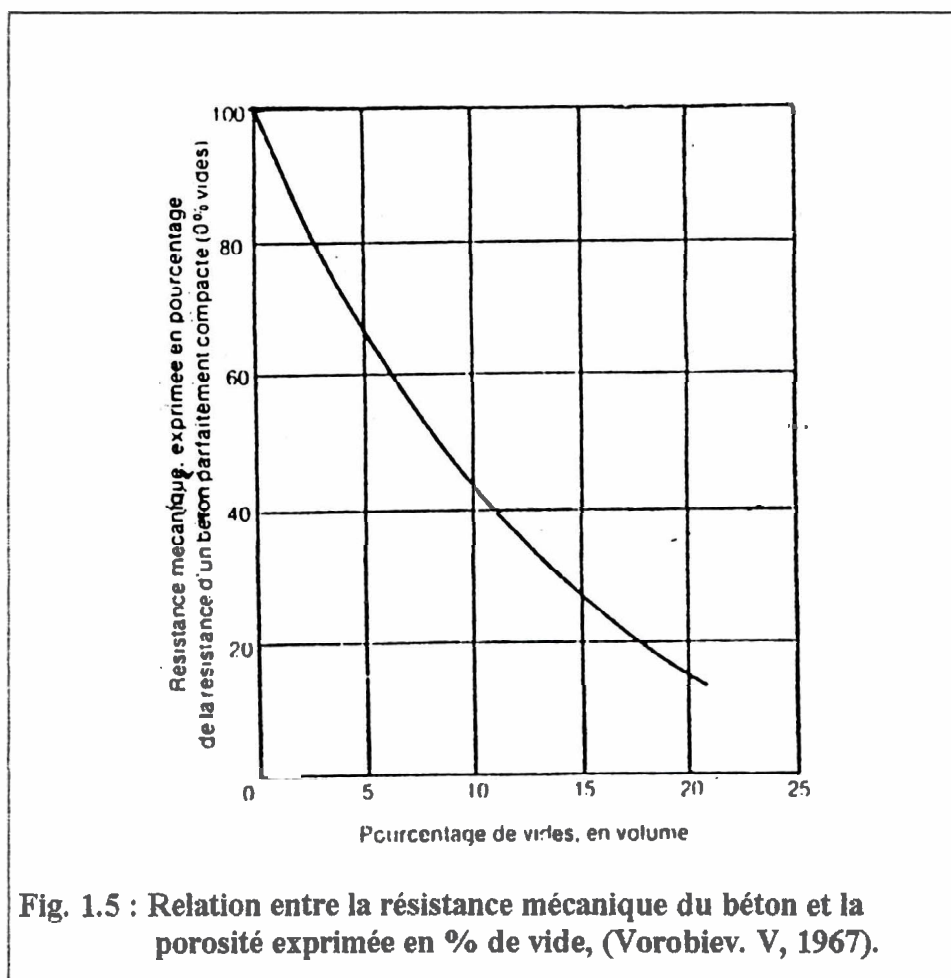
C'est un phénomène de la remontée d'eau en surface du béton fraîchement placé qui engendre de multiples conséquences plastiques : finition des surfaces; gain local en eau; l'enrobage d'armature en eau; fissuration avant prise; etc...(Pozer. T.C, 1968).

- Compacité

Elle représente le complément de la porosité rapportée à 100 %; le coefficient de compacité varie en fonction de la consistance; de l'efficacité des moyens de serrage et de la forme et grosseur maximum des granulats, (Vorobiev. V, 1967), (Fig. 1.5).

- Consolidation

On emploie aussi des termes, serrage, densification et compactage dans le même sens. La consolidation contribue à l'augmentation de la compacité et la réduction des vides. Le damage, la vibration sont des procédés pour réaliser la consolidation, (Tremblay. D, 1983).



1.4.2. Béton à l'état durci

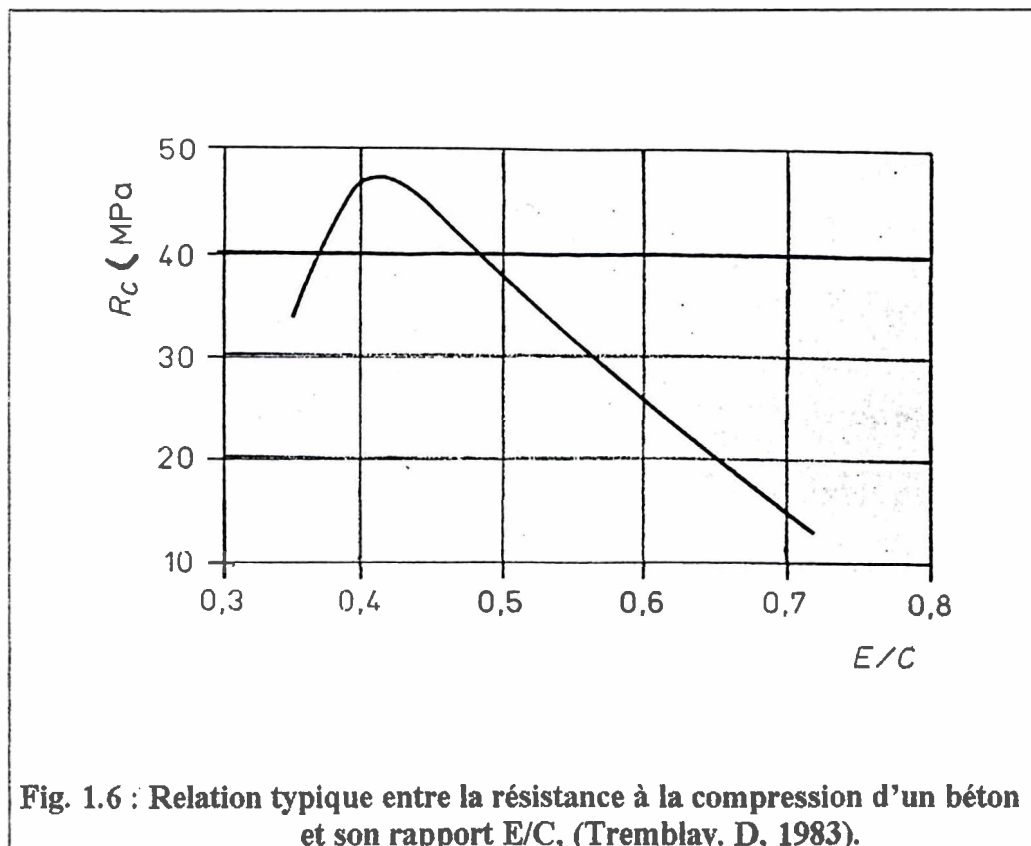
1.4.2.1 Masse volumique absolue

La masse volumique des bétons dépend de la composition adoptée, du serrage plus ou moins énergétique (piquage, vibration) et, de la masse volumique des granulats utilisés qui dépend de leur nature minéralogique, (Dreux. G, 1985). On peut considérer qu'en général, avec les granulats naturels silico-calcaires, la masse volumique du béton est de l'ordre de 2200 à 2400 Kg/m³; on peut admettre a priori 2300 Kg/m³ en valeur moyenne courante (pour des bétons durcis et pratiquement secs).

1.4.2.2 Résistance mécanique

La résistance mécanique est considérée comme la propriété la plus représentative de la qualité globale du matériau. La résistance mécanique peut être de différentes modes, (compression, flexion, traction, torsion, cisaillement, etc...), et varie généralement en fonction du rapport eau/ciment, (Tremblay. D, 1983), (Fig. 1.6).

En outre, il existe une relation approximative entre les résistances à la compression, à la traction et à la flexion du béton, (Fig. 1.7).



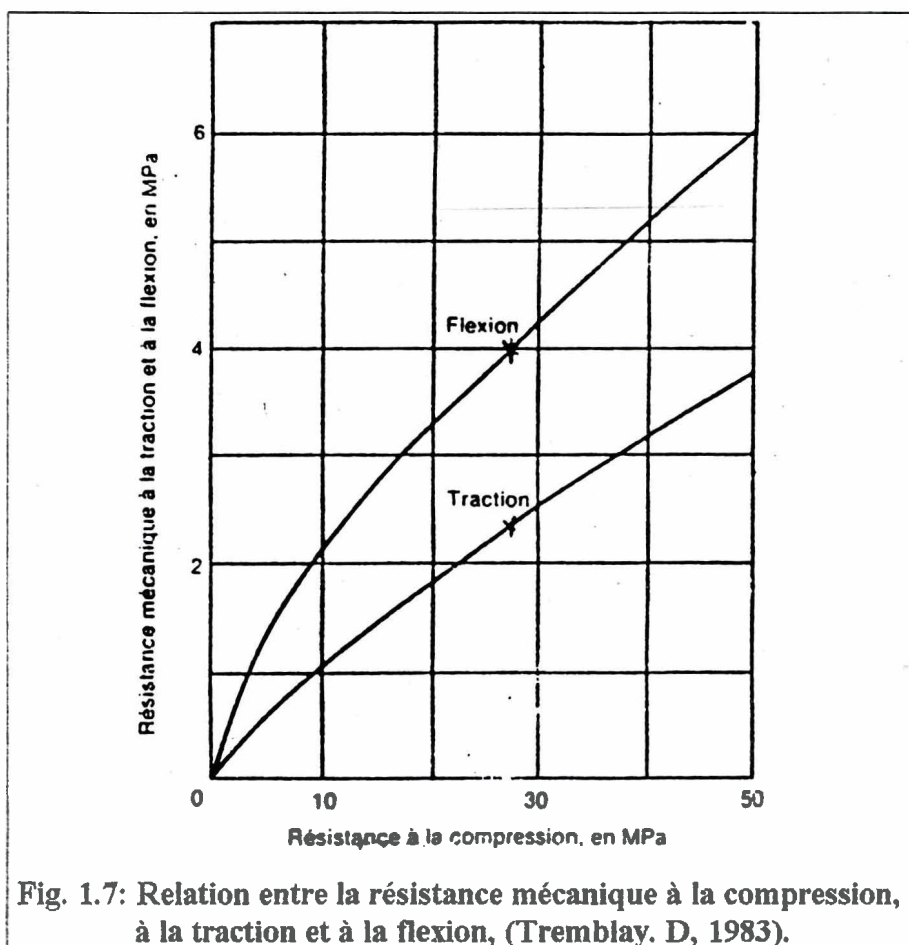


Fig. 1.7: Relation entre la résistance mécanique à la compression, à la traction et à la flexion, (Tremblay, D, 1983).

1.4.2.3 Paramètres influant sur la résistance à la rupture par compression

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

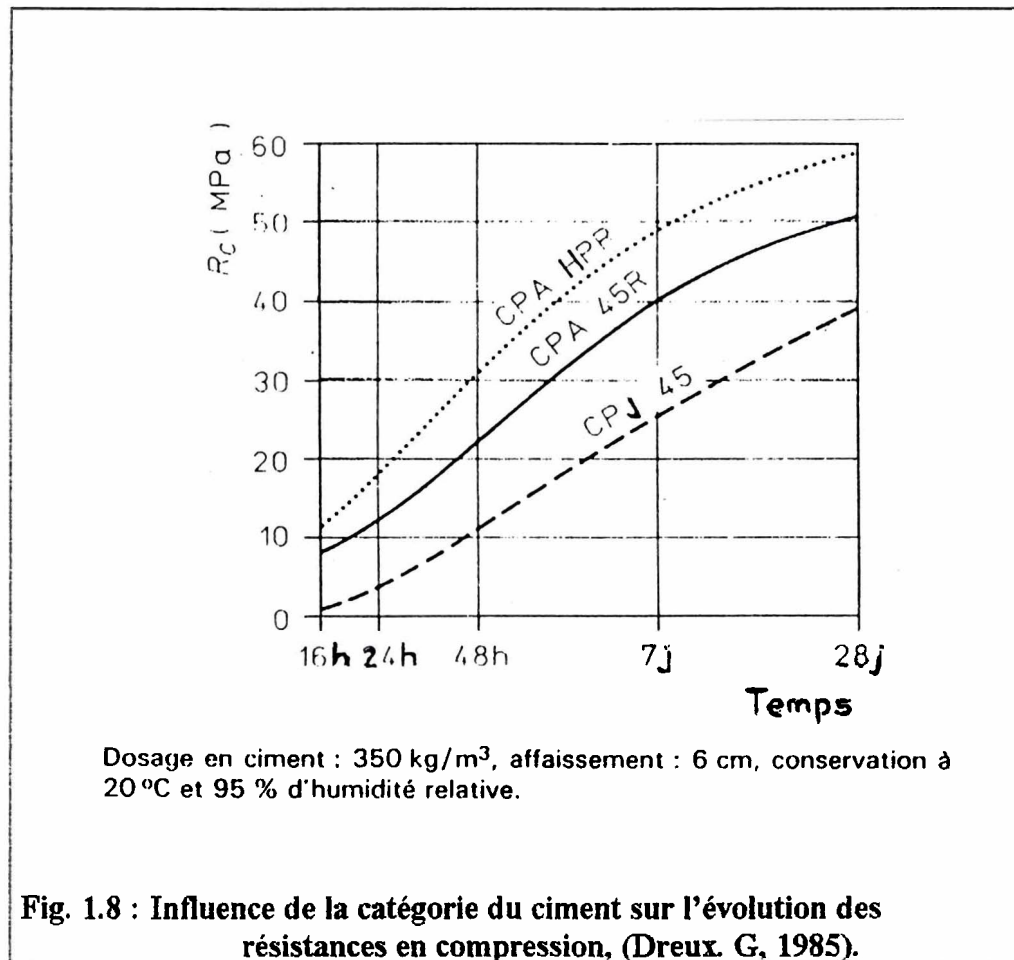
- La nature et la quantité des constituants : ciment, granulats, eau, adjuvant;
- Les conditions de mise en oeuvre de ces constituants;
- Les conditions thermohygrométriques ambiantes de conservation.

- Influence de la nature des constituants

* 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 1.8 montre l'évolution des résistances en compression d'un béton gâché avec trois ciments de catégorie différente : un CPA HP-R, un CPA 45- R et un CPJ 45, (Dreux. G, 1985).



* Nature des granulats

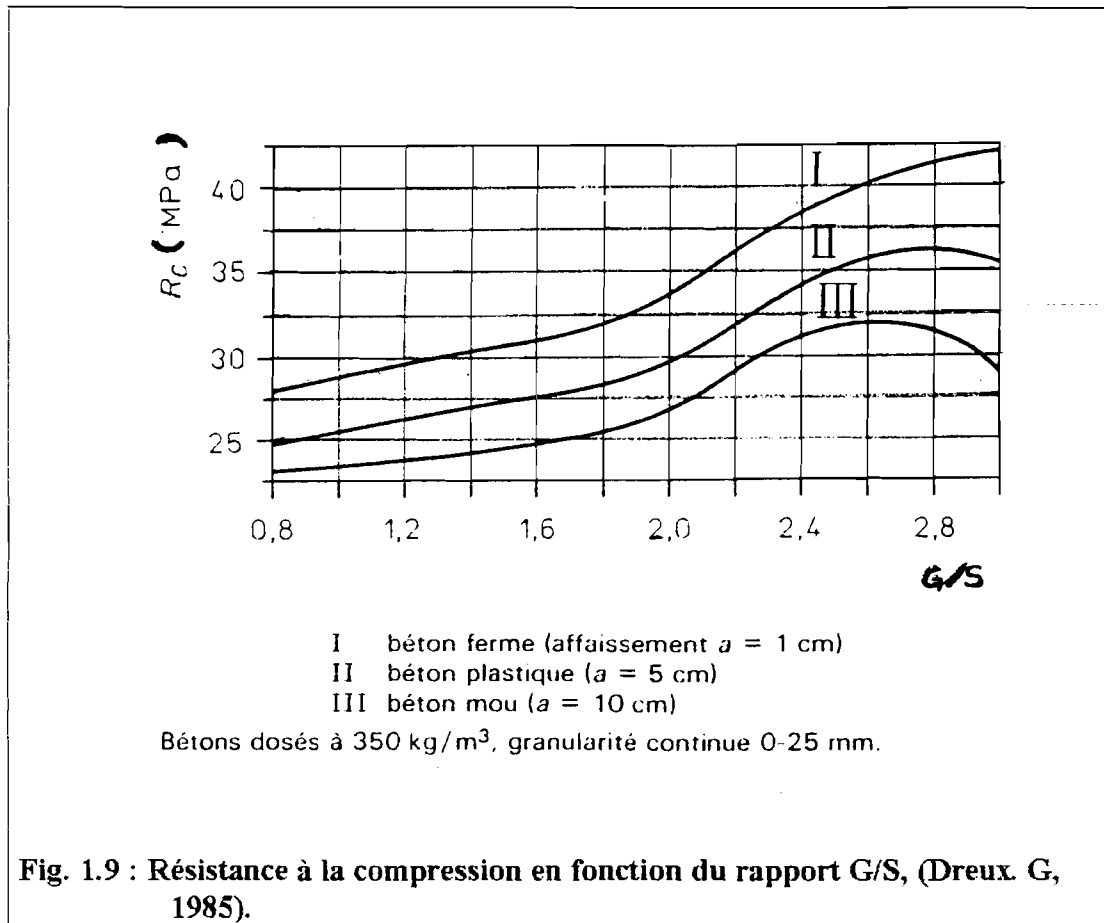
-Granularité

La résistance d'un béton dépend de la composition granulométrique du mélange, par exemple de la proportion relative de gravier G et de sable S (rapport G/S).

La figure 1.9 montre cette influence. On remarque que pour les rapports les plus courants de G/S (entre 1.2 et 2.0) l'influence est relativement faible.

- Nature et forme des granulats

La résistance d'un béton dépend de la qualité du granulat. La qualité du granulat dépend principalement de la propreté, de la dureté et de la forme des grains.



On sait, en effet, que la plus ou moins bonne adhérence de la pâte de ciment sur la face des granulats est un facteur important de la résistance en traction surtout. Ainsi, des graviers comportant une présence d'impuretés telles que gangue argileuse ou poussières risquent de compromettre l'adhérence mortier sur graviers. De même, l'emploi d'un sable souillé conduit à une baisse sensible de la résistance à la traction et à une augmentation du retrait. Il doit contenir un minimum d'impuretés. La propreté se mesure par l'équivalent de sable.

La résistance dépend également de la résistance à l'écrasement des grains influant surtout sur la résistance en compression.

Par ailleurs, la résistance d'un béton 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 maximale. Mais cet excès d'eau sera d'autant plus faible que les grains seront plus arrondis. Un béton de granulats roulés exige un rapport E/C de 0.45 pour avoir une consistance plastique ($a = 6$ cm), alors qu'il faut $E/C = 0.55$ pour

l'obtenir avec granulats anguleux, toutes choses égales par ailleurs (dosage en ciment : 350 Kg/m^3). 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 aiguilles.

La norme NF P 18-561 définit un coefficient d'aplatissement.

* Dosage en ciment et en eau

D'une façon générale, la résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et décroît avec le dosage en eau E. Il est pratique d'évaluer la résistance au moyen du facteur C/E ou E/C.

La figure 1.6 montre la variation de la résistance en compression en fonction du rapport E/C, pour une énergie de mise en oeuvre donnée et sans adjuvant.

- Influence de la température de conservation

L'évolution de la résistance d'un béton dépend de la température de conservation.

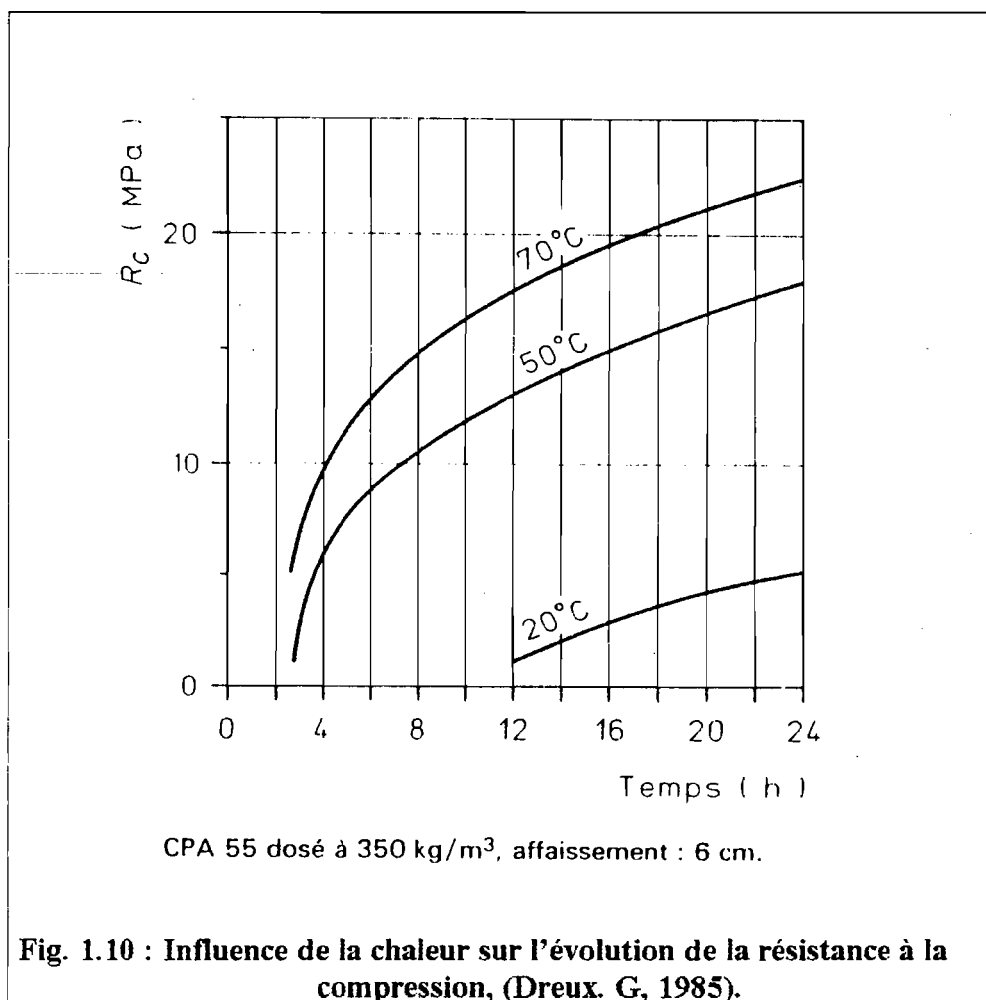
* Influence de la chaleur

La figure 1.10 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, (Dreux. G, 1985).

1.4.2.4 Retrait et gonflement

Dès que le contact entre les grains de ciment et l'eau s'effectue, des hydrates précipitent, s'organisent en formant une structure dont la cohésion évolue progressivement selon une cinétique dont les mécanismes sont divers et compliqués.

Dans le même laps de temps, il y a une superposition de plusieurs phénomènes qui concourent tous vers une réduction de volume apparent du béton. LE CHATELIER (1887), a montré que l'hydratation du ciment Portland entraîne une diminution du volume absolu total, (Dreux. G, 1985).



Depuis plus de 50 ans, ce phénomène de retrait a été observé dès les premières utilisations des liants hydrauliques pour la confection du mortier, du béton et du béton armé. C'est surtout la fissuration due aux effets du retrait qui, en pratique constitue la conséquence la plus préoccupante pour la qualité et la durabilité des matériaux de construction à base des liants hydrauliques.

La figure 1.11 donne les retraits et les gonflements moyens d'une pâte pure, d'un mortier et d'un béton. Le retrait est mesuré en laboratoire. L'origine est prise conventionnellement au démoulage à l'âge de 24h, au moment où l'on place les éprouvettes dans une ambiance de 20° C et 50 % d'hygrométrie relative.

Les paramètres qui influent sur le retrait sont :

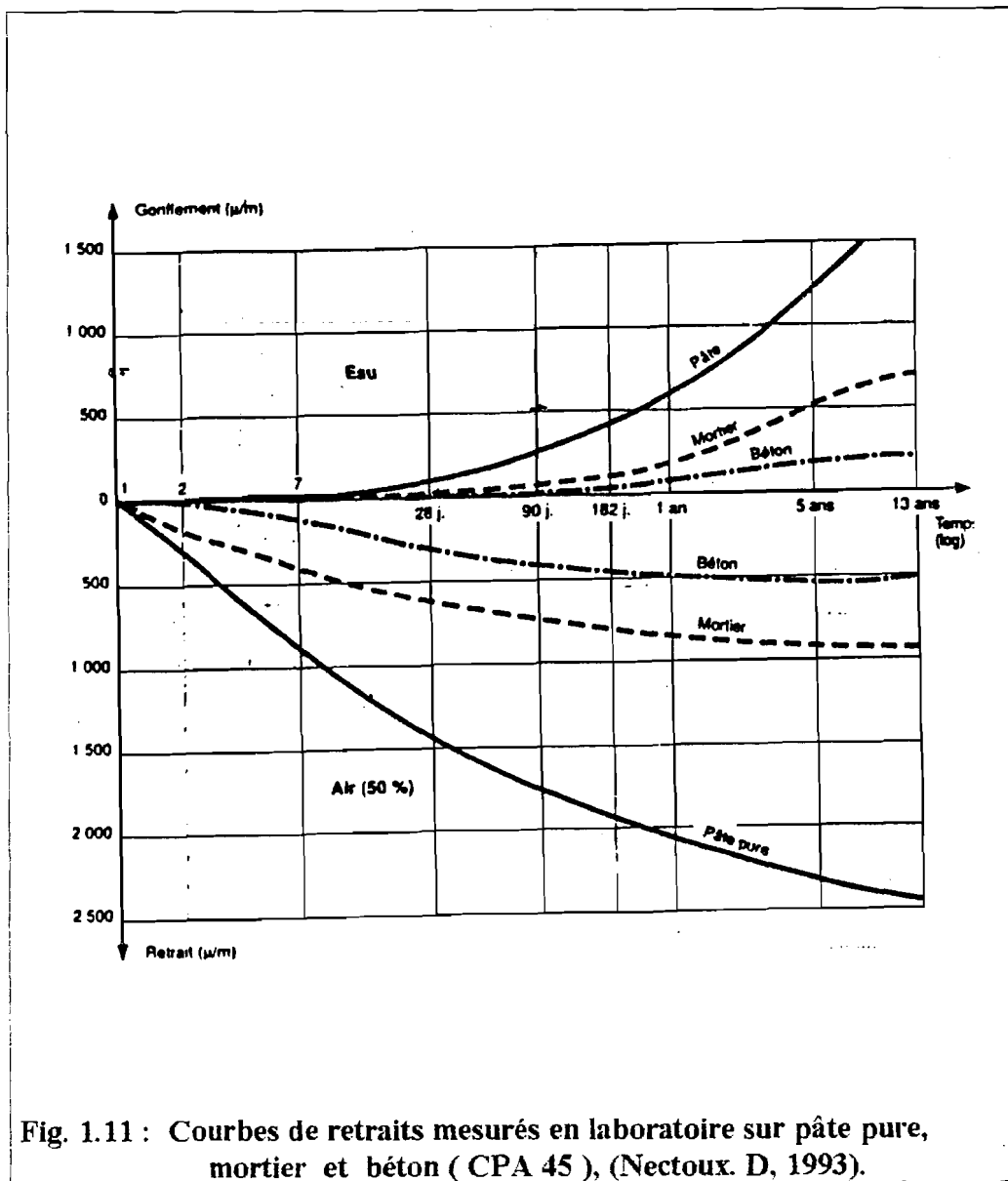


Fig. 1.11 : Courbes de retraits mesurés en laboratoire sur pâte pure, mortier et béton (CPA 45), (Nectoux, D, 1993).

* Dosage en eau

Le retrait après prise du béton durci est relativement peu augmenté par l'accroissement du dosage en eau (à condition de rester dans des limites acceptables).

Par exemple, pour un béton dosé à 350 Kg de ciment/ m³, si le rapport E/C passe de 0.45 à 0.60, le retrait final du béton croît de 10 %.

* Nature du ciment

Selon la nature du ciment, le retrait du mortier ou du béton durci, peut varier dans des proportions de 1 à 3. Plusieurs paramètres de la constitution du ciment influent. Parmi

les plus importants, on peut citer la finesse de mouture, la constitution minéralogique du ciment (gypse, teneur en chaux, etc...). Sur la figure 1.12 le retrait définitif du mortier durci est présenté en fonction de la finesse de mouture d'un même clinker. On voit que le retrait croît quand la finesse des grains de ciment augmente.

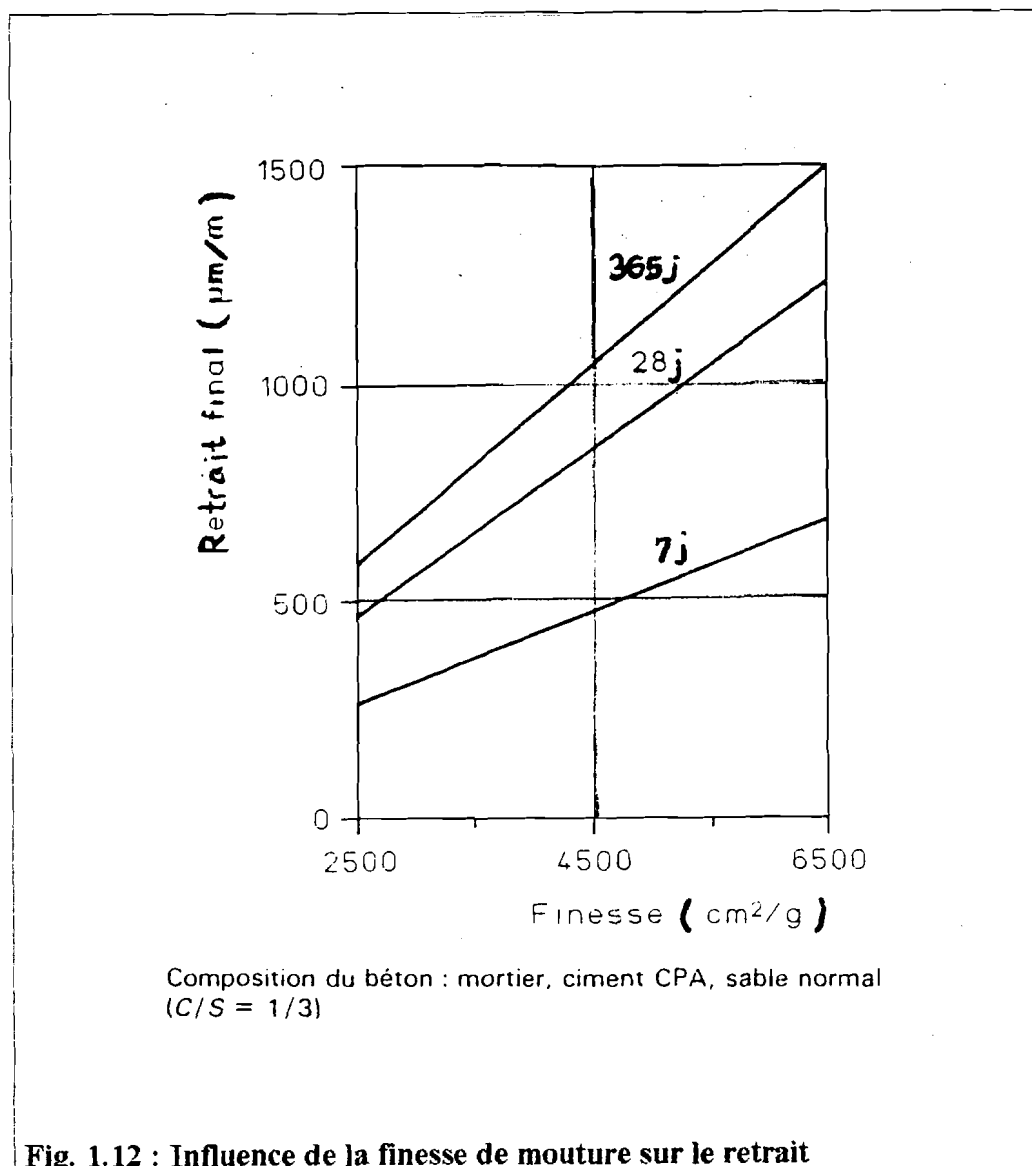


Fig. 1.12 : Influence de la finesse de mouture sur le retrait

* Dosage en ciment

Le retrait du mortier et du béton augmente avec le dosage en ciment. Les résultats d'essais sur du béton, après un an, donnent les valeurs de retrait indiquées dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9 : Retrait du béton en fonction du dosage en ciment, (Dreux. G, 1985).

Dosage en ciment (Kg/m ³)	Retrait du béton durci (µm/m)
250	250
350	350
450	400

1.4.2.5 Elasticité

Lorsque l'on soumet une éprouvette de béton à un effort de compression, on enregistre un raccourcissement du béton proportionnel à la contrainte appliquée, jusqu'à une certaine valeur de la contrainte (environ 50 à 60 % de la contrainte de rupture); cette première phase est dite élastique; ensuite, si la contrainte continue d'augmenter, la déformation croît plus vite que la contrainte; cette seconde phase est dite anélastique.

• Module d'élasticité E

C'est le rapport entre la contrainte appliquée σ et la déformation relative $\Delta l / l$:

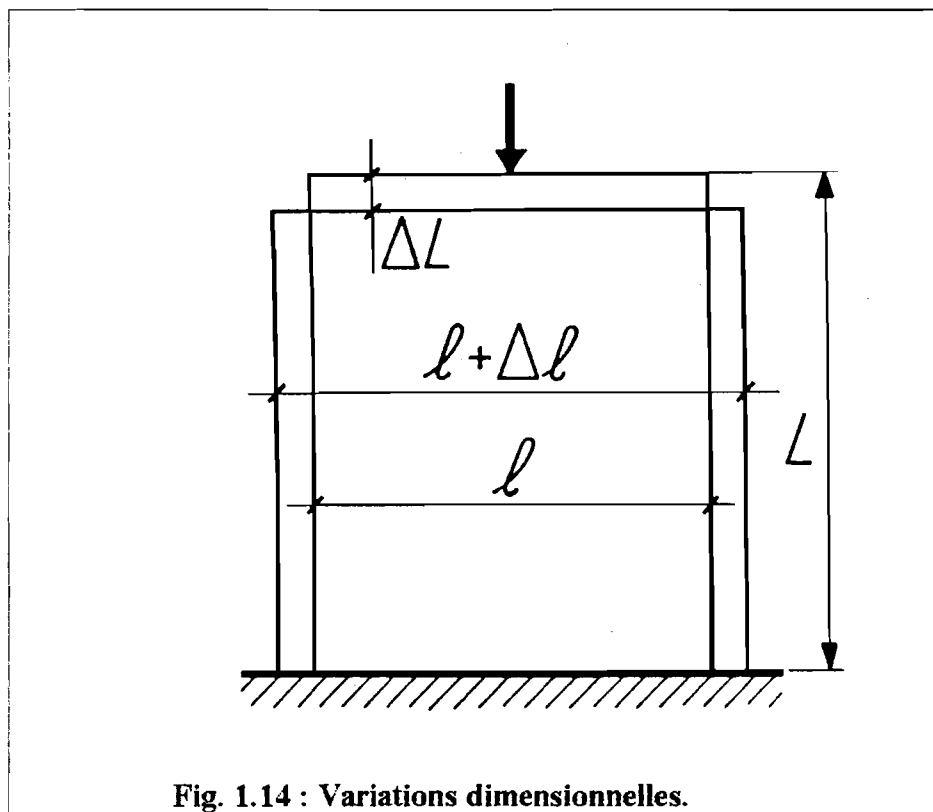
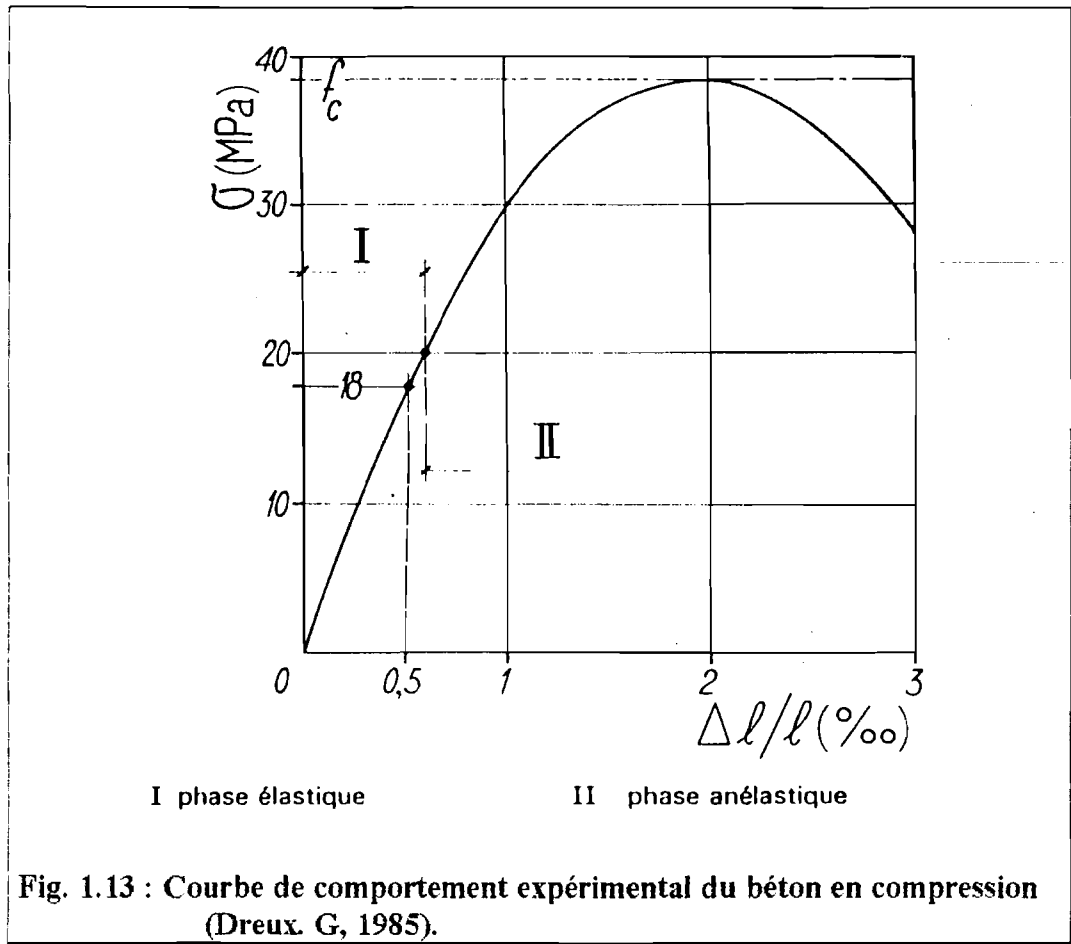
$$E = \frac{\sigma}{\Delta l / l} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$$

Ce module n'est définissable que dans la phase d'élasticité (première partie de la courbe de la figure 1.13) où il y a proportionnalité des contraintes et les déformations. Sur le diagramme présenté on lit une déformation de 0.5 ‰ pour une contrainte de 18 MPa; d'où $E = 36\,000$ MPa, ce qui correspond à une valeur courante du module d'élasticité.

• Coefficient de Poisson

Si $\Delta L / L$ est le raccourcissement relatif longitudinal et $\Delta l / l$ l'augmentation relative de la dimension transversale (fig. 1.14), le coefficient de Poisson ν est :

$$\nu = \frac{\Delta l / l}{\Delta L / L}$$



1.4.2.6 Fluage

C'est un phénomène de déformation différée sous charge fixe indéfiniment appliquée. L'éprouvette gonfle ou se rétracte selon le degré hygrométrique de conservation, puis au cours du chargement, il se produit une déformation instantanée (élastique et plastique) et enfin dans le temps une lente déformation désignée sous le nom de fluage (fig. 1.15), (Dreux. G, 1985, Gorisse. F et Dreux. G, 1979).

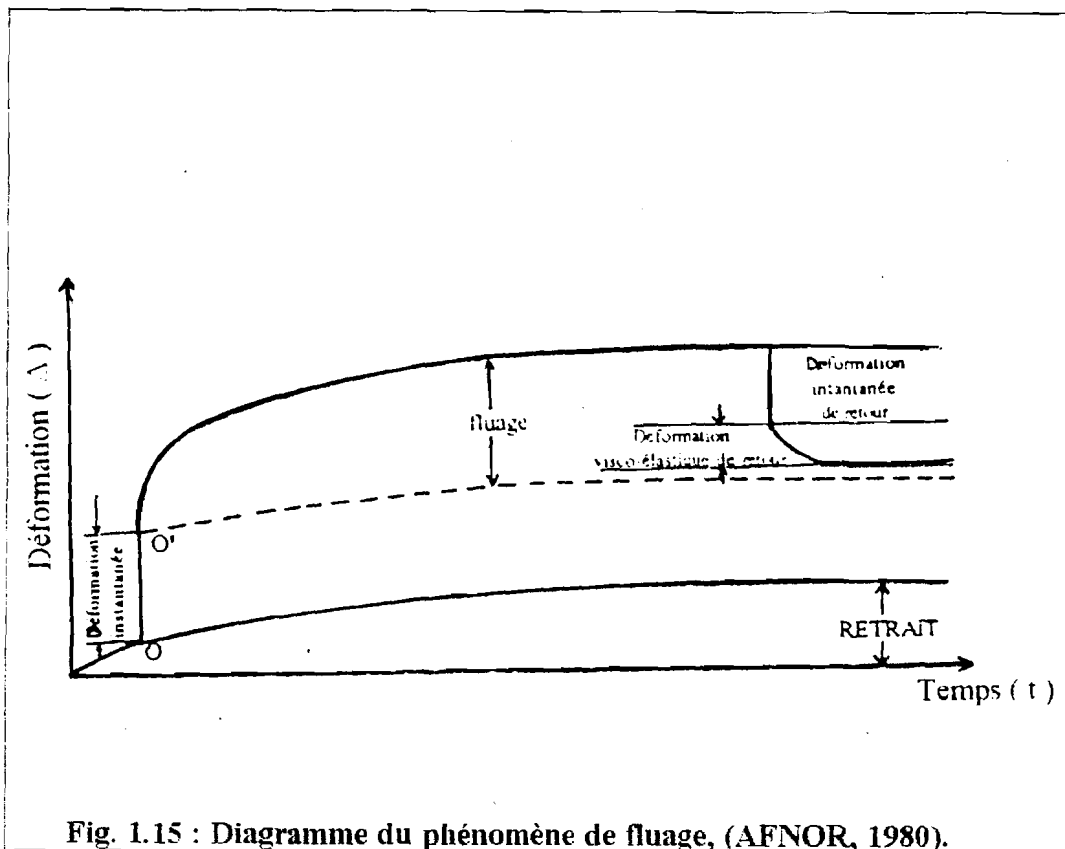


Fig. 1.15 : Diagramme du phénomène de fluage, (AFNOR, 1980).

1.4.2.7 Durabilité

D'après DURIEZ. M, la durabilité est la résistance du béton à s'opposer aux effets agressifs générés par les agents physiques et chimiques du milieu. Et selon GORCHAKOV. M, la durabilité est un temps pendant lequel le béton est capable d'exécuter ses fonctions.

Le manque de durabilité en tant que résistance physico-chimique du béton peut réduire la résistance mécanique à moyen ou à long terme, même lorsque celle-ci est très élevée au début, (Revue technique, 1986).

La pierre de ciment représente dans la masse du béton la partie la moins résistante et capable de réagir avec les agents agressifs.

Les causes principales de corrosion des bétons de ciment sont diverses : (Baron. J.A et Sauterey. R, 1982, Seminaire, 1990).

- Action externe des sels : chlorures - sulfates, etc...
- Action agressive d'origine interne : réaction Alcalis - granulats, (Guettache. B, 1993).

Ces réactions conduisent à un affaiblissement de la liaison pâte de ciment-granulat et à la fissuration du béton. Pour contrecarrer l'instabilité chimique, il faut respecter le choix du couple ciment-granulat, faire diminuer le rapport eau/ciment au maximum possible en utilisant éventuellement des adjuvants.

1.5 CONCLUSION

Après avoir présenté le comportement mécanique des bétons gris, on va étudier dans les chapitres qui suivent, le comportement mécanique des bétons confectionnés avec le ciment blanc afin de faire une comparaison entre les deux bétons (gris et blanc).

CHAPITRE 2

CARACTERISATION DES

MATERIAUX ET

METHODES D'ESSAIS

CHAPITRE 2

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

2.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre traite d'une part, de la détermination des caractéristiques de différents constituants entrant dans la confection d'un mélange du béton (granulats et ciment), et d'autre part, de la présentation des modes de confection du béton et du mortier et leurs régimes de conservation, ainsi que les principes des différents essais réalisés dans la partie expérimentale.

2.2 CARACTERISATION DU CIMENT

Les ciments gris et blanc utilisés dans notre étude sont respectivement un ciment Portland artificiel (C.P.A) de classe 325 fabriqué à l'usine de MEFTAH et un ciment blanc (C.P.A) de classe 425 fabriqué à l'usine de LAFARGE CIMENT (France).

Le choix de la classe 325 du ciment gris est justifié par le fait qu'il s'agit de la meilleure classe disponible dans le marché.

Les valeurs des caractéristiques de ces deux ciments sont présentées dans les tableaux ci-après et sont obtenues conformément aux essais normalisés en vigueur (NF).

Tableau 2.1 : Résultats d'essais physiques

Type de ciment		Ciment gris	Ciment blanc	Gain (%)
Caractéristiques	Unité			
Début de prise	h-mn	2-10	1-40	+23.0
Fin de prise	h-mn	4-40	2-10	+53.5
Masse volumique absolue	g / cm ³	3.09	3.06	≈0
Surface spécifique	cm ² / g	3360	3520	+4.7

Tableau 2.2 : Résultats d'analyse chimique.

Composants (%)	Ciment gris	Ciment blanc
SiO ₂	20.67	24.39
Al ₂ O ₃	04.53	02.99
Fe ₂ O ₃	02.86	00.72
CaO	63.06	65.76
MgO	00.37	00.22
SO ₃	02.31	02.41
K ₂ O	00.54	00.54
Na ₂ O	00.10	00.16
P. F	05.31	02.52
Total	99.76	99.71
Insolubles	01.02	02.73

Tableau 2.3 : Résultat d'analyse des clinkers et ajouts de ciment par un microscope universel.

Type de ciment	Constituants minéraux en %				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO.L
Ciment blanc	62	27	10	/	01
Ciment gris	52	28	12	07	01

Type de ciment	AJOUTS EN %
Ciment blanc	Gypse : 05 + Calcaire : 06
Ciment gris	Gypse : 06 + Calcaire : 10

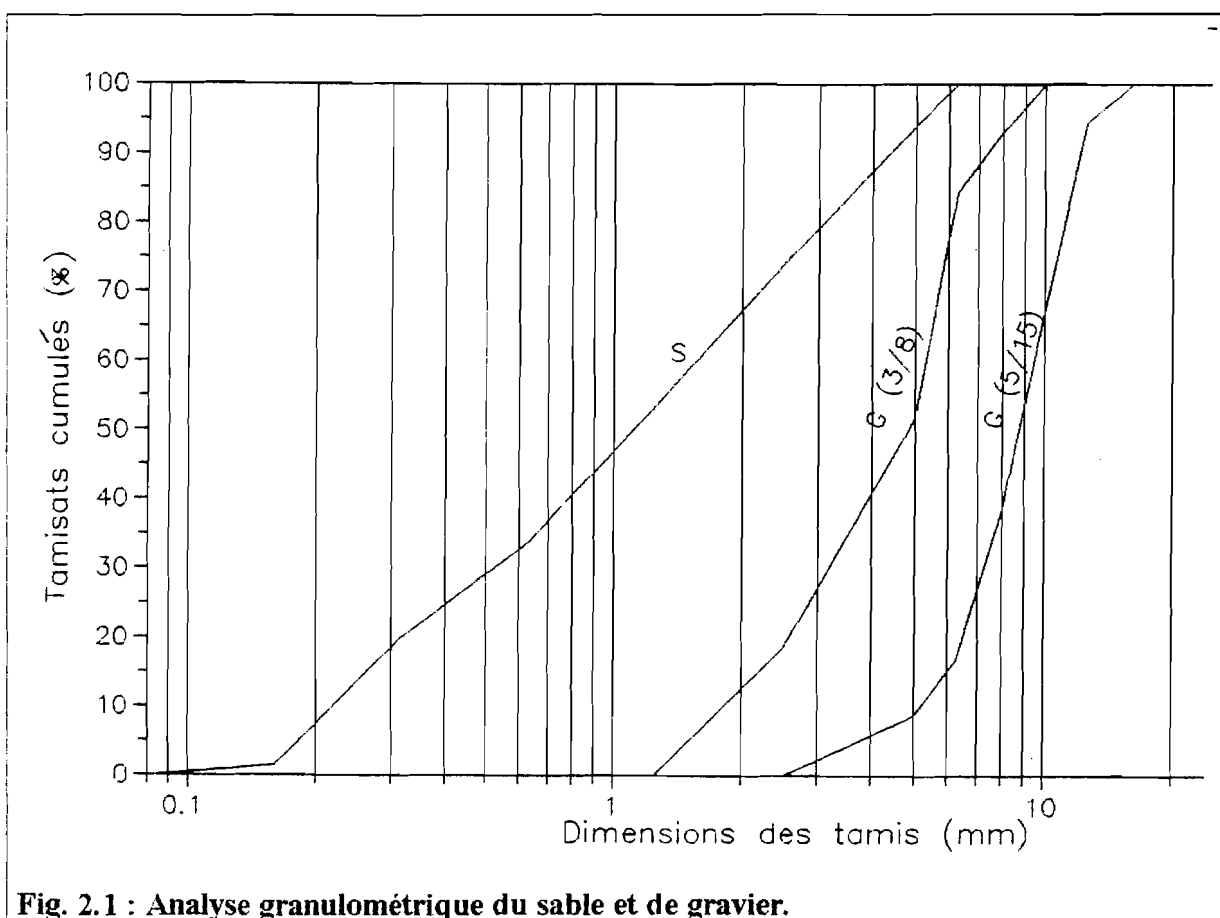
Le gypse analysé est sous forme d'hemi-hydrate et d'anhydrite

2.3 CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS

2.3.1 Analyse granulométrique du sable et gravier

Le sable utilisé est un sable de rivière de Boumerdes dont le module de finesse est égale à 3.23. Cette valeur correspond à un sable grossier.

Les graviers utilisés nous ont été fournis par la carrière C.P.V.A d'Alger. Ce sont des graviers concassés de haute qualité d'origine calcaire, et de classe 3/8 et 5/15 mm, l'analyse granulométrique des deux classes de gravier ainsi que celle du sable, est présentée sur la figure 2.1.



2.3.2 Essai d'équivalent de sable; (Norme NF P18-598)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculante. Après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes; ensuite on mesure la hauteur dans l'éprouvette normalisée du sédiment (H_1) et du sédiment + flocculant (H_2), (Fig. 2.2).

L'équivalent de sable est donné par :

$$E.S = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est plus faible.

Nous avons trouvé pour notre sable les résultats suivants :

- E.S à vue = 93.
- E.S à piston = 90.

Le sable est très propre et convient aux bétons de qualité, (Dreux. G, 1985, Pozer. T.C, 1968).

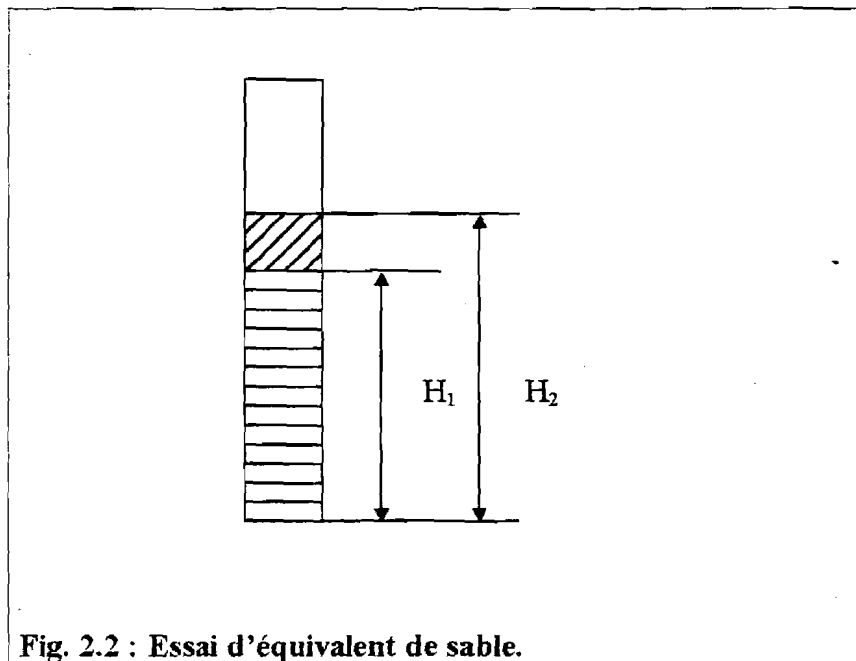


Fig. 2.2 : Essai d'équivalent de sable.

2.3.3 Masse volumique absolue du sable et de gravier

Pour étudier la formulation d'un béton, il est indispensable de connaître la masse volumique des grains d'un granulat (la masse volumique absolue). Pour la déterminer, il faut, après avoir pesé un échantillon de granulat sec, déterminer en application de la loi d'Archimède son volume à la balance hydrostatique; pour les trois granulats utilisés dans notre projet on a trouvé :

$$\rho_{\text{sable}} = 2.50 \text{ g/cm}^3;$$

Le coefficient micro-Deval est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.

La norme NF P 18-572 préconise un coefficient micro-Deval inférieur à 35 %.

Pour les graviers utilisés dans notre étude on a trouvé :

- MD (4/6.3) = 24.15 %;
- MD (6.3/10) = 24.65 %;
- MD (10/16) = 24.05 %.

2.3.7 Essai Los Angeles ; (Norme NF P 18-573)

Cette essai estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement réciproques. Il se pratique sur les classes granulaires 4/6.3 ou 6.3/10 ou 10/16 comme le micro-Deval.

On place un échantillon de 5 Kg de granulat et 7 à 11 boulets de 417 g dans un tambour dont une génératrice intérieure est munie d'une lame métallique.

Après un nombre normalisé de tour (500 tours pendant 45 minutes à une vitesse de 33 t/min) du tambour, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm. Le coefficient Los Angeles est :

$$L.A = 100 \frac{P}{5000} \quad P \text{ exprimé en grammes.}$$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon. La norme (NF P 18-573) préconise un coefficient Los Angeles inférieur à 40 %, (Lesage. R, 1982).

Pour les graviers utilisés on a trouvé :

- L A (4/6.3) = 30.74 %;
- L A (6.3/10) = 29.45 %;
- L A (10/16) = 29.05 %.

2.3.8 Essai de propreté ; (Norme NF P 18-301)

Dans le cas des graviers on lave un échantillon sur le tamis de 500 μm ; c'est le pourcentage de passant à ce tamis qui constitue la teneur en impuretés fines. La norme (NF P 18-301) préconise un pourcentage inférieur à 5 %, pour les graviers; quoique ce taux d'impureté est trop élevé pour certains auteurs; Dreux.G, propose qu'on ne doit pas dépasser le 1.5 %, (Dreux. G, 1985, Lesage. R, 1982).

Pour les deux classes de gravier nous avons trouvé :

- Gravier (3/8) : 1.15 %.
- Gravier (5/15) : 1.04 %.

Le tableau (2.4) récapitule les résultats obtenus par les essais effectués sur les granulats.

Tableau 2.4 : Récapitulation des résultats des essais de caractérisation des granulats

Essai	Résultats	Remarques et observations
Equivalent de sable (NF P 18-598)	E.S (à vue) = 93 % E.S (à piston) = 90 %	Sable très propre qui convient au béton de qualité
Module de finesse (NF P 18-304)	$M_f = 3.23$	Sable à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.
Coefficient d'aplatissement (NF P 18-561)	$A = 28.45 \%$	Satisfaisant aux normes.
Essai micro-Deval (NF P 18-572)	MD (4/6.3) = 24.15 % MD (6.3/10) = 24.65 % MD (10/16) = 24.05 %	Bon gravier, convenable selon les normes aux bétons de qualité.
Essai Los Angeles (NF P 18-573)	L A (4/6.3) = 30.74 % L A (6.3/10) = 29.45 % L A (10/16) = 29.05 %	Satisfaisants aux normes.
Essai de propreté (NF P 18-301)	Gravier (3/8) : 1.15 % Gravier (5/15) : 1.04 %	Gravier propre.

2.4 CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON - METHODE DE FAURY

En se servant préalablement de l'analyse granulométrique des granulats (sable + gravier), nous avons choisi la méthode de calcul de Faury, puisqu'elle tient compte de la connaissance de la courbe granulométrique de référence, ainsi que la quantité du ciment utilisée.

Pour déterminer une composition de béton, on trace les courbes granulométriques des granulats, ensuite on trace la courbe optimale, et en utilisant la méthode de Joisel, on détermine les proportions du sable et des graviers dans le béton.

Dans notre étude, on a choisi trois dosages de ciment : 350, 400 et 450 Kg/m³, qui présentent les dosages les plus utilisés dans les travaux de génie civil.

• Formulation théorique retenue

Tableau 2.5 : Composition du béton à dosage de 350 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	14.39		113	3.10	350
Sable	31.61		248	2.50	620
G ₁ (3/8)	09.00	785	71	2.66	189
G ₂ (5/15)	45.00		353	2.65	935
Eau			215	1.00	215
Totaux	100				2309

La densité théorique du béton est de 2309 Kg/m³.

Tableau 2.6 : Composition du béton à dosage de 400 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	16.43		129	3.10	400
Sable	29.57		232	2.50	580
G ₁ (3/8)	09.00	785	71	2.66	189
G ₂ (5/15)	45.00		353	2.65	935
Eau			215	1.00	215
Totaux	100				2319

La densité théorique du béton est de 2319 Kg/m³.

Tableau 2.7 : Composition du béton à dosage de 450 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	18.47	785	145	3.10	450
Sable	27.53		216	2.50	540
G ₁ (3/8)	09.00		71	2.66	189
G ₂ (5/15)	45.00		353	2.65	935
Eau			215	1.00	215
Totaux	100				2329

La densité théorique du béton est de 2329 Kg/m³.

Tableau 2.8 : Composition des trois bétons avec les trois dosages de ciment.

Composants	Dosages en ciment (Kg/m ³)		
	350	400	450
Ciment	350	400	450
Sable	620	580	540
G1 (3/8)	189	189	189
G2 (5/15)	935	935	935
Eau	215	215	215
Masse volumique (Kg/m ³)	2309	2319	2329

• Confection et malaxage du béton

Le malaxage du béton est effectué selon les règles B.S 4550 Part 3, (Teychenne. D.C, Franklin. R.E et Erntory. H.C, 1988) qui consiste à :

- Placer le sable, le liant et le gravier dans le malaxeur.
- Malaxer à sec pendant 15 secondes.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme pendant les 15 secondes qui suivent. Continuer le malaxage durant 3 minutes.
- Remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.
- Directement après le malaxage on passe aux essais sur le béton frais, puis on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration du béton moulé a été effectuée sur une table vibrante à raison de 30 secondes par couche.

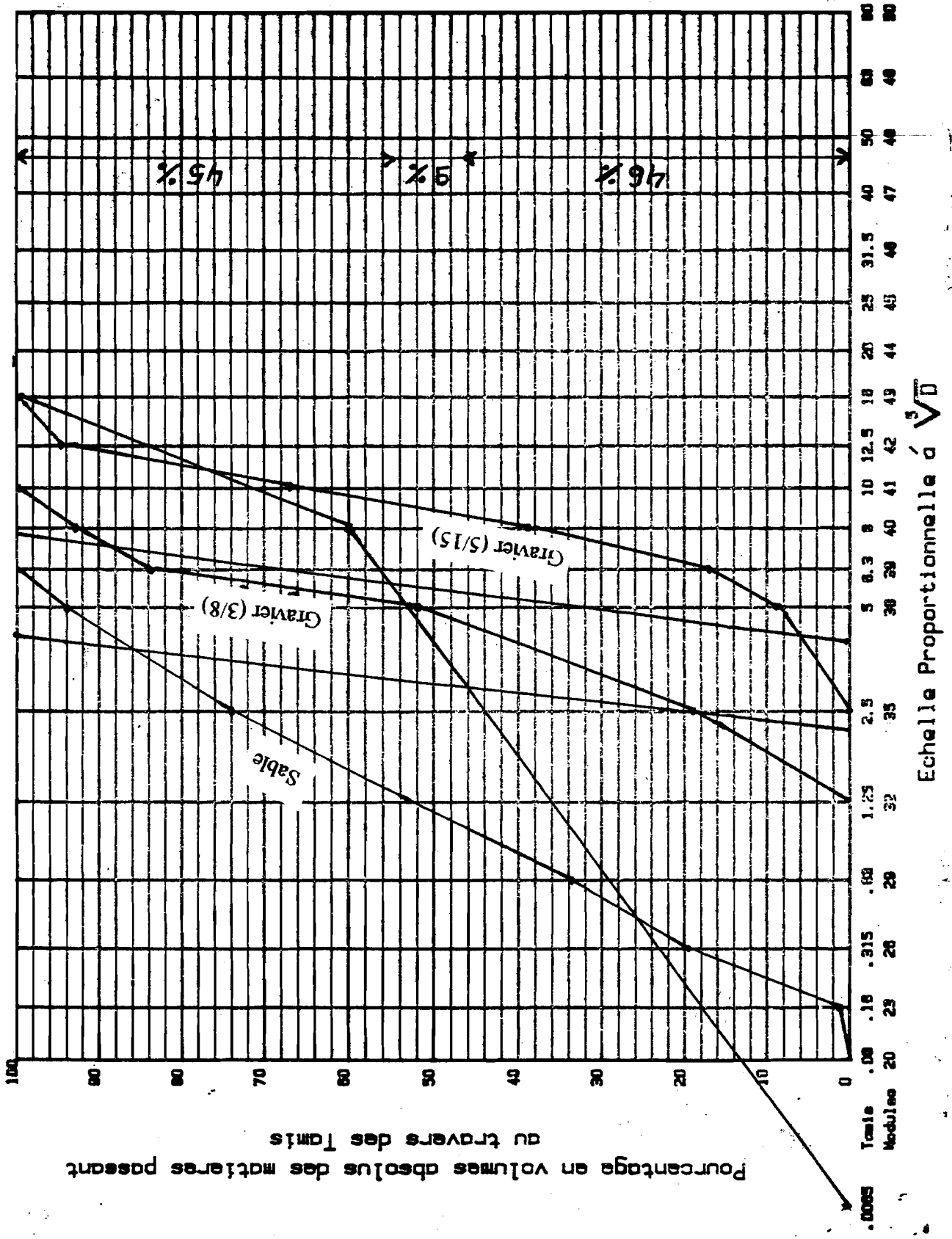


Fig 2.3 : Détermination des proportions granulaires par la méthode de faury.

- Enfin, araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le laboratoire pendant 24 heures, démoulée puis conservées dans l'eau à $20 \pm 2^\circ \text{C}$ jusqu'à la date de l'essai.

2.5 ESSAI PHYSICO- MECANIQUES

2.5.1 Essais sur ciments

2.5.1.1 Classe vraie du ciment

La classe du ciment est mentionnée sur sa fiche technique, mais on l'a vérifié par des essais en laboratoire sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$) d'un mortier normalisé, dont la composition est la suivante :

- Sable normalisé 3 parties (1350 g).
- Ciment 1 partie (450 g).
- Eau 0.5 partie (225 g).

Les essais de compression et de traction sont effectués à l'âge de 3, 7 et 28 jours. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 2.9 : Classe vraie du ciment

Type de ciment	Age (Jours)	R_t (MPa)	R_c (MPa)
Ciment gris	03	2.08	23.4
	07	2.91	36.0
	28	3.64	42.0
Ciment blanc	03	2.65	35.0
	07	3.54	46.3
	28	3.82	50.0

2.5.1.2 Masse volumique absolue du ciment

La méthode utilisée est celle du densimètre Le Chatelier, qui consiste à :

- Remplir le densimètre jusqu'au niveau «0» avec du benzène;
- Y verser une masse (M) de 64 g de l'échantillon;
- Lire directement le volume (V_{abs}) en cm^3 .

La masse volumique absolue sera donnée par :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}} \quad (\text{g/cm}^3)$$

2.5.1.3 Surface spécifique de Blaine (SSB) (Norme NF P 15-442)

La surface spécifique est mesurée à l'aide du perméabilimètre de Blaine; et elle est calculée par l'équation suivante :

$$\text{SSB} = \frac{K \sqrt{e3} \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

où :- K : constante de l'appareil (K= 34.1842).

- ρ : Masse volumique absolue en g/cm³.

- η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

- t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre en seconde.

2.5.2 Essais sur béton frais

2.5.2.1 Mesure de la consistance (Norme NF P 18-451)

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

2.5.2.2 Mesure de l'air occlu

Elle se fait à l'aide d'un aréomètre sur une quantité de béton de 6 litres pour les bétons courants.

L'appareil est constitué d'un réservoir de forme évasé dans lequel on compacte le béton. Le couvercle, muni d'un tube gradué et d'un manomètre, est fixé hermétiquement sur le réservoir. De l'eau est introduit dans le tube jusqu'à un repère zéro. Une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle. Le pourcentage d'air total est lu directement sur le tube gradué.

2.5.2.3 Masse volumique du béton frais

Cet essai consiste à :

- Remplir un récipient de volume V en (litre) et de masse Mr en (Kg) d'un échantillon de béton frais, en deux couches tassées par vibration, à raison de 30 secondes par couche.
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle ;
- Peser le récipient rempli, soit de masse totale Mt en (Kg).

La masse volumique du béton frais est :

$$\rho_{b,f} = \frac{Mt - Mr}{V} \quad (\text{Kg/litre})$$

2.5.3 Essais sur béton durci

2.5.3.1 Rectification et surfaçage

Après le démoulage des éprouvettes, les surfaces libres sont rarement planes (ou lisse), entraînant un phénomène de concentration de contraintes lors de l'essai de compression et par suite une rupture de l'éprouvette par fatigue. De ce fait, techniquement, l'opération de surfaçage suffit pour palier à ce problème de concentration de contraintes.

L'opération de surfaçage au soufre consiste à :

- Préparer une composition renfermant deux volumes de soufre et un volume de sable fin ($\leq 0.5 \text{ mm}$).
- Apporter le mélange à une température de 1350°C jusqu'à fusion, puis l'étaler sur la plaquette de l'appareil de surfaçage.
- Poser l'éprouvette perpendiculairement sur la plaquette et après quelques minutes soulever l'éprouvette, pour obtenir une surface très lisse.

2.5.3.2 Détermination de la masse volumique du béton durci

Avant d'entamer les essais mécaniques sur le béton durci, une mesure de la masse volumique a été effectuée. La détermination de cette caractéristique est simple :

- On pèse l'éprouvette après nettoyage; soit de masse M en (Kg);
- Puis on détermine son volume V en (m^3) à partir des mesures précises des

longueurs des trois cotés et selon trois diamètres.

La masse volumique est calculée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{Kg/m}^3)$$

2.5.3.3 Essais de résistances mécaniques

- Essai de compression

L'essai de compression est l'essai le plus répandu des essais mécaniques. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. La presse utilisée est une machine à double cadrans, ayant une capacité maximale de 2000 KN.

La mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement constante de 0.5 MPa par seconde.

La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{S}$$

- P : charge appliquée ;

- S : section de l'éprouvette.

- Essai de traction par flexion

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28 cm).

L'essai est effectué sur une machine d'une capacité de 200 KN, et ayant une vitesse de chargement de 0.1 MPa par seconde.

La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1.8 P}{a^2}$$

- P : La charge appliquée ;
- a : Le côté de l'éprouvette prismatique (a×a×4a).

2.5.3.4 Essai de retrait

Les essais de retrait ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16) pour le mortier et la pâte pure, et sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28 cm) pour le béton, conservés à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire (20 ± 2° C).

Pour l'essai de gonflement, les éprouvettes sont conservées dans l'eau.

2.5.3.5 Module d'élasticité et coefficient de Poisson

Le module d'élasticité statique en compression est déterminé graphiquement, en exploitant la courbe contrainte-déformation.

Le module d'élasticité statique E est la valeur de la pente à l'origine de cette courbe.

Les déformations longitudinales et transversales sont déterminées à l'aide de deux tables traçantes couplées avec un conditionneur de jauges qui est relié directement avec l'éprouvette.

Les jauges utilisés sont de type PL 10 - 11 de 10 mm de longueur et de 120 Ω de résistance.

Le coefficient de Poisson, qui exprime le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale est donné par l'expression suivante :

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques (16×32 cm).

2.5.3.6 Essai ultrasonique

C'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter - à la fois - plusieurs caractéristiques du béton durci telles que : le degré de compacité, le taux de fissuration, les dommages causés par le gel ou l'écart de température...etc.

Cet essai consiste à mesurer la vitesse de propagation longitudinale du son dans le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice)

Deux méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse du son :

- Mesure en surface ;
- Mesure en transparence.

Cette dernière présente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur les deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La fréquence de l'appareil est de 55 Hz. La surface du béton doit être raisonnablement plane et bien nettoyée.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en micro-seconde. La vitesse de propagation est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{S}{t} \cdot 10^6$$

- V : Vitesse de propagation en m/sec.
- S : Distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1 %.
- t : Temps en micro-seconde.

La vitesse dans un béton normal est environ de 4000 à 4800 m/sec.

A partir de cette vitesse on peut déterminer le module d'élasticité dynamique par la relation suivante :

$$E_{\text{dyn}} = \rho \cdot v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

- ρ : Masse volumique du béton en Kg/m³ ;
- ν : Coefficient de Poisson du béton ;
- v : Vitesse de propagation du son dans le béton en m/sec.

Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques (16×32 cm).

2.6 CONCLUSION

L'analyse chimique et minéralogique des deux ciments a montré que ces derniers présentent des caractéristiques satisfaisantes.

Compte tenu des résultats d'essais et d'analyses sur les composants de base à savoir le sable et le gravier, il en résulte une bonne aptitude d'utilisation dans les bétons.

Dans le chapitre prochain, on exposera les résultats des essais relatifs au béton frais et durci, suivis de quelques discussions et interprétations.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET

INTERPRETATIONS

CHAPITRE 3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on expose les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur le béton frais et durci, suivis par des discussions et des interprétations basées sur la littérature.

Le travail expérimental consiste en :

- la détermination d'une composition optimale du béton.
- la présentation des résultats des essais sur le béton frais.
- et la présentation des résultats des essais sur le béton durci.

3.2 OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BETON

La composition d'un béton doit être prévue en considérant les besoins à satisfaire et doit tenir compte des moyens dont on dispose, pour le réaliser. Elle ne sera pas la même lorsqu'il s'agit d'un ouvrage d'art où les contraintes sont élevées, d'un bâtiment d'habitation où les contraintes sont plus faibles, d'un ouvrage massif où la stabilité domine, d'un réservoir où l'étanchéité est un besoin majeur, d'un mur qui doit être un isolant thermique, d'une chape qui doit résister à l'usure, d'un ouvrage en mer où les risques de corrosion sont importants, etc...

On doit dire que la grande majorité des études de composition a porté sur la recherche de la résistance mécanique maximale et le plus souvent de la résistance à la compression, et d'avoir une bonne plasticité pour la mise en forme.

Pour cette raison, et lors de la confection du béton, une correction a été faite sur la quantité d'eau utilisée, dans le but d'obtenir un béton malléable, les nouvelles compositions des trois bétons seront représentées comme suit :

Tableau 3.1 : Composition du béton à dosage de 350 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	14.48	780	113	3.10	350
Sable	31.52		246	2.50	615
G ₁ (3/8)	09.00		70	2.66	186
G ₂ (5/15)	45.00		351	2.65	930
Eau			220	1.00	220
Totaux	100				2301

Tableau 3.2 : Composition du béton à dosage de 400 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	16.64	775	129	3.10	400
Sable	29.36		228	2.50	570
G ₁ (3/8)	09.00		70	2.66	186
G ₂ (5/15)	45.00		349	2.65	925
Eau			225	1.00	225
Totaux	100				2306

Tableau 3.3 : Composition du béton à dosage de 450 Kg/m³

Composants	%	Volume absolu (sec) (L)	Volume absolu (par composant) (L)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Composition (Kg/m ³)
Ciment	18.83	770	145	3.10	450
Sable	27.17		210	2.50	525
G ₁ (3/8)	09.00		70	2.66	186
G ₂ (5/15)	45.00		347	2.65	920
Eau			230	1.00	230
Totaux	100				2311

Tableau 3.4 : Composition des bétons avec les trois dosages

Composants	Dosages en ciment (Kg/m ³)		
	350	400	450
Ciment	350	400	450
Sable	615	570	525
G1 (3/8)	186	186	186
G2 (5/15)	930	925	920
Eau	220	225	230
Masses volumiques (Kg/m ³)	2301	2306	2311

3.3 ESSAIS SUR BETON FRAIS

Les principaux essais effectués sur les bétons frais sont les suivants :

- L'ouvrabilité (l'affaissement au cône d'Abrams).

- L'air occlu dans le béton.
- La masse volumique.

3.3.1 L'ouvrabilité

Dans cet essai, on a mesuré l'affaissement pour chaque composition, ainsi les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 3.5 : Evolution de l'ouvrabilité en fonction du dosage en ciment

Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	Eau de gâchage (L)	Ouvrabilité (cm)
Béton gris	350	220	3.0
Béton blanc	350	220	3.5
Béton gris	400	225	5.0
Béton blanc	400	225	6.0
Béton gris	450	230	8.5
Béton blanc	450	230	6.1

3.3.2 L'air occlu dans le béton

L'air occlu mesuré dans les deux bétons pour différents dosages est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 3.6 : Taux de l'air occlue dans les deux bétons.

Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	Air occlu (%)
Béton gris	350	1.0
Béton blanc	350	1.8
Béton gris	400	1.5
Béton blanc	400	1.8
Béton gris	450	1.7
Béton blanc	450	1.9

3.3.3 La masse volumique absolue

Les masses volumiques des deux bétons avec différents dosages sont données par le tableau suivant :

Tableau 3.7 : La masse volumique du béton frais

Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	Masse volumique (Kg/m ³)	Gain (%)
Béton gris	350	2370	+ 0.6
Béton blanc	350	2385	
Béton gris	400	2380	+ 0.8
Béton blanc	400	2400	
Béton gris	450	2390	+ 2.1
Béton blanc	450	2440	

** Discussion et interprétation*

Pour le béton gris, on remarque que l'ouvrabilité augmente avec le dosage en ciment et avec la quantité de l'eau de gâchage, car le facteur qui agit de la façon la plus importante sur la plasticité du béton est le dosage en eau qui, lorsqu'il augmente, confère au béton une plus grande fluidité. Par contre pour le béton blanc, on remarque que pour un dosage en ciment de 350 Kg/m³, l'ouvrabilité est du même ordre que le béton gris, mais elle se stabilise avec l'augmentation du dosage en ciment et de la quantité d'eau de gâchage. Ceci peut se confirmer en augmentant le nombre d'essais pour chaque dosage, afin de bien connaître l'évolution de l'ouvrabilité du béton blanc en fonction du dosage en ciment.

Le taux de l'air occlu dans le béton frais augmente avec le dosage en ciment pour le béton gris, par contre il reste relativement stable pour le béton blanc, sa valeur est généralement acceptable, (< 3%).

Concernant la masse volumique des bétons frais, on remarque qu'elle croît avec l'augmentation du dosage en ciment pour les deux bétons, mais en général elle est plus élevée avec le ciment blanc qu'avec le ciment gris, ce qui est expliqué par le rôle de remplissage des grains de ciment blanc.

En effet, le ciment blanc a une finesse plus grande que le ciment gris, ce qui permet à ses grains de s'insérer dans les vides et les pores capillaires et qui entraîne la diminution de la porosité du squelette du béton, et par conséquent, on aura une amélioration dans la masse volumique du béton frais.

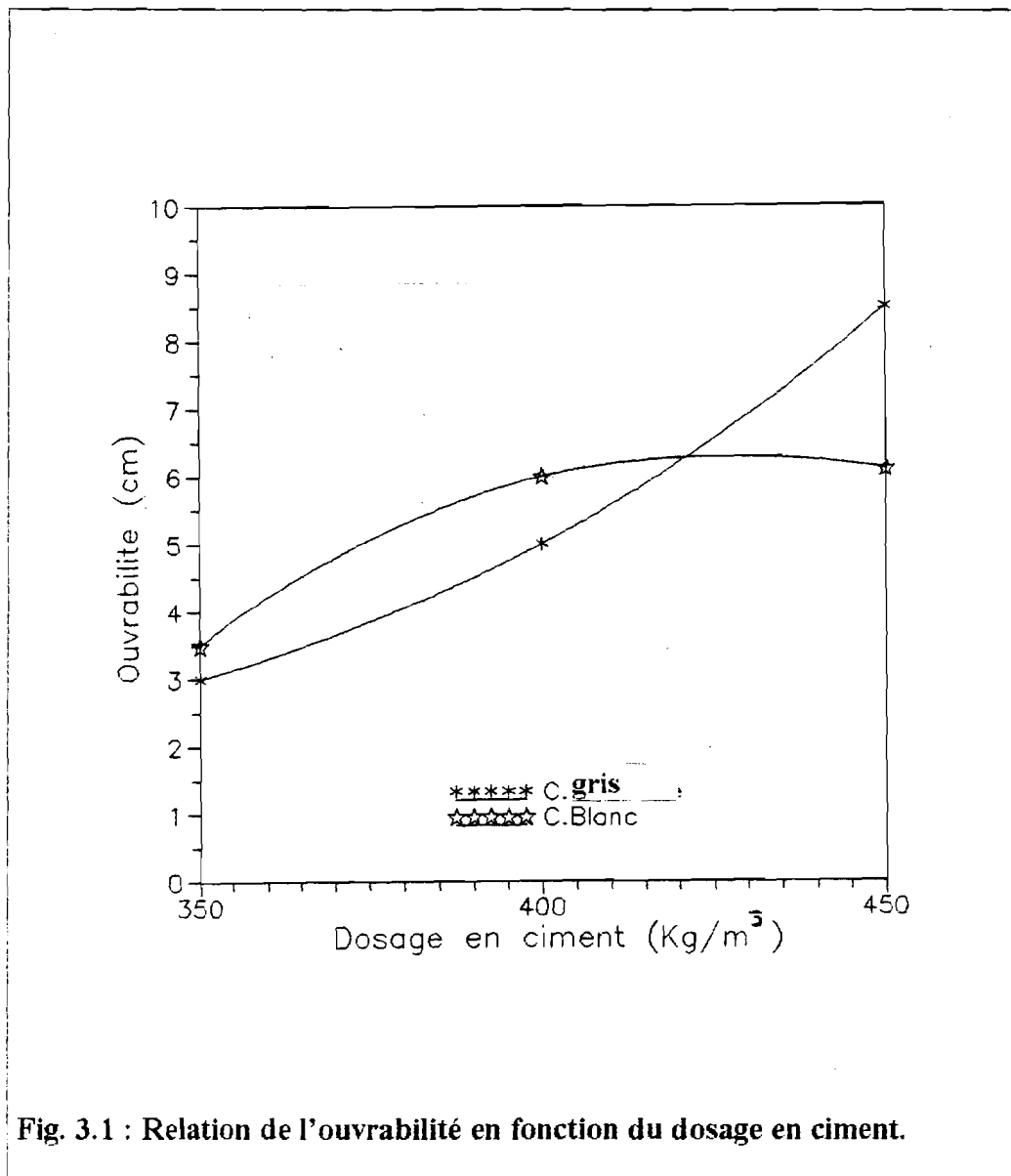


Fig. 3.1 : Relation de l'ouvrabilité en fonction du dosage en ciment.

3.4 ESSAIS SUR BETON DURCI

Les essais effectués sur béton durci sont :

- La masse volumique absolue.
- La résistance mécanique (à la compression et à la traction par flexion).
- Le module d'élasticité (relation contrainte - déformation).

Dans ce qui suit, nous exposons les résultats de ces essais pour chaque béton. Puis, nous allons faire des comparaisons entre les résultats.

3.4.1 La masse volumique absolue du béton durci

Les masses volumiques des bétons sont déterminées à 28 jours selon le mode opératoire décrit au paragraphe 2.5.3.1.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau 3.8 : La masse volumique absolue du béton durci à 28 jours.

Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	Masse volumique (Kg/m ³)	Gain (%)
Béton gris	350	2380	+ 0.8
Béton blanc	350	2400	
Béton gris	400	2390	+ 1.0
Béton blanc	400	2420	
Béton gris	450	2410	+ 1.3
Béton blanc	450	2440	

3.4.2 La résistance à la compression

Nous rappelons que les éprouvettes utilisées sont des cylindres de 16 × 32, et sont conservées dans l'eau potable à une température ambiante du laboratoire (20 ± 2 °C) jusqu'à la date de l'essai. Avant chaque essai, les éprouvettes sont essuyées et séchées.

Dans cette partie d'essais, nous avons écrasé trois éprouvettes à chaque date d'essai, à 03, 07 et 28 jours pour chaque composition.

Tableau 3.9 : Résistance à la compression des deux bétons

Résistance à la compression (MPa)					
Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	03 jours	07 jours	28 jours	Gain à 28 jours (%)
Béton gris	350	16.4	20.4	25.8	+ 21.3
Béton blanc	350	20.6	25.3	31.3	
Béton gris	400	17.1	23.2	33.2	+ 9.6
Béton blanc	400	21.0	26.3	36.4	
Béton gris	450	17.9	25.8	38.2	+ 4.0
Béton blanc	450	21.5	27.8	39.7	

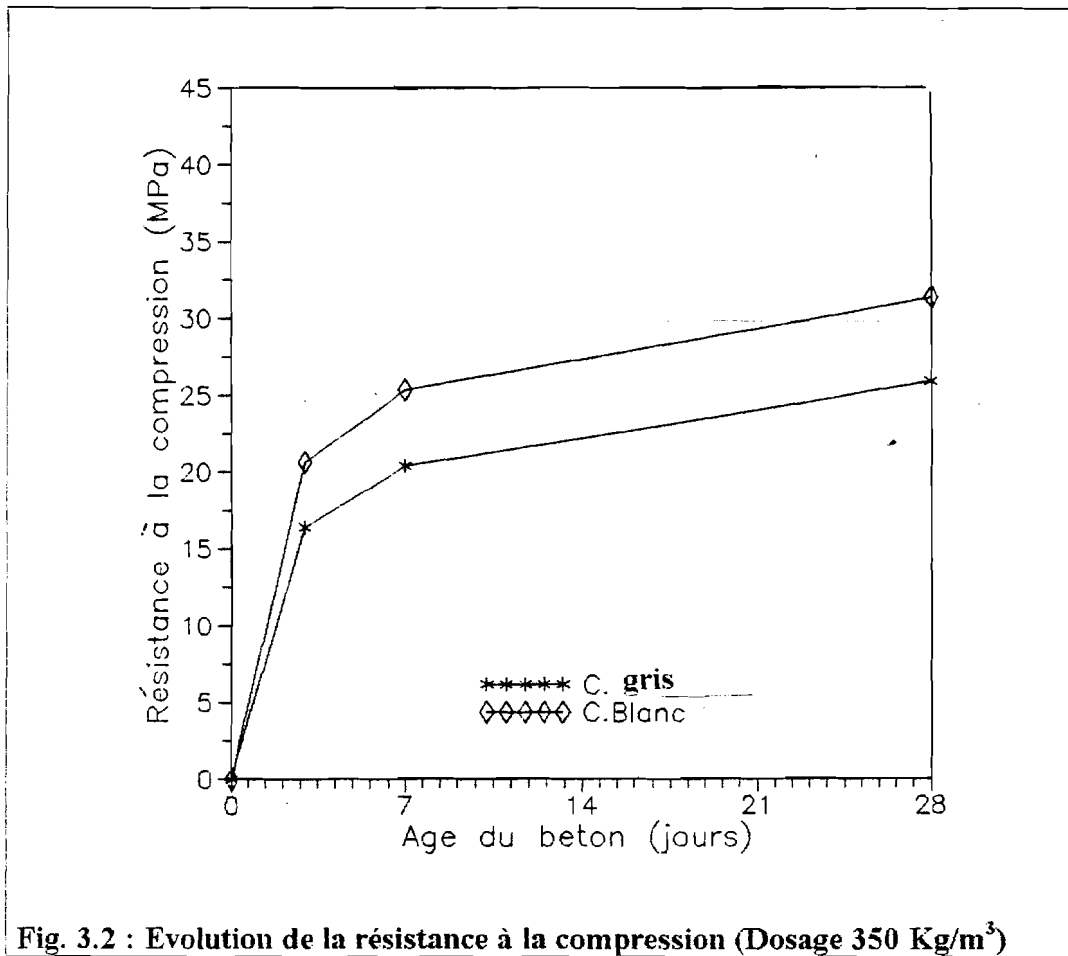


Fig. 3.2 : Evolution de la résistance à la compression (Dosage 350 Kg/m³)

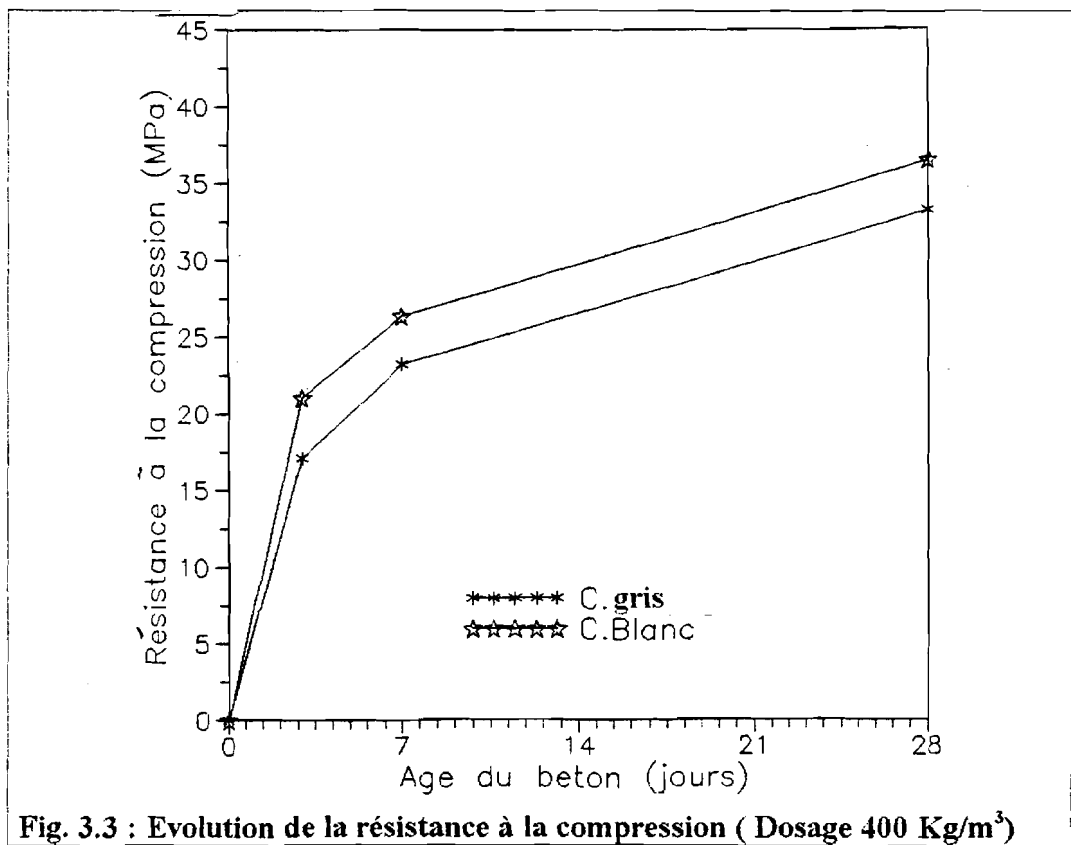
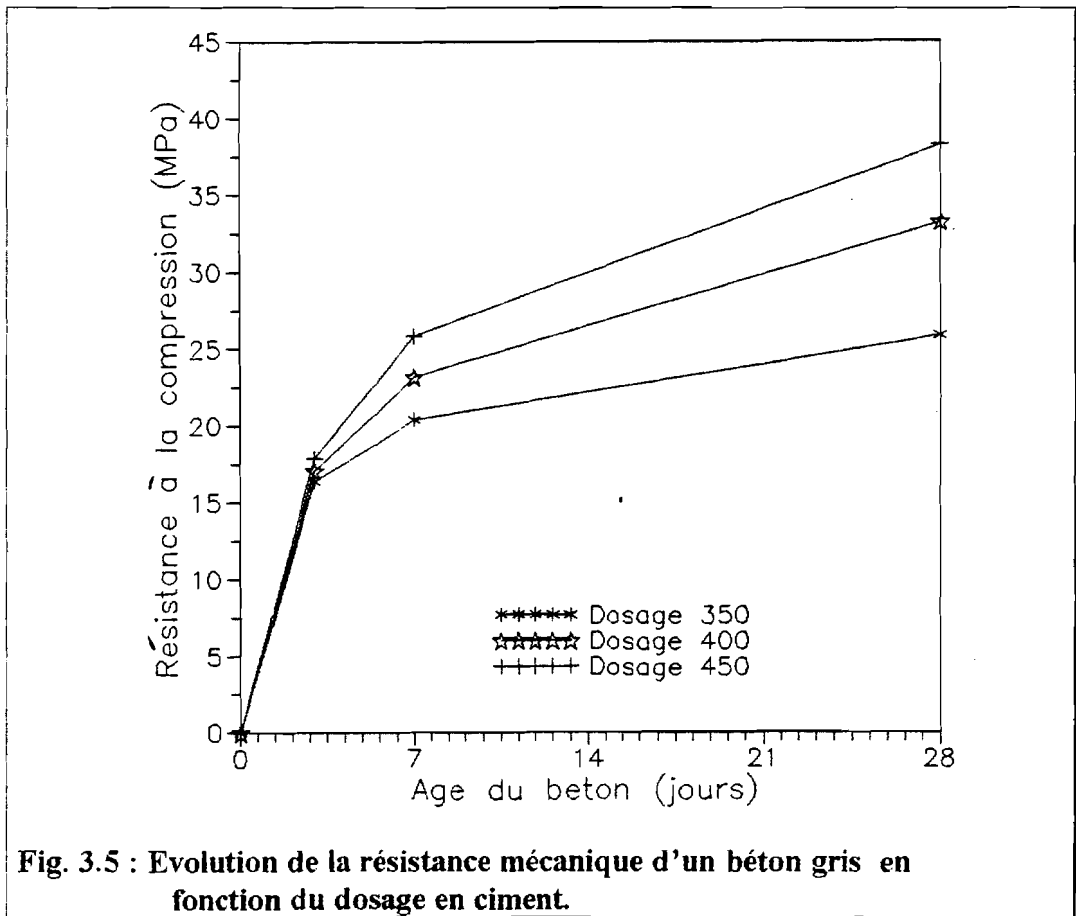
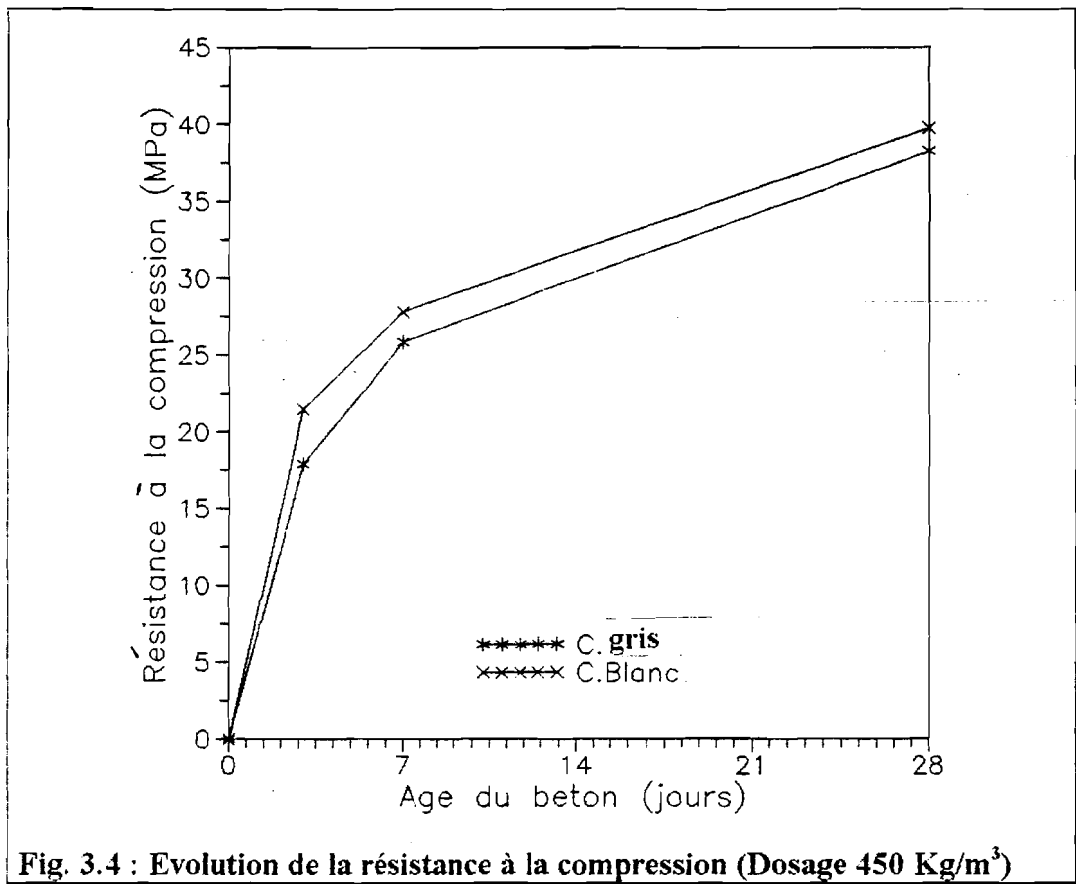
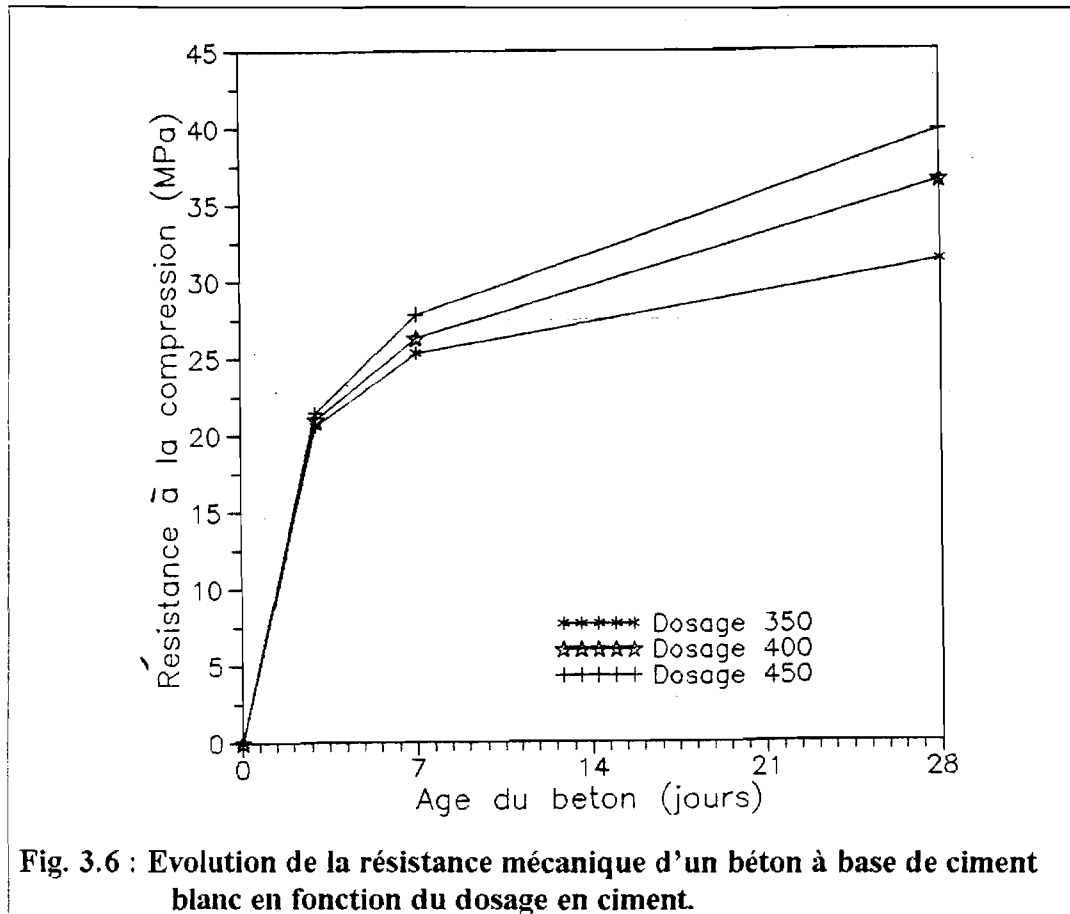


Fig. 3.3 : Evolution de la résistance à la compression (Dosage 400 Kg/m³)





3.4.2.1 Discussion et interprétation

Les résultats obtenus dans le tableau 3.8 montrent une augmentation très sensible de la masse volumique des bétons à base du ciment blanc par rapport aux bétons gris, ceci est dû à la finesse du ciment blanc qui permet de bien remplir les vides intergranulaires, ce qui donne des bétons plus denses par rapport aux bétons gris.

Pour la résistance à la compression, on remarque qu'elle augmente avec l'âge du béton pour les deux ciments, mais elle est plus grande avec le ciment blanc qu'avec le ciment gris surtout pour les dosages de 350 et 400 Kg/m³ (21.3% et 9.6% respectivement), par contre, cette augmentation est relativement faible pour un dosage de 450 Kg/m³ (de l'ordre de 4%).

Cette augmentation de résistance est expliquée par le pourcentage un peu élevé de C₃S dans le ciment blanc (62% contre 52% dans le ciment gris).

Un autre élément qui peut expliquer cette augmentation de la résistance est la finesse du ciment. Le ciment blanc a une finesse plus grande que le ciment gris, ce qui lui confère une

meilleure réactivité et un bon remplissage des vides, donc un matériau plus dense et plus résistant.

Les figures 3.5 et 3.6 montrent l'évolution de la résistance en fonction du dosage en ciment, on voit bien que la résistance croît en même temps que le dosage en ciment (C) et cela pour les deux bétons.

En comparant ces deux courbes, on remarque que le béton blanc développe des résistances très élevées surtout aux jeunes âges (une résistance à trois jours pour un dosage de 350 Kg/m³ avec un ciment blanc est supérieure à la résistance à trois jours pour un dosage de 400 Kg/m³ avec un ciment gris, et de même une résistance à trois jours pour un dosage de 400 Kg/m³ avec un ciment blanc est supérieure à la résistance à trois jours pour un dosage de 450 Kg/m³ avec un ciment gris), ce qui permet d'obtenir un gain de matériau en utilisant le ciment blanc.

Enfin, on remarque que la variation de la résistance en fonction du dosage en ciment est presque linéaire, (il y a une proportionnalité entre la résistance du béton et le dosage en ciment).

3.4.2.2 Traitement statistique des résultats d'essais de la résistance mécanique du béton.

A cause de l'hétérogénéité du béton et la dispersion des essais mécaniques, il est nécessaire de calculer l'écart type et le coefficient de variation pour apprécier la qualité des résultats obtenus.

A titre de rappel, le traitement statistique s'opère de la façon suivante :

1) Calcul de la moyenne arithmétique

$$Ma = \frac{\sum Mi}{n}$$

où Ma : Moyenne arithmétique.

n : nombre de résultats obtenus pour le même béton (dans notre cas, n=3)

$\sum Mi$: somme des valeurs obtenues.

La dispersion peut être caractérisée par :

2) Calcul de l'écart type:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (M_i - M_a)^2}{n - 1}} \quad \text{où } M_i : \text{valeurs individuelles.}$$

3) Calcul du coefficient de variance :

$$\text{C.V.} = \frac{100 \cdot S}{M_a} \quad [\%]$$

Tableau 3.10 : Exigence des valeurs du coefficient de variance (C.V.), (Dreux. G, 1985).

Béton fabriqué	Valeurs du C.V. (%)		
	Excellents	Bonnes	Mauvaises
Au labo	8	12	15
A la centrale	10	15	> 20
Sur chantier	15	20	> 25

La valeur du coefficient de variance est en général d'autant moins fort que le béton a une résistance plus élevée. D'après (Dreux. G, 1985), l'homogénéité du béton est évaluée selon les valeurs du coefficient de variance.

Tableau 3.11 : Représentation statistique des valeurs obtenues:

• Dosage 350 Kg/m³

Type de béton	Age du béton (j)	Contrainte moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Coef. de variance (%)
Béton gris	03	16.50	1.410	8.54
	07	20.50	0.000	0.00
	28	26.00	1.410	5.42
Béton blanc	03	20.75	0.353	1.70
	07	25.50	0.707	2.77
	28	34.50	0.707	2.05

• Dosage 400 Kg/m³

Type de béton	Age du béton (j)	Contrainte moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Coef. de variance (%)
Béton gris	03	17.25	1.060	6.14
	07	23.25	1.767	7.60
	28	33.50	1.414	4.22
Béton blanc	03	21.20	0.989	4.66
	07	26.50	1.060	4.00
	28	36.67	0.742	2.02

• Dosage 450 Kg/m³

Type de béton	Age du béton (j)	Contrainte moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)	Coef. de variance (%)
Béton gris	03	18.00	1.414	7.85
	07	26.00	0.707	2.71
	28	38.50	0.707	1.83
Béton blanc	03	21.62	6.540	30.24
	07	28.00	4.950	17.68
	28	40.00	0.707	1.77

**Interprétation*

Les valeurs des coefficients de variance du béton blanc représentées dans le tableau 3.11 sont généralement inférieures à celles du béton gris, pour les dosages de 350 Kg/m³ et 400 Kg/m³, ce qui implique une amélioration de l'homogénéité de la structure. Cependant, pour le dosage de 450 Kg/m³, on dénote une élévation des valeurs de coefficients de variance surtout pour les premiers âges pour les bétons blancs, ce qui explique une apparition de l'hétérogénéité du mélange due probablement aux nombres insuffisants des éprouvettes testées avec le ciment blanc, alors que pour le béton gris ces valeurs représentent une bonne approche de la résistance réelle du béton conformément aux exigences présentées dans le tableau 3.10. Ceci nous permet d'expliquer le rapprochement de la résistance à la compression des deux bétons pour le dosage de 450 Kg/m³.

3.4.3 Effet du rapport E/C sur la résistance mécanique du béton

Pour connaître l'effet du rapport E/C sur la résistance mécanique du béton, nous avons considéré plusieurs valeurs et nous avons mesuré la résistance à la compression du béton sur trois éprouvettes dosées à 450 Kg/m^3 à 28 jours. Les résultats sont représentés dans le tableau 3.12.

Tableau 3.12 : Evolution de la résistance mécanique en fonction du rapport E/C.

Type de béton	E/C	Résistance à 28 j (MPa)
Béton gris	0.35	36.2
Béton blanc	0.35	39.7
Béton gris	0.40	36.2
Béton blanc	0.40	40.1
Béton gris	0.45	36.3
Béton blanc	0.45	40.7
Béton gris	0.50	38.2
Béton blanc	0.50	39.7
Béton gris	0.55	33.2
Béton blanc	0.55	36.4
Béton gris	0.60	25.8
Béton blanc	0.60	31.3

**Interprétation*

Les résultats obtenus au tableau 3.12 montrent l'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression des deux bétons. On remarque qu'on peut obtenir une bonne résistance avec le ciment blanc pour un rapport E/C compris entre 0.40 et 0.45, tandis que pour le ciment gris ce rapport est compris entre 0.45 et 0.50, ces résultats restent à confirmer en augmentant le nombre des éprouvettes testées. En outre, on remarque bien pour les deux bétons que les résistances chutent par un excès ou un manque d'eau. Un excès d'eau influe directement sur la structure du béton (béton liquide) ce qui donne de faibles résistances. Un manque d'eau peut empêcher l'hydratation complète du ciment, ce qui entraîne alors une baisse des résistances mécaniques finales.

Donc le rapport E/C est un indice de qualité important, car il influe de façon sensible sur la structure et sur la résistance du béton.

L'évolution des résistances mécaniques en fonction du rapport E/C pour les deux bétons est illustrée par la figure 3.7.

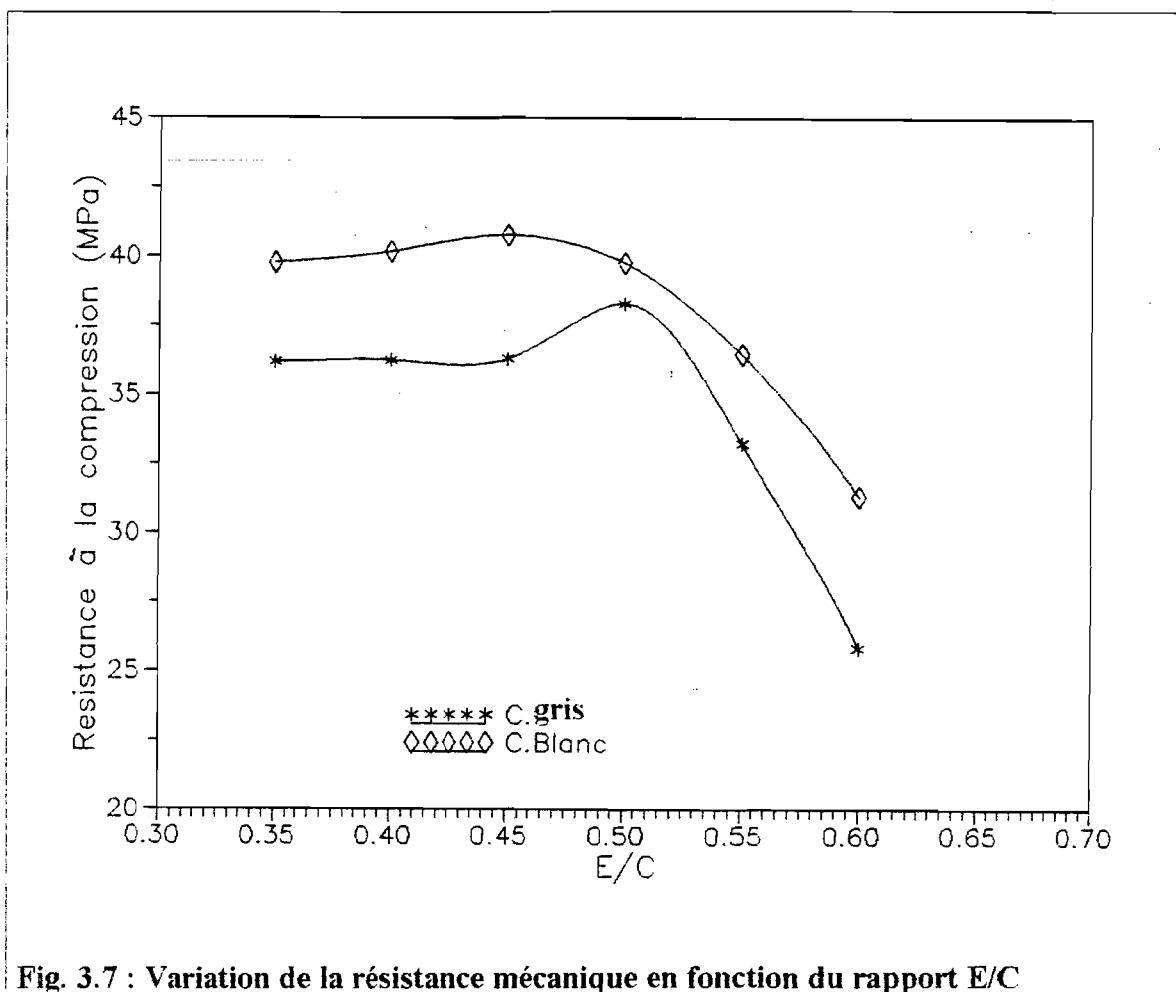


Fig. 3.7 : Variation de la résistance mécanique en fonction du rapport E/C

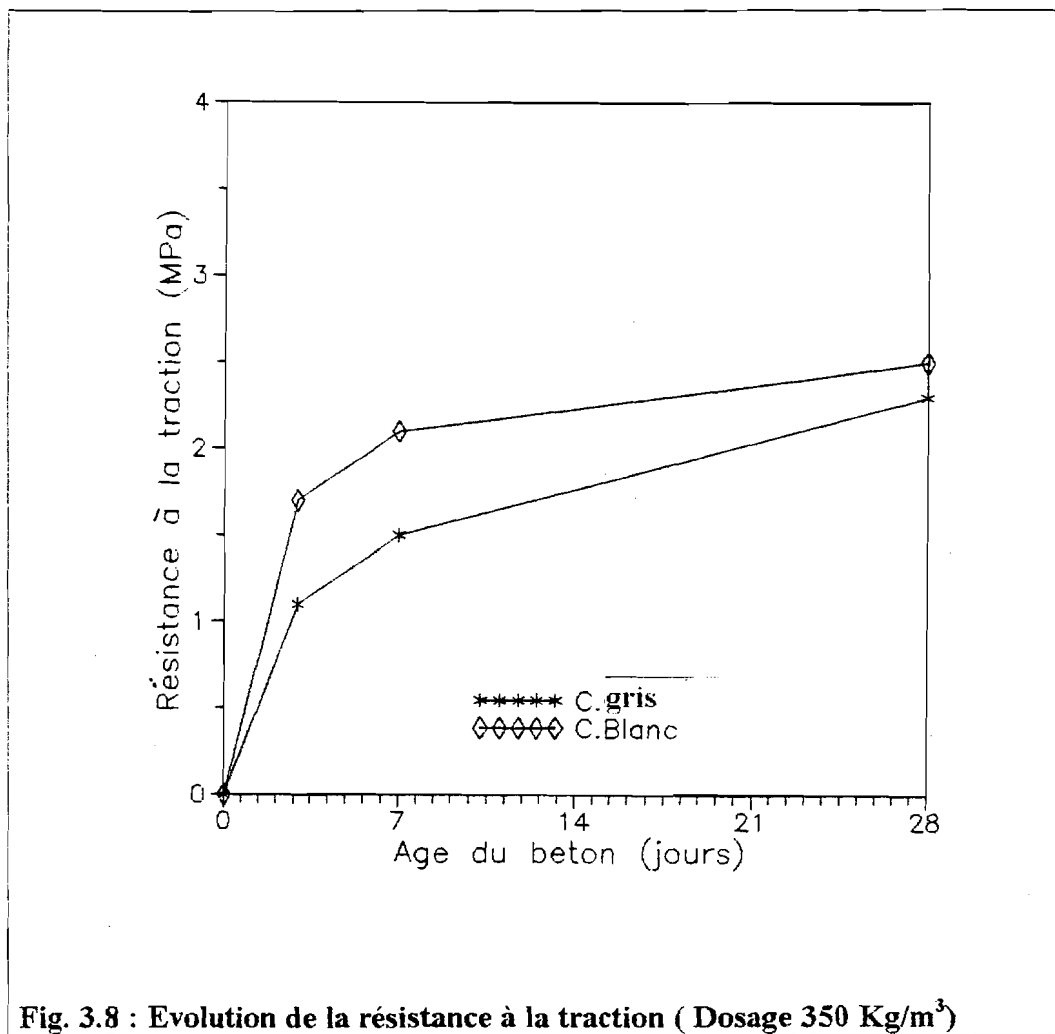
3.4.4 La résistance à la traction

La résistance à la traction a été déterminée par la méthode dite « traction par flexion », les éprouvettes utilisées sont des prismes (7×7×28 cm), elles sont conservées dans l'eau potable à la température ambiante du laboratoire (20 ± 2° C) jusqu'à l'âge de l'essai.

Pour chaque date d'essai, trois éprouvettes sont écrasées. Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux et sur les figures suivants:

Tableau 3.13 : Résistance à la traction des deux bétons

Résistance à la traction (MPa)					
Type de béton	Dosage en ciment (Kg/m ³)	03 jours	07 jours	28 jours	Gain à 28 jours (%)
Béton gris	350	1.15	1.55	2.32	+ 8.6
Béton blanc	350	1.76	2.11	2.52	
Béton gris	400	1.54	2.24	2.86	+ 10.5
Béton blanc	400	2.13	2.46	3.16	
Béton gris	450	2.24	2.84	3.42	+ 10.0
Béton blanc	450	2.27	2.97	3.76	



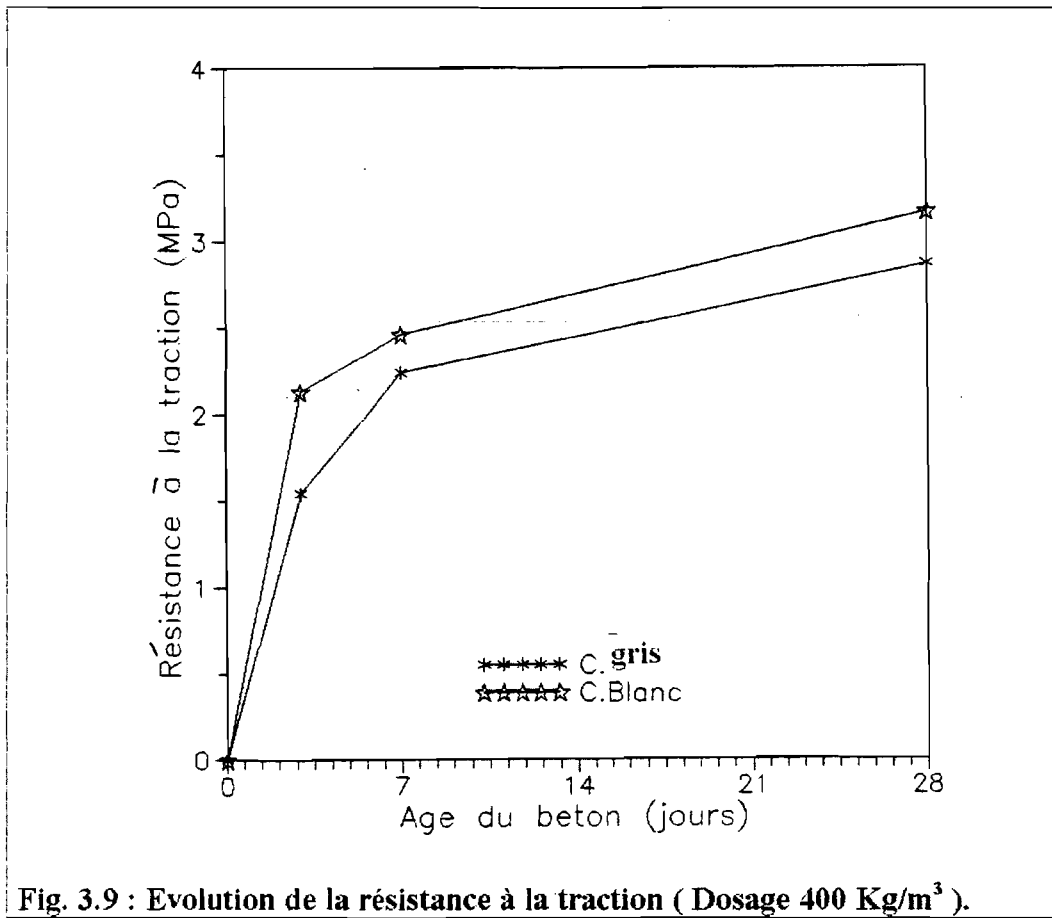


Fig. 3.9 : Evolution de la résistance à la traction (Dosage 400 Kg/m³).

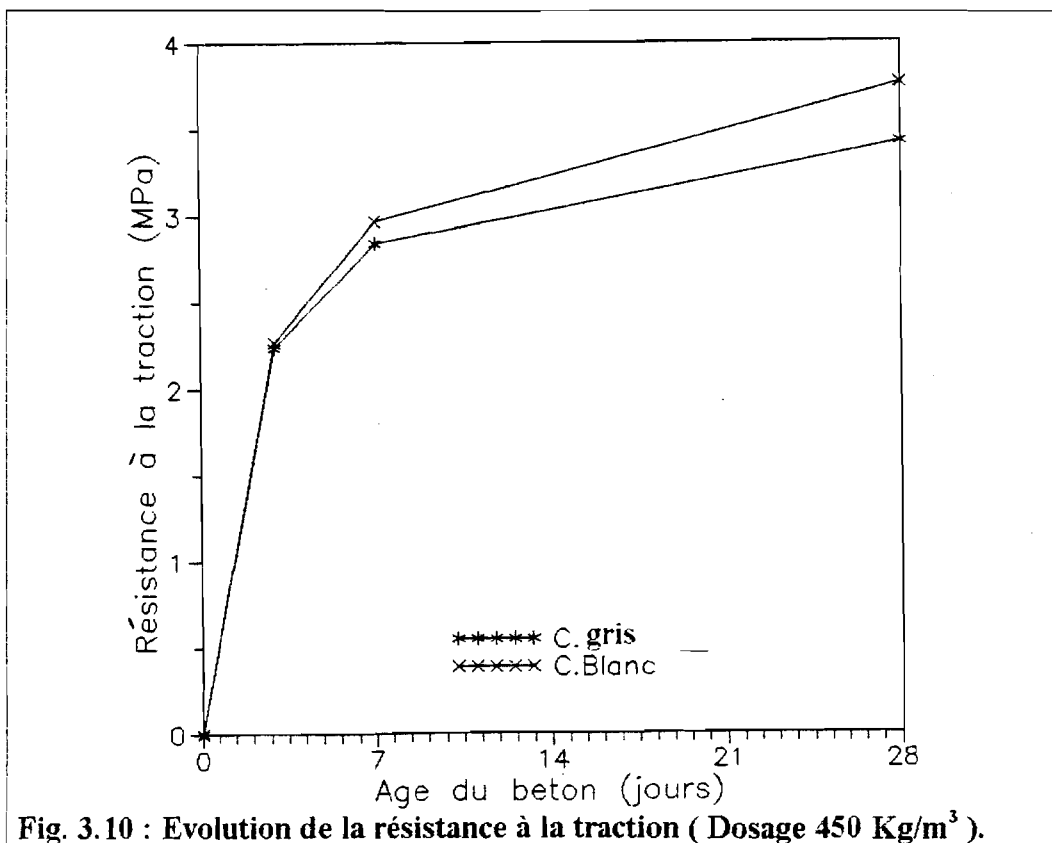
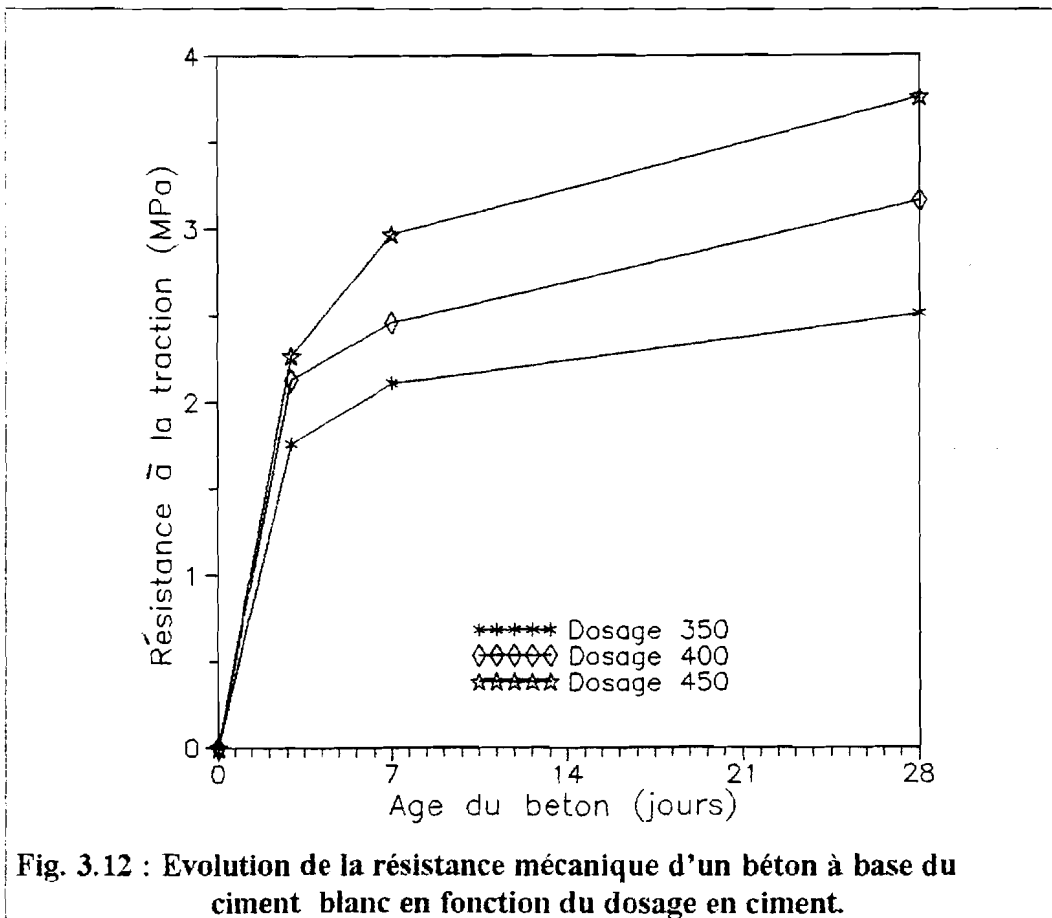
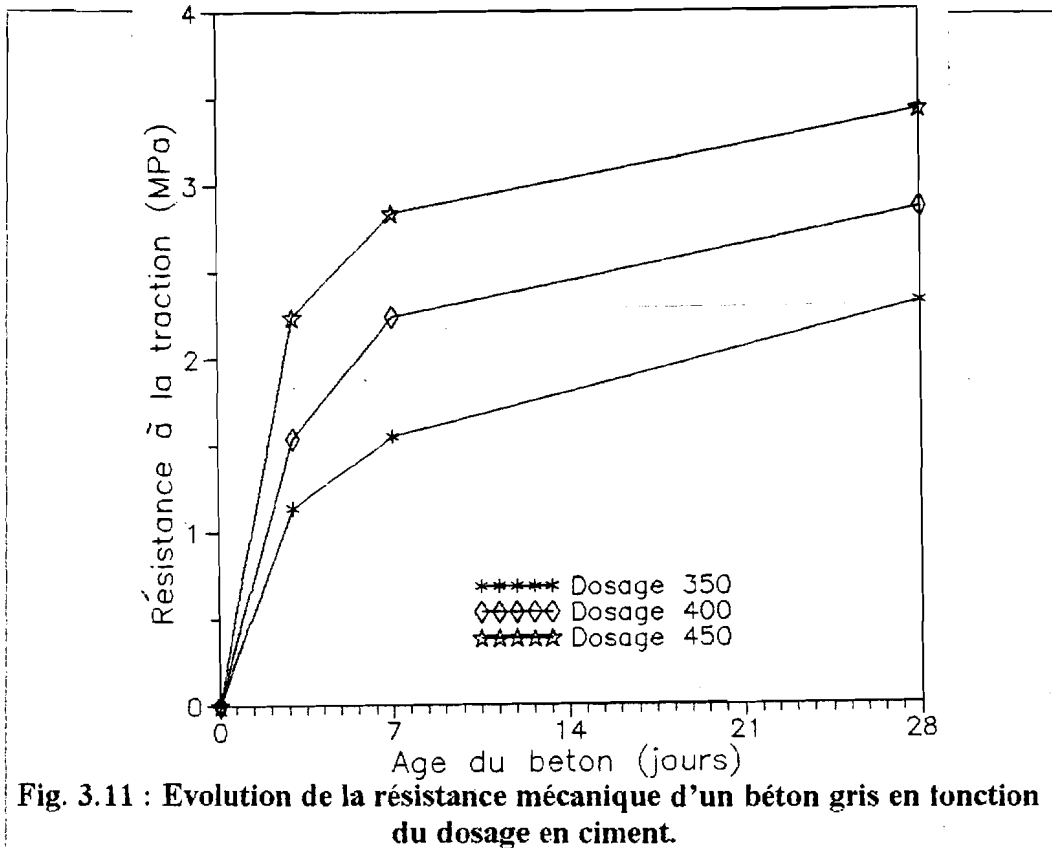


Fig. 3.10 : Evolution de la résistance à la traction (Dosage 450 Kg/m³).



* Discussion et interprétation

On remarque que la variation de la résistance à la traction par flexion a la même tendance que celle à la compression.

Quelque soit l'âge, le béton à base du ciment blanc donne les résistances les plus élevées. Ceci s'explique d'une part, par la bonne adhérence de la pâte de ciment blanc avec les faces des granulats, et d'autre part, par la qualité des granulats utilisés (granulats calcaire et propres).

Les figures 3.11 et 3.12 montrent bien l'évolution de la résistance à la traction des deux bétons en fonction du dosage en ciment et l'âge du béton. Ce qui a été dit pour la résistance à la compression se confirme ici, on remarque toujours que le béton blanc développe des résistances très élevées aux jeunes âges.

3.4.5 Module d'élasticité

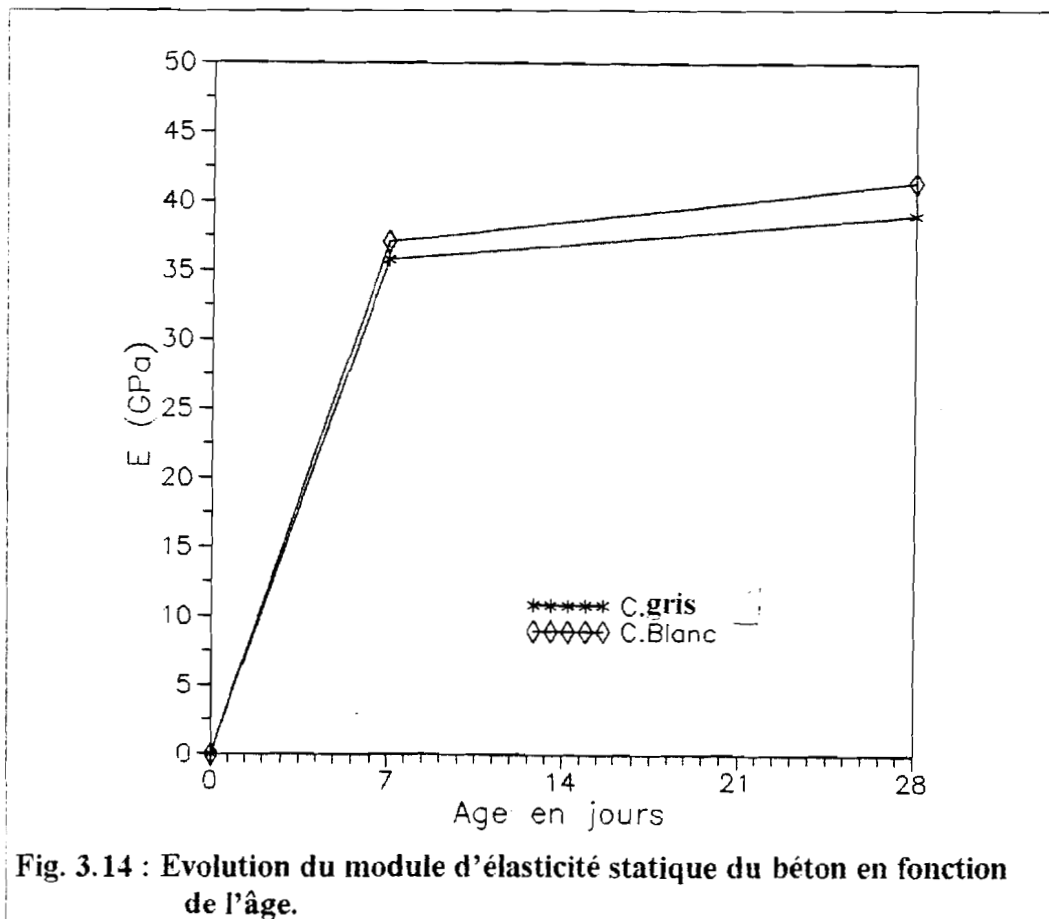
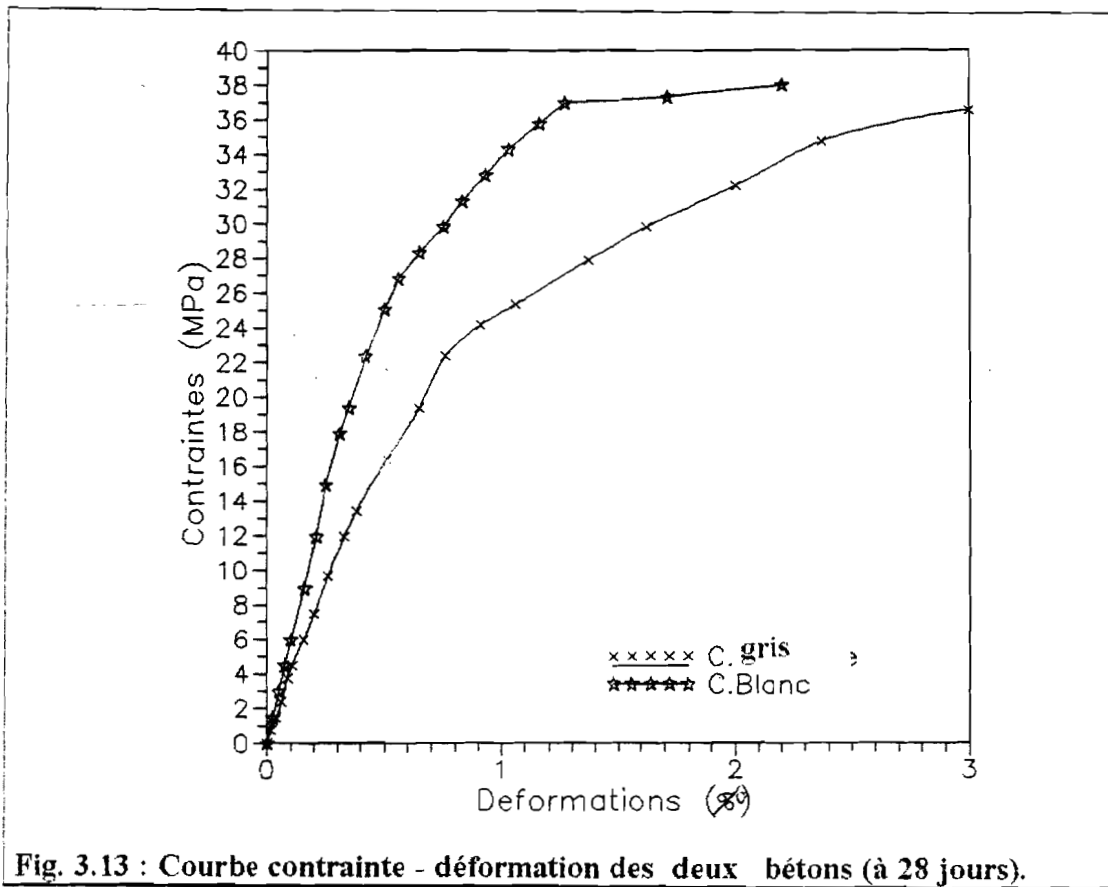
3.4.5.1 Module d'élasticité statique

Le module d'élasticité statique est déterminé à partir de la courbe contrainte - déformation, comme il a été décrit au paragraphe 2.5.3.5.

Les essais (contrainte-déformation), ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques (16x32) à l'âge de 7 et 28 jours. Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux et les figures suivants :

Tableau 3.14 : Module d'élasticité statique des deux bétons

Type du béton	Age du béton (j)	E (GPa)	Gain à 28 jours (%)
Béton gris	07	35.80	+ 5.7
	28	39.07	
Béton blanc	07	37.10	
	28	41.44	



**Discussion et interprétation*

D'après les résultats présentés précédemment, on remarque que le module d'élasticité statique varie de la même manière que la résistance mécanique, quoi que son évolution est plus lente que celle de cette dernière.

Cette évolution est remarquable dès l'âge de 07 jours, comme l'indique la figure 3.14

Pour le béton à base du ciment blanc, nous avons obtenu un module d'élasticité de 41.44 GPa à 28 jours, soit une augmentation de 5.7 % par rapport à celle du béton gris.

Cette augmentation, paraît relativement grande par rapport à celle de la résistance mécanique, du fait que le module d'élasticité représente une caractéristique invariante du béton durci qui n'évolue que faiblement, même dans le cas d'augmentation considérable de la résistance. En effet, toutes les relations de corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression, ont donné des expressions du module en fonction de la racine carrée ou cubique de la résistance, telle que la formule établie par le règlement BAEL 91 (BAEL 91, 1993) :

$$E_{ij} = 11000 \sqrt{R_{cj}} \quad (\text{MPa})$$

- E_{ij} le module d'élasticité statique en (MPa) à l'âge (j jours);
- R_{cj} la résistance à la compression à l'âge (j) en (MPa).

D'autre part, AITCIN. P. C, (Aitcin. P.C, 1987), a aboutit à la formule de corrélation suivante :

$$E_{ij} = 3320 \sqrt{R_{cj}} + 6900 \quad (\text{MPa})$$

Où les valeurs sont exprimées en MPa.

La première formule paraît être la plus convenable pour nos résultats expérimentaux.

Concernant la ductilité du béton à base du ciment blanc, nous avons remarqué une diminution de la déformation. En général, le béton est d'autant plus fragile que sa résistance est plus grande, (Bernard. F, 1990). Pour le béton à base du ciment blanc nous avons obtenu une déformation maximale de 2.2 % et 3 % pour le béton gris.

3.4.5.2 Module d'élasticité dynamique

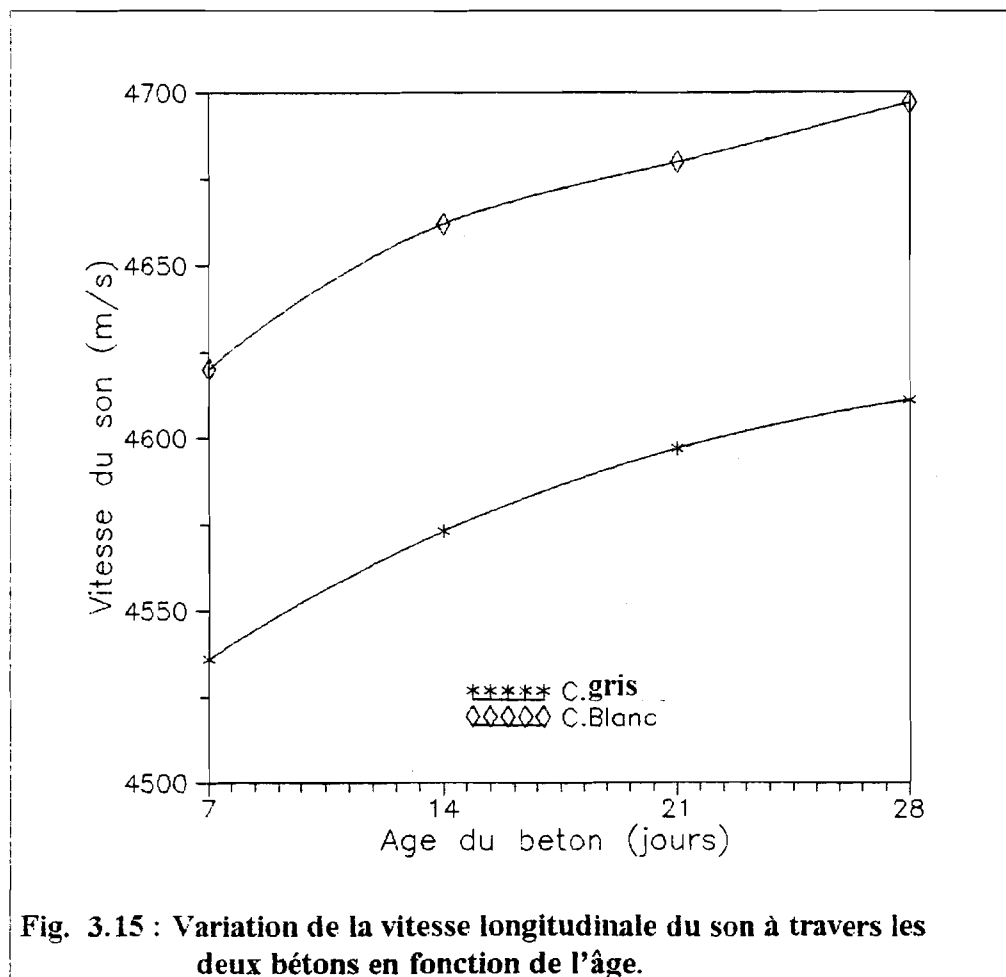
Comme il a été déjà décrit (paragraphe 2.5.3.6), le module d'élasticité dynamique est déterminé à partir de la vitesse de propagation du son à travers le béton, tout en rappelant que les éprouvettes utilisées dans ces essais, sont des cylindres (16×32 cm).

Les tableaux 3.15, 3.16 et la figure 3.15 donnent l'évolution de la vitesse de propagation du son dans le béton, ainsi que le module d'élasticité dynamique des deux bétons.

- Vitesse longitudinale du son

Tableau 3.15 : Vitesse longitudinale du son des deux bétons (m/sec)

Type de béton	Age (jours)			
	07	14	21	28
Béton gris	4536	4573	4597	4611
Béton blanc	4620	4662	4680	4697
Gain (%)	+ 1.9	+ 2.0	+ 1.8	+ 1.8



- Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique pour les deux bétons a été déterminé à l'âge de 28 jours, ainsi les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.16 : Module d'élasticité dynamique des deux bétons

Type de béton	Masse volumique (Kg/m ³)	Coeff de Poisson	E _{dyn} (GPa)	Gain (%)
Béton gris	2323	0.25	41.10	+ 1.1
Béton blanc	2315	0.26	41.58	

• Discussion et interprétation

D'après ces résultats, nous remarquons que la vitesse de propagation du son dans les deux bétons est d'autant plus grande, que ces derniers sont plus âgés, ce qui explique l'évolution de leur compacité avec l'âge.

La plus grande vitesse enregistrée est celle obtenue avec le béton blanc dont la valeur est de 4697 m/sec à l'âge de 28 jours, ce qui témoigne la bonne compacité obtenue avec le ciment blanc.

Un examen du tableau 3.16, nous montre que le béton blanc présente toujours le module d'élasticité dynamique le plus élevé par rapport au béton gris, et cela est dû à la structure compacte présentée par le ciment blanc avec l'âge.

On note aussi que les modules d'élasticité dynamiques sont très peu élevés par rapport aux modules d'élasticité statiques.

3.4.6 Retrait et gonflement

Les essais de retrait et de gonflement consistent à mesurer, à l'aide d'un Dilatomètre et en fonction du temps, la variation de longueurs d'éprouvettes prismatiques de mortier, de pâte pure et du béton conservées après démoulage :

- A l'air libre, pour l'essai de retrait.
- Dans l'eau, pour l'essai de gonflement.

A cet effet, trois éprouvettes sont conservées à l'air libre pour l'essai de retrait, et parallèlement, trois éprouvettes sont conservées dans l'eau pour l'essai de gonflement.

Les mesures de retrait et gonflement, ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de (4×4×16 cm) pour le mortier et la pâte pure, et de (7×7×28 cm) pour le béton.

Le contrôle de la température et l'humidité se fait à l'aide d'un armoire, qui peut varier la température ainsi que l'humidité du milieu de conservation selon le mode opératoire de l'essai.

Les résultats de retrait et de gonflement sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.17 : Résultats d'essais du retrait et du gonflement sur pâte pure (E/C=0.5)

	Durée (Jours)	Conservation à l'air H = 50 % ; T = 20°C				Conservation dans l'eau			
		Retrait		Perte de poids		Gonflement		Gain de poids	
		µm/m	%	g	%	µm/m	%	g	%
Ciment gris	03	422	0.042	21	3.94	94	0.009	18	3.43
	07	736	0.073	25	4.97	159	0.016	20	3.81
	14	1088	0.108	31	5.82	192	0.019	22	4.19
	28	1275	0.127	33	6.20	248	0.024	23	4.38
Ciment blanc	03	291	0.029	07	1.28	89	0.009	21	3.82
	07	591	0.059	09	1.65	159	0.016	22	4.00
	14	816	0.081	11	2.02	188	0.018	23	4.19
	28	928	0.092	13	2.38	244	0.024	23	4.19



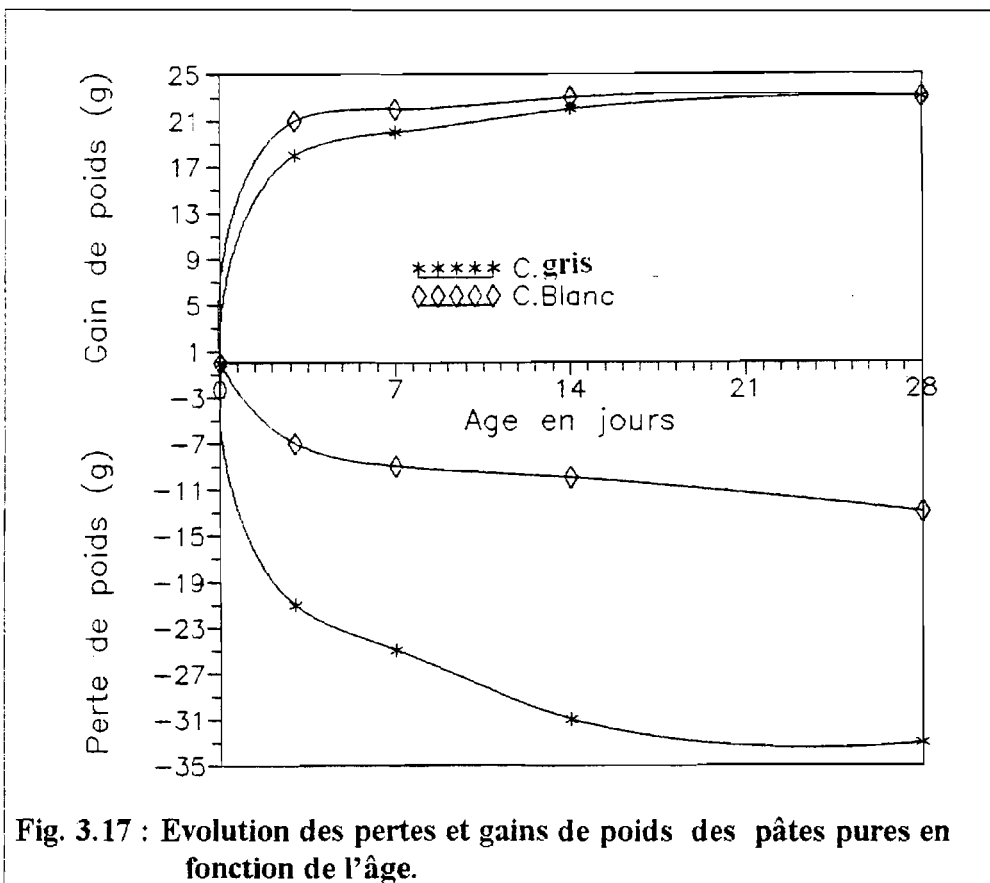
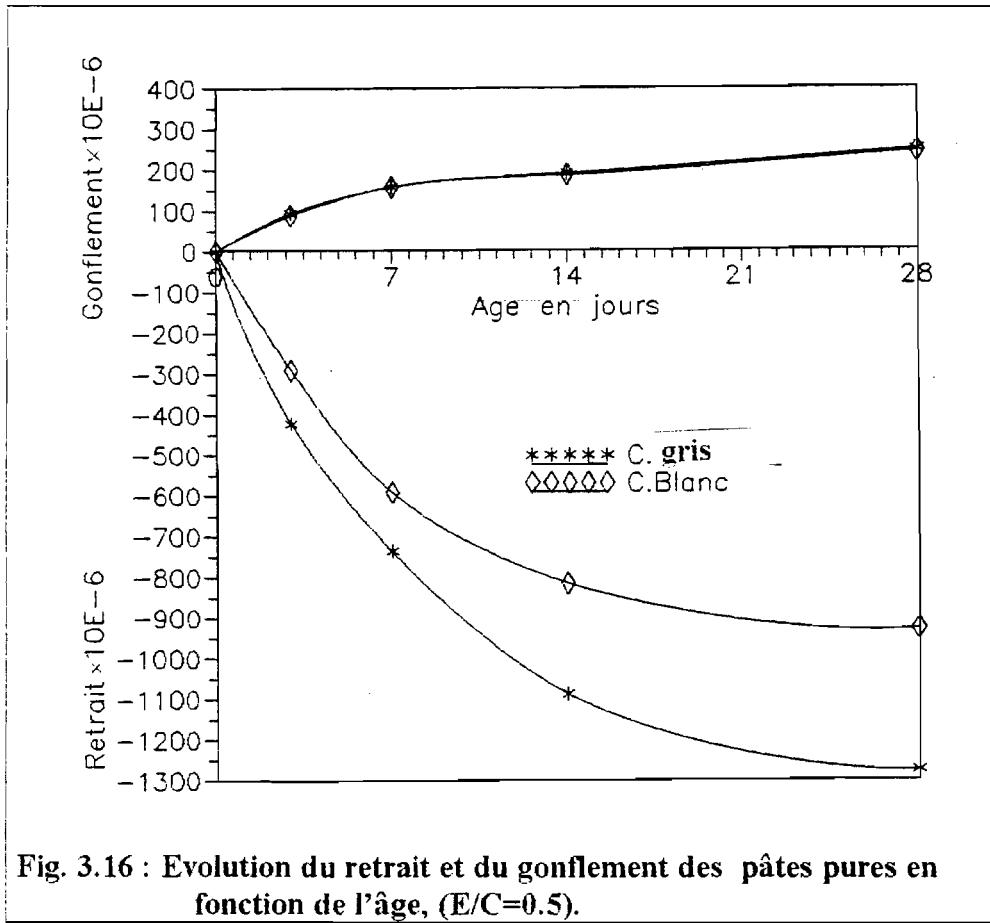
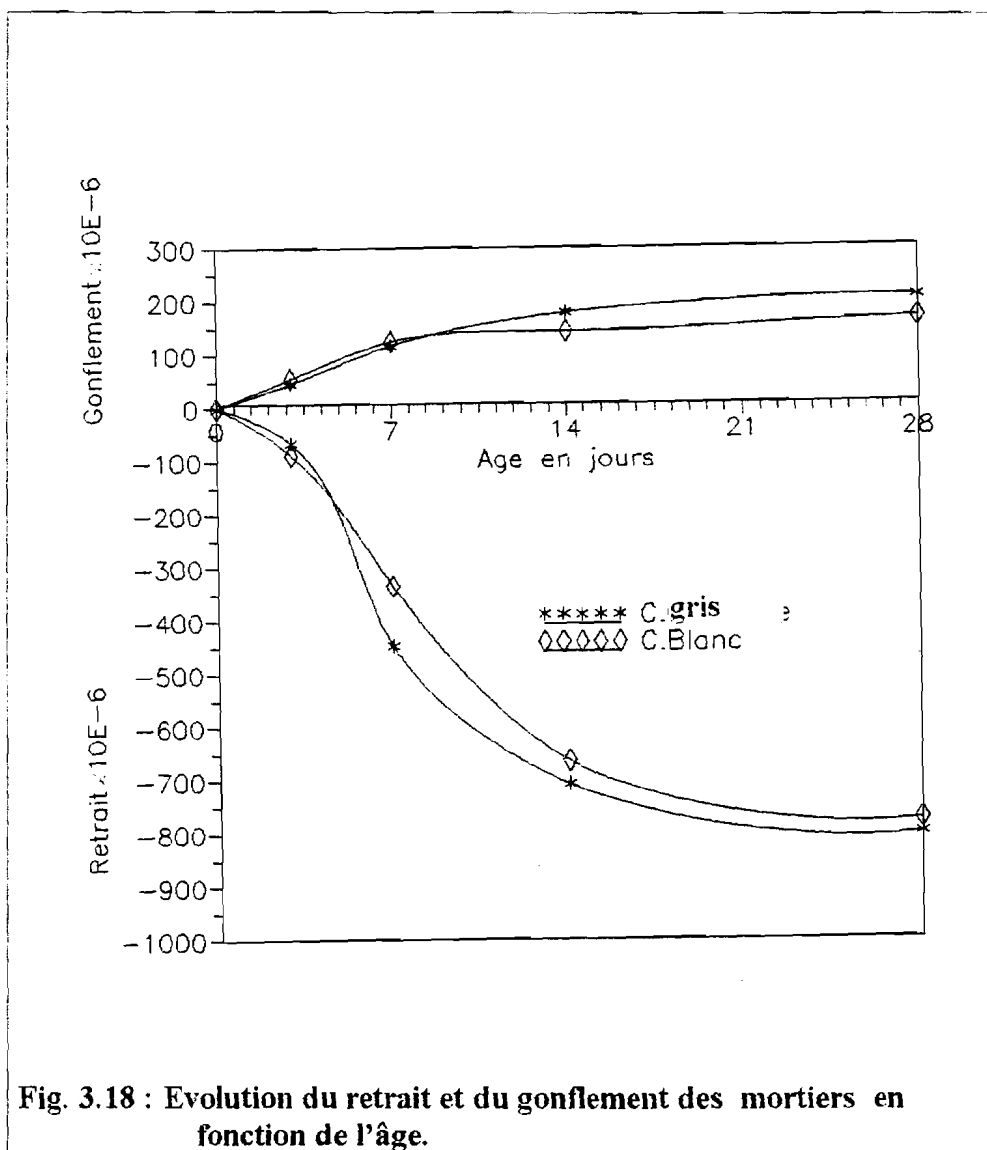


Tableau 3.18 : Résultats d'essais du retrait et du gonflement sur mortier.

	Durée (Jours)	Conservation à l'air H = 50 % ; T = 20°C				Conservation dans l'eau			
		Retrait		Perte de poids		Gonflement		Gain de poids	
		µm/m	%	g	%	µm/m	%	g	%
Ciment gris	03	66	0.0066	11	1.87	47	0.0047	12	2.05
	07	447	0.0447	17	2.90	117	0.0117	13	2.22
	14	708	0.0708	20	3.40	178	0.0178	15	2.56
	28	802	0.0802	22	3.74	206	0.0206	15	2.56
Ciment blanc	03	88	0.0088	07	1.16	56	0.0056	13	2.17
	07	334	0.0334	09	1.49	125	0.0125	13	2.17
	14	664	0.0664	10	1.66	143	0.0143	14	2.34
	28	775	0.0775	13	2.16	166	0.0166	15	2.50



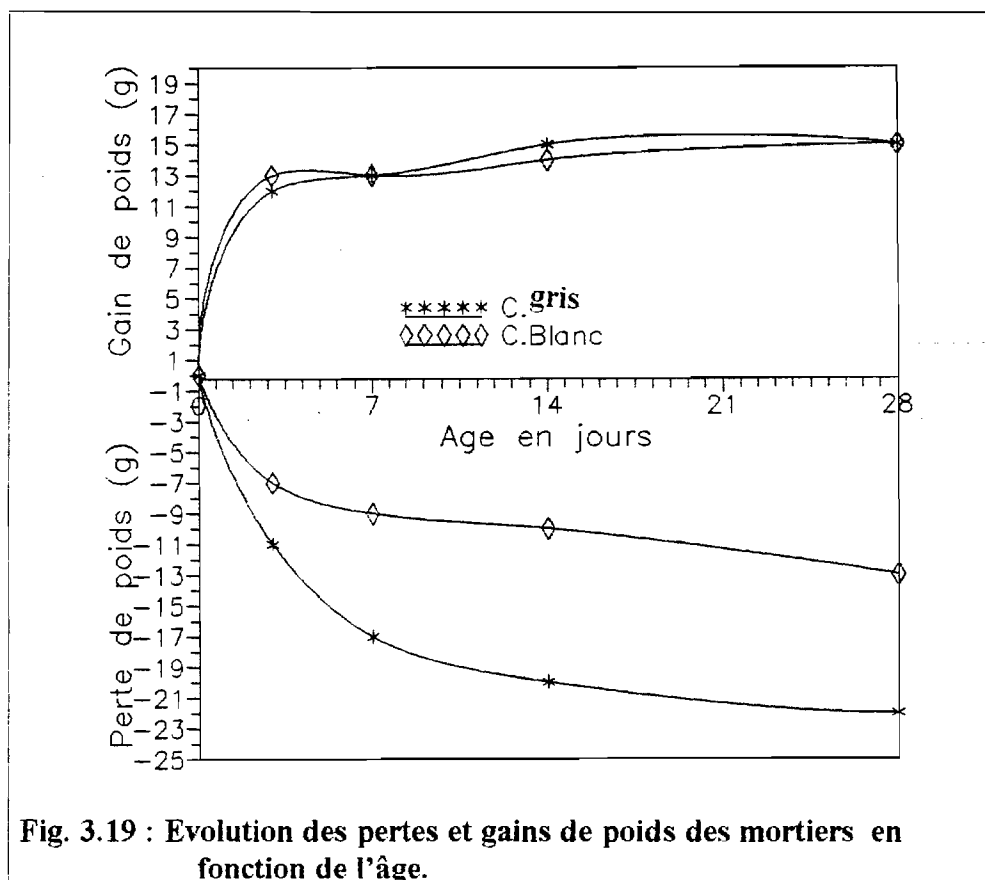


Fig. 3.19 : Evolution des pertes et gains de poids des mortiers en fonction de l'âge.

Tableau 3.19 : Résultats d'essais du retrait sur béton.

	Durée (Jours)	Conservation à l'air H = 50 % ; T = 20°C				Conservation dans l'eau			
		Retrait		Perte de poids		Gonflement *		Gain de poids	
		µm/m	%	g	%	µm/m	%	g	%
Ciment gris	03	29	0.0029	99	3.12	/	/	35	1.07
	07	89	0.0090	113	3.56	/	/	39	1.20
	14	179	0.0180	133	4.19	/	/	40	1.23
	28	236	0.0230	139	4.38	/	/	42	1.29
Ciment blanc	03	26	0.0026	69	2.11	/	/	31	0.93
	07	77	0.0077	75	2.29	/	/	33	0.99
	14	126	0.0126	90	2.75	/	/	35	1.05
	28	205	0.0205	94	2.88	/	/	37	1.11

* On n'a pas pu faire les essais de gonflement pour les bétons à cause d'un manque de moyens.

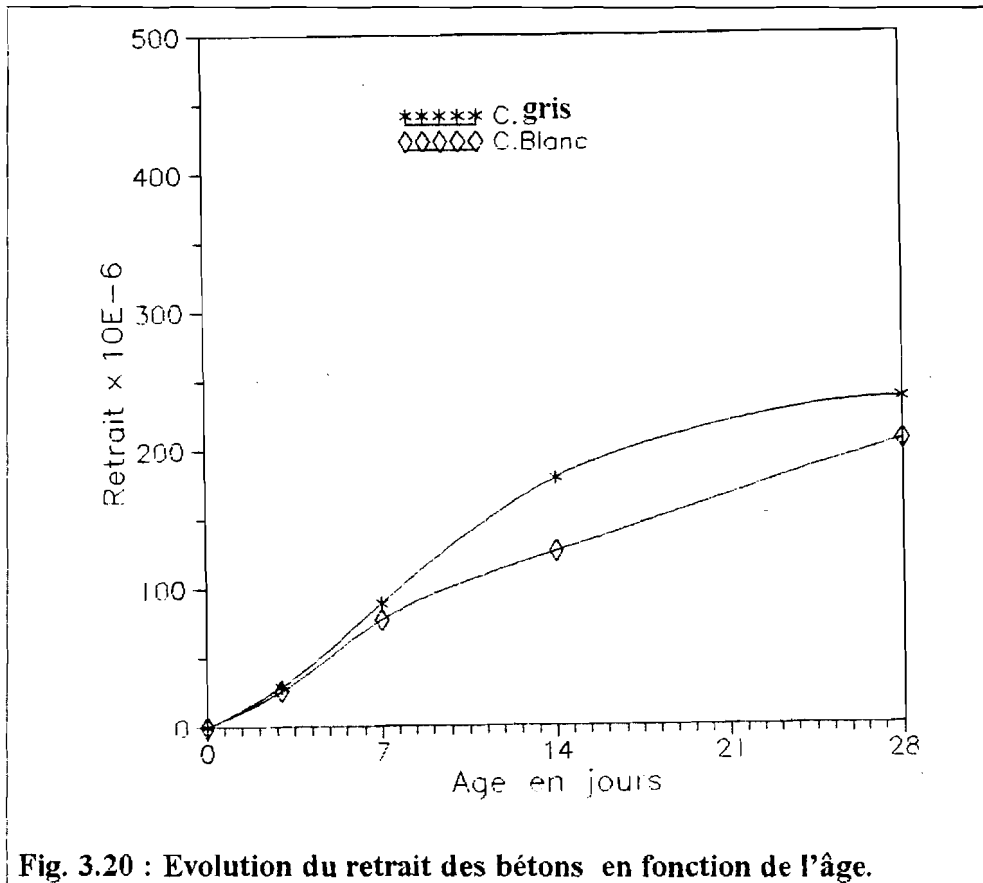


Fig. 3.20 : Evolution du retrait des bétons en fonction de l'âge.

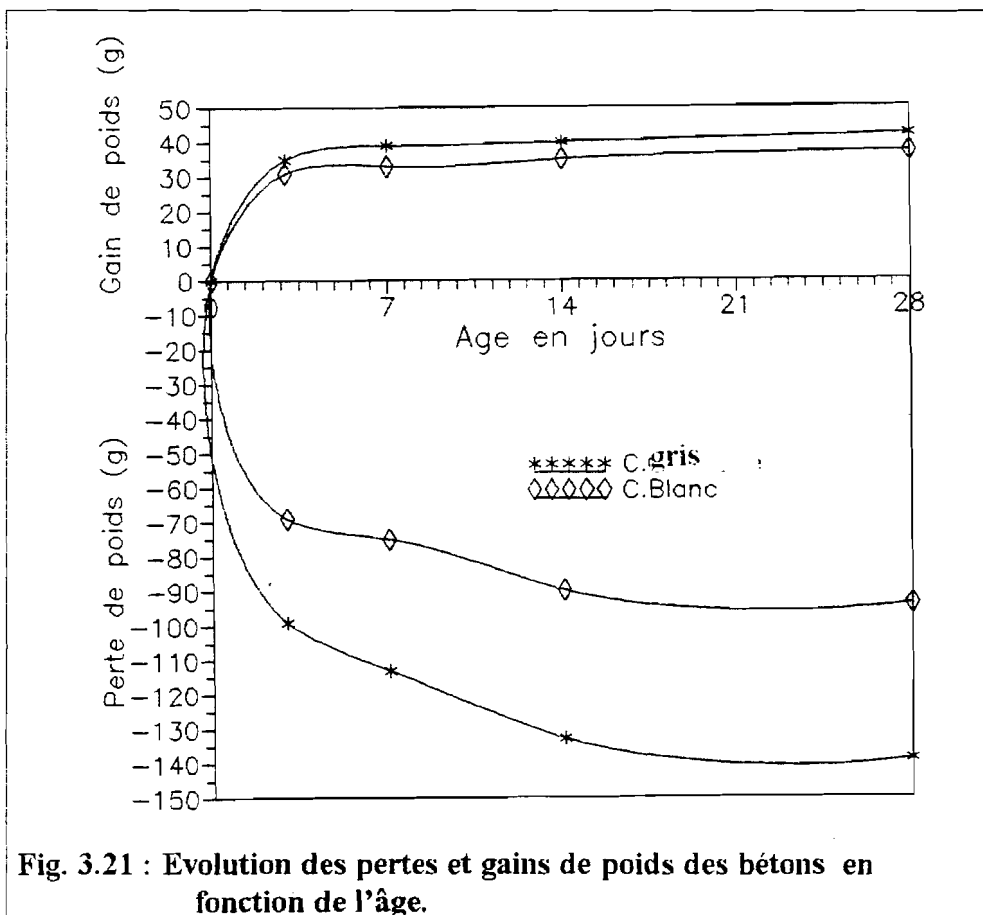


Fig. 3.21 : Evolution des pertes et gains de poids des bétons en fonction de l'âge.

**Discussion et interprétation*

Les valeurs représentés dans les tableaux précédents, nous indiquent une diminution relative du retrait et du gonflement de béton à base du ciment blanc.

Cette diminution du retrait de ciment blanc intervient bien que la finesse de ce dernier soit plus grande que celle du ciment gris; un facteur très intéressant qui influe d'une manière non quantifiable sur le retrait, d'autre part, cette diminution du retrait est due au fait qu'une grande quantité d'eau est liée chimiquement par les grains du ciment blanc pendant la prise et le durcissement, donc une diminution de la quantité d'eau évaporée.

La comparaison des retraits mesurés sur pâte pure et sur mortier ou béton, montre que le retrait est plus grand en pâte pure qu'en mortier et en béton, cela est dû à l'action de l'eau qui dans la pâte pure se trouve sous différentes formes, c'est à dire qui présente des liaisons plus ou moins nombreuses avec les particules solides.

Cette énergie de liaison engendre dans les espaces intergranulaires des mouvements provoquant le retrait.

Donc, le retrait est plus faible pour le mortier que pour la pâte pure du ciment, et encore plus faible pour le béton, car le squelette granulaire s'oppose au mouvement.

Les figures 3.16, 3.18 et 3.20 illustrent la variation des déformations de retrait et de gonflement des deux ciments; nous remarquons que la vitesse de retrait est rapide jusqu'à l'âge de 7 jours, moins rapide entre 7 et 14 jours et lente à partir de 14 jours, ce qui dénote que la plus grande quantité d'eau évaporée se situe dans les premiers âges à savoir 3 et 7 jours.

En conclusion, la diminution des pertes de poids à 28 jours de durcissement des deux ciments pour les trois cas (en pâte pure, en mortier et en béton) est respectivement égale à 6.20, 3.74 et 4.38 % avec le ciment gris et à 2.38, 2.16 et 2.88 % avec le ciment blanc.

Cette diminution est en relation avec la diminution du retrait pour le ciment blanc. Ceci explique que le retrait hydraulique est dû à l'évaporation de l'eau du béton durci à l'air libre.

Pour le gonflement, nous remarquons que les deux ciments ont donné des valeurs rapprochées.

3.4.7 Effets cycliques d'adsorption-désorption

Dans cet essai, des éprouvettes cylindriques de béton (16×32) ont été préparées avec les deux sortes de ciments (gris et blanc). Les deux mélanges ont les mêmes compositions (Dosage de 450 Kg/m³) et un rapport E/C=0.5.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un milieu sous trois régimes variables:

Après 24 h de durcissement dans les conditions normales (dans l'eau), on a exposé ces éprouvettes à l'air libre pendant 24 h, après on les a placées dans une étuve, à 45°C (Température maximale atteinte dans notre pays), pendant les 24 h qui suivent.

Après 9 cycles de conservations, correspondant à l'âge de 28 jours de vieillissement, date de l'essai, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.20 : Effets cycliques d'adsorption-désorption sur la résistance des bétons

Type du béton	Densité (Kg/m ³)	Résistance à la compression (MPa)		Chute (%)
		Béton témoin	Béton testé	
Béton gris	2362	38.2	19.4	49.3
Béton blanc	2409	39.7	27.3	31.3

* Discussion et interprétation

Après dépouillement des résultats, on remarque que les résistances ont chutés de presque la moitié; ceci est dû au alternance du milieu de conservation qui ne facilite pas le développement des réactions chimiques du liant et par conséquent, le béton perd une grande partie de sa résistance mécanique.

En outre, les variations cycliques adsorption-désorption produisent dans la masse des bétons des efforts internes considérables. De tels efforts se produisent aussi dans la pellicule du liant qui enrobe le granulat. A cause de ces efforts, il en résulte un état de fissuration non seulement dans

les couches périphériques du béton, mais aussi dans la masse du liant durci, ce qui entraîne une diminution sensible de la résistance de toutes les éprouvettes de béton.

Cependant, nous remarquons que cette chute de résistance est très accentuée pour les éprouvettes en béton gris (49.3%). Par contre, pour les bétons à base de ciment blanc, la chute de résistance n'atteint que (31.3%).

La détermination du retrait sur le même béton (Tableau 3.19), confirme ces résultats et montre que la composition minéralogique du ciment joue un rôle déterminant en ce qui concerne le retrait et le degré d'hydratation des ciments et par conséquent des bétons.

Si on se réfère à la composition minéralogique (Tableau 2.3), on remarque que le ciment blanc possède un minimum de C_3A et un maximum de C_3S , constituants les plus influents sur le retrait et le degré d'hydratation des ciments.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Après la réalisation de ce travail, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

-Le ciment blanc qui est classé comme un C.P.A (selon NF P 15-301) présente des avantages par rapport au ciment gris concernant les propriétés physiques. La prise du ciment blanc est relativement rapide (de l'ordre de 2h.10mn), sa finesse est plus grande que celle du ciment gris ce qui permet d'avoir une nette amélioration de la résistance à la compression et à la traction.

-L'ouvrabilité du béton frais pour le ciment blanc n'est pas trop influencée par le quantité d'eau utilisée, elle reste relativement constante. Une grande partie de cette eau est utilisée pour l'hydratation des grains de ciment.

-Le ciment blanc permet d'augmenter sensiblement la densité du béton frais et durci. Cette augmentation atteint 47 Kg/m^3 pour un dosage de 450 Kg/m^3 du ciment, 27 Kg/m^3 pour un dosage de 400 Kg/m^3 et 16 Kg/m^3 pour un dosage de 350 Kg/m^3 , ce qui permet de dire que le béton à base du ciment blanc est plus compact que le béton gris.

-Le ciment blanc nous a permis d'obtenir la meilleure résistance mécanique; 39 MPa en compression et 3.80 MPa en traction (à 28 jours), soit une augmentation respective, de 4% et de 10%. En diminuant le dosage en ciment, la résistance mécanique reste toujours plus grande que celle obtenue par le ciment gris.

-Les modules d'élasticité statique et dynamique ont été améliorés avec l'utilisation du ciment blanc de la même manière que la résistance mécanique. Le plus grand module statique est celui obtenu avec le ciment blanc; 41.44 GPa (à 28 jours).

-La vitesse de propagation du son dans le béton blanc est plus grande que celle du béton gris, ce qui confirme la structure compacte du béton blanc.

-Le retrait du béton blanc est presque similaire au béton gris, quoi que la finesse du ciment blanc est un peu supérieure à celle du ciment gris. Donc le problème du retrait n'est pas à craindre avec l'utilisation du ciment blanc.

Comme conclusion finale, on peut dire que le ciment blanc, peut être utiliser dans les ouvrages en béton armé surtout dans le domaine du bâtiment. L'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques de ces bétons, nous permet d'obtenir à la fois, un gain de matériau et des aspects décoratif et esthétique remarquables.

RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats obtenus, et en plus de l'aspect esthétique que apporte le ciment blanc, nous souhaitons vivement l'élargissement de l'utilisation de ce ciment dans la construction et dans les ouvrages en génie civil.

Cependant, et suite à son prix de revient relativement élevé, il est impératif de l'utiliser rationnellement.

Comme notre modeste travail ne s'est pas étalé sur le comportement proprement dit du béton blanc (l'impact des conditions atmosphériques sur le degré de blancheur, les essais rhéologiques,...), nous recommandons que des études approfondies soit entreprises dans ce sens afin de mieux faire connaître ce matériau et donc l'employer rationnellement.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abadlia. M. T. « Cours de technologie des liants » . Université de Boumerdes.
- [2] Adam. M. « *Guide pratique pour l'emploi des ciments* ». Paris, Eyrolles, 1976, 70 p.
- [3] Aitcin. P.C. « *La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord* ». Material and structures, N° 20, pp. 180 - 189, (1987).
- [4] BAEL 91. Ed. Eyrolles, Paris, 2^{ème} tirage, (1993).
- [5] Baron. J.A et Sauterey. R. Bétons hydrauliques. « *Connaissances et pratiques* ». Ed. Presse de l'ENPC. Paris (1982). pp. : 59 -142.
- [6] Bernard. F. « *Quelques propriétés mécaniques des B.H.P* ». Les bétons à haute performance du matériau à l'ouvrage. Pp. : 93 - 106. Presse de l'ENPC. Paris (1990).
- [7] Brahma. A. « *Béton* ». Alger, OPU, (1992), 130 p.
- [8] Buil, Michel. « *Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante* » Paris, LCPC, (1979), 72 p.

- [9] C.I.L.F. Comité I de la langue Française. « *Vocabulaire du béton* ». Eyrolles, Paris, (1976).
- [10] Dreux. G. « *Nouveau guide du béton* ». Ed. Eyrolles, Paris, (1985).
- [11] Dreux. G. « *Technique de l'ingénieur* ». C2 III. Construction.
- [12] Extrait - CIMBETON -. Fiches techniques. Chapitre V, paragraphe : B1 (Bétons).
Edité par : Centre d'information de l'industrie cimentière, Paris, (1989).
- [13] Folliot. A et Buil. M. « *La structuration progressive de la pierre du ciment* ». Le béton hydraulique, pp. : 223 - 236. Presse de l'ENPC, Paris, (1982).
- [14] Gorisse. F et Dreux. G. « *Contribution à l'étude du fluage et de retour de fluage* ». Annales de l'ITBTP, N° 377, Paris, (1979).
- [15] Granju. J.I et Maso. J.C. « *Résistance à la compression simple des pâtes de ciments durcis, temps de durcissement supérieur à quatre ans* ». Cement and concrete research, 8; pp. : 7 - 14. (1978).
- [16] Guettache. B. « *Comportement des minéraux en milieu hyper-alkalin. Application à la prévision des dégradations internes des bétons par essais et modélisations* ». Thèse de Doctorat en géologie de l'ingénieur à l'E.N.P.C, Paris, 1993.
- [17] Komar. A. « *Matériaux et éléments de construction* ». Traduction française. Ed. MIR, Moscou, (1989), p : 174 - 230.
- [18] Lanchon. R. « *Granulats. bétons. sols* ». Cours de LABO, (1977).
DESFORGES, Paris.
- [19] Lesage. R. « *Les granulats* ». Le béton hydraulique. pp. : 39 - 58. Presse de l'ENPC, Paris, (1982).
- [20] L'Hermitte. R. « *Béton: élaboration du béton* ». Paris, FNBTP, S.D. -105 p.
- [21] Nectoux. D. Rapport de conférence physico-chimique des ciments et des structures.
Ed. Ecole des mines d'ALES, France, (1993).

- [22] Normes AFNOR (NF P 18-303). Eau de gâchage pour béton et construction. Spécifications. Année 1941.
- [23] Norme AFNOR (NF P 18 - 101). Granulats - Vocabulaire - Définitions et classification. (1980).
- [24] Papadakis. M et Venuat. M. « *Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre* ». Dunod, (1970).
- [25] Pozers. T.C. « *The properties of fresh concrete* ». (1968).
- [26] Revue technique. « *Contribution sur la qualité et la durabilité du béton* ». Ciment et chaux, N° 771, (Octobre 1986).
- [27] Rossi. P. « *Fissuration du béton* ». Paris, LCPC, (1988), 233 p.
- [28] Séminaire sur la qualité des granulats . Organisé par C.T.T.P. avec la collaboration de l'ENPC à Alger le 24 / 25 Février 1990.
- [29] Soroka. I. « *Concrete in hot environment* ». Ed. E and FN SPON, London, (1993).
- [30] Techniques des essais de retrait et de gonflement. N.A. (1989), 2 p, NF P 15 - 433.
- [31] Teychenne. D.C, Franklin. R.E et Erntory. H.C, « *Design of normal concrete mixes* ». Building Research Establishment Report, published by department of the Environment, (1988).
- [32] Tremblay. D. « *Béton et ciment* ». (1983), pp : 9 - 27.
- [33] Venuat. M. « *Adjuvant et traitement des mortiers et bétons* ». 1^{ère} Ed. Venuat, Paris, (1971), p : 40 - 45.
- [34] Vernet. C et Demoulian. E. « *Cinétique de l'hydratation des ciments au laitiers* ». 7^{ème} Congrès international de chimie de ciments, vol II, pp. : 128 - 133, Paris, (1980).

- [35] Vorobiev. V. « *Matériaux de construction* ». Ed. MIR, Moscou, (1967), p : 5 -30.

ANNEXES

ANNEXE 1

Valeurs du terme A en fonction de la nature des matériaux et de la puissance de compactage, (Dreux. G, 1985).

Consistance , mise en oeuvre	Sable et gravier roulés	Sable roulé et gravier concassé	Sable et gravier concassés
Très fluide, sans serrage	≥ 32	≥ 34	≥ 38
Fluide, faible serrage	30 à 32	32 à 34	36 à 38
Molle, serrage moyen	28 à 30	30 à 32	34 à 36
Ferme, serrage soigné	26 à 28	28 à 30	32 à 34
Très ferme, serrage puissant	24 à 26	26 à 28	30 à 32
De terre humide, serrage très puissant	22 à 24	24 à 26	28 à 30
Serrage exceptionnellement puissant	< 22 (à déterminer dans chaque cas)	< 24 (à déterminer dans chaque cas)	< 28 (à déterminer dans chaque cas)

ANNEXE 2

Valeurs de K en fonction de la consistance du béton, de la puissance de compactage et de la nature des granulats, (Dreux. G, 1985).

Valeurs de K	Sable et gravier roulés	Sable roulé et gravier broyé	Sable et gravier broyés
Béton fluide mise en place sans serrage	0.370	0.405	0.450
Béton à consistance molle, serrage moyen piqué ou vibré	0.350 à 0.370	0.375 à 0.405	0.430 à 0.450
Béton à consistance ferme, serrage soigné	0.330 à 0.350	0.350 à 0.375	0.400 à 0.430
Béton sec (consistance de terre humide), serrage très énergétique)	0.330	0.350	0.400

