

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Civil
الدراسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE

Présentée par

M^r BOUBAKIR Lyès
Ingénieur d'état en Génie civil de L' E.N.P.

pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN GENIE CIVIL
Option : Matériaux

THEME

**ELABORATION ET ETUDE D'UN BETON A
HAUTES PERFORMANCES**

Soutenue le 06 JUILLET 1999 devant la commission d'examen composée de:

M^r M.T. Abadlia	Professeur à l'Université de Boumerdès	Président
M^r A. Bali	Professeur à l'ENP	Rapporteur
M^r K. Silhadi	Maître de Conférences à l'ENP	Rapporteur
M^r R. Boutemeur	Chargé de Cours à l'ENP	Examinateur
Mme R. Kettab	Chargée de Cours à l'ENP	Examinatrice
Mme M. Morsli	Chargée de Cours à l'ENP	Examinatrice
M^r Idir	CNERIB	Invité

ملخص:

المهدف من بحثنا هو باعداد و دراسة الخصائص الفيزيو-ميكانيكية للخرسانة ذات المميزات الجلد حسنة. قمنا بتحضير ثلاثة باضافات معدنية: الجفاء المعدني، البوزولان، دخان السلس المكثف، ثم أضفناها على الإسمنت بنسب مختلفة (5, 10, 15, 20 %). مساعداً ذو كثافة عالية في التميع على شكل سائل، أضيف على الخرسانة بنسبة 2 % من كتلة الاسمنت. و كنتيجة للبحث وجدنا أن الخرسانة التي تحتوي على (5-10%) من البوزولان او 15 % من دخان السلس المكثف لها خصائص أفضل من الخرسانة العادية.

كلمات مفتاحية: الخرسانة، الاسمنت، الجفاء المعدني، البوزولان، دخان السلس المكثف، مبيع، التقلص، باجهاد الضغط، باجهاد الشد.

Résumé:

Le but de notre projet consiste en l'élaboration et l'étude des propriétés physico-mécanique d'un béton à hautes performances. trois ajouts actifs: le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni saf et la fumée de silice sont incorporés dans le ciment avec différentes teneurs (5, 10, 15, 20 %). Un adjuvant de type superfluidifiant accélérateur de prise de forme liquide est ajouté au béton avec un pourcentage de 2 % du poids de ciment.

Le béton renfermant (5-10%) de pouzzolane ou 15% de la fumée de silice présente des propriétés plus performantes que celles du béton témoin.

Mots clés: béton, ciment, laitier granulé, pouzzolane, fumée de silice, superfluidifiant, retrait, résistance à la compression, résistance à la traction.

Abstract:

The mark of our project consists on the making and a study of the high performance concrete. Slag of El-hadjar, pozzolan of Béni-saf and condensed silica fume are incorporated in the cement with different contents (5, 10, 15, 20 %). A chemical accelerating admixture type superplasticiser in the shape of liquid is added to the concrete with a content 2 % by weight of the cement.

The concrete with (5-10 %) of pozzolan or 15 % of condensed silica fume seems to have better performances than the ordinary one.

Keywords: concrete, cement, granulated slag, pozzolan, condensed silica fume, superplasticiser, shrinkage, compressive strength, flexural strength.

Remerciements



Ce travail a été effectué dans le laboratoire du CNERIB. Nous tenons à remercier Monsieur Oumaaziz, Directeur général du CNERIB, le chef du laboratoire ainsi que le personnel techniques et administratifs du CNERIB pour l'aide qu'ils nous ont apportée à la réalisation pratique de ce travail.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux directeurs de thèse : Monsieur Bali, Professeur à l'ENP et Monsieur Silhadi, Maître de conférence à l'ENP pour leurs conseils et aides précieuses.

Nous remercions Monsieur Abadlia, Professeur à l'université de Boumerdès, qui nous fait le grand honneur de présider le jury de notre thèse.

Que Monsieur Boutemour, Chargé de cours à l'ENP, Madame Kettab, Chargée de cours à l'ENP et Madame Morsli, Chargée de cours à l'ENP qui nous ont fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury, trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements.

Nos remerciements vont aussi à Monsieur Abchiche, chef de projet à Génie sider pour ses aides précieuses.

Nous tenons enfin à remercier le personnel Administratifs et techniques de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ainsi que tous ceux qui ont contribué à notre formation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION1

CHAPITRE 1
FORMULATION DES BETON A HAUTES PERFORMANCES

1-1 Généralités sur les formulations des bétons à haute résistance.....	3
1-1-1 L'obtention du mortier le plus résistant.....	3
1-1-2 L'effet du rapport E/C sur la porosité initiale.....	3
1-1-3 L'effet combiné du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la porosité.....	4
1-1-4 L'effet du rapport (E/C) sur la résistance.....	6
1-2 Hydratation des grains du ciment.....	6
1-3 Choix des matériaux.....	8
1-3-1 Ciment.....	8
1-3-2 Les adjuvants minéraux.....	8
1-3-3 Les adjuvants à faible activité.....	9
1-3-4 Les adjuvants pouzzolaniques.....	9
1-3-4-1 L'activité pouzzolanique.....	9
1-3-4-2 Classification.....	9
1-4 La fumée de silice.....	10
1-4-1 Introduction.....	10
1-4-2 Production.....	10
1-4-3 Disponibilités en fumée de silice.....	12
1-4-4 L'effet filler de la fumée de silice.....	13
1-4-5 L'effet pouzzolanique de la fumée de silice.....	13
1-4-6 L'effet de la F.S. sur le ciment et les propriétés du béton.....	14
1-4-6-1 Chaleur d'hydratation.....	14
1-4-6-2 Microstructure.....	14
1-4-6-3 Développement de la résistance.....	14
1-4-6-4 L'effet de la cure sur le développement de la résistance.....	17
1-4-6-5 Perméabilité du béton.....	17
1-5 Un adjuvants hydrauliques.....	18
1-5-1 Production laitier.....	18
1-5-2 Le laitier adjuvant dans le béton.....	18
1-5-3 L'effet du laitier sur les propriétés du ciment et du béton.....	22
1-5-3-1 Chaleur d'hydratation.....	22

1-5-3-2 Microstructure.....	23
1-5-3-3 Evolution de la résistance.....	23
1-6 Les adjuvants chimiques.....	25
1-6-1 Les réducteurs d'eau.....	25
1-6-2 Les fluidifiants.....	26
1-6-3 Utilisations pratiques des fluidifiants.....	27
1-7 Gros granulats.....	27
1-7-1 Influence des granulats sur la maniabilité du béton frais.....	27
1-7-2 La résistance de l'interface pâte – granulats.....	28
1-7-2-1 L'effet du rapport E/C.....	28
1-7-2-2 L'effet des caractéristiques de la surface.....	28
1-7-3 L'effet des propriétés et la concentration des agrégats sur la résistance à la compression.....	28
1-7-3-1 L'effet de la résistance des agrégats.....	28
1-7-3-2 L'effet du module d'élasticité des agrégats.....	31
1-7-3-3 L'effet de la taille des particules.....	31
1-7-3-4 L'effet de la concentration des agrégats.....	31
1-7-4 Conclusion.....	33
1-8 La relation entre le rapport E/C et la résistance.....	33
1-9 Caractéristiques mécaniques des bétons à haute résistance.....	33
1-9-1 La résistance en compression.....	33
1-9-2 Résistance à la traction.....	34
1-9-3 Module élastique.....	34
1-9-4 Comportement du béton sous compression uniaxiale.....	35
1-9-5 Retrait.....	37
1-9-6 Fluage.....	37
1-9-7 Durabilité des bétons à hautes performances.....	39
1-10 Conclusion et but de la recherche.....	40

CHAPITRE 2
MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

Introduction.....	41
2-1 Matériaux.....	41
2-1-1 Laitier.....	42
2-1-2 La pouzzolane.....	42
2-1-3 La fumée de silice.....	43
2-1-4 le ciment.....	43
2-1-5 Les adjuvants.....	44
2-1-6 Granulats.....	45
2-2 Méthodes d'analyses et d'essais des bétons et des mortiers.....	49
2-2-1 Confection du béton et du mortier.....	49
2-2-2 Essais physico-mécaniques.....	50
2-2-2-1 Essais sur les liants.....	50
2-2-2-2 Essais sur béton et mortier frais.....	52
2-2-2-3 Essais sur béton et mortier durcis.....	53

Conclusion	57
------------------	----

CHAPITRE 3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3-1 Introduction	58
3-2 Optimisation du dosage en fluidifiant	58
3-2-1 Discussion et interprétation.....	60
3-3 Optimisation des ajouts.....	60
3-3-1 Mortier au laitier.....	60
a- Maniabilité.....	60
b- Résistance à la compression.....	60
3-3-2 Mortier à la pouzzolane	63
a-Maniabilité.....	63
b- Résistance à la compression.....	63
3-3-3 Mortier avec fumée de silice.....	65
a- Maniabilité.....	65
b- Résistance à la compression	65
3-4 Essais sur béton frais.....	67
3-4-1 Discussion et interprétation.....	67
3-5 Essais sur béton durci.....	67
3-5-1 Effet du régime de cure sur la résistance mécanique du béton au laitier et fluidifiant	68
3-5-1-1 Résistance à la compression.....	68
3-5-1-2 Résistance à la flexion.....	70
3-5-1-3 Conclusion sur la résistance du béton au laitier.....	71
3-5-2 Béton à la pouzzolane	71
3-5-2-1 Résistance à la compression.....	71
3-5-2-2 Résistance à la flexion.....	73
3-5-2-3 Conclusion sur la résistance du béton à la pouzzolane.....	74
3-5-3 Béton à la fumée de silice et fluidifiant.....	74
3-5-3-1 Résistance à la compression.....	74
3-5-3-2 Résistance à la flexion.....	76
3-5-3-3 Conclusion sur la résistance du béton à la fumée de silice.....	77
3-5-4 Courbe contrainte- déformation.....	77
3-5-5 Mesure de l'onde longitudinale du son.....	79
3-5-6 Porosité.....	81
3-5-7 Retrait.....	82
Conclusion.....	84

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	85
--	----

Bibliographie

Annexe

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années, les matériaux de construction ont connu une rapide évolution qu'il s'agisse de fonte, d'aciers, ou d'autres matériaux. Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics de nombreux produits et sous-produits industriels, tels que les pouzzolanes et laitiers sont ajoutés au ciment portland. Ces derniers résidus qui agissent par leurs caractères hydrauliques ou pouzzolaniques ont des effets positifs spécifiques sur les liants et offrent un gain d'énergie calorifique et mécanique appréciable dans la fabrication des ciments.

En 1950, une nouvelle tendance s'est développée en Amérique du Nord, qui consiste en l'utilisation de ces résidus dans la fabrication des bétons à hautes performances. A cette époque le béton le plus résistant est un béton de 35 Mpa. Avec l'utilisation des cendres volantes et autres pouzzolanes les producteurs de béton ont commencé à confectionner des bétons de plus en plus résistants. Au début des années 70 un nouveau produit commence à être disponible sur le marché qui est connu sous le nom de la fumée de silice. En 1986 au Canada un béton de 100 Mpa est mis au point. A l'heure actuelle, en Amérique du Nord il est possible de confectionner un béton prêt à l'emploi dont la résistance à la compression dépasse 100 Mpa.

En plus de l'utilisation des résidus et déchets industriels dans la technologie du béton, il y a d'autres techniques d'élaboration d'un béton à hautes performances. On peut citer à titre indicatif les méthodes de serrage du béton ainsi que les ciments aux résines. Ces dernières méthodes peuvent donner au béton des résistances exceptionnelles (plus de 200 Mpa), néanmoins ces méthodes sont un peu coûteuses et nécessitent des procédés spéciaux qui sont à l'heure actuelle disponible uniquement en laboratoire.

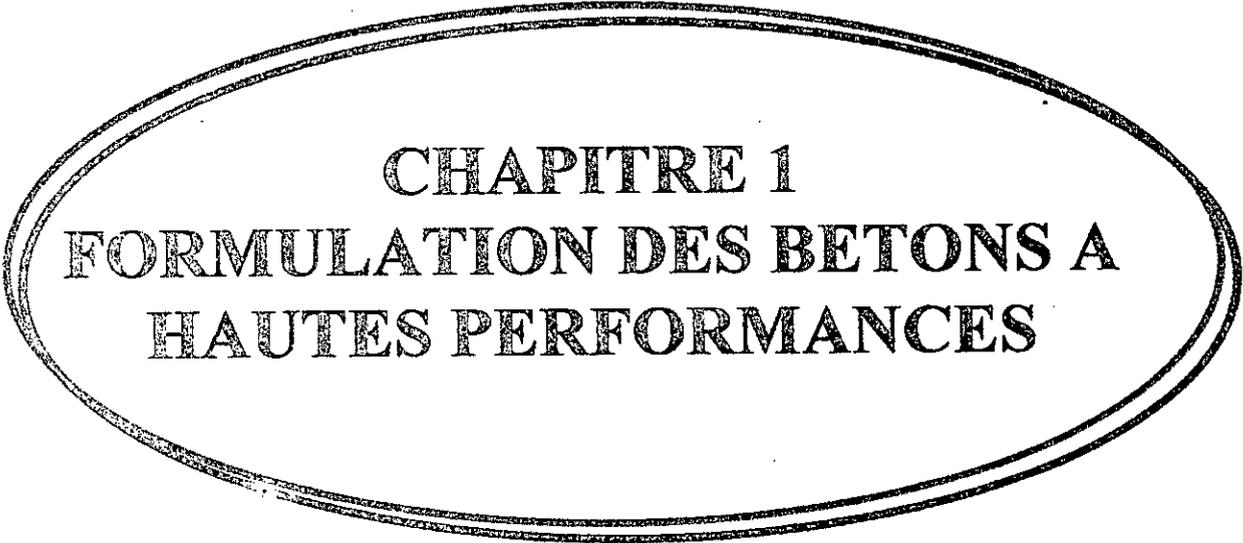
Pour obtenir un niveau de résistance en compression de l'ordre de 100 Mpa, il faut abaisser le rapport eau / ciment aux alentours de 0.25 à 0.30, en utilisant un superplastifiant de haute qualité. Tous les ingrédients du béton doivent être de très bonne qualité.

La présente étude porte sur des essais comparatifs de trois minéraux actifs à savoir le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni-saf et la fumée de silice en vue d'élaborer un béton à hautes performances. Cette étude a été motivée par la demande, dans le domaine industriel, de béton de plus en plus performants avec une plasticité adéquate et surtout revêtant un caractère économique réel. C'est pour cela que nous tentons d'introduire dans le domaine du génie civil, des déchets et sous-produits industriels tels que le laitier et la fumée de silice dont les propriétés hydrauliques sont identiques à celle d'un ciment portland. Ces trois ajouts ont été mélangés au ciment à différentes teneurs. Le ciment utilisé est un CPJ 45 délivré par la cimenterie de Ain-Kebira. Par ailleurs un adjuvant (superfluidifiant) accélérateur de prise a été utilisé dans ce travail. Les essais élaborés ont été effectués aussi bien à l'ENP qu'au laboratoire du CNERIB et portaient entre autre sur : la résistance, le retrait et la mesure des porosités et l'indice de continuité. L'effet de la cure sur les bétons à hautes performances a été aussi examiné.

Dans la partie bibliographique, nous avons exposé les différentes caractéristiques pouzzoïaniques ou hydrauliques des ajouts mélangés avec le béton ainsi que le rôle des granulats dans la matrice du béton. Nous avons présenté aussi les résultats des travaux antérieurs effectués par différents auteurs, notamment sur les caractéristiques mécaniques et physiques, ainsi que la durabilité des bétons et mortiers à hautes performances.

Dans la deuxième partie nous avons exposé les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés dans ce travail et les méthodes d'essais réalisés sur mortiers et bétons à l'état frais et durci.

Dans la dernière partie on présente les résultats des essais réalisés sur béton et mortier ainsi que l'effet de l'incorporation du laitier, la pouzzolane et la fumée de silice sur les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons et mortiers. Les résultats sont représentés sous forme de courbes et tableaux.



CHAPITRE 1
FORMULATION DES BETONS A
HAUTES PERFORMANCES

CHAPITRE 1

FORMULATION DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1-1 Généralités sur les formulations des bétons à haute résistance

Lorsqu'on mesure la résistance en compression uniaxiale du béton, on s'aperçoit que la rupture du béton peut se produire à trois niveaux différents, soit :

- dans le mortier ;
- au niveau de l'interface granulat/mortier ;
- dans le granulat.

Pour fabriquer un béton à haute résistance, il faut donc s'organiser :

- pour obtenir le mortier le plus résistant possible ;
- pour maximiser l'adhérence granulat/mortier ;
- pour avoir les granulats les plus résistants possibles

Toutefois il suffit que l'un de ces points soit défaillant pour qu'il soit la cause d'une résistance en compression limitée [1].

1-1-1 L'obtention du mortier le plus résistant

La pâte du ciment anhydre est caractérisée par une haute structure poreuse. En réalité, la porosité constitue le facteur le plus dominant ainsi que la résistance. Dans un solide poreux, la relation entre la résistance de la pâte (S) et sa porosité (p) peut être exprimée d'une manière générale [2] par :

$$S=S_0\exp(-bp) \quad (1-1)$$

S_0 : la résistance de la pâte du ciment pour une porosité égale à zéro (p=0).

b : est une constante qui dépend essentiellement du type du ciment, de l'âge de la pâte.

1-1-2 L'effet du (rapport eau/ciment : E/C) sur la porosité initiale[2]

La porosité initiale ou la distance initiale entre les grains du ciment non anhydre joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'eau relative nécessaire à l'hydratation du ciment ainsi que le rapport (E/C). La porosité (p_i) est exprimée par la relation suivante :

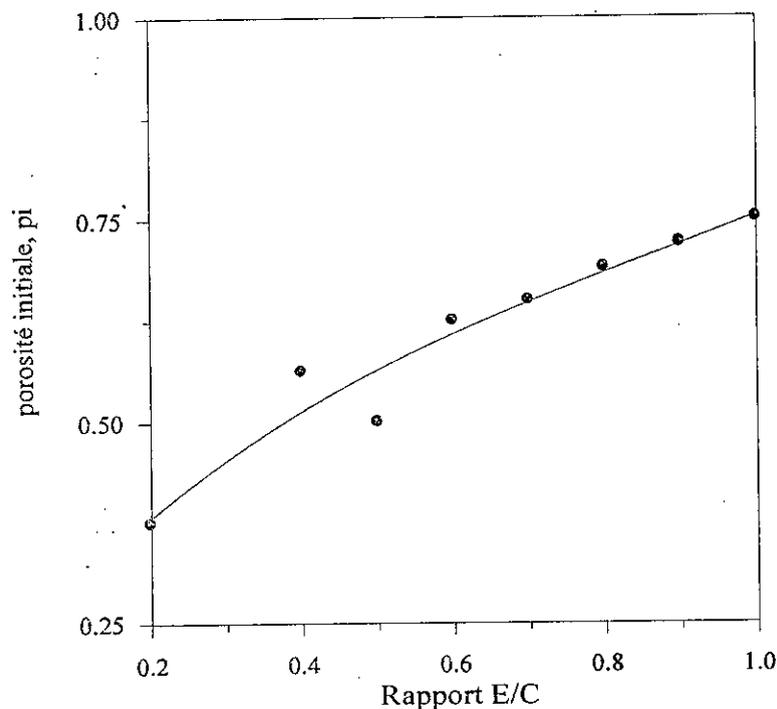


Fig.(1.1) : L'effet du rapport E/C sur la porosité initiale, [2]

$$p_i = \omega / (V_C + \omega) \quad (1-2)$$

Où : V_C est le volume spécifique du ciment ;
 ω est le rapport E/C.

Cette relation est représentée sur la fig.(1.1) où l'on voit clairement que la porosité initiale (p_i) augmente avec l'augmentation du rapport E/C.

1-1-3 L'effet combiné du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la porosité

Le volume du produit d'hydratation est deux fois plus grand que le volume du ciment non hydraté. Par conséquent la distance entre les grains du ciment diminue, ainsi que la porosité de la pâte avec le processus d'hydratation à un stade donné. La porosité de la pâte, et sa résistance associée, sont déterminées par le rapport E/C et le degré d'hydratation, [2]. On entend ici par degré d'hydratation la quantité de ciment hydraté par rapport à la quantité totale de ciment, [4].

L'effet combiné du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la porosité est donné par l'équation :

$$p_t = 1 - \frac{0.32 - 0.187\alpha}{0.32 + \omega} \quad (1-3)[2]$$

p_t : la porosité de la pâte.

ω : le rapport E/C.

α : le degré d'hydratation.

Cette équation considère que le volume du solide augmente avec un facteur de 2.2 fois et la masse spécifique du ciment est égale à $0.32 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Cette expression représentée sur la fig.(1.2) confirme que la porosité diminue avec l'augmentation du degré d'hydratation et la diminution du rapport E /C.

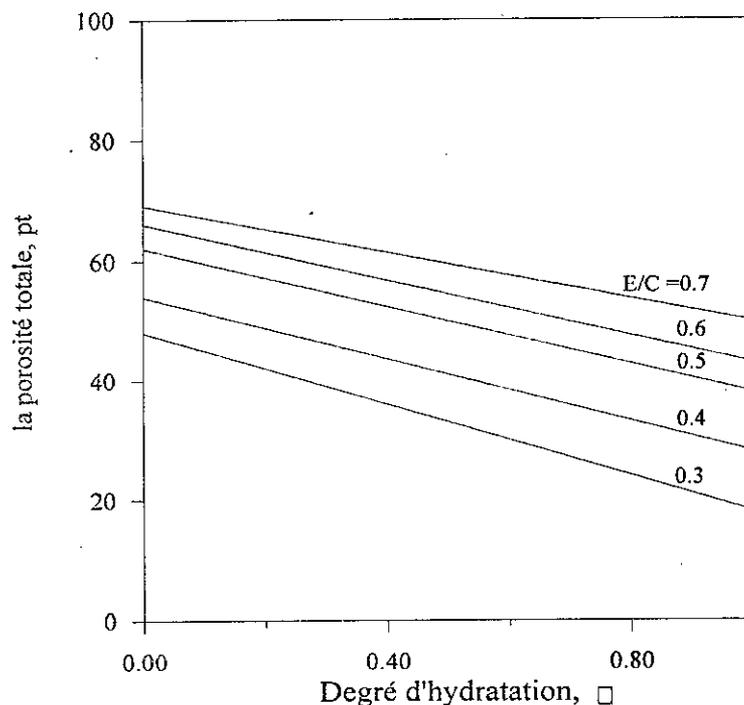


Fig.(1.2) : L'effet du rapport E/C et de degré d'hydratation sur la porosité initiale de la pâte du ciment, [2].

1-1-4 L'effet du rapport (E/C) sur la résistance

Pour le même degré d'hydratation (même âge du ciment et même régime de cure), le rapport E/C est le seul facteur qui influe sur la porosité et la résistance de la pâte du ciment, [2].

Les résultats expérimentaux représentés sur la fig.(1.3) justifient la dernière hypothèse.

1-2 Hydratation des grains du ciment

Féret [3], a montré que la résistance en compression d'un béton augmente lorsque son rapport E/C diminue. Par ailleurs, Lechatelier a indiqué que l'hydratation complète de tous les grains du ciment exige une quantité d'eau correspondant à un rapport E/C de l'ordre de 0.30.

Torrenti [4] rapporte aussi dans une étude sur les bétons aux jeunes âges, que les différents composants du clinker dans leur réaction d'hydratation ne consomment pas tous la même quantité d'eau. Le tableau (1.1) donne les quantités d'eau liée pour chacun des anhydres.

Suivant la composition du ciment nous pourrions donc estimer la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation complète. Par exemple, pour des compositions types, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (1.2).

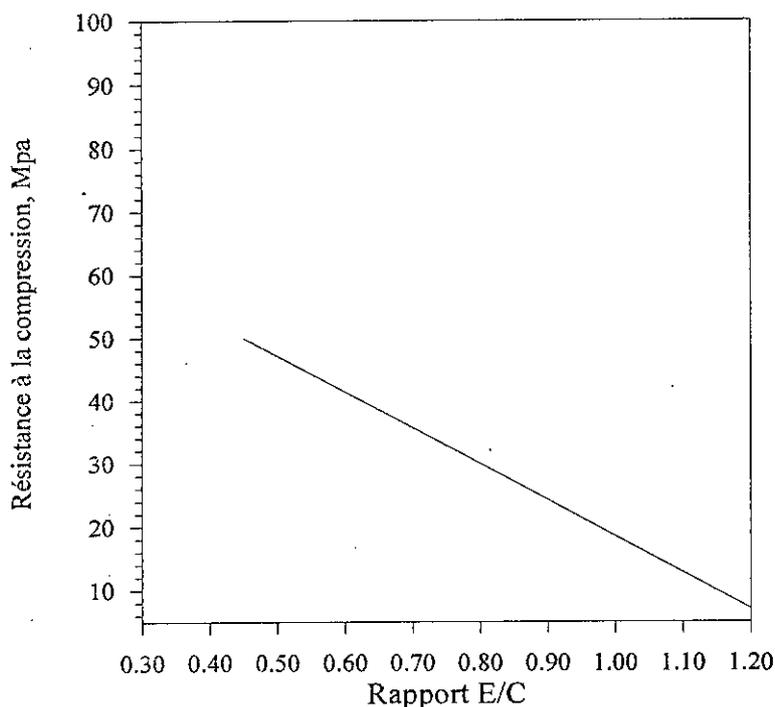


Fig.(1.3) : Relation entre la résistance à la compression de la pâte du ciment et le rapport E/C

Composants	Produits de la réaction	Rapport du poids d'eau liée au poids du composant
C ₃ S	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	0.24
C ₂ S	3CaO.2SiO ₂ .2H ₂ O	0.21
C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O	0.40
C ₄ AF	3CaO.Al ₂ O ₃ .6H ₂ O +3CaO.Fe ₂ O ₃ .6H ₂ O	0.37

Tableau (1.1) : Quantité d'eau liée en fonction des hydrates[4].

Anhydre	Pourcentage	Poids d'eau liée/ Poids du Constituant
C ₃ S	54.1	0.130
C ₂ S	16.6	0.035
C ₃ A	10.8	0.043
C ₄ AF	9.1	0.034
Eau totale liée = 0.241.		

Tableau (1.2) : Estimation de la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation complète d'un portland type[4].

1-3 Choix des matériaux

1-3-1 Ciment

Le choix du ciment fait intervenir à la fois des critères rhéologiques et des critères de résistance mécanique.

A.M Paillere [5] dans ses études sur l'influence du dosage de superplastifiant sur la maniabilité du béton fabriqué avec différents types de ciment a constaté que le ciment ayant le plus faible pourcentage d'aluminate tricalcique donne la meilleure maniabilité.

J. M Torrenti [4] rapporte aussi que les ciments ayant le plus grand pourcentage de C_3S et C_2S donnent la plus grande résistance au béton, (fig.(1.4)).

En pratique, on est toujours obligé de faire des essais de vérification sur mortiers et coulis en laboratoire pour sélectionner le meilleur ciment.

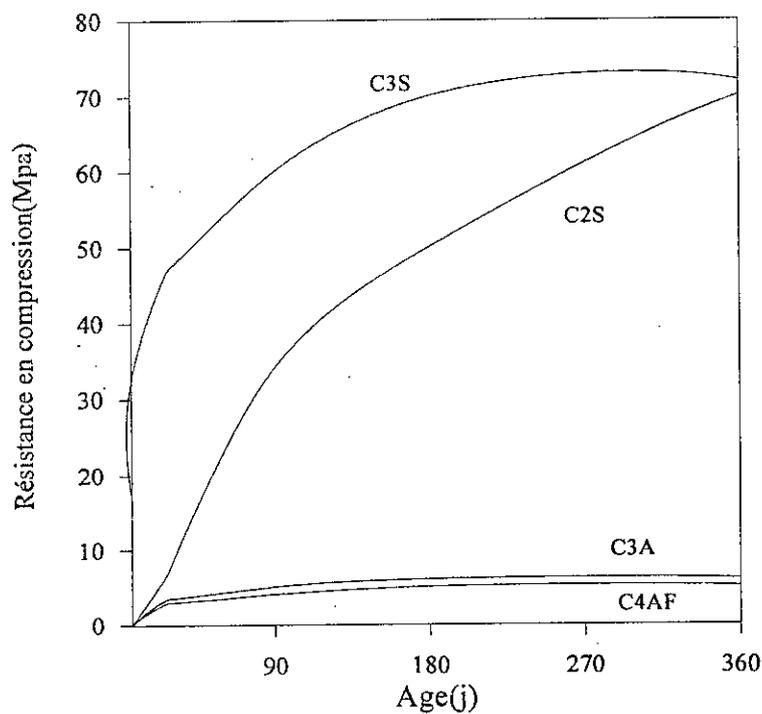


Fig.(1.4) : Evolution des résistances pour chacune des réactions d'hydratation, [4].

1-3-2 Les adjuvants minéraux

Un adjuvant [2] est par définition un matériau autre que l'eau, les agrégats, le ciment hydraulique et les fibres, utilisés comme un ingrédient du béton ou mortier et ajouté au malaxeur immédiatement après ou durant le malaxage.

Généralement les adjuvants minéraux sont des solides finement broyés, mélangés du béton avec des pourcentages élevés (excédant 15% par poids de ciment) ; surtout dans l'ordre d'améliorer la maniabilité du béton frais, sa durabilité, et aussi sa résistance à l'état durci.

Ces adjuvants sont aussi utilisés pour le remplacement partiel du ciment dans la production des ciments composés.

Les adjuvants minéraux sont subdivisés en faible activité, pouzzolaniques et hydrauliques.

1-3-3 Les adjuvants à faible activité

Ces adjuvants, appelés aussi ' filler inerte ' réagissent à peine avec l'eau ou le ciment et leur effet est essentiellement de nature physique.

Les fines calcaires et le sable de dune sont des exemples de ce type d'adjuvant. Ils ont un rôle bénéfique dans l'amélioration de la maniabilité et la cohésivité du béton.

1-3-4 Les adjuvants pouzzolaniques

1-3-4-1 l'activité pouzzolanique

L'adjuvant pouzzolanique ou " pouzzolane " contient : la silice réactive (SiO_2), et l'alumine réactive (Al_2O_3). Avec la présence d'eau cet adjuvant réagit avec la chaux (Ca(OH)_2) et donne un gel de silicate de calcium hydraté (CSH gel) assimilé au produit d'hydratation du ciment portland.

Les pouzzolanes sont donc des matériaux siliceux ou siliceux alumineux qui possèdent un faible pouvoir hydraulique. A l'état broyé et en présence de l'humidité ces adjuvants réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à des températures ordinaires pour former un composant qui possède des propriétés pouzzolniques.

On dit d'un tel matériau qu'il possède une activité pouzzolanique et les réactions chimiques résultantes sont qualifiées de " pouzzolaniques "

Lors de l'hydratation du ciment, un pourcentage considérable d'hydroxyde de calcium est dégagé, ce qui rend utile l'exploitation de cet adjuvant dans la production des ciments composés d'ajouts pouzzolaniques.

1-3-4-2 Classification

Généralement les pouzzolanes sont subdivisées en matériaux naturels et industriels. Les matériaux naturels sont d'origine volcanique et leur traitement se limite au concassage et au broyage,[6].

Ces pouzzolanes naturelles incluent les cendres volcaniques et les dépôts de laves. L'autre groupe de pouzzolanes consiste en des matériaux sous produits d'un processus industriel. Les plus connus de ces matériaux sont la cendre volante et la fumée de silice (F.S) appelée aussi micro-silice.

1-4 La fumée de silice

1-4-1 Introduction

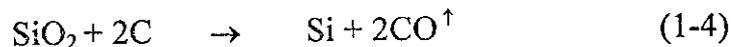
L'Electrométallurgie est une industrie qui se rapporte à la production des ferro-alliages, silico - alliages et produits électrofondus en utilisant comme outil de base le four électrique, en général le four à arc.

Les températures de travail, très élevées, entre 1500 et 3000 °C- provoquant des dégagements importants de fumée, qui, dans certaines fabrications peuvent dépasser 30% du poids de produit final. La captation de ces fumées, rendue obligatoire pour protéger l'environnement fait que des tonnages très importants de produits nouveaux, mais sans utilisation, ont commencé dès 1975 à être disponibles - et même encombrants - dans les différents sites de production.

Une réflexion a été entamée pour trouver des applications à ces fumées en mettant à profit leurs propriétés chimiques et physiques très particulières. Parmi les réponses apportées, l'utilisation de fumées dans les bétons et coulis [2,7].

1-4-2 Production

Le processus de production est le même pour tous les silico- alliages. Ainsi le minerai de départ est la silice sous la forme de quartz ou de galet. Additionnée ou non d'oxyde de Fe, Ca, Ba ou Zr. on effectue la réduction (c'est-à-dire l'élimination de l'oxygène) par le charbon sous la forme de coke, charbons, bois, etc.



Cette réduction est fortement endothermique. Pour se produire, elle nécessite une température élevée, supérieure à 1800°C. On utilise pour la réaliser, un four à arc submergé. la composition chimique de la fumée de silice résultante est influencée par :

a/ le type d'arc électrique des fours de fabrication : Il est indispensable de distinguer deux types d'arcs dans le four selon qu'ils opèrent avec ou sans système de conservation de chaleur, (fig.(1.5)). En effet, le type d'arc influe sur les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de la fumée de silice et qui est responsable de leur couleur foncée presque noire [8, 9,10,15]. Le pourcentage de silice dépend du Type de métal produit et il varie entre 84 à 98%.

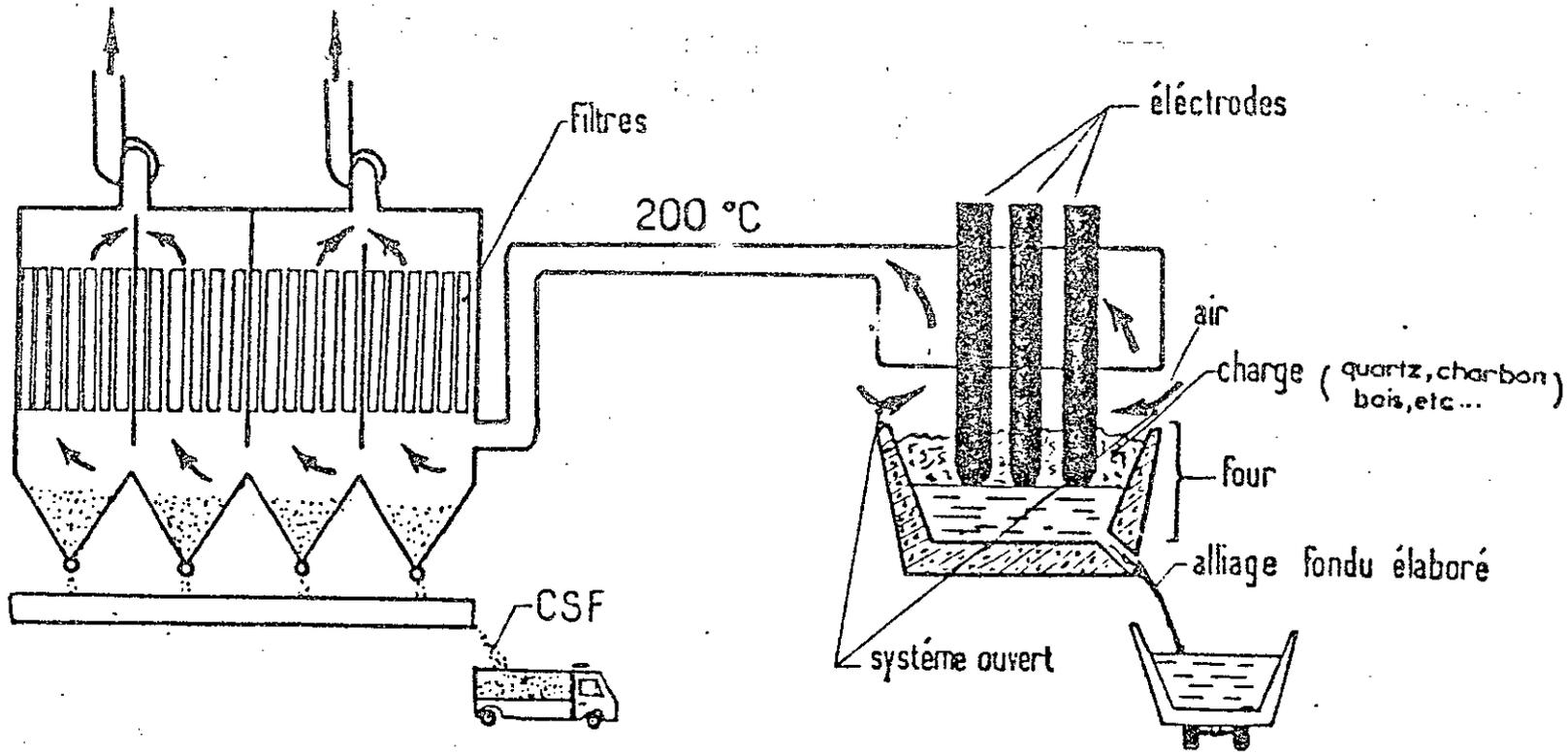
b/ la nature du produit élaboré : Silicium (Si) ou Ferro - silicium (Fe Si).

Les propriétés notables de la micro-silice sont la très petite taille et le pourcentage élevé de silice, [2,10].

Le diamètre moyen de la micro-silice est aux alentours de 0.1µm, avec une très grande surface spécifique de l'ordre de 150000 g/cm²

La dimension de la particule de la fumée de silice est 10 fois plus petite de celle du ciment (moyenne 10µm).

Fig.(1.6) : Représentation schématique de l'installation des fours élaborant des alliages sans système de conservation de chaleur[10].



1-4-3 Disponibilités en fumée de silice

Au total, dans le monde 0.6 million tonne de la fumée de silice était produit en 1987 et 1.7 millions de tonnes de silicium [7]. Les tableaux (1.3) et (1.4) ci-après illustrent les principaux producteurs de la fumée de silice dans le monde en 1987

Pays	FeSi Produit	Si Produit	Fumée de silice
Norvège	365 000 t	77 000 t	130 000 t
France	70 000 t	66 000 t	35 000 t
Allemagne	-	12 000 t	4 000 t
Italie	30 000 t	18 000 t	12 000 t
Espagne	53 000 t	11 000 t	15 000 t
Yougoslavie	35 000 t	30 000 t	17 000 t
Suède	-	20 000 t	7 000 t

Tableau (1.3) : Production de la fumée de silice en Europe (1987), [7].

Amérique de Nord	280 000 t	154 000 t	100 000 t
Amérique du sud	300 000 t	52 000 t	35 000 t
Afrique du sud	110 000 t	31 000 t	22 000 t
Asie	60 000 t	100 000 t	32 000 t

Tableau (1.4) : Production de la fumée de silice au reste du Monde, [7].

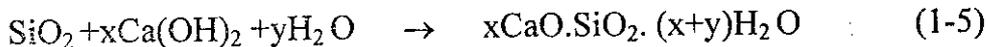
1-4-4 L'effet Filler de la fumée de silice

L'action bénéfique de la fumée de silice peut être attribué à plusieurs facteurs en même temps. Les caractéristiques principales de la fumée de silice faisant d'elle un bon adjuvant sont : la finesse, la nature amorphe, et le pourcentage élevé en SiO_2 . La fumée de silice agit en tant que filler puisqu'elle occupe l'espace entre les grains de ciment, qui peut être occupé par l'eau.

Bache [9] attribue le gain de maniabilité du béton à l'effet filler de la fumée de silice. Pour un béton fabriqué avec un superplastifiant et un faible rapport E/C, Les petites sphères de la fumée de silice peuvent déplacer l'eau emprisonnée entre les grains du ciment floculé. Cette dernière action augmente le pourcentage d'eau libre dans la pâte ainsi que sa maniabilité. L'effet filler et le mode de densification dus à l'action de la fumée de silice sont démontrés par F. De Larrard [10,12] en utilisant le modèle de Farris.

1-4-5 L'effet pouzzolanique de la fumée de silice

La fumée de silice réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des silicates de calcium (C-S-H), selon la réaction suivante (appelée pouzzolanique par les spécialistes de la chimie des ciments).



Phase « C-S-H »

Cette réaction contribue, par la formation d'une phase liante (CSH), au renforcement des propriétés mécaniques du ciment [2,9,13,14,19].

Plusieurs chercheurs ont étudié les propriétés pouzzolaniques de la fumée de silice. Les résultats de la réaction entre la fumée de silice et le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ augmentent le volume des C-S-H et réduisent le volume total des pores capillaires dans la pâte de ciment. Ces résultats ont été vérifiés par Goldman et Bentur [17] sur deux pâtes de ciment fabriquées avec un rapport E/(C+F.S) égal à 0.33 l'un contenant 10% de F.S., l'autre sans F.S.

Reggourd, Sarkar et Aitcin [2] rapportent que les particules de la F.S. ne réagissent pas toutes avec la même vitesse. En utilisant le microscope électronique à transmission, quelques particules réactives de la F.S. peuvent commencer à réagir en un jour tandis que d'autres ne réagissent qu'avant un mois. Généralement la réaction chaux - silice est pratiquement totale après un mois à 20°C. a titre de comparaison, la réaction entre la chaux et une pouzzolane naturelle n'est pas terminée au bout d'un an.

La réaction pouzzolanique de la F.S. avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ réduit le pourcentage des portlandites dans la pâte du ciment hydraté. La concentration des $\text{Ca}(\text{OH})_2$, exprimée en pourcentage de poids du ciment, diminue avec l'augmentation de volume de la fumée de silice.

Scrivener et al.[2] Dans leur étude sur l'influence de la F.S. sur la densification de la zone de transition du béton à haute résistance ont observé que le remplacement de 15% de poids du ciment par la F.S. dans un béton fabriqué avec un rapport $E/(C+FS)$ égal à 0.33 réduit de façon significative la porosité de la zone de transition en comparaison avec un béton fabriqué classique. Ce résultat est observé après un jour ; il est attribué à l'effet filler de la F.S. A long terme ils ont observé dans la zone de transition pour le mélange de la F.S. que le volume total des pores supérieures à $0.5\mu\text{m}$ est similaire à celui dans la pâte du ciment.

1-4-6 L'effet de la F.S. sur le ciment et les propriétés du béton

L'effet des pouzzolanes sur les propriétés du ciment et du béton dépend des caractéristiques spécifiques des matériaux utilisés.

1-4-6-1 Chaleur d'hydratation

Semblablement à l'hydratation du ciment, la chaleur libérée par la réaction pouzzolanique est plus faible que celle résultant de l'hydratation du ciment. Le remplacement partiel du ciment par la pouzzolane engendrera une diminution de la chaleur d'hydratation qui augmente avec le volume de remplacement du ciment par la pouzzolane.

Les résultats représentés sur la fig.(1.6) confirment les effets exceptionnels de l'ajout pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation des ciments. Ces effets sont aussi confirmés par les résultats représentés sur la fig.(1.7) dans laquelle le ciment portland est partiellement remplacé par la F.S.

Les résultats obtenus par Helland [4] (1987) montrent que le couple fumée de silice - superplastifiant n'influence que légèrement la quantité de chaleur libérée pour les faibles valeurs de E/C , (fig. (1.8)).

1-4-6-2 Microstructure

Le remplacement du ciment par la fumée de silice conduit à un système de pore fin [2,21]. Cet effet de la fumée de silice est attribué partiellement à l'effet filler des particules de fumée de silice très petites. Cet effet est aussi remarqué pour les autres pouzzolanes constituées de particules ayant une taille similaire aux particules ciment.

1-4-6-3 Développement de la résistance

La Fig.(1.9) représente un diagramme schématique de la contribution de l'effet pouzzolanique et filler de la fumée de silice sur le gain de la résistance du béton. Ces deux effets conduisent à une pâte de ciment dense et solide, spécialement dans la zone de transition avec les agrégats. L'addition de la fumée de silice peut aussi réduire la résistance suite à une augmentation de volume d'eau nécessaire pour maintenir la fluidité désirée. Cet effet négatif peut être éliminé par l'utilisation d'un réducteur d'eau ou un superplastifiant pour obtenir la fluidité désirée sans changer le rapport $E/(C+F.S)$.

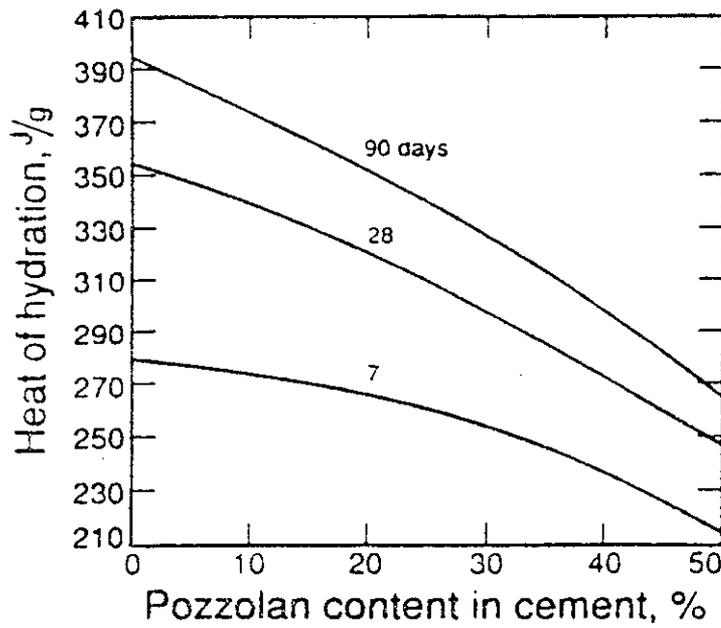


Fig.(1.6) : L'effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment, [2].

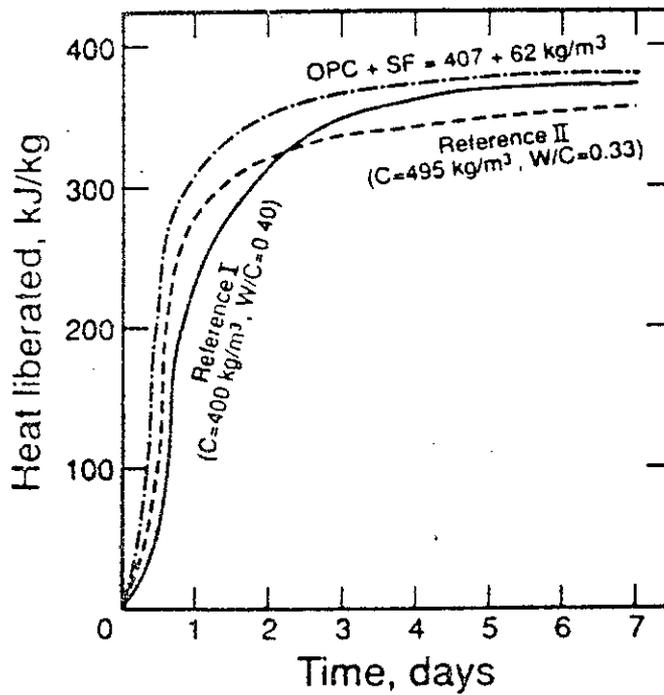


Fig.(1.7) : L'effet de la fumée de silice sur la chaleur d'hydratation du ciment, [9].

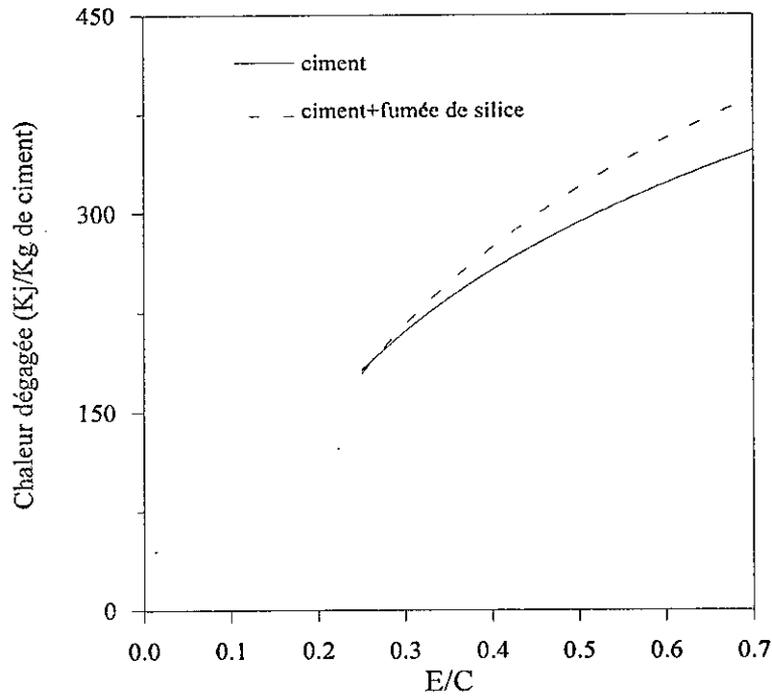


Fig.(1.8) : Quantité de chaleur émise dans un essai isotherme à 20° C en fonction du rapport E/C, [4]

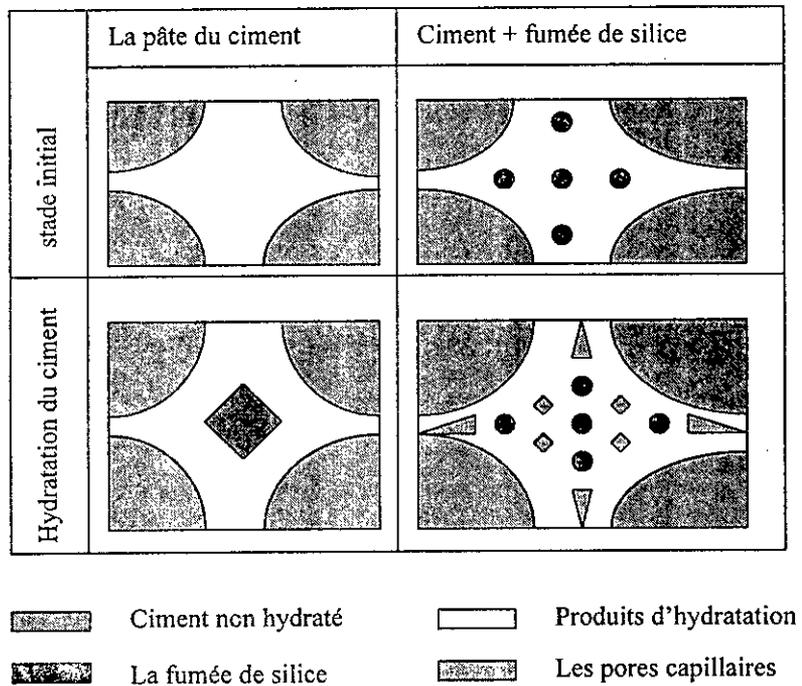


Fig.(1.9) : L'effet filler de la fumée de silice sur le système des pores du ciment, [2]

Le temps à partir duquel la fumée de silice commence à contribuer à l'amélioration de la résistance du béton dépend de plusieurs facteurs, incluant la concentration de la fumée de silice, la température, la cure et le rapport $E/(C+F.S)$. Une amélioration de la résistance du béton aux jeunes âges est surtout remarquée pour les rapports E/C inférieurs à 0,4 [17].

Malhorta [2] rapporte aussi que pour un béton fabriqué avec un rapport $E/(C+F.S)$ égal à 0.6, contenant : 5, 10 ou 15% de fumée de silice par rapport aux poids de ciment, la résistance à la compression après 3 jours de cure est pratiquement la même.

1-4-6-4 L'effet de la cure sur le développement de la résistance

Asselanis et al [2] ont mené une étude sur l'effet à court terme de la cure sur le développement de la résistance à la compression et le module d'élasticité d'un béton superplastique réalisé avec un rapport $E/(C+FS)$ égal à 0.28 et contenant 10 % F.S., ont montré qu'un béton dans une cure humide développe un module d'élasticité et une résistance à la compression approximativement 15 % à 18% plus grands que ceux d'un béton conservé 28 jours à l'air libre.

Des résultats similaires ont été trouvés avec un béton conservé 56 jours.

D'autres travaux montrent que 7 jours de cure humide sont suffisants pour qu'un pareil béton avec fumée de silice développe sa propre résistance et sa durabilité. Des recommandations similaires sur la durée minimale de conservation à l'air libre d'un béton avec fumée de silice sont suggérées dans la littérature, [7,9].

1-4-6-5 Perméabilité du béton

L'addition de la FS peut réduire significativement la porosité de la pâte de ciment hydraté ainsi que la zone de transition entre la pâte de ciment et l'agrégat [16,17]. Par conséquent l'incorporation de la FS diminue le rapport de séchage et le coefficient de diffusion. Sorensen [2] a fait une comparaison du coefficient de diffusion d'un disque mince, réalisé en dehors du béton contenant 0, 8 et 16% de F.S. ; et Il a trouvé que le facteur d'efficacité de la FS en considérant le rapport de séchage a varié entre 6 et 8.

D'après Gjorv [2] la F.S. peut réduire considérablement la perméabilité à l'eau d'un béton maigre, mais elle aura une influence plus faible sur la perméabilité d'un béton riche en ciment. L'auteur a trouvé que le coefficient de perméabilité à l'eau d'un béton contenant $100\text{Kg}/\text{m}^3$ de ciment diminue de 1.6×10^{-7} à 4×10^{-10} m/s quand $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ de fumée sont utilisés. La dernière valeur de la perméabilité est la même que celle d'un béton sans F.S. dosé à $250\text{Kg}/\text{m}^3$ de ciment.

L'efficacité de la F.S. sur la réduction de la perméabilité à l'eau d'un béton a été étudiée par Sandvik [2]. Le coefficient de la perméabilité à l'eau d'un béton contenant $300\text{Kg}/\text{m}^3$ de ciment avec 0, 5% de F.S. est égal à 3×10^{-11} m/s et 6×10^{-14} m/s, respectivement [2,22].

1-5 Un adjuvants hydrauliques : le laitier

Ce type d'adjuvant possède des propriétés hydrauliques en lui-même. Il rentre sous ce type d'adjuvant le ciment naturel, la chaux hydraulique et le laitier granulé des hauts fourneaux

1-5-1 Production du laitier

Le laitier est un sous-produit de l'industrie de la fonte, obtenu par la réduction du minerai de fer métallique [23].

Le minerai de fer contient un certain pourcentage d'impuretés et en particulier le SiO_2 et Al_2O_3 . Dans l'ordre de séparer ces impuretés de fer fondu, un certain pourcentage de chaux est ajouté à la charge. La chaux combinée avec la silice et l'alumine donne un produit plus léger que le fer fondu qui flotte sur ce dernier d'après la Fig.(1.10).

Ce produit est connu sous le nom du laitier des hauts fourneaux.

Dans l'ordre de donner au laitier des propriétés hydrauliques, il doit être refroidi rapidement, d'habitude par désaltération du laitier liquide par l'eau. Dans ce processus le laitier fondu avant d'être immergé dans l'eau est entrecoupé de haut par un jet d'eau, (fig.(1.11)). A la fin de ce processus on obtient un produit constitué de particules qui ont la forme du sable appelé laitier des hauts fourneaux granulé.

Une méthode encore moins connue utilise un entrecoupé par l'air avec un pourcentage limité d'eau. Dans cette méthode le laitier est obtenu sous forme de palettes et il est connu sous le nom de laitier des hauts fourneaux bouleté.

Le laitier est broyé avec le ciment (clinker) pour produire le ciment au laitier. Eventuellement peut être broyé séparément, ces derniers ciments sont produits par mélange du laitier pulvérisé avec le ciment portland.

1-5-2 Le laitier adjuvant dans le béton

La réactivité du laitier est affectée par :

- La taille des particules.
- Le volume des vitres.
- La composition des vitres.
- Le degré de désordre de la structure du laitier.

L'utilisation du laitier dans le domaine de la construction comme un ajout est souvent limité. Les particules de laitier de taille supérieures à $45\mu\text{m}$ sont peu réactive.

Le laitier des hauts fourneaux est composé surtout de calcium, magnésium et aluminosilicates qui sont le résultat d'un coulage rapide et vitré du laitier.

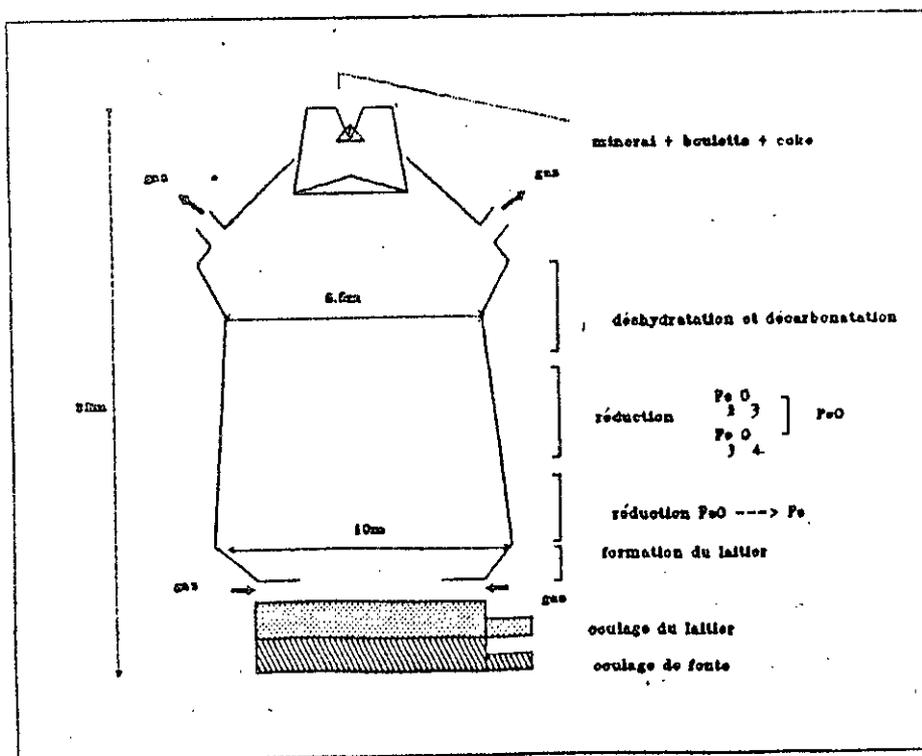


Fig.(1.10) : Haut fourneau[23].

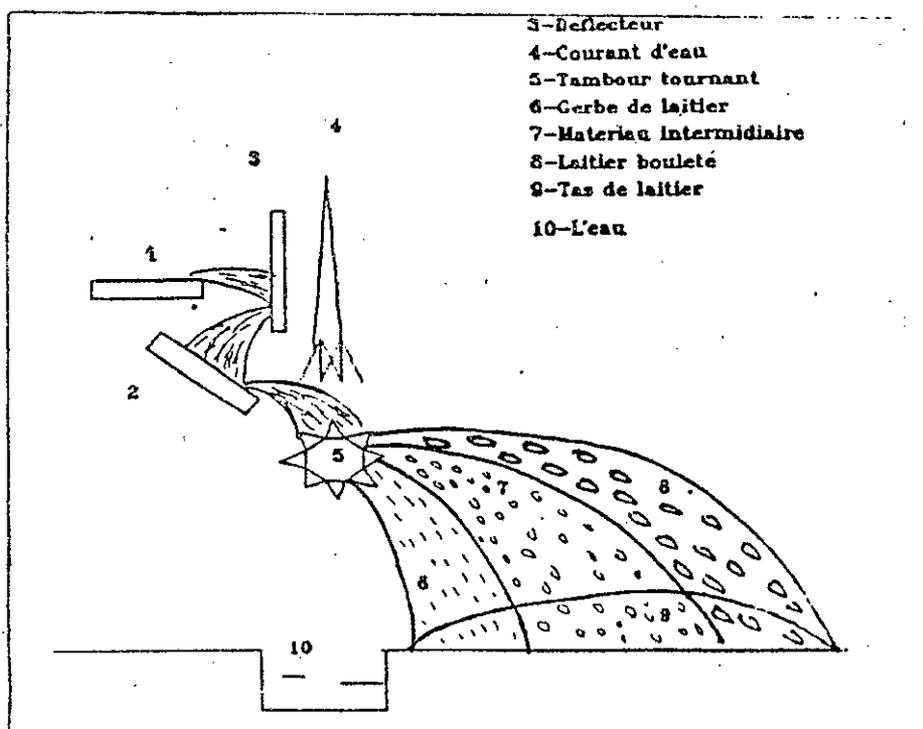


Fig.(1.11) : La méthode d'obtention du laitier bouleté[23].

La composition du laitier est spécifiée par le terme 'indice d'hydraulicité (I_h)' ou Module chimique défini par :

$$I_h = \frac{(CaO) + (MgO) + (Al_2O_3)}{(SiO_2)} \quad (1-6) [2]$$

Cette formule donne le pourcentage en masse des oxydes particuliers dans le laitier (BS 6699, 1986). Ce module doit rester inférieur à 1.4 avec un rapport (SaO) sur (SiO_2) inférieur à 1.4, (cf. tableau (1.5))

Les propriétés composantes	Besoins
Finesse, min (m^2/g)	275
volume de vitre, pourcentage total minimal	
- des particules vitrées pures	40
- des particules vitreuses	85
Résistance minimale à la compression du mortier fabriqué avec 30/70 laitiers : ciment portland composé, (Mpa)	
- à âge de 3 jours	3
- à âge de 28j jours	22
temps de prise	
- initial (min)	≥ 45
- final (h)	< 10
Expansion minimale, test de Lechatelier, 30 / 70 laitiers : ciment portland composé, (mm)	10
la composition chimique	
- Résidu insoluble, max. (%)	1.5
- Magnésie, max. (%)	4.0
- Soufre, aussi sulfate, max. (%)	4.0
- Perte de feu, max. (%)	3.0
- Manganèse, max. (%)	2.0
- (%) module chimique, min	1.0
- Rapport CaO sur SiO_2 , max.	1.4
-Volume d'humidité, max. (%)	1.0

Tableau (1.5) : Les propriétés acceptables pour l'utilisation du laitier des hauts granulés fourneaux avec les ciments portland d'après la norme BS 6699 [2].

Les propriétés composantes	les besoins	
<p>Les besoins chimiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sulfate soufre (S), max. (%) - Ion sulfaté SO₃, max. (%) <p>les besoins physiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pourcentage maximal retenu sur un tamis 45µm. - la surface spécifique. 	<p>2.5</p> <p>4.0</p> <p>20</p> <p>pas de limite</p>	
<p>index d'activité du laitier, min (%)</p> <p>index à 7 jours</p> <ul style="list-style-type: none"> - note 80 - note 100 - note 120 <p>index à 28 jours</p> <ul style="list-style-type: none"> - note 80 - note 100 - note 120 	<p>-</p> <p>75</p> <p>95</p> <p>75</p> <p>95</p> <p>115</p>	<p>-</p> <p>70</p> <p>90</p> <p>70</p> <p>90</p> <p>110</p>

Tableau (1.6) : Classification et propriétés requises pour l'utilisation du laitier granulé des hauts fourneaux dans les bétons et mortiers d'après la norme ASTM C 989-89 [2].

Aucune limitation n'est imposée dans la norme ASTM C989, (cf. tableau (1.6)) qui spécifie la réactivité requise du laitier directement par le terme "index d'activité de laitier", défini par le rapport suivant :

$$\text{Index d'activité de laitier (\%)} = (\text{SP/P}) \times 100 \quad (1-7)$$

Où SP : est la résistance à la compression moyenne d'un mortier référence de ciment au laitier (50% laitier et 50% ciment en poids).

P : est la résistance à la compression moyenne pour le même mortier fabriqué avec un ciment portland sans ajout.

Le laitier granulé des hauts fourneaux est un liant hydraulique latent et en l'absence d'un activateur approprié son hydratation est très lente. L'activation du laitier peut être réalisée par un alcalin fort ou un ciment portland qui contient du gypse et quelques alcalins, comme le NaOH, KOH ou Ca(OH)₂, et les sulfates. De plus, un pourcentage

substantiel de la chaux est produit durant la réaction d'hydratation. Aussi le ciment portland peut être utilisé comme un activateur du laitier dans la production des ciments au laitier [24,25].

Les produits d'hydratation du laitier granulé des hauts fourneaux sont similaires à ceux produits par l'hydratation du ciment portland à l'exception de l'hydroxyde de calcium.

1-5-3 L'effet du laitier sur les propriétés du ciment et du béton

L'effet du laitier sur les propriétés du ciment et du béton dépend en grand partie des propriétés spécifiques du laitier introduit.

1-5-3-1 Chaleur d'hydratation

Le degré d'hydratation du laitier résultant de l'évolution de la chaleur d'hydratation est plus faible que le degré d'hydratation du ciment portland, cependant la partie remplacée du ciment portland par le laitier produit dans le ciment une faible chaleur d'hydratation. Par conséquent, l'augmentation de la température dans un béton fabriqué avec un ciment au laitier est plus faible que celle observée dans un béton sans ajout [24,26].

L'effet de substitution du ciment portland par le laitier est montré sur la fig.(1.12) qui illustre l'augmentation de la température enregistrée dans la masse du béton (c'est à dire à une profondeur de 4.5m) réalisé avec ou sans laitier.

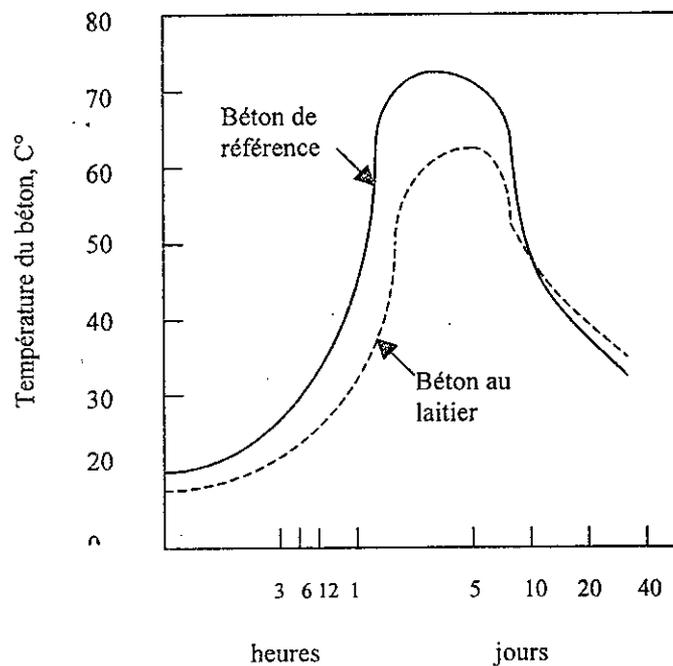


Fig.(1.12) : L'effet du laitier sur la température du béton, [24].

1-5-3-2 Microstructure

La microstructure de la pâte de ciment durcie contenant du laitier est généralement plus dense que celle de la pâte de ciment portland, (fig.1.13 , fig.1.14 et fig.1.15) [24, 26].

Il est évident que la porosité totale diminue avec l'augmentation du pourcentage du laitier. En effet, l'amélioration de la durabilité du béton fabriqué avec un ciment au laitier est généralement attribuée à la faible porosité des bétons au laitier.

Toutefois la diminution de la porosité n'est pas toujours observée. En réalité, une augmentation du volume total des pores, plutôt qu'une diminution, a été trouvée pour de grandes additions de laitier granulé (fig.(1.13)). Aussi la porosité de la pâte de ciment plus laitier diminue avec l'âge (effet pozzolanique), fig .1.14. Cependant, une diminution de la perméabilité et une amélioration de la durabilité d'un béton fabriqué avec un ciment portland au laitier sont attribuées à un système de pore fin plutôt qu'à la porosité, [22, 24, 26].

1-5-3-3 Evolution de la résistance

De nombreux essais montrent que la résistance à la compression et le degré d'hydratation sont liés par une relation presque linéaire [26,27,28,29]. Or le degré d'hydratation des ciments au laitier est plus faible que celui d'un ciment portland. En effet, au premier âge (jusqu'à 7 jours) les bétons au laitier ont une résistance inférieure à celles des bétons ordinaires. Mais à long terme (au-delà de 28 jours) cette résistance augmente de façon plus rapide et peut même dépasser celle du béton ordinaire dans des bonnes conditions de cure, (fig.(1.16)). Une explication à ce phénomène a pu être donnée par Berry (1980) qui conclut que la résistance est directement proportionnelle à la finesse du laitier.

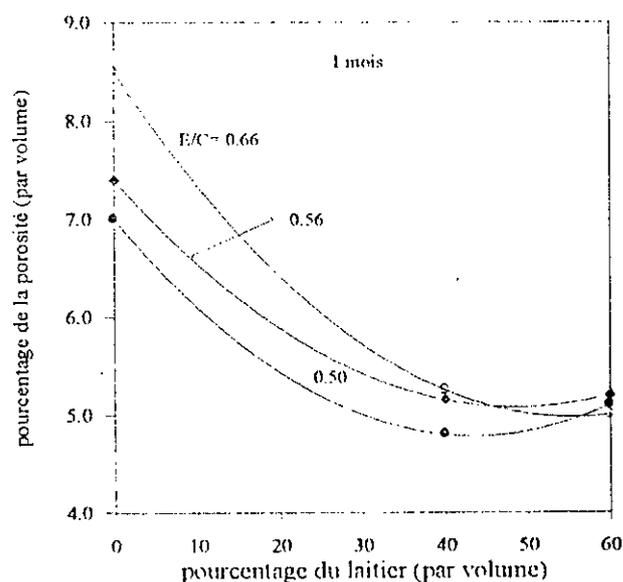


Fig.(1.13) : L'effet du taux de laitier et le rapport(E/C) sur la porosité de la pâte du ciment. La taille de pore est de 30 à 7500 μ m, [2].

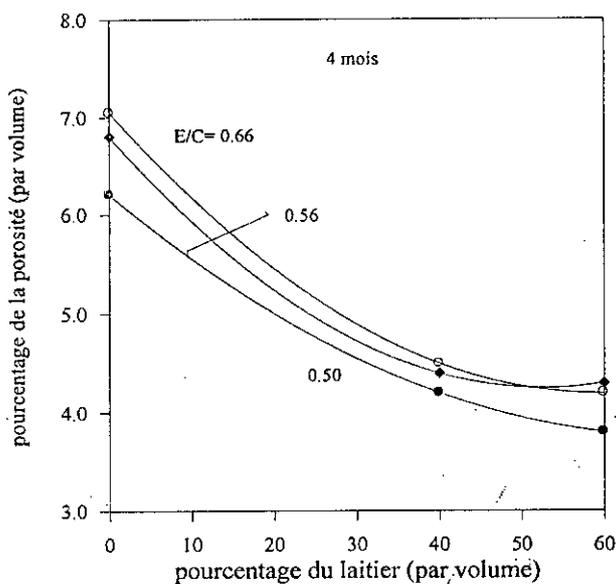


Fig.(1.14) : L'effet du taux de laitier et le rapport(E/C) sur la porosité de la pâte du ciment. La taille des pores est de 30 à 7500 μm , [2].

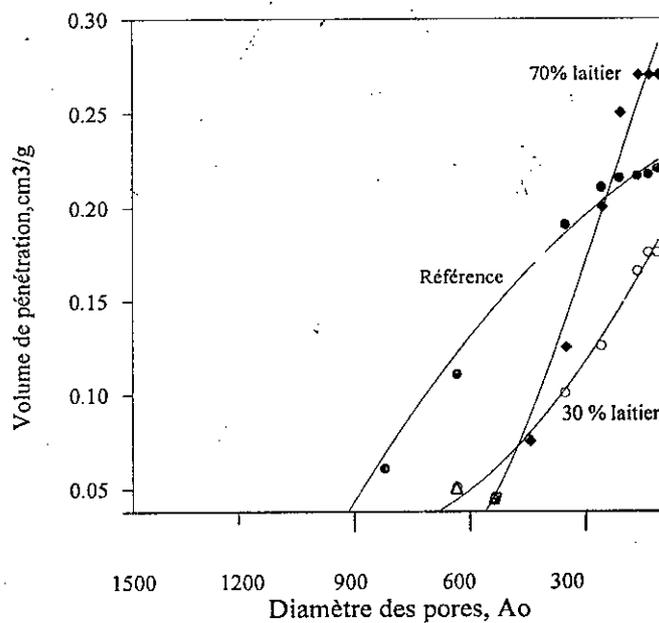


Fig.(1.15) : La distribution des pores dans un ciment contenant 30 ou 70% du laitier, [2].

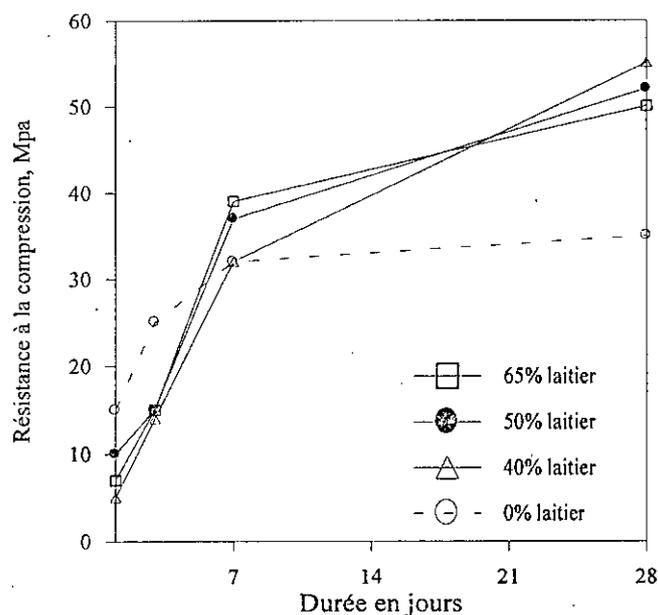


Fig.(1.16) : L'effet du taux de laitier sur la résistance à la compression d'un mortier conservé dans une cure humide, [24].

1-6 Les adjuvants chimiques

Les ciments portland que l'on sait fabriquer ne permettent pas de produire un béton idéal.

En effet d'une part, les particules de ciment qui présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées ont une forte tendance à se flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau comme on peut le voir sur la fig.(1.17). D'autre part, la réaction d'hydratation n'attend pas que le béton soit placé dans les coffrages pour démarrer. C'est une réaction dont les premières manifestations se développent aussitôt que le ciment portland est mis en contact avec l'eau. Ceci est causé notamment par le fait que certains composés du ciment, le C_3A en particulier, sont très réactifs et que les ciments portlands actuels présentent de très fines particules de l'ordre de quelques micromètres qui sont évidemment très réactives. Ceci explique pourquoi, depuis toujours, il a fallu utiliser beaucoup plus d'eau qu'il n'en faut pour hydrater complètement les grains du ciment lorsqu'on veut fabriquer un béton qui présente, au moment de sa mise en place, une maniabilité suffisante quand on n'utilise aucun autre ingrédient que le ciment et l'eau pour fabriquer la pâte de béton [30].

1-6-1 Les réducteurs d'eau

Pour essayer de lutter contre cette tendance qu'ont les grains du ciment à flocculer et pour diminuer la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter, on utilise des

molécules organiques bien connues pour leurs propriétés dispersantes.

La première génération de dispersants, mieux connus commercialement sous le nom de réducteurs d'eau, était constituée de produits à base d'un déchet des usines de pâte à papier : Les lignosulfonates. Ces produits avaient l'avantage d'être très bon marché et ne nécessitent pratiquement aucun traitement additionnel pour être utilisés avec succès dans le béton, [31].

Cependant, on s'est très vite aperçu qu'on ne pouvait augmenter à volonté leur dosage dans le béton sans faire apparaître des phénomènes secondaires néfastes :

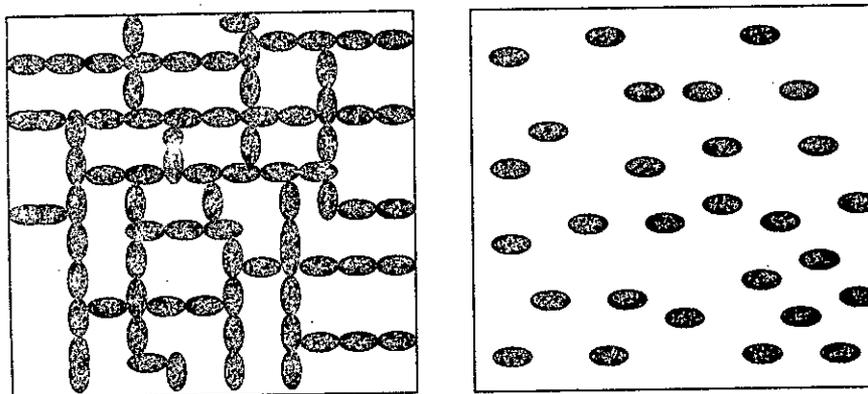
- Retard de prise causé par la présence de sucre ;
- Entraînement de grosses bulles d'air causé par la présence du surfactant, [30].

1-6-2 Les fluidifiants

Pendant plus de 30 ans, l'industrie du béton s'est donc satisfaite de ces réducteurs d'eau de première génération jusqu'à ce que, presque simultanément, les Japonais et les Allemands mettent sur le marché des produits de synthèse aux propriétés beaucoup plus dispersantes et beaucoup plus efficaces que les lignosulfonates de l'époque. Ces nouveaux produits qui étaient des sels sulfoniques de condensé de formaldéhyde et de naphthalène (produit japonais) ou de mélamine (produit allemand) ont été commercialisés sous divers noms : superplastifiants, super réducteurs d'eau, réducteurs d'eau de deuxième génération, fluidifiants, etc.

Un des inconvénients majeurs de ces premiers fluidifiants était la durée relativement courte de leur effet fluidifiant sur les bétons, qui est de l'ordre de 15 à 30 minutes dans les meilleurs cas.

Cependant, la technologie de fabrication des fluidifiants s'est attaquée à ce problème et, de nos jours, on sait fabriquer des fluidifiants pour des rapports E/C de moins de 0.28 avec une durée de fluidification de plus d'une heure dans les meilleurs cas.



Grains dans la pâte de ciment avec fluidifiant

Grains dans la pâte de ciment sans fluidifiant

Fig.(1.17) : Défloculation des grains du ciment par l'utilisation d'un fluidifiant, [30, 31]

1-6-3 Utilisations pratiques des fluidifiants

Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il est très important de sélectionner avec soin les différents ingrédients que l'on utilisera. Lorsqu'on cherche à optimiser la composition d'un béton à hautes performances en un lieu donné, il s'agit donc de trouver le ciment ayant la plus faible réactivité rhéologique, c'est à dire celui qui fixera le moins d'eau de gâchage dans les instants qui suivent le malaxage, et de l'utiliser avec le fluidifiant qui entrera le moins en compétition avec les cristaux d'étringite qui se forment dès que le ciment entre en contact avec l'eau. Malheureusement il n'existe aucun moyen théorique qui permette de prédire l'un ou l'autre de ces deux comportements.

Une méthode proposée par F. de Larrad [30] consiste à faire recirculer, pendant deux minutes dans une petite pompe à auge modifiée, un coulis de ciment de rapport E/C égal à 0.35 contenant un fluidifiant à base de naphthalène, dosé à 1.5% en extraits secs par rapport à la masse du ciment. On mesure alors le temps d'écoulement d'un litre du coulis au cône de Marsch utilisé dans l'industrie du pétrole pour mesurer la fluidité des coulis de bentonite.

Après la mesure initiale du temps d'écoulement, le coulis est placé dans un contenant que l'on agite en permanence jusqu'à la mesure suivante, en général 15 minutes plus tard, et ce, pendant une heure.

En plus de la compatibilité du fluidifiant avec le ciment, il y a plusieurs autres paramètres qui influent sur la qualité du béton tel que le pourcentage en extrait sec du fluidifiant [30]

1-7 Gros granulats

Le gros granulat idéal pour un béton à très haute résistance doit être très résistant à l'écrasement, avoir un module d'élasticité aussi voisin que possible de celui du mortier, de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface granulat/mortier, présenter une surface favorisant l'adhérence du mortier et enfin, il ne devra pas diminuer la maniabilité du béton frais.

1-4-7-1 Influence des granulats sur la maniabilité du béton frais

Les principales caractéristiques du gros granulat qui influent sur la maniabilité sont la taille, la forme et l'état de surface du granulat. En effet, l'eau mouille la surface du granulat, sépare les particules, et de cette façon agit comme un lubrifiant. Par conséquent, une plus grande surface des particules nécessite une plus grande quantité d'eau pour obtenir la maniabilité désirée, et vice versa.

En ce qui concerne la forme et l'état de surface, une distinction est faite entre gravier concassé et gravier roulé. Les particules du gravier concassé sont cubiques et à surface rugueuse, tandis que celles du gravier roulé sont rondes et lisses.

L'expérience pratique montre que c'est avec de gros granulats cubiques de 10 à 12 mm de diamètre maximal que l'on peut obtenir des bétons à très haute résistance maniable. Des études scientifiques plus poussées, conduites sous la direction du professeur Legrand à l'INSA de Toulouse [1], ont d'ailleurs permis d'expliquer ce phénomène qui est lié à la compacité de squelette solide. On utilise donc en général, un gros granulat de diamètre 10 à 12.5 mm pour fabriquer des bétons à haute résistance.

1-7-2 La résistance de l'interface pâte - granulat

Les caractéristiques de l'interface pâte de ciment-granulat sont apparemment liées aux caractéristiques mécaniques et physiques des composants du béton et plus ou moins aux produits des réactions chimiques qui ont lieu entre le ciment et les agrégats qui remplissent l'interface. En pratique, les principaux facteurs à considérer dans l'étude de l'interface pâte-granulat sont le rapport E/C et la surface caractéristique des particules d'agrégats.

1-7-2-1 L'effet du rapport E/C

Une diminution du rapport E/C conduit à une augmentation simultanée de la résistance de la pâte, ainsi que la résistance de l'interface pâte- agrégat.

1-7-2-2 L'effet des caractéristiques de la surface

L'obtention d'un béton à haute résistance de bonne adhérence nécessite l'utilisation des granulats ayant une surface rugueuse. L'expérience, ainsi que les résultats expérimentaux montrent que la résistance d'un béton fabriqué avec des agrégats concassés est plus grande que celle du même béton fabriqué avec des agrégats roulés, cela est dû au chevauchement des granulats concassés qui limite leur mouvement dans le squelette solide. Cet effet est plus prononcé pour un faible rapport E/C et peut être négligé dans un béton de faible résistance, (fig.(1.18)). Cela a été aussi observé pour la résistance à la flexion. Et apparemment, la dernière résistance est très influencée par la surface spécifique [34,35].

1-7-3 L'effet des propriétés et la concentration des agrégats sur la résistance à la compression

1-7-3-1 L'effet de la résistance des agrégats.

Puisque le béton est un matériau composite, sa résistance mécanique est très influencée par celle des agrégats, (fig.(1.19)). Généralement, pour le même rapport E/C les bétons fabriqués avec des agrégats légers sont moins résistants que ceux fabriqués avec des agrégats lourds.

Dans un béton, la rupture peut se produire à deux niveaux :

- Dans le granulat (granulat de faible résistance), (fig.(1.20-a)).
- A l'interface pâte- granulat (granulat de bonne résistance), (fig.(1.20-b)).

Dans le premier cas une diminution du rapport E /C n'a aucun effet sur la résistance du béton, donc la résistance du béton est beaucoup plus contrôlée par celle des agrégats.

Dans le deuxième cas une diminution du rapport E/C apporte une augmentation automatique de la résistance du béton. Dans ce cas la résistance du béton est contrôlée par celle de la pâte [2,34,35].

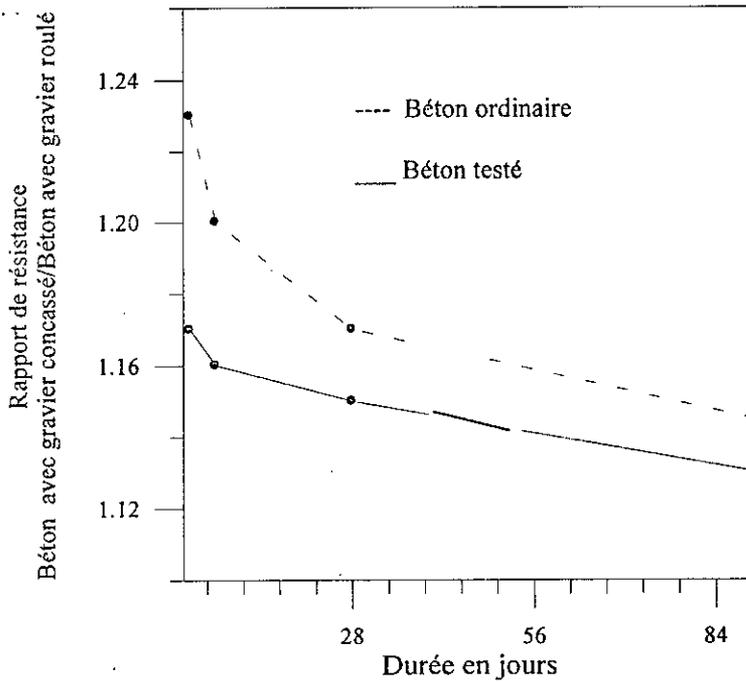


Fig.(1.18) : L'effet du type de gravier sur la résistance du béton, [2].

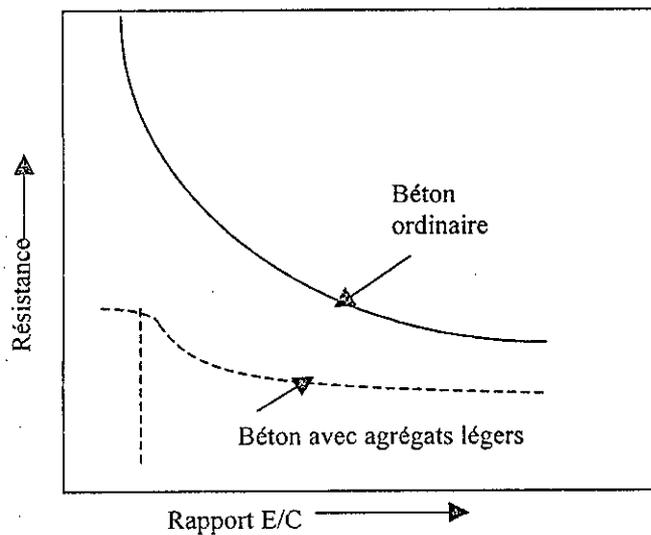


Fig.(1.19) : L'effet des granulats sur la résistance du béton, [2].

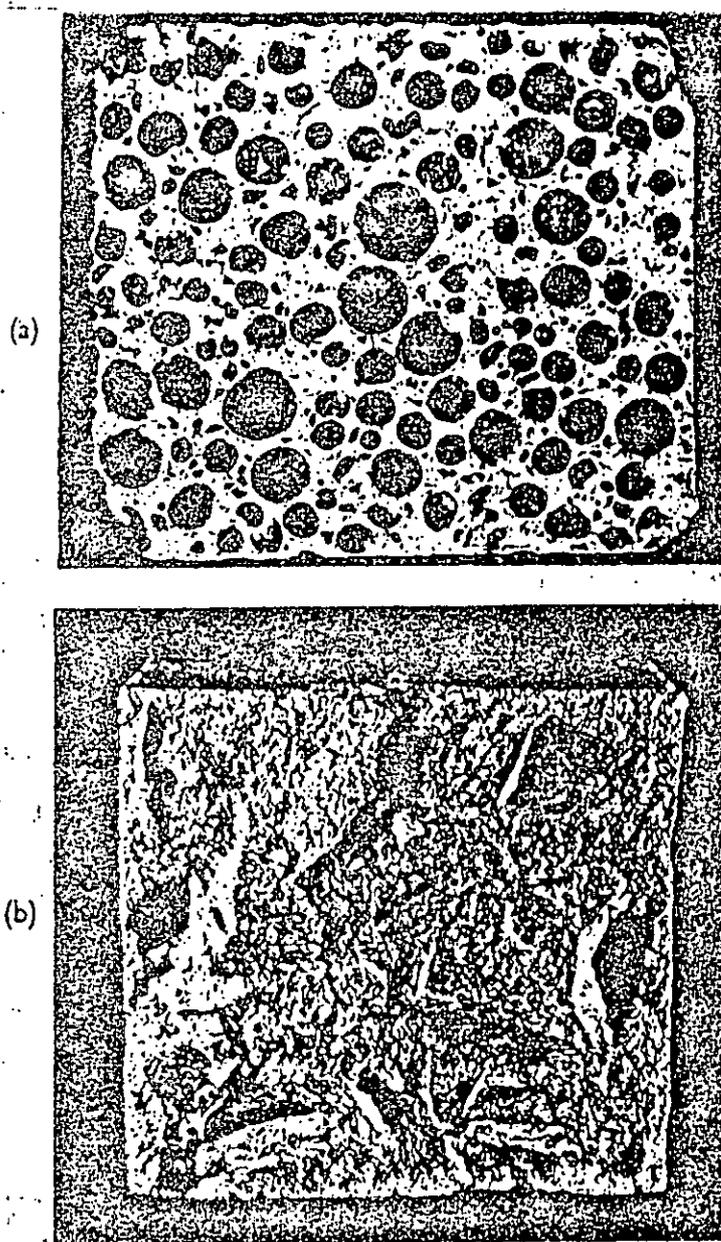


Fig.(1.20) : Le mode de rupture dans :

a- un béton avec gravier d'argile expansé,

b- un béton avec gravier type dolomite concassé[1]

1-7-3-2 L'effet du module d'élasticité des agrégats

Le module d'élasticité des agrégats constitue un des facteurs déterminant de la résistance du béton. Généralement la résistance du béton augmente avec l'augmentation du module d'élasticité des agrégats. Cette relation peut être expliquée par l'effet de la rigidité des agrégats sur la distribution des contraintes dans le béton sous charges.

A déformation égale la part des charges supportées par les agrégats augmente avec la rigidité (c'est à dire avec le module d'élasticité). Et par conséquent la part supportée par la pâte de ciment diminue.

Dans un béton ordinaire, fabriqué avec des agrégats plus résistants que la pâte de ciment la résistance du béton est contrôlée par celle de la pâte. Une diminution de la charge supportée par la pâte de ciment engendrera un retard de rupture et une augmentation de la résistance du béton. A cet égard il faut noter qu'un module d'élasticité élevé caractérise un agrégat résistant. La différence de résistance du béton indiquée sur la fig.(1.19) est essentiellement due à la différence de la résistance des agrégats et le module d'élasticité.

1-7-3-3 L'effet de la taille des particules

La présence des particules d'agrégats dans la pâte de ciment engendre une concentration des contraintes au voisinage de l'interface pâte - agrégat.

La concentration des contraintes augmente avec la dimension des granulats, cela conduit à une rupture du béton au premier âge. Par conséquent la résistance du béton va diminuer avec l'augmentation de la taille maximale des particules. Cette conclusion est justifiée par les résultats expérimentaux représentés sur la fig.(1.21). L'effet de la taille des particules est relativement faible.

1-7-3-4 L'effet de la concentration des agrégats

Quoiqu'il existe des données contradictoires, il est généralement accepté que la résistance du béton augmente avec l'augmentation de la concentration des agrégats.

Cela est expliqué par la diminution de la concentration des contraintes avec l'augmentation des granulats. Cette conclusion est justifiée par la fig.(1.22). Tout en respectant le pourcentage minimal de la pâte nécessaire à une consolidation complète du béton:

Pour les mortiers on prend généralement un pourcentage des granulats qui variera entre 30 et 36%. Pour un béton normal ce pourcentage varie entre 65 et 75%.

En pratique l'effet de la variation de pourcentage des granulats sur la résistance à la compression est négligé.

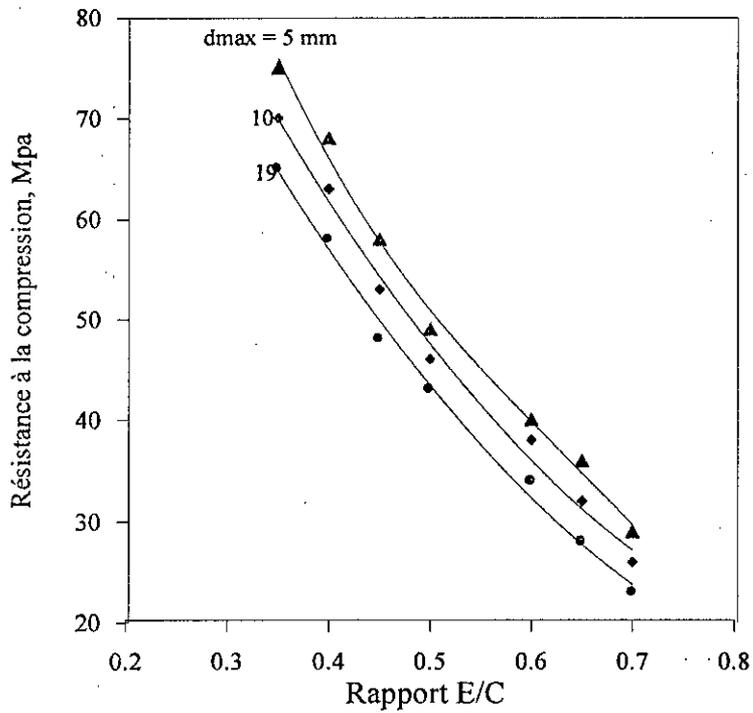


Fig.(1.21) : L'effet de la taille des granulats sur la résistance du béton, [2].

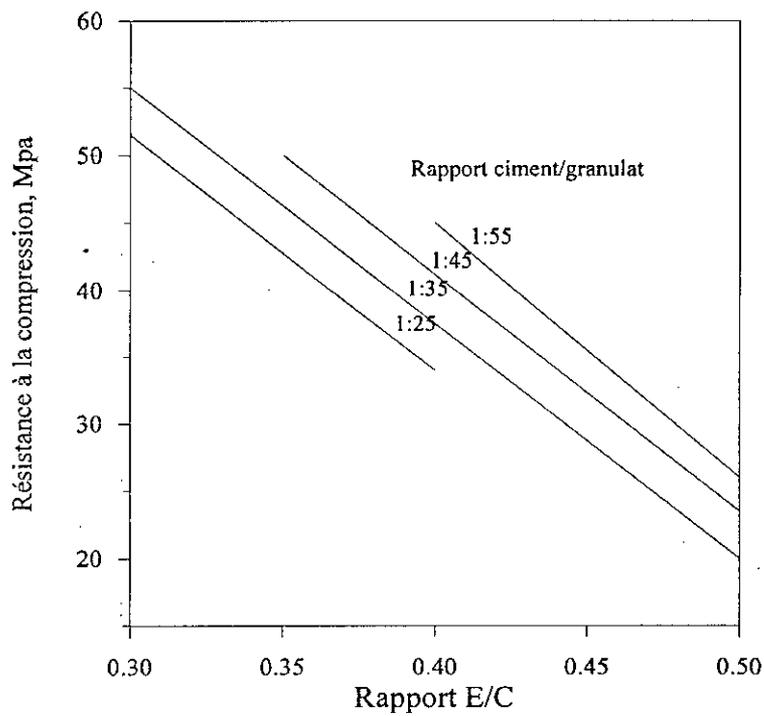


Fig.(1.22) : L'effet de la concentration des granulats sur la résistance du béton, [2].

1-7-4 Conclusion

La résistance du béton augmente en général avec : le module d'élasticité, la résistance et la concentration des granulats. Par contre elle diminue avec l'augmentation de la taille des agrégats. L'effet de ces propriétés est généralement négligé, par contre la surface caractéristique des agrégats a une grande influence sur la résistance de l'interface pâte – agrégat ainsi que la résistance en compression du béton et plus ou moins sa résistance à la flexion. En pratique l'effet des caractéristiques de la surface est très important dans la conception des mélanges du béton. Une distinction est faite entre un gravier concassé et un gravier naturel. La fig.(1.18) indique que L'utilisation d'un agrégat lisse et rond donne une résistance du béton plus faible que celle due à l'utilisation d'un agrégat rugueux et cubique(concassé).

1-8 La relation entre le rapport E/C et la résistance

Pour le même degré d'hydratation (même type et âge du ciment, même conditions de cure, même type d'agrégats). Le rapport E/C est le seul facteur qui influe sur la résistance du béton qui est généralement exprimée par l'expression :

$$S=A/B^{\omega} \quad (1-8) [2]$$

- Où :
- S est la résistance du béton
 - ω est le rapport E/C
 - A et B sont des constantes

Cette relation est connue sous le nom de la loi d'ABRAMS.

La loi du rapport E/C est largement appliquée dans la conception des mélanges, une fois les constantes A et B sont déterminées, pour un rapport E/C donné on peut estimer la résistance à la compression du béton, ou d'une autre manière on sélectionne le rapport E/C adéquat pour confectionner un béton d'une telle résistance. En effet dans ce contexte le rapport E/C joue un rôle primordial.

1-9 Caractéristiques mécaniques des bétons à haute résistance

1-9-1 La résistance en compression

C'est la plus importante des propriétés d'usage du matériau, c'est aussi celle dont l'amélioration est plus spectaculaire : on a pu réaliser en laboratoire [17,38] des bétons dont la résistance à l'écrasement dépassait 200 Mpa ! Cependant, si l'on cherche à fabriquer des bétons maniabiles avec des granulats ordinaires, on devra se limiter, dans l'état actuel de la technologie à des valeurs comprises entre 100 et 120 Mpa en résistance moyenne à 28 jours (mesure sur cylindre)

Une explication de cette augmentation de la résistance est due au rôle accélérateur de la fumée de silice selon la nouvelle lois de Féret [18] exprimée par

$$f_{c28} = \frac{K_g R_{c28}}{\left(1 + \frac{3.1e/c}{1.4 - 0.4 \exp(-11s/c)}\right)^2} \quad (1-9) \quad [18]$$

où :

- f_{c28} est la résistance moyenne en compression du béton à 28 jours

-e, c et s sont les poids respectifs d'eau, Du ciment et de la fumée de silice au mètre cube du béton.

- K_g est un paramètre dépendant de la qualité des granulats (pour des granulats courants, la valeur $K_g=4.91$ conduit à des résultats corrects).

- R_{c28} est la classe vraie du ciment.

Enfin Seki et al relie la variation de la résistance aux méthodes de conservation. Ainsi un béton à haute résistance conservé dans l'eau douce développe une résistance plus grande qu'un béton conservé à l'air libre [2].

1-9-2 Résistance à la traction

Celle-ci croit sensiblement par rapport à la résistance en compression ; la relation entre les résistances à la compression et à la traction est de l'ordre de 1/10 à 1/13, soit 0.10 à 0.077 ; mais lorsque la résistance à la compression est de l'ordre de 100 Mpa, la valeur du rapport (f_t / f_c) est beaucoup plus petite, de l'ordre de 1/20, ainsi la résistance à la traction n'augmente pas proportionnellement à la résistance en compression, voir tableau (1.7). La densification de la matrice, et de l'interface pâte - granulat sont à l'origine dus à l'amélioration de la résistance en traction. Lors des essais de fendage, le faciès de rupture est systématiquement transgranulaire (même avec des granulats siliceux), ce qui montre l'homogénéité mécanique du matériau.

1-9-3 Module élastique

Hanshin [[in38]] a proposé des expressions mathématiques issues des théories de l'homogénéisation, qui montrent le rôle des trois paramètres essentiels : Volume des granulats (g), module de la pâte (E_p) et module du granulat (E_g) sur le module du béton (E).

$$E = E_p [(1-g)E_p + (1+g)E_g] / [(1+g)E_p + (1-g)E_g] \quad (1-10) \quad [38]$$

Le module de la pâte sera conditionné par sa compacité. Les termes g et E_g sont peu variables quand on passe d'un béton classique à un béton THP. D'où une croissance assez modérée du module, qui variera de 40 Gpa (béton THP à squelette compact – tel

que celui présenté au tableau (1.7))

Une autre formule a été proposée par Caraasquillo, Nilson, et Slate

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \text{ Mpa} \quad (1-11) [33]$$

H. M. Marzouk [33] a trouvé une bonne corrélation entre ses résultats expérimentaux et cette formule.

	1 j	3 j	7 j	14 j	28 j	90 j	1an
Résistance moyenne en compression (Mpa)	27.2	72.2	85.6	92.6	101	109	111
Résistance au fendage (Mpa)	2.2	4.5	6.4	6.1	6.5	-	-
Module d'Young (Gpa)	34.9	48.7	51.2	52.4	53.4	53.6	56.8

Tableau (1.7) : Evolution des caractéristiques mécaniques du béton THP, [38].

1-9-4 Comportement du béton sous compression uniaxiale

C'est évidemment le mode de travail normal du matériau. Avant la rupture, la relation contrainte- déformation est très linéaire(cf. fig.(1.23)). Au pic des contraintes, la déformation plastique ne représente que 15% de la déformation totale, contre 29% pour le béton témoin. Selon la définition de Rossi [38,39], le BTHP serait donc plus fragile en tant que matériau. L'allongement au pic de contrainte est un peu plus important que pour un béton ordinaire.

Plusieurs chercheurs ont examiné le comportement du béton en post – rupture Ainsi J.Xie et al. ont démontré que les courbes contraintes-déformations d'un béton normal et un béton à hautes performances sont identiques, seulement la partie descendante de la courbe pour les BHP est plus prononcée avec l'augmentation de la résistance. Cette dernière constatation pénalise les bétons à hautes performances par une faible ductilité, ce qui veut dire que les BHP sont des matériaux fragiles, cependant cet écart de comportement pourrait être réduit en augmentant le pourcentage des armatures transversales, (fig.(1.24)).

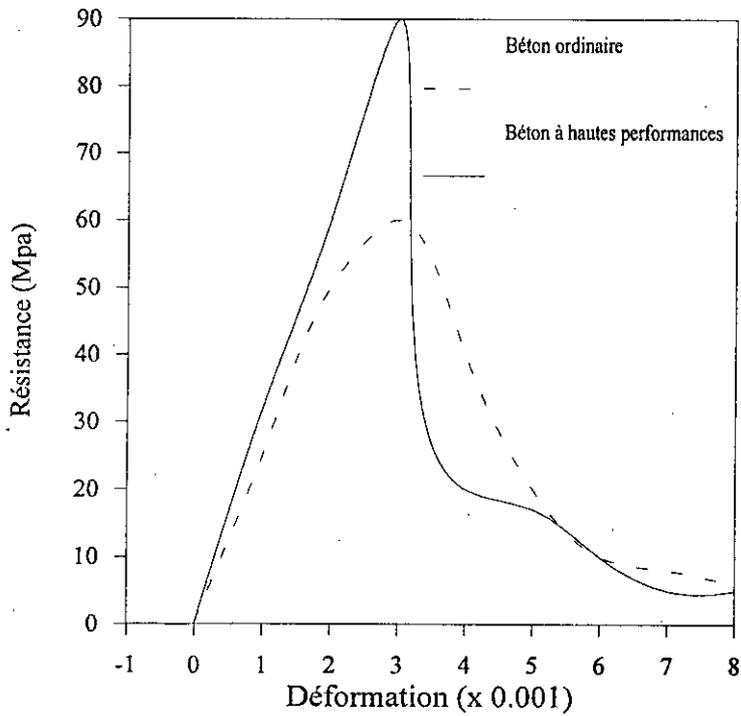


Fig.(1.23) : Comparaison de la courbe contrainte- déformation d'un béton ordinaire avec un béton à hautes performances, [40].

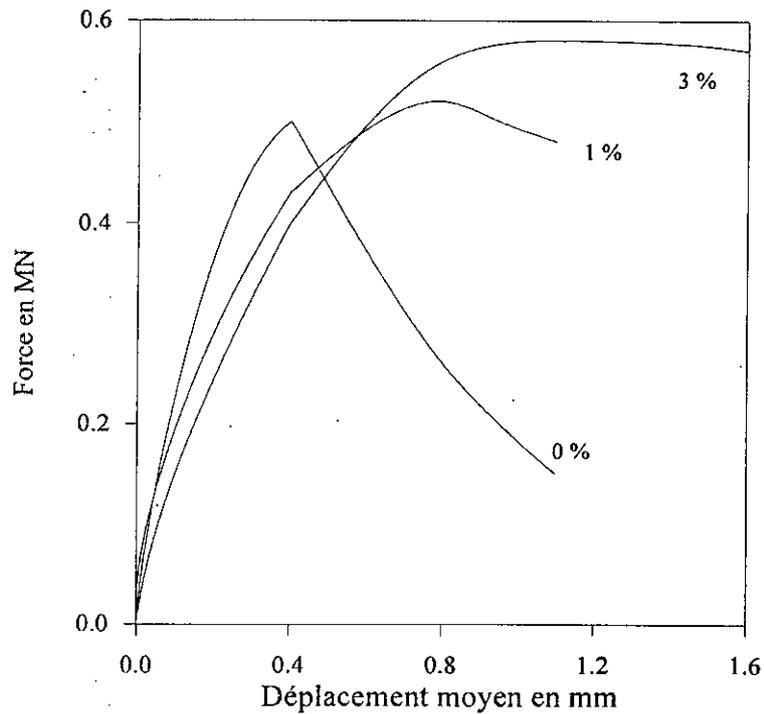


Fig.(1.24) : L'effet de pourcentage d'acier sur la ductilité du béton à hautes performances, [38].

1-9-5 Retrait

Le retrait est principalement dû à l'évaporation de l'eau du béton, au contact de l'atmosphère.

De façon générale, l'eau existe dans le béton dans les états suivants :

- En combinaison chimique.
- Sous forme de gel dans les sels hydratés.
- Enfermée dans les petits interstices sous forme capillaire.
- Libre dans les vides les plus importants entre les granulats et la pâte.

Le processus du séchage de l'eau dans le béton est le suivant : lorsque le béton sèche, l'eau s'évapore d'abord à la surface des tubes capillaires ; il en résulte un accroissement de la courbure du ménisque de capillaire, et une tension qui attire l'eau des vides les plus importants ; celle-ci se déplace vers les capillaires [7]. Ce processus se répétant, le béton se dessèche de plus en plus au voisinage de la surface. Au fur et à mesure du recul des ménisques intérieurs, les gels d'hydratation arrivent au contact direct avec l'atmosphère.

A priori, on pourrait penser que pour un béton qui contient une grande quantité de pâte de ciment et d'eau les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré.

Dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux Ca(OH)_2 avec la silice SiO_2 donne naissance à un silicate du calcium $\text{CaSiO}_3, n\text{H}_2\text{O}$. Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. En conséquence, la déformation de retrait est réduite.

Beaucoup de recherches ont confirmé que le retrait d'un béton à hautes performances est plus faible que celui d'un béton ordinaire, (fig.(1.25)).

1-9-6 Fluage

Celui-ci a été déjà abordé dans des publications antérieures [38,43]. Les déformations de fluage (données sur la fig.(1.26), retrait non déduit) ont été obtenues, avec et sans séchage.

Par rapport à un béton témoin de mêmes composants mais sans additifs, le fluage est divisé par deux (il passe pour une contrainte unitaire de 1 Mpa, de $23,3 \cdot 10^{-6}$ à $10,5 \cdot 10^{-6}$). De Larrad explique cette diminution, tout simplement, par la réduction du volume des hydrates formés dans la matrice du béton THP, ainsi que par la diminution de l'humidité interne.

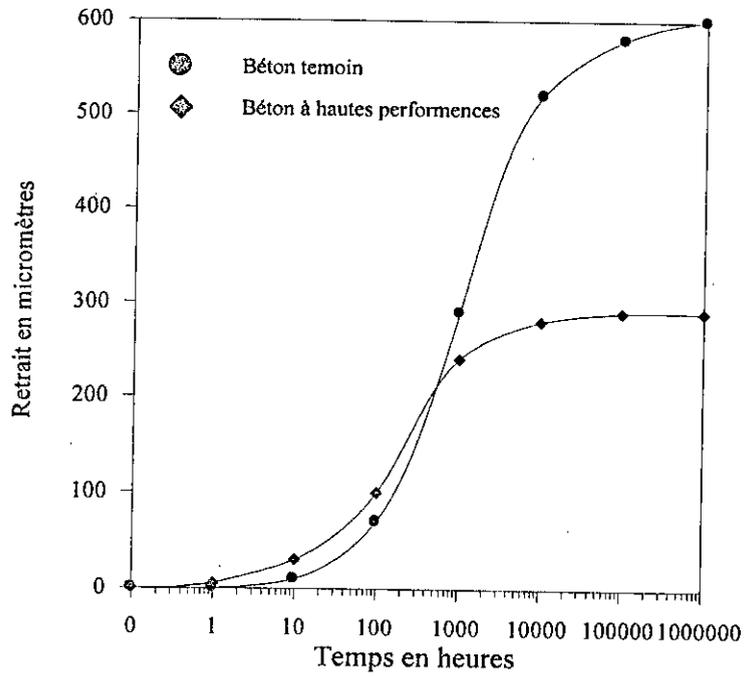


Fig.(1.25) : Retrait des bétons à hautes performances, [43].

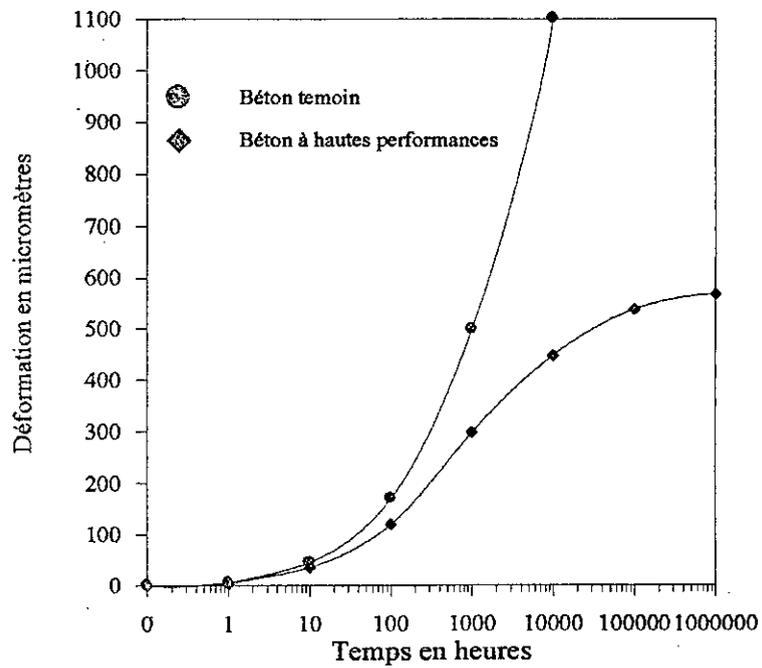


Fig.(1.26) : Fluage des bétons à hautes performances, [43].

1-9-7 Durabilité des bétons à hautes performances

La durabilité du béton peut être définie, dans le cas le plus général, comme la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et ses performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisante pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de service existantes.

Les principales mécanismes de dégradation du béton sont :

- Les altérations chimiques purement externes (solution acide, eaux contenant des ions Cl^- , SO_4^{2-} , eau de mer, ... etc) qui sont étroitement liées aux actions physico-chimiques, physiques et même mécaniques. En pratique, il n'est pas possible de séparer ces actions qui agissent simultanément ou successivement et de ne tenir compte que de l'une d'entre elles en négligeant les autres. La durabilité soulève donc des problèmes d'une grande complexité.

D'après l'étude de J. Grandet [44] le comportement global du B.H.P vis à vis des ions agressifs, lorsqu'il n'est pas fissuré devrait être très satisfaisante grâce à une faible teneur en chaux et sa faible perméabilité.

- Les altérations internes, dues à la formation de gel de silicate expansif au cours des réactions d'hydratation des alcalins (CaO , K_2O et Na_2O).

La nature et la qualité du liant jouent un rôle très important dans la durabilité. Dans ce sens de nombreuses recherches ont montré qu'il y a une amélioration de la résistance des bétons à hautes performances aux agressions dues à la réaction alcalis - granulats. Cette amélioration est liée à :

- Une structure poreuse fine et discontinue qui réduit les diffusions ioniques au travers de la matrice et de l'interface pâte du ciment- granulats.
- Une réduction de la teneur en Ca(OH)_2 par l'effet pouzzolanique des ultrafines.
- Une réduction des ions OH^- dans la solution interstitielle [46].

Les altérations dues à la carbonatation du béton qui peut avoir soit un effet bénéfique par l'augmentation de la résistance en compression (couche superficielle dense de microcristaux de calcite) soit un effet néfaste par la diminution du PH de la solution interstitielle et la dépassivation des armatures.

Un mode opératoire fiable a été mis au point pour caractériser la durabilité des bétons vis à vis de la carbonatation.

D'après les résultats de Christophe Lévy [46] il apparaît clairement que la durabilité vis à vis de la carbonatation des bétons à hautes performances ($R_c 28 = 65 \text{ Mpa}$) est très nettement supérieure à celle d'un béton ordinaire d'ouvrage d'air ($R_c = 40 \text{ Mpa}$). En effet la pénétration des molécules d'anhydride carbonique est quasiment nulle dans le cas du B.H.P, béton dont la compacité est bien meilleure que celle d'un béton plus courant.

1-10 Conclusion et but de la recherche

Depuis longtemps de nombreux sous produits industriels tels que la fumée de silice et le laitier, sont ajoutés au ciment portland. Ces résidus associés à un adjuvant chimique tel que le superplastifiant donnent un béton ayant des caractéristiques physico-mécaniques beaucoup plus performantes que ceux observées pour un béton ordinaire c'est à dire sans ajout. Pour l'obtention d'un béton à hautes performances il faut abaisser le rapport E/C à moins de 0.4, ce qui rend indispensable l'utilisation d'un superplastifiant haut réducteur d'eau. Le laitier participe surtout à l'amélioration de la perméabilité du béton et à un rapport moindre sa résistance à la compression. Aussi les bétons aux laitiers développent une faible chaleur d'hydratation. Cette dernière caractéristique favorise l'utilisation de ces bétons dans les grands ouvrages où la chaleur d'hydratation nécessite des mois et des années pour se dissiper. Ces derniers effets du laitier sont dus à sa structure vitreuse et à son pouvoir hydraulique.

La fumée de silice est un sous produit de l'industrie électrométallurgique, sa très grande surface spécifique et son pouvoir pouzzolanique exceptionnels sont exploités dans la technologie de béton pour la confection d'un béton de performances supérieure. Pour les faibles rapport E/C la F.S. mélangée avec le ciment apporte au béton une très grande résistance et une bonne durabilité aux différents agents extérieurs.

En plus des effets positifs spécifiques que ces résidus apportent aux liants, l'utilisation des adjuvants va de plus en plus diminuer l'énergie calorifique et mécanique de la production du ciment qui aide à l'élaboration des bétons à hautes performances. Malgré le surcoût de l'élaboration du B.H.P. par rapport au béton ordinaire, leur utilisation dans l'industrie des bâtiments a pu réaliser des économies de plusieurs centaines de millier de dollars sur le coût de la construction de l'édifice en hauteur.

Quant au but de notre projet, il consiste en l'élaboration d'un béton à hautes performances à partir des matériaux localement disponibles et l'étude de quelques propriétés importantes de ce dernier. La non disponibilité en Algérie d'un adjuvant adéquat nous a poussé à utiliser un plastifiant fabriqué à l'étranger. Les autres matériaux sont tous disponibles en Algérie. Une comparaison est faite aux résultats obtenus pour les essais sur béton avec de la fumée de silice d'origine étrangère. Pour ce faire un programme d'essais est établi en deux parties. La première phase des essais est consacrée à l'étude des caractéristiques fondamentales des matériaux utilisés dans ce travail, la deuxième phase englobe les résultats obtenus des différents essais réalisés sur béton.



CHAPITRE 2
MATERIAUX ET METHODES
D'ESSAIS

CHAPITRE 2

MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

Introduction

Cette étude est consacrée à l'amélioration de la résistance à la compression et à la traction d'un béton par l'incorporation d'ajouts actifs pour aboutir à un BHP. On a aussi examiné les caractéristiques suivantes : l'ouvrabilité - le retrait- la vitesse de son dans le béton. Dans ce but nous avons élaboré le programme d'essais suivants :

- essais sur coulis de ciment pour la détermination de dosage en supeplastifiant.
- essais sur éprouvettes de mortier 4×4×16 cm. pour l'optimisation de dosage en ajouts.
- essais de compression sur éprouvettes cubique de coté 15 cm à différentes cures.
- essais de flexion et essais ultrasonique sur éprouvettes prismatiques 7×7×28cm.

De ce fait les matériaux suivants sont utilisés dans cette étude :

- le laitier d'El-Hadjar.
- la pouzzolane de Béni-Saf.
- la fumée de silice d'origine Canadienne.
- le sable de rivière de Tazmalt (Béjaia).
- Le sable de dune de Boussaada.
- Le ciment CPJ45 de Ain-Kebira (Sétif).
- Gravier silico-calcaire concassé de la carrière Jobert.
- Gravier granitique concassé de la carrière Thénia.

Ce chapitre contient une étude détaillée sur les différents ajouts incorporés dans le béton (laitier, pouzzolane et fumée de silice) et sur le ciment C.P.J.45 . Par la suite, les modes de confectionnement des bétons et des mortiers et leurs régimes de conservation ainsi que les principes des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, sont décrits en détail.

2-1 Matériaux

Tous les essais de caractérisation ont été faits selon la norme AFNOR mis à part la composition chimique des matériaux.

2-1-1 Laitier

Il s'agit d'un sous produit de la production de la fonte du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). Le laitier granulé utilisé dans notre étude a une forme du sable, de granulométrie 0/5mm, de couleur claire, de masse volumique apparente égale à 1000 kg/m^3 et de masse volumique absolue égale à 3000 kg/m^3 . La composition chimique du laitier d'El-Hadjar est donnée au tableau (2.1). Pour ce laitier on a :

l'indice d'hydraulicité (I_h) = 1.25

l'indice de basicité (I_b) = 1

Ces indices indiquent que le laitier d'El-Hadjar est un laitier de qualité médiocre de point de vue hydraulicité. Cependant, il faut préciser que pour les ciments au laitier ces indices ne suffisent pas pour caractériser leur qualité hydraulique. En effet, la qualité de ces ciments dépend du pourcentage de substitution du clinker par du laitier et de la qualité du clinker. Le faible pouvoir hydraulique du laitier pourra être compensé par un clinker hautement réactif. Les essais sur mortier et béton vont confirmer la dernière constatation.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF	MnO
%	42.2	5.85	1.9	42.2	4.72	1.54	0.43	0.12	0.8	1.8

Tableau (2.1) : Composition chimique du laitier

le traitement du laitier comporte les étapes suivantes :

- a- Séchage dans une étuve à 100°C pendant 24 heures ;
- b- Broyage et tamisage à 0.01 mm jusqu'à une SSB de 4800 g/cm^2 dans un broyeur à boulets.

2-1-2 La pouzzolane

Il s'agit d'un minerai naturel d'origine volcanique extrait du gisement de Bouhamidi situé à 2.5 km au sud de Béni-saf, l'aptitude de cette pouzzolane à fixer la chaux Ca(OH)_2 est de 100 mg/g . elle présente des minéraux actifs tels que le verre volcanique et la Zéolithe.

Une analyse physico-chimique de cette pouzzolane est fournie par les tableaux (2.2 et 2.3)

Les scories pouzzolaniques vont subir plusieurs cycles de broyage jusqu'à l'obtention d'une poudre de SSB égale à 5600 g/cm^2 qui va être passer au travers d'un tamis de 0.08 mm .

La pouzzolane résultante sera étuvée, pendant 24 heures à plus de $150 \text{ }^\circ\text{C}$, afin d'être associée au ciment.

Caractéristiques physiques	Valeurs
Perte au feu (%)	5.6
Porosité (%)	57.1
Absorption (%)	57.4
Densité apparente (g/cm^3)	1.02
Densité absolue (g/cm^3)	1.6
Résistance mécanique (kg/cm^2)	33.2
Pouzzolanité (%)	85
Humidité (%)	3.7

Tableau (2.2) : Caractéristiques physiques de la pouzzolane

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CO	TiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂	P ₂ O ₅	CL
%	46.4	17.5	10.5	10.5	2.5	3.8	0.4	1.5	3.4	4.9	0.8	0.03

Tableau (2.3) : Analyse chimique de la pouzzolane

2-1-3 La fumée de silice

Il s'agit d'un sous produit de l'industrie d'électrometallurgie d'origine canadienne, de couleur grise et de taille très petite, la SSB de cet ajout est de l'ordre de 150000 g/cm² le tableau (2.4) donne sa composition chimique

2-1-4 le ciment

Selon la littérature le ciment le plus approprié pour l'élaboration d'un BHP est le CPA 55 [4], mais vu les difficultés trouvées pour l'obtention de ce ciment en Algérie on a choisi le CPJ 45 qui a des caractéristiques meilleures par rapport aux autres ciments qui se trouvent sur le marché algérien.

Le ciment appartient à la classe C.P.J.45 provenant de la cimenterie de Ain -Kebira livré dans des sacs de 50 kg, sa masse spécifique est égale à 3.09 g/cm³ et sa surface spécifique égale à 3422 cm²/g, ses caractéristiques chimiques et minéralogiques sont données par les tableaux (2.5 et 2.6) (voir annexe 1). Le ciment de Ain -Kebira est riche en silice et contient une teneur en aluminat tricalcique(C₃A) supérieure à celle préconisée dans la littérature pour la confection des BHP qui est généralement inférieure à 3% [5].

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃ ⁻	K ₂ O	CL ⁻	C
%	85.6	0.9	2.9	0.3	1.9	1.2	3	2	1.6

Tableau (2.4) : Composition chimique de la fumée de silice

Elément	SiO ₂ -T	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO-T	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.A.F.	CaO Libre	R Insolub
%	27.74	4.90	3.81	56.95	1.70	1.78	/	/	2.83	0.77	3.30

Tableau (2.5) : Analyse chimique du ciment

Elément	A/F	MS	L.S.F.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	1.13	2.3.8	0.92	59.85	17.64	5.64	13.24

Tableau (2.6) : Composition potentielle du clinker

2-1-5 Les adjuvants

Sur le marché algérien on trouve trois producteurs d'adjuvants : Sika –Contact International- Granitex. L'examen des fiches techniques des adjuvants produits par ces entreprises nous a permis de choisir trois types d'adjuvants qui sont pratiquement les plus adaptés à l'élaboration d'un BHP (voir annexe 2-3-4) :

- Plastiment BV40
- Plastiment H.P.
- Supercontact

Ces adjuvants seront testés en laboratoire pour choisir le plus adapté au ciment de Ain-Kebira. Par la suite un seul va être utilisé pour la confection des mortiers et bétons.

2-1-5-1 Justification du choix de l'adjuvant (plastifiant) [6]

Nous avons procédé à deux tests indicatifs à $E/C = 0.4$. Il s'agit de la mesure du temps d'écoulement afin d'apprécier la maniabilité et de la résistance à l'écrasement à 48 h pour choisir le meilleur adjuvant disponible. Le tableau (2.7) présente les résultats obtenus. On gardera celui qui satisfera les deux conditions ci-dessous :

- Meilleure maniabilité avec un rapport $E/C = 0.40$
- Meilleure résistance à l'écrasement à 48 heures

A travers cela il apparaît clairement que le supercontact (dosage 2%) est le meilleur. Par la suite on gardera ce pourcentage pour tous les essais de mortiers et de béton.

	Temps d'écoulement (s)	Résistance à l'écrasement à 48 h en Mpa
BV 40 (0.85 %)	70	17.1
HP (1 %)	37	12.3
Supercontact (2 %)	18	23.6

Tableau(2.7) : Tests sur les adjuvants

2-1-6 Granulats

a- Le sable pour béton

Le meilleur sable pour les BHP [12, 48] est celui qui a le plus grand module de finesse (de l'ordre de 3). Aussi la propreté de sable est recommandée. Nous avons utilisé un sable de rivière, provenant de Tazmalt qui vérifie les deux dernières conditions. Sa courbe granulométrique, (cf. fig.(2.1)) satisfait aux fuseaux de référence pour un béton de haute résistance.

Les caractéristiques du sable utilisé sont les suivantes :

Equivalent sable ES	86 %
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.58
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.6
Module de finesse du sable	2.85

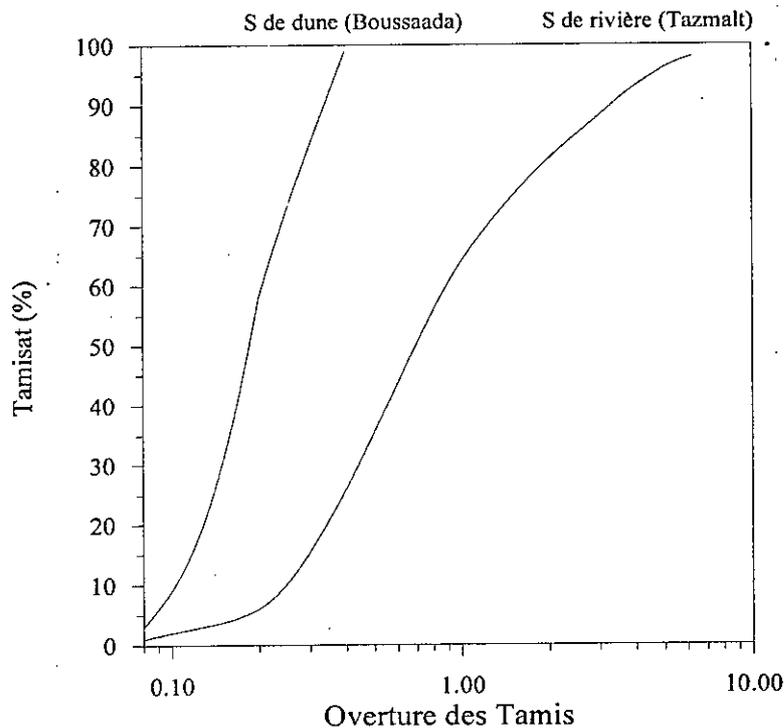


Fig.(2.1) : Courbe granulométrique du sable

b- Le sable pour mortier

Pour satisfaire aux fuseaux de référence des mortiers normalisés (annexe 9), nous avons réalisé une correction du sable de Tazmalt (83.6 %) par un sable de dune (16.4 %) provenant de Boussaada de diamètre maximal de 0.4mm et de module de finesse égal à 0.72.

Les caractéristiques de sable de dune sont les suivantes :

Equivalent sable ES	100 %
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.67
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.5
Module de finesse du sable	0.72

Le sable corrigé a un module de finesse de 1.8 et un diamètre maximal égal à 2 mm. Sa courbe granulométrique est représentée au fig.(2.2).

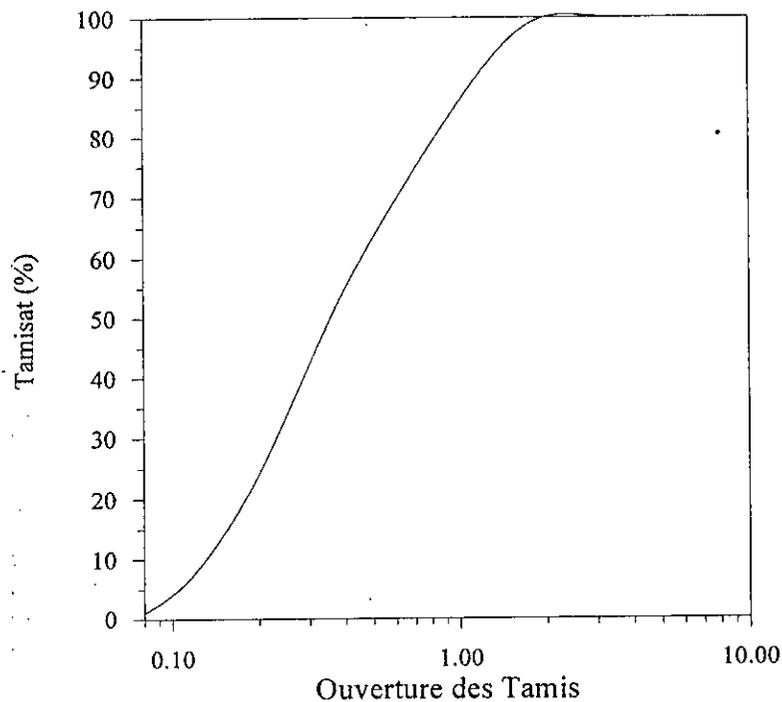


Fig.(2.2) : Courbe granulométrique du sable pour mortier

c- Gravier

Nous avons utilisé deux types de graviers, le premier pour l'élaboration d'un BHP et le deuxième pour examiner l'effet de la nature des granulats sur la résistance de béton.

- Gravier de nature silico-calcaire concassé (3-8 et 5-15) provenant de la carrière Jobert (Alger) de diamètre maximal égal à 12.5 mm, de masse volumique absolue 2.66 t/m^3 et de masse volumique apparente 1.3 t/m^3 , sa courbe granulométrique est représentée sur la fig.(2.3)
- Gravier granitique concassé (5-15) provenant de carrière Thénia de diamètre maximal égal à 15 mm, de masse volumique absolue 2.51 t/m^3 et de masse volumique apparente 1.5 t/m^3 . Sa courbe granulométrique est donnée sur la fig. (2.4).

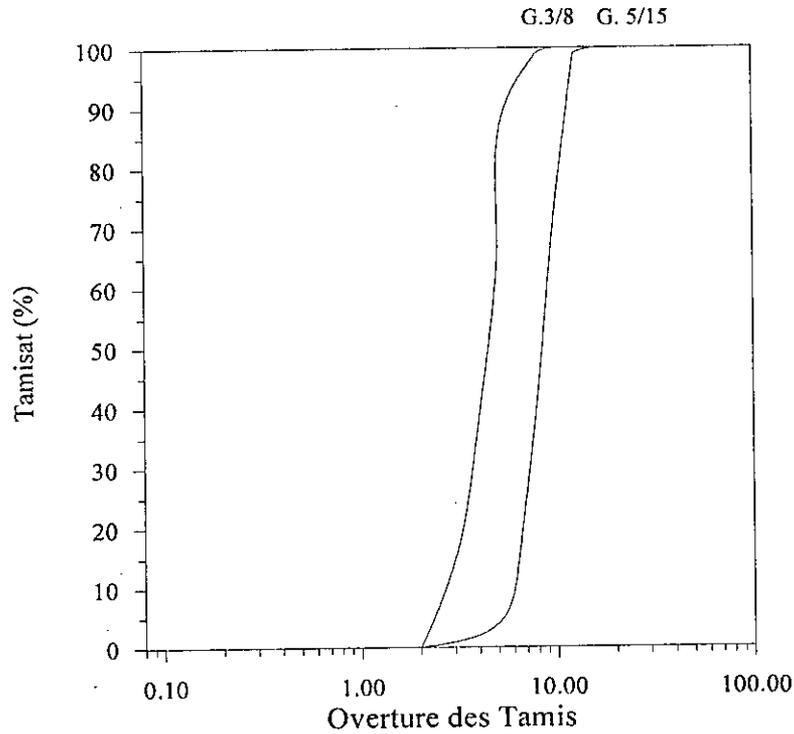


Fig.(2.3) : Courbe granulométrique du gravier de carrière Jobert

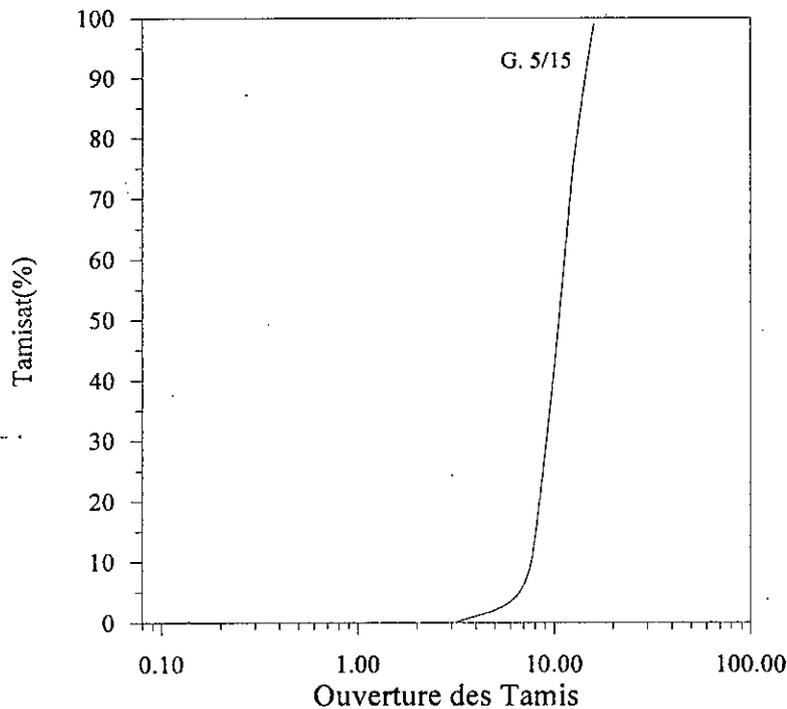


Fig.(2.4) : Courbe granulométrique du gravier de carrière Thénia

2-2 Méthodes d'analyses et d'essais des bétons et des mortiers

Afin de mettre au point un BHP nous avons procédé à une série d'essais sur bétons et mortiers. Ces essais sont en général tirés des normes AFNOR mis à part : le mode de malaxage de béton et mortier qui dépend de la réactivité de ciment utilisé - le type d'éprouvette utilisée (on a utilisé des éprouvettes cubiques qui ne nécessite aucun moyen de surfaçage à cause de problème d'approvisionnement en soufre utilisé pour le surfaçage des éprouvettes cylindriques) .

2-2-1 Confection du béton et du mortier

a - Le béton

Le béton ordinaire a été confectionné selon la méthode Dreux – Gorisse [48] qui se base sur les courbes granulométriques des différents composants du béton.

Le tableau (2.8) donne la composition du béton ordinaire avec sa résistance.

Le malaxage du béton suit les étapes suivantes :

- Placer le sable, le liant (ciment + ajout) et le gravier dans le malaxeur ;
- Malaxer à sec pendant une minute ;

- Introduction de 3/4 d'eau avec la moitié du superplastifiant, puis malaxer pendant 1 mn 30s ;
- Introduction de la deuxième partie du superplastifiant, puis malaxer pendant 30 secondes ;
- Introduction de la partie d'eau restante puis malaxer pendant 30 secondes
- Remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation. Le malaxage étant terminé, on procède aux essais sur béton frais, puis on remplit les moules à raison de trois couches avec un compactage sur table vibrante.
- 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 à l'air libre, puis conservées dans l'eau à $20 \pm 2^\circ \text{C}$ ou bien à l'air libre selon le type d'essai jusqu'à la date du test.

b- Mortier

Le travail consiste à préparer un mortier 1/3 normalisé, pour la fabrication d'éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm, à raison de six échantillons par essai. La quantité nécessaire pour un moule (3 éprouvettes) est indiquée dans le tableau (2.9)

L'opération de malaxage est d'une grande importance car elle influe de façon notable sur le produit final. La préparation du mortier a été effectuée selon les étapes suivantes et en utilisant un malaxeur automatique normalisé, à axe vertical, à deux vitesses et de capacité 5 litres.

- Malaxage à sec des constituants (sable, ciment, ajouts).
- Introduction de 3/4 d'eau avec la moitié du fluidifiant suivie d'un malaxage de 1 mn 30s ;
- Ajout de la quantité d'eau restante avec la moitié du fluidifiant suivie d'un malaxage final de 2 mn ;
- Remplissage des moules par couches successives ;
- Vibration sur la table à secousses pendant 1 mn ;
- La moitié du nombre de ces éprouvettes sera conservée dans l'eau ($T=20^\circ \text{C}$), l'autre moitié sera conservée à l'air ambiant du laboratoire ($T=25^\circ \text{C}$).

Composants	Liant	Sable	Gravier		Eau	E/C	Résistance à la compression (Mpa)	
			3/8	8/15			7 Jours	28 Jours
Quantité en (KG)	425	617	182	1003	212.5	0.5	27	35

Tableau (2.8) : Composition du béton par m³

Sable	1350 g
Ciment	450 g
Pourcentage de chaque ajout à incorporer dans le mortier (laitier, pouzzolane, fumée de silice)	5% =22.5 g 10%=45 g 15 % =67.5 g 20 % =90 g
Adjuvant	2 % de (C+ A)=9 g

Tableau (2.9) : Composition du mortier

Où (C+ A) : Est le ciment plus ajout (laitier, pouzzolane, fumée de silice) ;

E/C : est le rapport eau sur ciment plus ajout.

c- Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes à tester ont été conservées selon le type d'essai :

- Dans l'eau douce à $20 \pm 2^\circ \text{C}$, l'humidité relative (H.R) est alors de l'ordre de $95 \pm 2\%$.
- A l'air libre (conditions du laboratoire) à $25 \pm 5^\circ \text{C}$,

2-2-2 Essais physico-mécaniques

2-2-2-1 Essais sur les liants

Ces essais ont été effectués uniquement sur les ajouts (laitier-pouzzolane)

a- Masse volumique apparente en g/cm^3

La mesure de la masse volumique apparente consiste à verser le matériau pulvérulent à l'état sec en le disposant sans tasser par couches horizontales, dans un récipient de volume connu. L'excès est arasé à l'aide d'une règle, la masse volumique apparente est alors donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V_{app}} \quad (2-1)$$

Avec

- M = masse de l'échantillon en gr
- V_{app} = volume du récipient en cm^3

b- Masse volumique absolue en g/cm^3

La méthode utilisée est celle du densimètre de Lechatelier qui consiste à :

- Remplir le densimètre jusqu'au niveau 'o' avec du benzène.
- Y verser une masse de 64g de l'échantillon.
- Lire directement le volume, (v_{abs}) en cm^3 .

La masse volumique absolue sera donnée par :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_{abs}} \quad (2-2)$$

Avec :

- M = masse de l'échantillon en gr
- V_{abs} = volume absolu de l'échantillon en cm^3 .

c- Finesse de mouture (ssb) en cm²/g

Pour la mesure de la surface spécifique le permeabilimètre de Blaine est utilisé. Il consiste à calculer le débit d'air susceptible de passer dans la poudre préalablement ramenée à une certaine compacité.

La surface spécifique est calculée par la relation suivante :

$$SSB = \frac{K\sqrt{e^3}\sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\pi}} \quad (2-3)$$

avec :

- K = Constante de l'appareil (K =22.66)
- ρ = Masse volumique absolue en g/cm³.
- e = Porosité (e=0.5).
- 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.

d- Teneur en eau

La mesure de la teneur en eau consiste à :

- Peser une certaine quantité de l'échantillon (P₁ en Kg).
- La sécher dans l'étuve à 105°C jusqu'à un poids constant (P₂ en Kg).
- La teneur en eau est alors donnée par l'expression suivante :

$$\omega = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100 \quad (2-4)$$

2-2-2-2 Essais sur béton et mortier frais**a- Mesure de la consistance**

La mesure de la consistance est obtenue grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ou le slump-test (NFP 18451), qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches piquetées à raison de 25 coups par couche avec un piquet de φ 16 mm.
- Retirer le moule lentement et mesurer l'affaissement en (cm)

b- Mesure de la maniabilité

La mesure de la maniabilité des mortiers est définie comme le temps d'écoulement dans un couloir vibrant sous l'action d'une vibration donnée. Elle se résume aux étapes suivantes :

- Vider complètement le malaxeur ; étaler la gâchée sur une surface plane, dure et non absorbante.
- Déverser l'échantillon sur la surface de travail et araser à la règle.
- Enlever la cloison amovible, puis mesurer le temps d'écoulement du mortier jusqu'au trait de référence.

c- Mesure de l'air occlus

Elle se fait à l'aide d'un aréomètre sur une quantité de béton de 6 litres pour les bétons courants (norme NBN 748-02, 03 et 20).

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.

2-2-2-3 Essais sur béton et mortier durcis

a- 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 contrainte.

Des recherches réalisées par F de Larrard [[in 39]] montrent que le surfaçage au soufre n'est pas adapté pour les bétons à hautes performances à cet effet une boîte à sable est confectionné. Le seul inconvénient de ce type de surfaçage est la durée d'exécution de l'opération qui est un peu long.

Généralement pour les éprouvettes cubiques aucun moyen de surfaçage n'est utilisé. Dans notre étude nous avons utilisé des éprouvettes cubiques à cause de problème d'approvisionnement en soufre.

b- Essais de résistance

- le béton

Conformément aux normes NFP 406, l'essai de compression simple s'effectue sur des éprouvettes cubiques de 15 cm de côté. La presse utilisée est une machine électronique, de capacité maximale 3000 KN. Sa mise en marche s'effectue avec une vitesse de chargement liée à la forme et la dimension de l'éprouvette (9 KN/s pour $16 \times 32 \text{ cm}^2$ et 12 KN/s pour les cubiques de côté 15 cm).

Par contre l'essai de résistance à la flexion, est réalisé sur des éprouvettes prismatiques

de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$. L'essai est effectué sur 4 points avec une vitesse de 0.14 KN/s. On note que les vitesses de chargements sont normalisées.

- Le mortier

Selon les mêmes normes l'essai de traction par flexion est réalisé sur des éprouvettes en mortier de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. Par ailleurs l'essai de compression s'effectue sur des éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}$ obtenus lors de l'essai de flexion sur les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. La vitesse de chargement est de 1 KN/s.

c- Module d'élasticité et coefficient de poisson

Compte tenu des progrès réalisés en extensiométrie grâce à l'électronique, les mesures deviennent de plus en plus précises de nos jours.

Le module d'élasticité statique en compression est déterminé soit par la différence de valeurs des déformations obtenues par chargements successifs, soit graphique en exploitant la courbe contrainte- déformation.

Le module d'élasticité E est la valeur de la pente à l'origine de cette courbe. C'est la méthode que nous avons utilisée. Le module d'élasticité statique s'exprime par la relation suivante :

$$E_{ST} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-5)$$

avec :

- ε : la déformation

- σ : la contrainte en MPa

Les déformations longitudinales et transversales sont déterminées à l'aide d'un pont d'extensométrie, les jauges utilisées sont de type PL100 de longueur 10 cm.

La section d'éprouvette étant connue, on peut déduire facilement la contrainte à partir de la force lue directement sur le cadran de la machine d'essai.

Enfin le coefficient de poisson, qui exprime le rapport de la déformation transversale à

la déformation longitudinale est donnée par l'expression suivante :

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (2-6)$$

avec :

- ε_t = déformation transversale
- ε_l = déformation longitudinale

d- Essai ultrasonique

Le degré de compacité, le taux de fissuration ou la détection des dommages causés par le gel, le feu ou l'écart de température, ne peuvent être illustrés que par un essai non destructif tel que l'essai ultrasonique par exemple. Cet essai consiste à mesurer la vitesse de l'onde longitudinale d'une impulsion sonore à travers le béton. L'appareil utilisé fonctionne sur secteur ou sur batterie. Il comporte essentiellement une boîte de mesure, deux têtes (émetteur, récepteur) et de la pâte de contact visqueuse qui facilite la transmission du son.

Deux méthodes sont possibles pour mesurer la vitesse du son.

- Mesure en transparence

La meilleure façon de mesurer la vitesse de propagation est de faire la mesure à travers le béton. Cette mesure consiste à presser les deux têtes de mesures sur les points du béton, en vis à vis, en utilisant la pâte de contact. La surface du béton doit être raisonnablement plane et exempte de poussière.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en micro-seconde (μsec). La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante :

$$V = \frac{S}{t} 10^6 \quad (2-7)$$

où :

- V = vitesse de propagation en m/s
- S = distance entre les têtes en m
- T = temps en s

Pour un béton normal on enregistre une vitesse du son variant entre 4000 à 4800 m/s.

- Mesure en surface

En cas d'impossibilité de mesure en transparence, on procède par une mesure en surface. Cette méthode consiste à maintenir la tête émettrice fixe et déplacer l'autre tête réceptrice sur la même face du béton de 5 ou 10 cm après chaque mesure.

Les résultats de mesures peuvent être reportés sur un diagramme distance/temps pour tracer une droite dont la pente donneront la vitesse de propagation du son.

Par l'intermédiaire de la vitesse de propagation du son, on peut déterminer plusieurs paramètres intéressants, à titre d'exemple, la résistance à la compression et le module

d'élasticité dynamique. Ce dernier est calculé par l'expression suivante :

$$E_{DYN} = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2-8)$$

où :

- V = vitesse de propagation longitudinale du son en m/s.
- ρ = masse volumique du béton en Kg/m³
- ν = coefficient de poisson du béton

e- Porosité

La détermination de la porosité consiste essentiellement en des mesures d'absorption d'eau à la pression atmosphérique.

La mesure de l'absorption capillaire se déroule comme suit :

L'éprouvette déjà conservée dans l'eau à 20± 2° C, doit être déshydratée à l'étuve. Elle doit subir un sciage sur une face et un traitement imperméabilisant sur les autres faces à l'aide de résine époxy ou de paraffine. Dans notre cas, la paraffine a été utilisée. L'éprouvette est ensuite posée dans un bac contenant du sable saturé d'eau sur sa face sciée. On mesure ensuite en fonction de temps, l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule :

$$AC = \frac{100 \cdot P}{S \sqrt{t}} \quad (2-9)$$

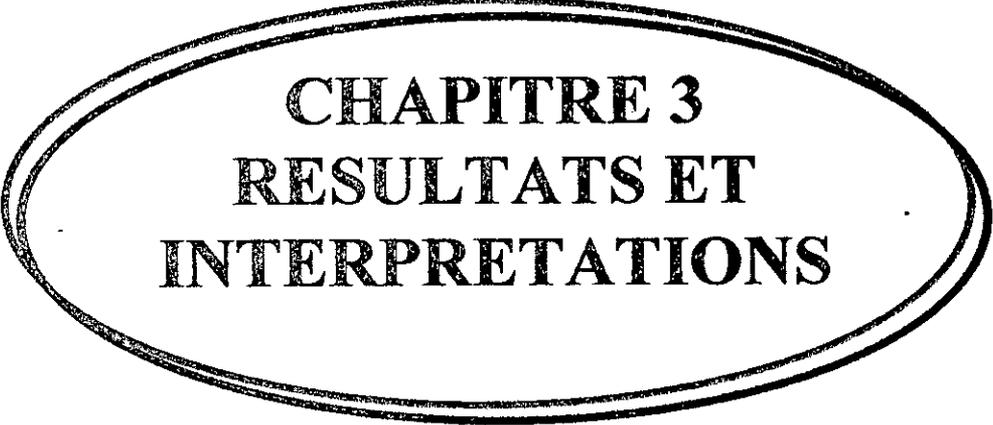
où

- p = poids d'eau absorbée en g
- s = surface de la face sciée en cm²
- t = temps en heures (t=72 heures pour notre cas)

Conclusion

Les essais réalisés dans cette partie ont confirmés que les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux utilisés sont proches de celles requises pour l'élaboration d'un béton à hautes performances. En effet le gravier est de nature silico-calcaire de forme presque cubique. Aussi on a utilisé un sable de rivière de module de finesse voisin de 3 et qui appartient au fuseau granulaire des sables grossiers. Ce sable améliore la résistance de béton mais il affaiblit sa maniabilité.

Le ciment de Ain-Kebira est riche en silice. Il appartient à la classe des CPJ45. Pour améliorer les propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques de laitier et de la pouzzolane on les a broyé dans un broyeur à boulet jusqu'à une surface spécifique supérieure à celle de ciment. Les résultats de l'incorporation de ces ajouts dans les bétons sont présentés au chapitre suivant.



CHAPITRE 3
RESULTATS ET
INTERPRETATIONS

CHAPITRE 3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3-1 Introduction

Après avoir étudié les propriétés physico-mécaniques de différents constituants de béton qu'on va utiliser pour l'élaboration d'un BHP. Le présent chapitre expose les différents résultats expérimentaux obtenus avec le laitier, la pouzzolane et la fumée de silice, incorporés dans une pâte de mortier ou de béton. Une interprétation des résultats et une comparaison avec ceux d'un béton ordinaire sont également présentés dans ce chapitre.

3-2 Optimisation du dosage en fluidifiant

Vu le nombre élevé des paramètres qui influent sur les propriétés de béton, Une optimisation directe du dosage en fluidifiant conduirait à plusieurs gâchées. Or c'est dans la pâte de ciment que résident les composants spécifiques du B.H.P. d'où l'idée de procéder à des essais sur coulis. Les essais sur béton venant simplement en vérification.

Cet essai appelé couramment « méthode des coulis » consiste à faire varier le dosage en fluidifiant et mesurer le temps d'écoulement au cône de Marsch.

La fig.(3.1) donne le dosage optimal du fluidifiant pour 5 % de laitier (en annexe 5-6-7-8 on trouve les ces courbes de saturation pour les autres ajouts). Le tableau(3-1) donne le dosage optimal de superfluidifiant pour chaque ajouts.

%	5%	10%	15%
Ajouts			
Laitier	2	1.5	2.5
Pouzzolane	2.5	1.5	2.5
Fumée de silice	2	1.9	2

Tableau(3.1) : dosage de saturation en superfluidifiant pour chaque ajout.

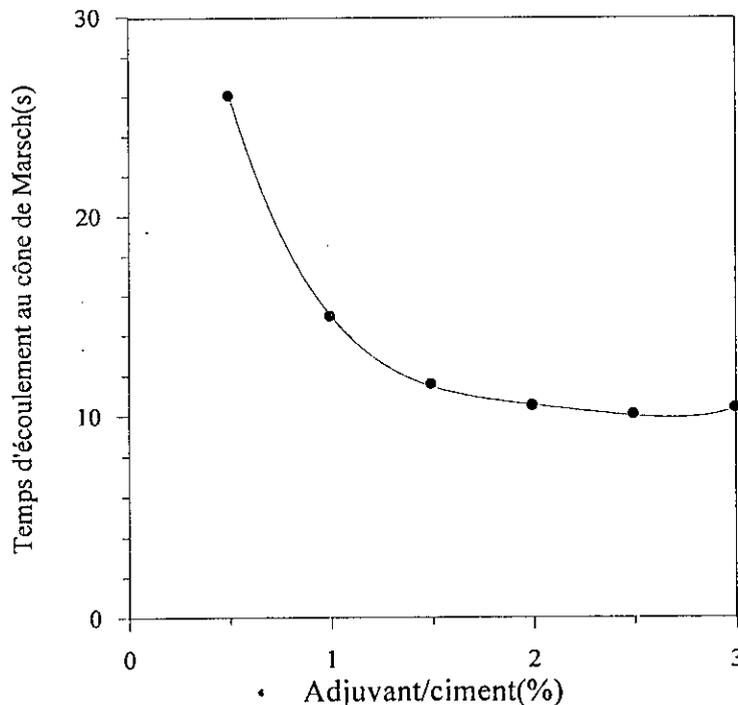


fig.(3.1) : Coulis n°1 ciment + 5 % laitier

3-2-1 Discussion et interprétation

Ces expériences montrent que le temps d'écoulement au cône de Marsch diminue avec l'accroissement du dosage en fluidifiant jusqu'à une valeur appelée «dosage de saturation» à partir duquel le temps d'écoulement reste constant, et une augmentation du dosage en fluidifiant au-delà de cette valeur n'a aucun effet sur la maniabilité des coulis.

La valeur du dosage de saturation varié entre 1.5 % et 3% pour tous les coulis. Après des essais de vérification sur béton on a constaté qu'au-delà d'un dosage du fluidifiant égal à 2% de poids du ciment un retard de prise important est remarqué qui peut aller jusqu'à 36 heures, et une forte tendance à la ségrégation du béton.

On a remarqué aussi pour que un même dosage en eau les bétons au laitier ou à la pouzzolane présentent une plus grande maniabilité que les bétons à la fumée de silice. Cette dernière constatation est due à la très grande surface spécifique de la fumée de silice (de l'ordre de 150000 g/cm^2) comparée à celle des laitiers et pouzzolanes.

Par la suite dans tous les essais réalisés sur mortier et béton on va travailler avec un pourcentage de plastifiant(supercontact) égal à 2 %.

3-3 Optimisation des ajouts

Afin d'examiner l'influence du granulats sur la résistance à la compression et la

détermination du dosage optimal en ajouts (laitier, pouzzolane, fumée de silice) on a tout d'abord effectué des essais sur mortiers.

3-3-1 Mortier au laitier

a- Maniabilité

Cette grandeur est mesurée avec le maniabilimètre à mortier, les résultats de cet essai, fig.(3.2), tableau 1(annexe 10) montrent que la maniabilité des mortiers avec laitier est meilleure que celle des mortiers sans laitier, une augmentation du dosage en laitier permet d'améliorer davantage la maniabilité du mortier.

Ceci permet d'affirmer que l'effet filler du laitier joue un rôle important dans l'amélioration de la maniabilité du mortier à l'état frais.

b- Résistance à la compression

L'essai de résistance à la compression est réalisé sur des éprouvettes du mortier $4 \times 4 \times 16$ cm confectionnées conformément au programme d'essais rapporté au chapitre précédent.

les résultats sont représentés sur les fig.(3.3) et (3.4) dans les deux cas de conservation suivant :

- conservation à l'air libre
- conservation dans l'eau douce

Les résultats de ces essais montrent clairement qu'aux jeunes âges les mortiers contenant du laitier et du fluidifiant ont des résistances inférieures à celles du témoin. Ces résistances augmentent rapidement entre 7 et 28 jours et dépassent dans certains cas celles données par le témoin. Cela est interprété comme suit : Aux jeunes âges, dans les bétons au laitier, l'hydratation du ciment se produit en premier lieu en donnant les hydrates C-S-H et un excès de chaux qui active l'hydratation du laitier.

La nécessité de la présence de la chaux pour l'hydratation du laitier fait que ce dernier ne réagit que tardivement. Cependant, la cinétique du développement des ciments au laitier est supérieure à celle du ciment, procurant aux bétons au laitier une résistance mécanique à long terme, plus élevée que celle des bétons ordinaires.

Notons que la quantité optimale du laitier du point de vue résistance du mortier est 15%.

Les fig.(3.3) et (3.4) indiquent clairement que la résistance à la compression du mortier au laitier dépend du mode de conservation. Ainsi la résistance augmente de 20% quand on passe d'un mortier conservé à l'air libre à un autre conservé à l'eau.

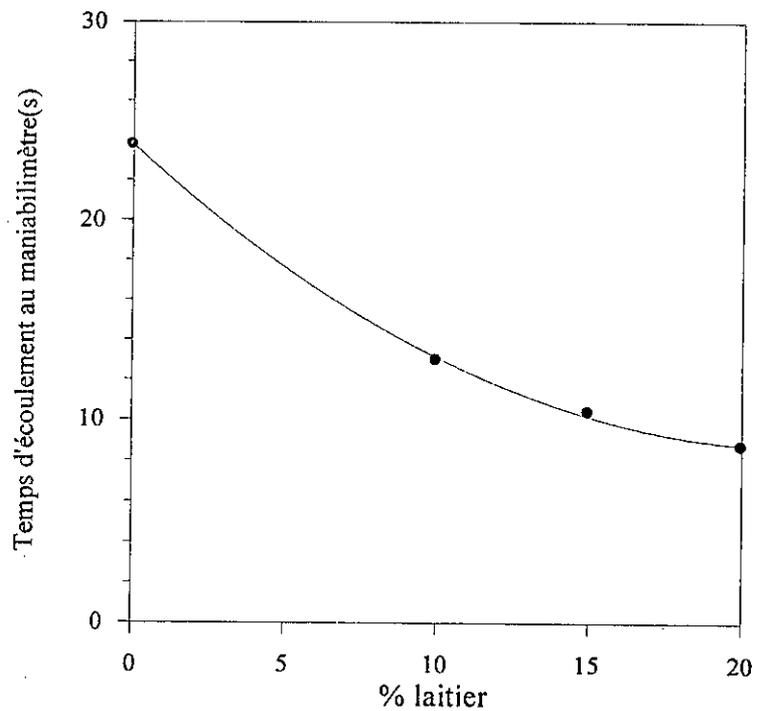


Fig.(3.2) : Evolution de la maniabilité en fonction du pourcentage du laitier sur mortier

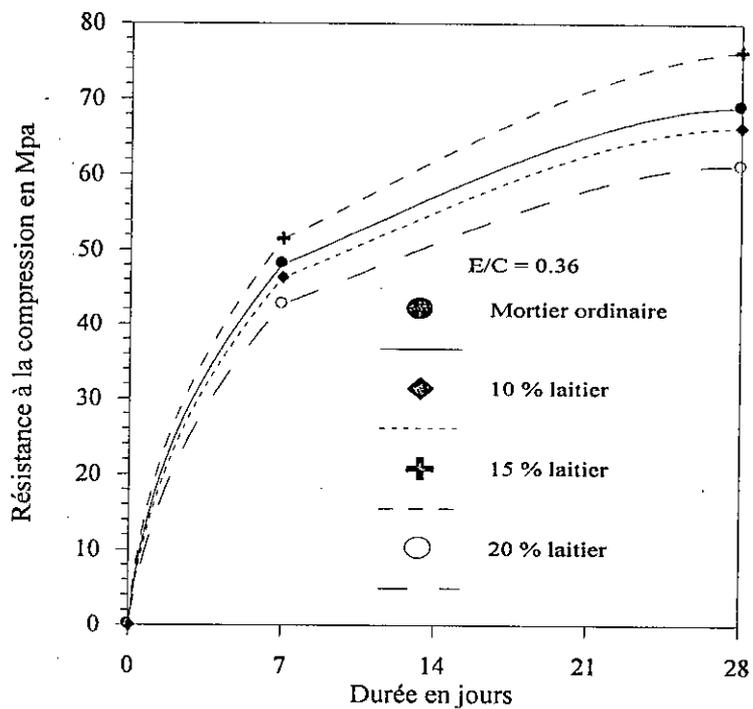


Fig.(3.3) : Résistance à la compression du mortier au laitier conservé 28 jours dans l'eau

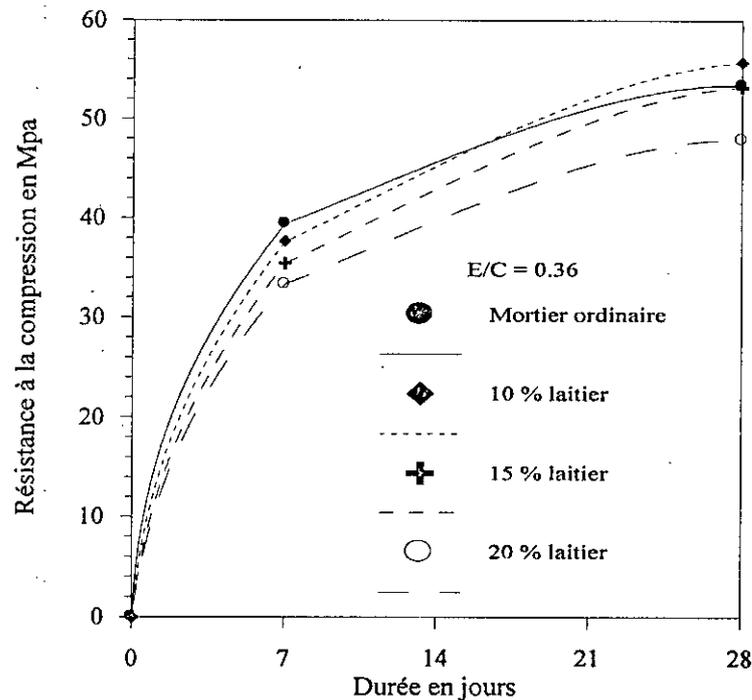


Fig.(3.4) : Résistance à la compression du mortier au laitier conservé 28 jours à l'air libre

3-3-2 Mortier à la pouzzolane :

a-Maniabilité

On obtient des résultats similaires à ceux du mortier avec laitier. Ainsi, la maniabilité augmente en même temps que le dosage en pouzzolane dans le mortier,

b- Résistance à la compression

Les résultats de ces essais montrent clairement qu'aux jeunes âges les mortiers contenant de la pouzzolane et du fluidifiant ont des résistances comparables à celles du témoin.

Ces résistances augmentent rapidement entre 7 et 28 jours et dépassent largement celles données par le témoin, fig.(3.6, 3.7), tableau 2 (annexe 10)

Notons que la quantité optimale de pouzzolane du point de vue résistance du mortier est observée à partir de 5 % et que la pouzzolane améliore la résistance par rapport au laitier. Par exemple pour un dosage en pouzzolane de 5% la résistance à la compression est de 79 Mpa.

La conservation des mortiers à la pouzzolane dans l'eau douce améliore la résistance par rapport aux mortiers conservés à l'air libre, fig.(3.5). Cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau de la masse du béton, suite à son évaporation à l'air libre, entraînant un affaiblissement de la cinétique d'hydratation qui

provoque une diminution de la résistance[23]. En conclusion on peut dire que la pouzzolane est un bon ajout pour l'élaboration d'un béton à hautes performances.

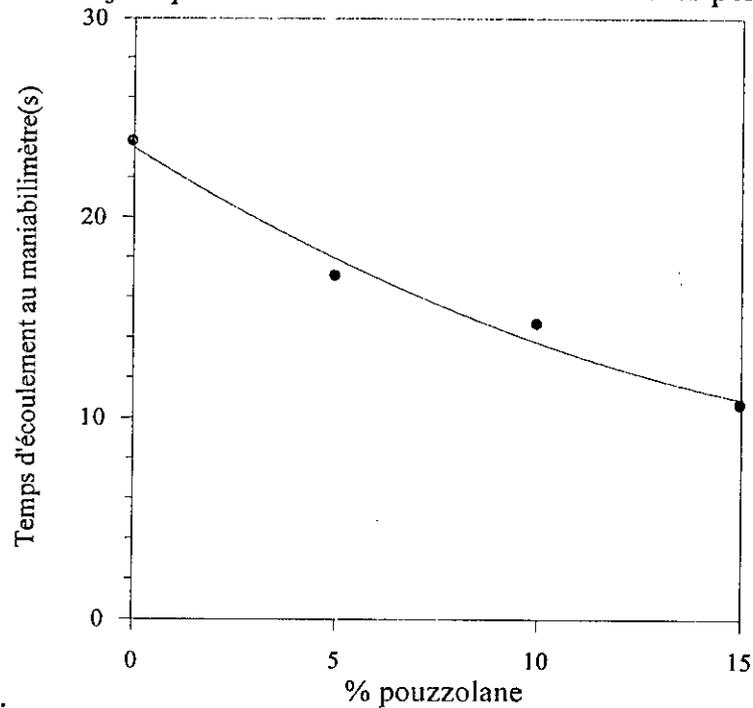


Fig.(3.5) : Evolution de la maniabilité en fonction du pourcentage de pouzzolane sur mortier

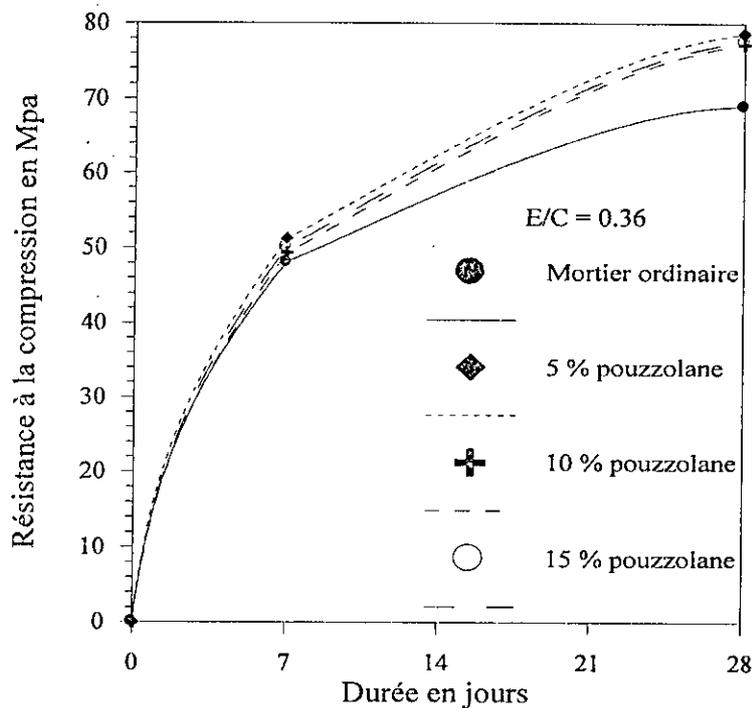


Fig.(3.6) : Résistance à la compression du mortier à la pouzzolane conservé 28 jours dans l'eau

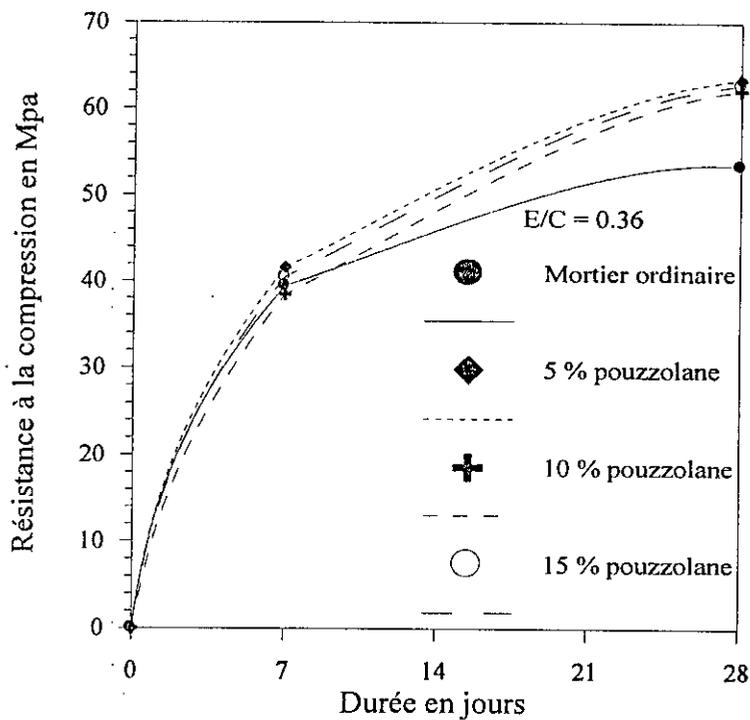


Fig.(3.7) : Résistance à la compression du mortier à la pouzzolane conservé 28 jours à l'air libre*

3-3-3 Mortier avec fumée de silice

a- Maniabilité

Comme on le voit sur la fig.(3.8) une augmentation du dosage en fumée de silice provoque une nette amélioration de la maniabilité de ces mortiers par rapport au témoin.

Néanmoins on constate lors du malaxage qu'elle est moins bonne par rapport aux mortiers utilisant comme ajout du laitier ou de la pouzzolane. Cela est dû à la très grande surface spécifique des grains de la fumée de silice.

b- Résistance à la compression

Les résultats représentés sur les fig.(3.9) et (3.10), tableau 3 (annexe 10) montrent que la résistance des mortiers à la fumée de silice aux jeunes âges et à long terme est toujours plus grande que celle du témoin.

Notons que le dosage optimal de la fumée de silice du point de vue résistance à la compression est de 15 % et 20 % . Mais par soucis d'économie nous optons pour 15 % . Dans ce cas on obtient une amélioration appréciable de la résistance par rapport au mortier contenant du laitier ou de la pouzzolane(environ 10 %)

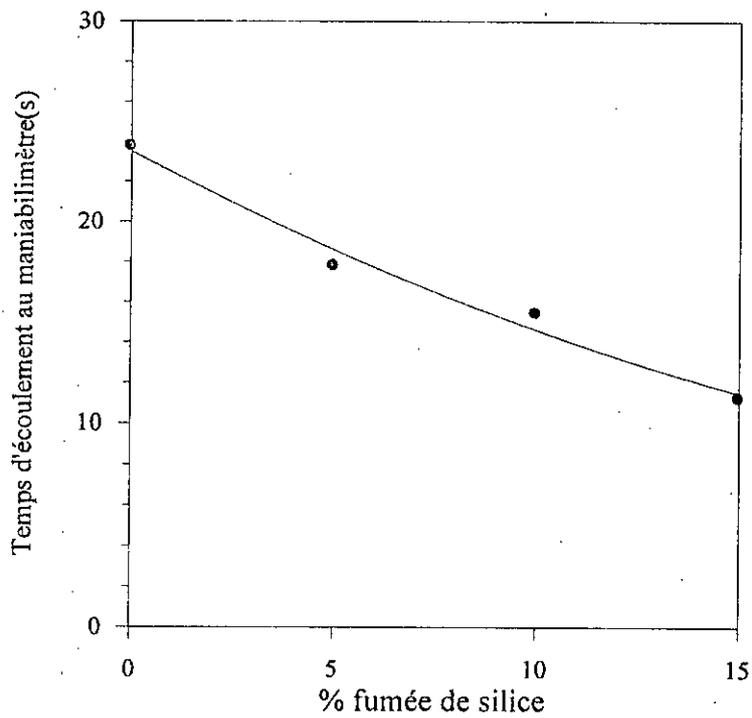


Fig.(3.8) : Evolution de la maniabilité en fonction du pourcentage de la fumée de silice sur mortier

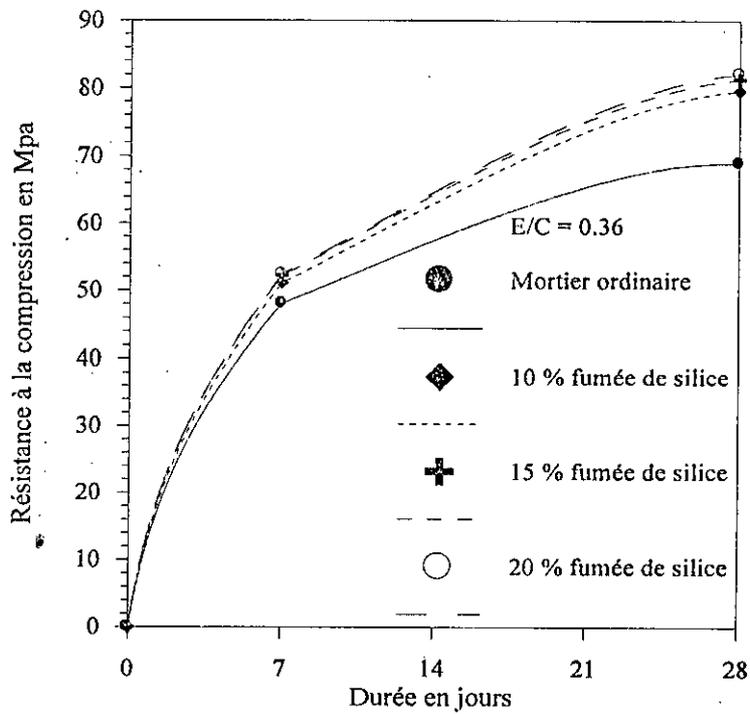


Fig.(3.9) : Résistance à la compression du mortier à la fumée de silice conservé 28 jours dans l'eau douce

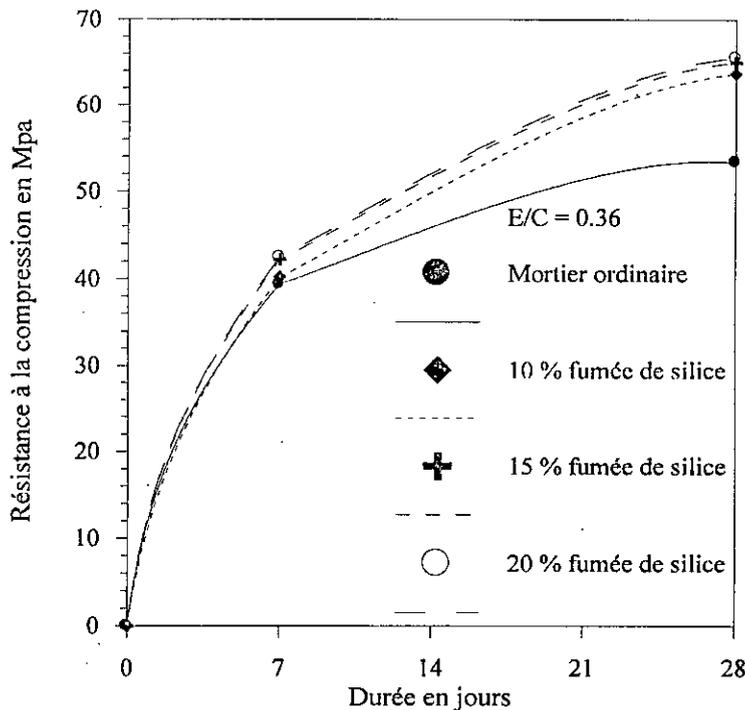


Fig.(3.10) : Résistance à la compression du mortier à la fumée de silice conservé 28 jours à l'air libre

Conclusion

Les essais sur mortiers ont montré que la résistance à la compression augmente avec le pourcentage d'ajouts dans le mortier jusqu'à une valeur optimale. Au-delà de cette valeur la résistance cesse d'augmenter et on constate par contre une diminution de la résistance. Ces résultats sont attribués aux propriétés pouzzolanique ou hydraulique de ces ajouts qui contribuent par la formation d'une phase liante (C-S-H) au renforcement des propriétés mécaniques de béton. Dans notre cas les mortiers avec 15 % de laitier, 10 % de pouzzolane et 15 % de fumée de silice donnent les meilleures résistances.

3-4 Essais sur béton frais

Afin de confirmer les analyse précédents nous avons procédé à des essais de vérifications sur béton frais dans un premier temps.

Les principaux essais effectués sur le béton sont les suivants :

- l'ouvrabilité déterminée par le cône d'ABRAMS
- le pourcentage d'air occlus déterminé par l'aréomètre
- La masse volumique mesurée par un récipient de volume connu.

Les résultats de ces essais sont donnés au tableau (3.2).

	Témoin	Laitier		Pouzzolane		Fumée de silice	
		10 %	15 %	10 %	15 %	10 %	15 %
Dosage du ciment (Kg)	425	425	425	425	425	425	425
E/(C+A)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Slump-test (cm)	8.5	9.2	9.3	8.7	8.9	8.7	8.8
% d'air occlus	2.8	2.7	2.5	2	1.65	2.6	2
Masse volumique (Kg/m ³)	24.1	24.4	24.4	24.9	24.9	24.9	24.9

Tableau (3.2) : Résultats d'essais sur béton frais

3-4-1 Discussion et interprétation

Pour un rapport E/C constant on peut constater que :

- la fluidité dans le béton frais augmente avec le pourcentage de l'ajout
- le taux de l'air occlus dans le béton frais diminue avec le pourcentage de l'ajout
- la masse volumique des bétons avec ajout est plus grande que celle des bétons ordinaires.

3-5 Essais sur béton durci

Après avoir confirmé les résultats trouvés sur mortier et béton frais une vérification sur béton durci est réalisée. Rappelons que le superfluidifiant utilisé est le supercontact avec un dosage égal à 2 %.

3-5-1 Effet du régime de cure sur la résistance mécanique du béton au laitier et fluidifiant

3-5-1-1 Résistance à la compression

Les éprouvettes utilisées sont des cubes de 150 mm de coté. Afin d'examiner l'influence de la cure sur la résistance à la compression, les bétons ont été traités de deux sortes différentes :

- cure normale dans l'eau douce à 20° C ;
- conservation à l'air libre à une température de 25° C

a- Conservation en cure normale dans l'eau douce

Les résultats de ce type de cure sont représentés sur la fig.(3.11), tableau 4 (annexe 11). Nous remarquons une augmentation continue de la résistance en fonction de l'âge. Aux jeunes âges le béton ordinaire présente une résistance mécanique supérieure à celle des bétons au laitier. Mais à long terme les bétons renfermant 10 % et 15 % de laitier développent une résistance supérieure à celle de béton ordinaire.

Ces résultats confirment la propriété latente de l'hydratation des bétons au laitier qui peut être interprétée comme suit :

Aux jeunes âges, dans les bétons au laitier, l'hydratation du ciment se produit en premier lieu en donnant les hydrates C-S-H et un excès de chaux qui active l'hydratation du laitier.

La nécessité de la présence de la chaux pour l'hydratation du laitier fait que ce dernier ne réagit que tardivement. Cependant, la cinétique du développement des ciments au laitier est supérieure à celle du ciment, procurant aux bétons au laitier une résistance mécanique à long terme, plus élevée que celle des bétons ordinaires.

b- Conservation à l'air libre

Les résultats sont représentés sur la fig.(3.12). La résistance à la compression des bétons au laitier conservés à l'air libre augmente d'une façon continue jusqu'à l'âge de 28 jours. On remarque que les bétons au laitier conservés à l'air libre présentent une résistance à la compression plus faible que celle des bétons conservés dans l'eau douce.

Cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau de la masse du béton, suite à son évaporation à l'air libre, entraînant un affaiblissement de la cinétique d'hydratation qui provoque une diminution de la résistance[23].

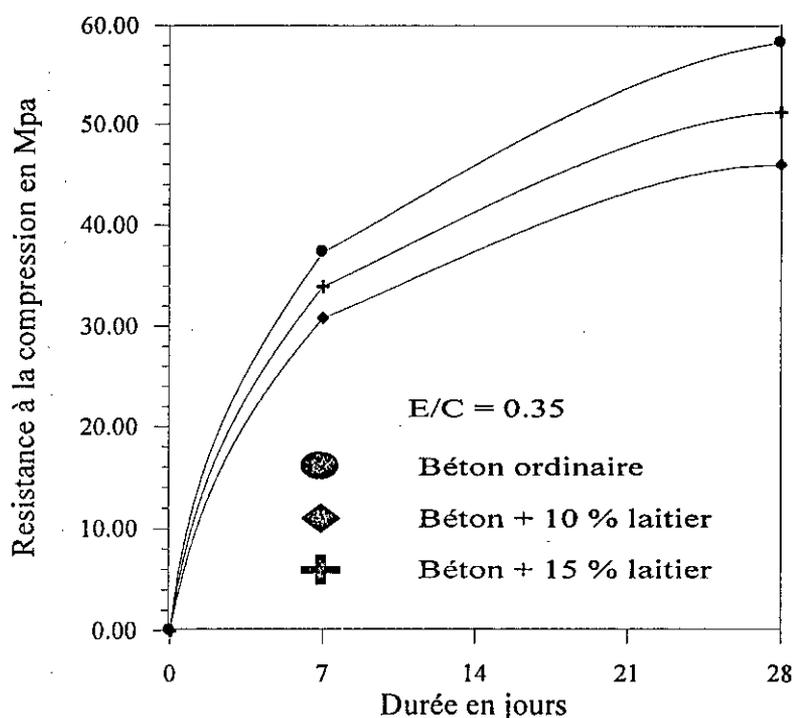


Fig.(3.11) : Résistance à la compression du béton au laitier conservé 28 jours dans l'eau douce

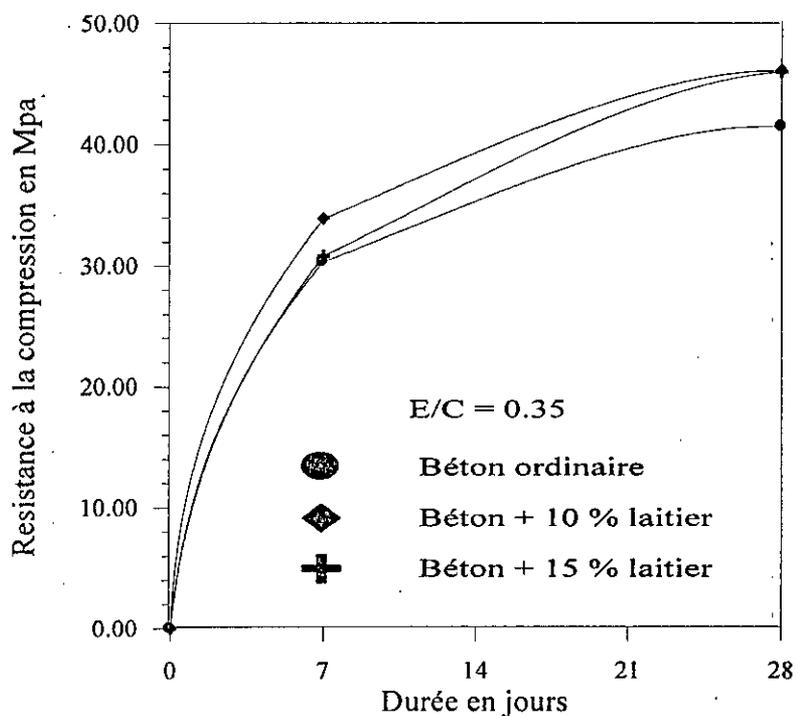


Fig.(3.12) : Résistance à la compression du béton au laitier conservé 28 jours à l'air libre

3-5-1-2 Résistance à la flexion

Les éprouvettes utilisées sont des prismes (7×7×28) cm. Les modes de conservation utilisés sont les mêmes que ceux décrits à la section précédente.

a- Conservation dans l'eau douce

D'après les résultats représentés sur la fig.(3.13) il apparaît clairement que la variation de la résistance à la flexion est semblable à celle de la résistance à la compression.

Aux jeunes âges le béton ordinaire est le plus résistant. A long terme les bétons contenant 10 % et 15 % de laitier développent la plus grande résistance à la flexion.

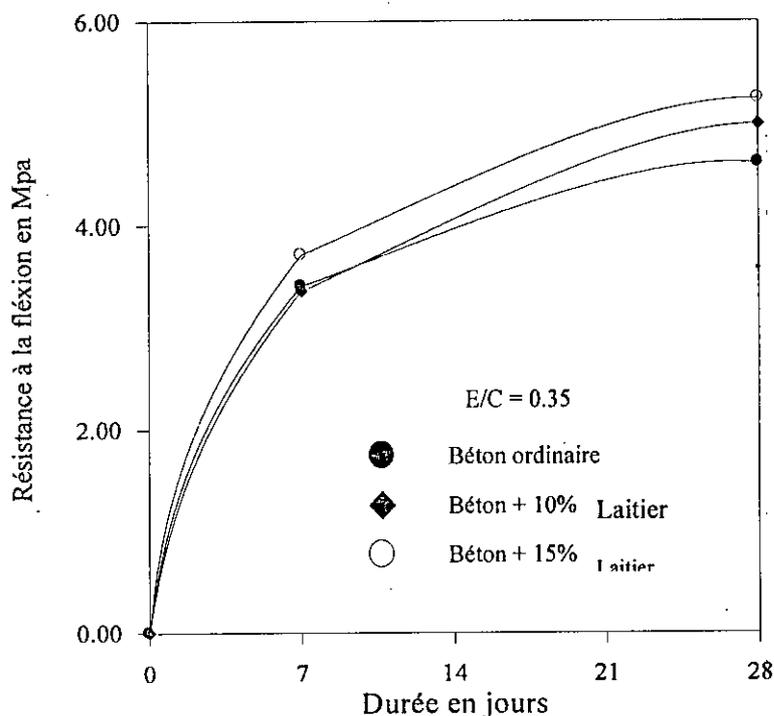


Fig.(3.13) : Résistance à la flexion du béton au laitier conservé 28 jours dans l'eau douce

b- Conservation à l'air libre

La fig.(3.14) indique clairement que les bétons au laitier conservés dans l'eau douce développent une plus grande résistance que celle des bétons ordinaires, cette réduction de la résistance est due à l'appauvrissement en eau suite à son évaporation à l'air libre de la masse de béton, entraînant un affaiblissement de la cinétique d'hydratation qui provoque une diminution de la résistance.

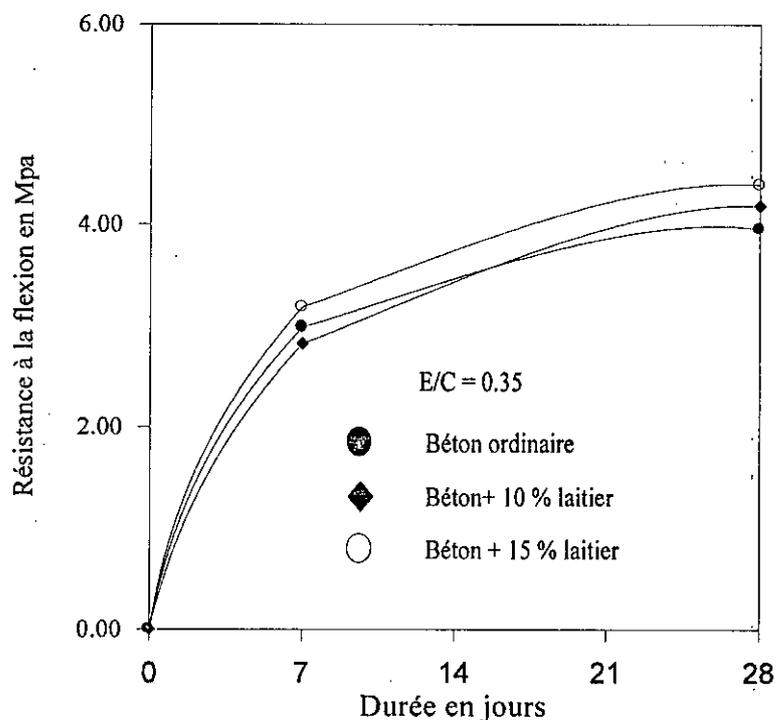


Fig.(3.14) : Résistance à la flexion du béton au laitier conservé 28 jours à l'air libre.

3-5-1-3 Conclusion sur la résistance du béton au laitier avec plastifiant

Avec le laitier d'El-Hadjar on obtient une résistance de l'ordre de 50 Mpa qui représente la limite inférieure des bétons à haute résistance. Dans ces essais on constate que l'ajout du laitier procure une augmentation de résistance près de 10 %. C'est pour cela que l'on a choisi de remplacer le laitier par la pouzzolane de Beni-Saf afin d'atteindre notre objectif de béton à hautes performances.

3-5-2 Béton à la pouzzolane

3-5-2-1 Résistance à la compression

Les fig.(3.15, 3.16), tableau 5 (annexe 11) montrent que la résistance du béton contenant de la pouzzolane augmente d'une façon continue avec l'âge du béton. Elle est comparable à celle du béton ordinaire aux jeunes âges. Mais à long terme la résistance à la compression dépasse largement celle du témoin pour un dosage de 10 % en pouzzolane, par contre pour 15 % de pouzzolane elle est inférieure à celle de témoin. Cela est expliqué par le fait que le ciment utilisé dans ce travail est un CPJ45 qui renferme de la pouzzolane. Toutefois le pourcentage d'ajouts en béton ne doit pas dépasser les 30 %.

Les bétons à la pouzzolane conservés dans l'eau douce développent une résistance supérieure de 20 % à celle du béton conservé à l'air libre.

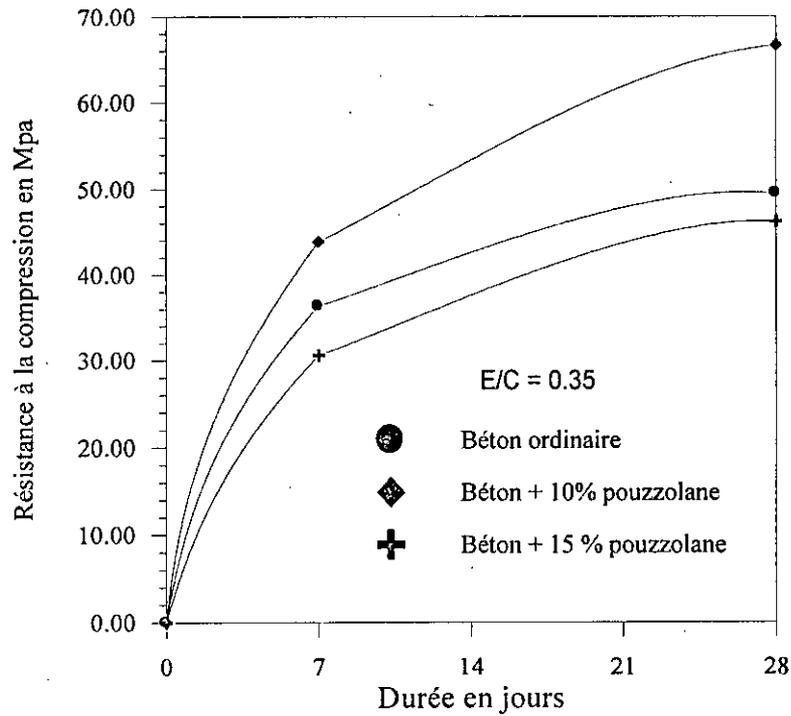


Fig.(3.15) : Résistance à la compression du béton à la pouzzolane conservé 28 jours dans l'eau douce

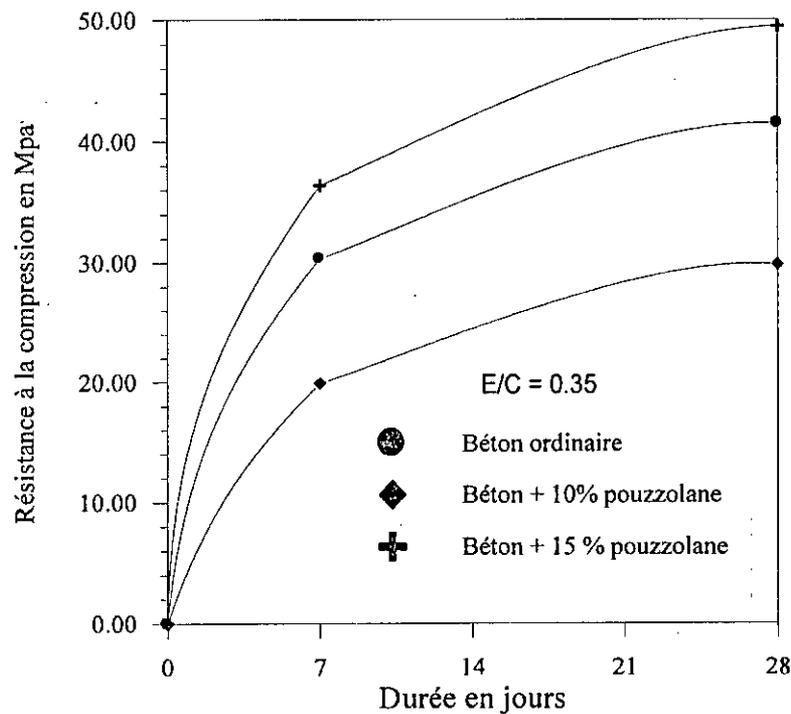


Fig.(3.16) : Résistance à la compression du béton à la pouzzolane conservé 28 jours à l'air libre

3-5-2-2 Résistance à la flexion

Sur la fig.(3.17) on remarque que la résistance à la flexion augmente d'une façon continue avec l'âge du béton, elle suit la même variation de la résistance à la compression. Aux jeunes âges le béton témoin a une résistance comparable à celle des bétons à la pouzzolane. A long terme la résistance à la flexion des bétons à la pouzzolane (10 %) dépasse largement celle du béton témoin.

L'effet de la cure est représenté sur la fig.(3.18) où la cure humide donne une résistance à la flexion plus grande que celle des éprouvettes conservées dans la cure sèche.

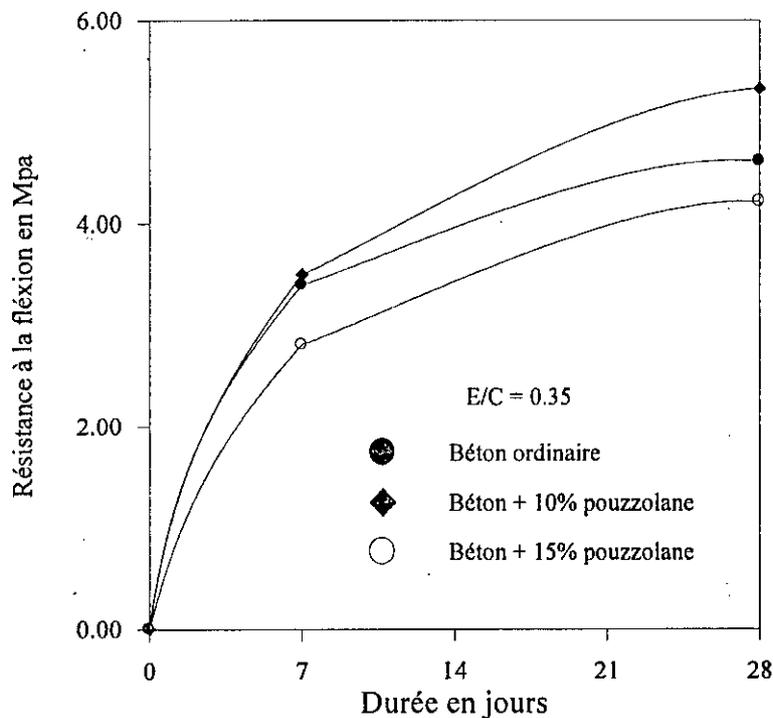


Fig.(3.17) : Résistance à la flexion du béton à la pouzzolane conservé 28 jours dans l'eau douce.

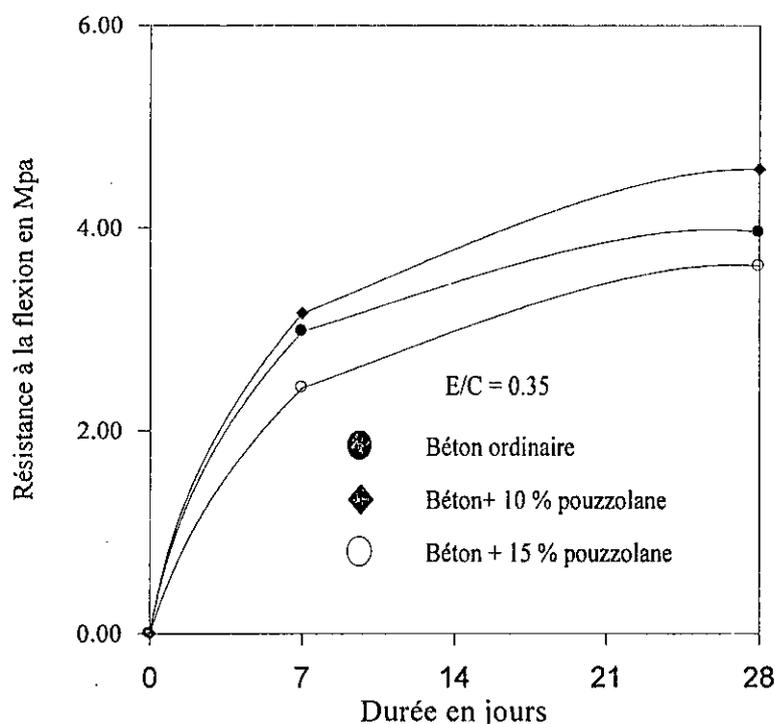


Fig.(3.18) : Résistance à la flexion du béton à la pouzzolane conservé 28 jours à l'air libre.

3-5-2-3 Conclusion sur la résistance du béton à la pouzzolane avec plastifiant

Avec la pouzzolane on a fait un pas important vers l'obtention de bétons à haute résistance. Toutefois cette résistance reste toujours difficile à atteindre et elle ne dépasse pas 70 Mpa.

Pour montrer l'efficacité de la pouzzolane on s'est proposé de substituer la pouzzolane par la fumée de silice bien que cette dernière n'est pas disponible localement. Cette dernière opération revêtue un caractère comparatif de l'effet de la pouzzolane par rapport à la fumée de silice connue par son pouvoir important sur le béton.

3-5-3 Béton à la fumée de silice et plastifiant

3-5-3-1 Résistance à la compression

La courbe de la résistance suit la même allure que celles des bétons à la pouzzolane ou au laitier. Toutefois elle dépasse largement celle du béton ordinaire aux jeunes âges et à long terme comme représentée sur les fig.(3.19, 3.20), tableau 6 (annexe 11).

La conservation des éprouvettes dans l'eau douce améliore la résistance à la

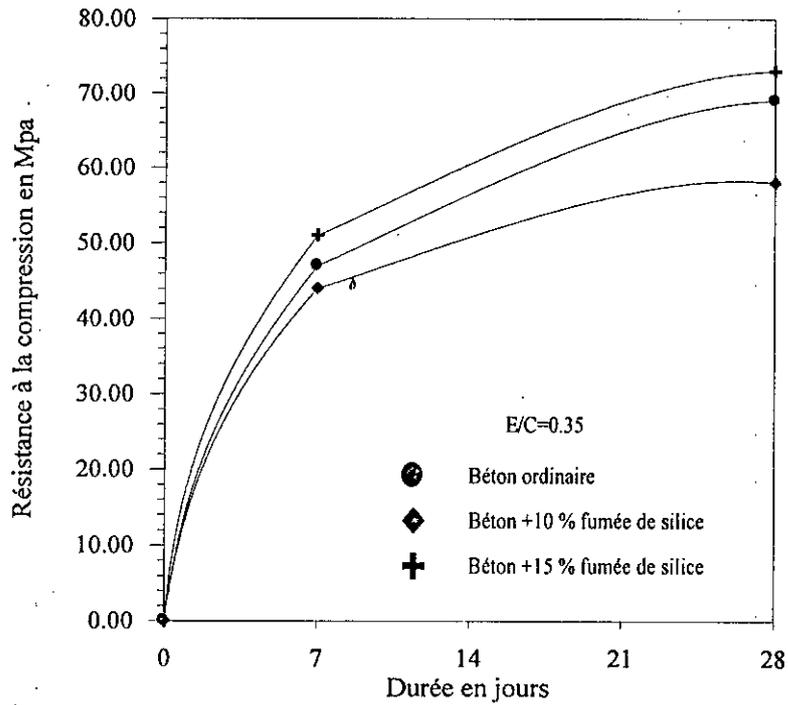


Fig.(3.19) : Résistance à la compression du béton à la fumée de silice conservé 28 jours dans l'eau douce.

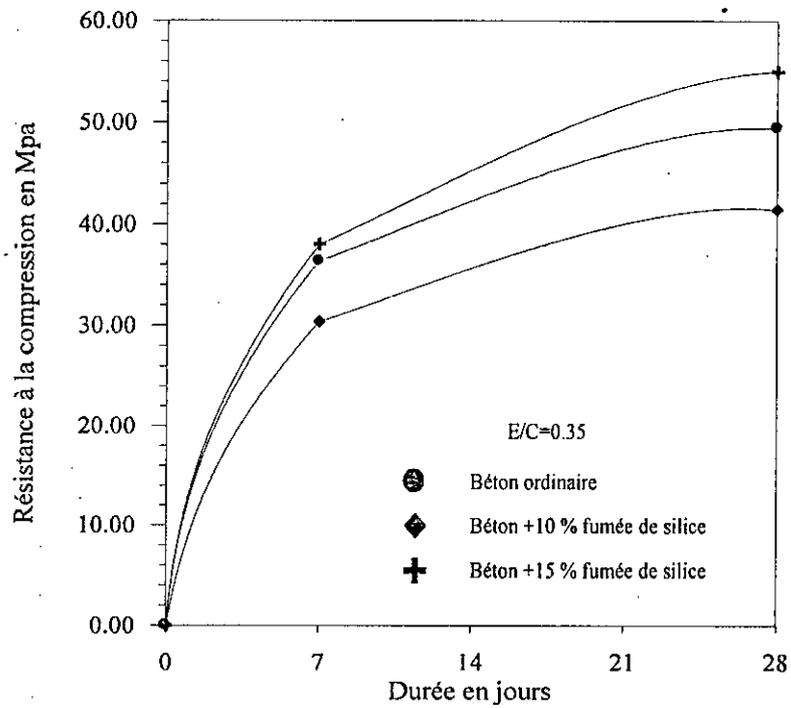


Fig.(3.20) : Résistance à la compression du béton à la fumée de silice conservé 28 jours à l'air libre.

3-5-3-2 Résistance à la flexion

Les fig.(3.21, 3.22) indiquent clairement que la résistance à la flexion des bétons à la fumée de silice est plus grande que celle du béton ordinaire pour tous les âges et que la cure humide développe la résistance à flexion la plus grande.

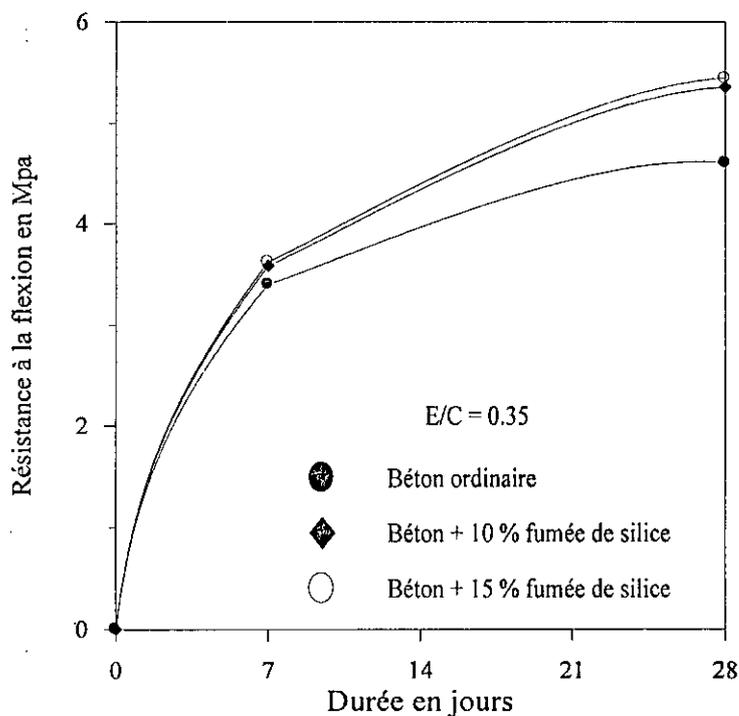


Fig.(3.21) : Résistance à la flexion du béton à la fumée de silice conservé 28 jours dans l'eau douce.

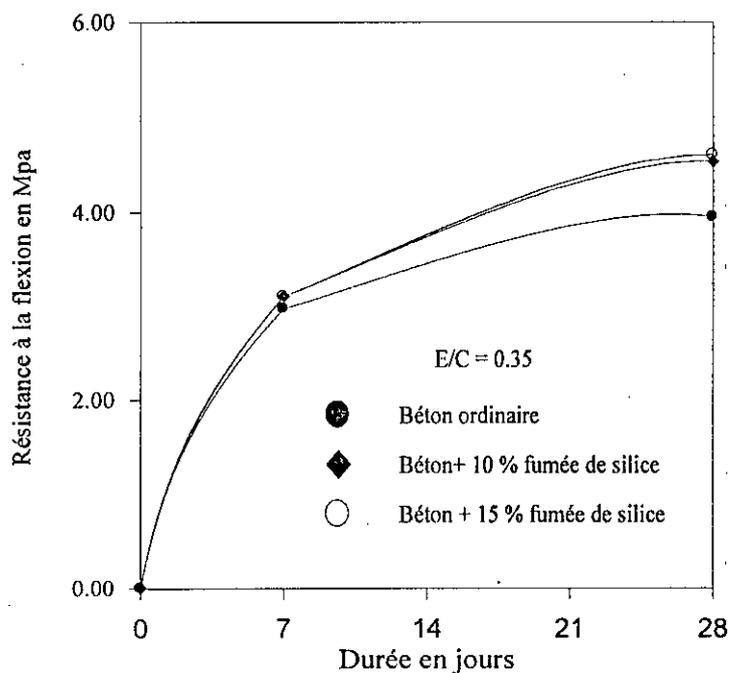


Fig.(3.22) : Résistance à la flexion du béton à la fumée de silice conservé 28 jours à l'air libre.

3-5-3-3 Conclusion sur la résistance du béton à la fumée de silice

Pour un rapport E/C égal à 0.35 les bétons fabriqués avec un ciment contenant 10 % à 15 % de fumée de silice peuvent atteindre une résistance de l'ordre de 70 Mpa et un affaissement de 8 cm. Une augmentation de cette résistance nécessite la diminution du rapport E/C, ce qui est difficile avec les fluidifiants disponibles en Algérie.

Une tentative d'amélioration de la résistance du béton par le remplacement du gravier de carrière Jobert de nature silico-calcaire par le gravier granitique de carrière de Thénia n'a conduit à aucune amélioration de la résistance ceci nous laisse penser qu'avec un rapport E/C égal à 0.35 on ne peut pas atteindre des résistances supérieures à 70 Mpa. C'est pour cela que l'on remarque que la rupture du béton se produit dans la pâte de ciment la plupart des temps. A travers ces résultats on conclut que pour un rapport E/C > 0.35 les bétons avec pouzzolane donnent les mêmes propriétés que celles des bétons avec fumée de silice. Ainsi avec la pouzzolane de Béni-Saf on peut fabriquer un béton à hautes performances.

3-5-4 Courbe contrainte- déformation

Sur les fig.(3.23, 3.24, 3.25) on remarque que La courbe contrainte- déformation des bétons ayant une résistance qui dépasse 60 Mpa est très linéaire, et que la déformation des B.H.P. à la rupture est plus grande que celle du béton ordinaire. Le comportement du béton en post- rupture n'est pas étudié (presse travaillant à charge contrôlée), ce qui nous a empêché de calculer la ductilité du béton à haute résistance. Le module d'élasticité statique est déterminé conformément au mode opératoire décrit au chapitre précédent.

Il suit la variation de la résistance à la compression, il varie de 25 Gpa pour les bétons ordinaires jusqu'à 35 Gpa pour le béton contenant 10 % de fumée de silice.

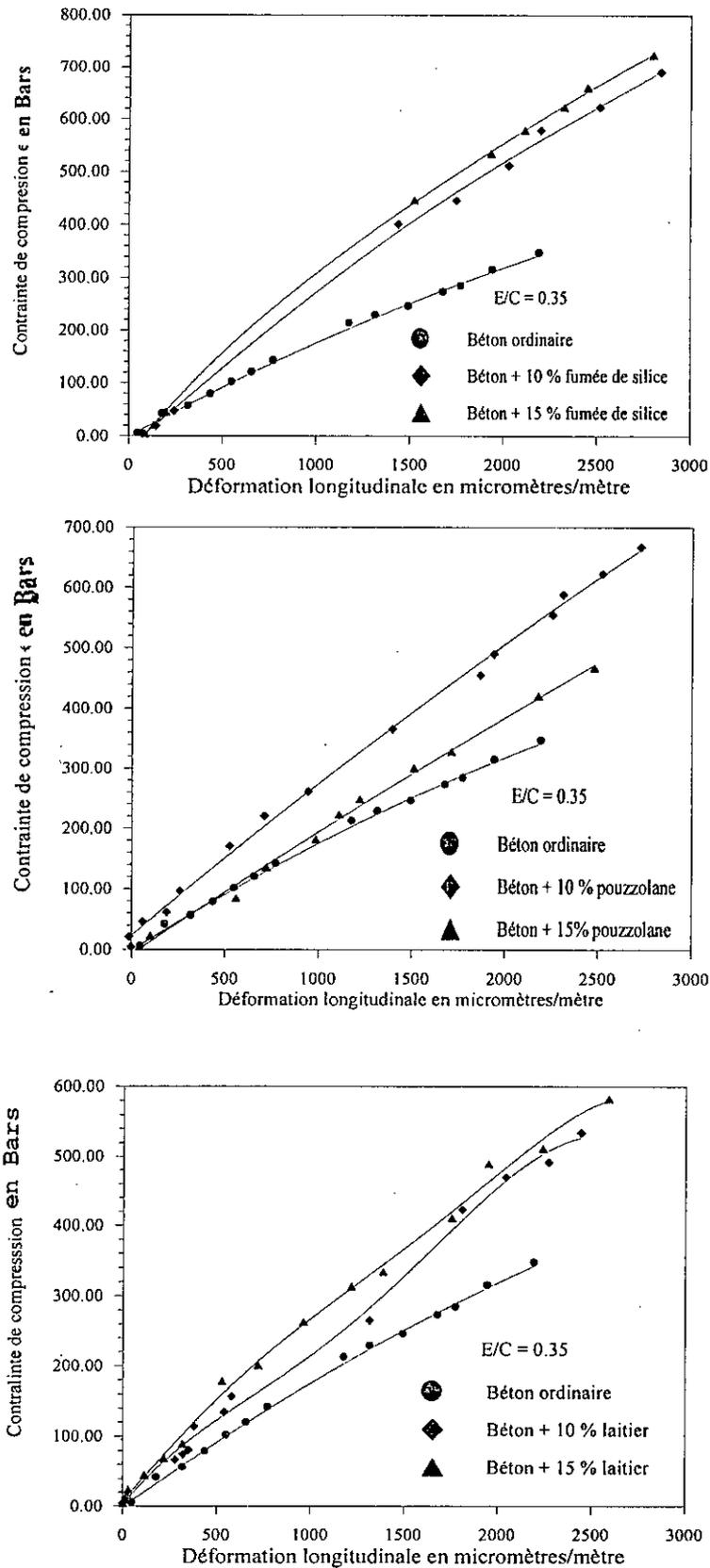


Fig.(3.23-3.24-3.25) : Relation contrainte- déformation du béton avec ajout(fumée de silice-pouzzolane-laitier) conservé 28 jours dans l'eau douce

3-5-5 Mesure de l'onde longitudinale du son

La mesure par la méthode en transparence du temps " t " en secondes de l'onde longitudinale du son est effectuée pour calculer la vitesse de propagation et de permettre d'évaluer le degré de fissuration ou d'endommagement du béton. Le mode opératoire de cette expérience est décrit au chapitre 2.

Les résultats obtenus sont représentés sur les fig.3.26, 3.27 et 3.28

Pour interpréter ces résultats, il est important de calculer l'indice de continuité I_C qui donne un aperçu direct sur le degré de fissuration du béton. En effet, si l'indice de continuité I_C est élevé alors le degré de fissuration est faible. I_C est donné par la relation suivante :

$$(I_C) = \frac{V_1}{V} \cdot 100 \quad (3-1)$$

Où : - V_1 = la vitesse longitudinale du son dans le béton en m/s

- V = la vitesse de référence égale à 4500 m/s pour le béton normal.

Le tableau(3.3) donne l'indice de continuité pour les trois ajouts avec différents pourcentages à 7 jours et 28 jours.

On constate d'après ces résultats que l'indice de continuité augmente en fonction de l'âge, entraînant une diminution du degré de fissuration. Les bétons ayant les plus grands indices de continuité sont les bétons à la fumée de silice et à 10 % de pouzzolane.

Ces mesures fournissent un début d'explication sur l'amélioration de la résistance dans le cas d'ajouts de fumée de silice. En effet l' I_C dont amélioré par ces ajouts, on peut supposer que le béton ainsi constitué offre une meilleure compacité par rapport à un béton ordinaire ce qui lui permet de mieux résister à la compression.

I _C / Jours	Laitier			Pouzzolane		Fumée de silice	
	0 %	10 %	15 %	10 %	15 %	10 %	15 %
7	0.78	0.83	0.96	0.96	0.76	0.96	0.97
28	0.88	0.91	1.05	1.076	0.88	1.075	1.093

Tableau(3.3) : Evolution de l'indice de continuité du béton avec le pourcentage d'ajout

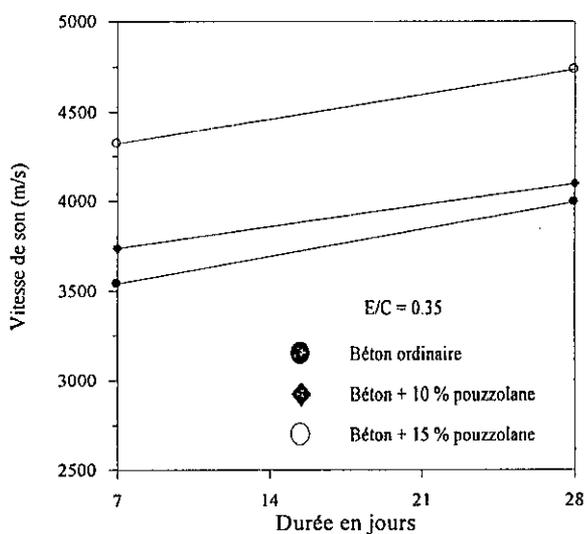
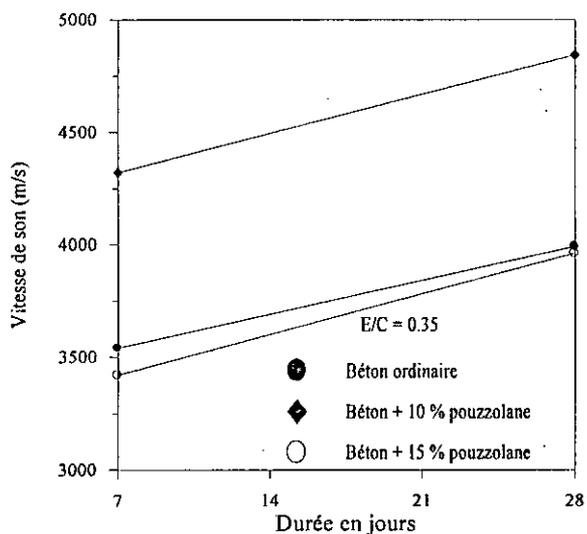
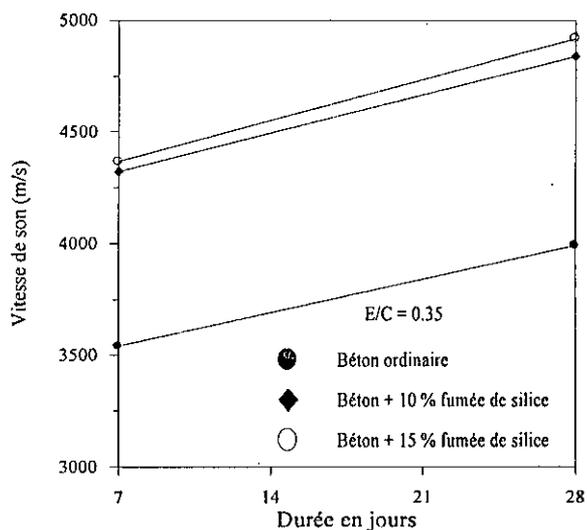


Fig.(3.26-3.27-3.28) : Evolution de la vitesse du son dans le béton en fonction de son âge à différents pourcentages d'ajout(fumée de silice-laitier-pouzzolane)

3-5-6 Porosité

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes de mortier selon le mode opératoire décrit au chapitre précédent.

Cette méthode consiste à déterminer la porosité totale qui est égale à la somme des porosités fermée et ouverte par des mesures d'absorption d'eau à la pression atmosphérique selon la formule

$$AC = \frac{100.P}{S\sqrt{t}} \quad (3-2)$$

Où P = le poids d'eau absorbée en kg

S = la surface de la face sciée du béton en (cm²).

T = le temps d'absorption qui est égal à 72 heures.

Les résultats des mesures sont donnés au tableau (3.4).

D'après les résultats obtenus, on constate que l'absorption d'eau des bétons avec ajout est inférieure à celle des bétons sans ajout. En effet le béton le plus résistant est le moins poreux. Ces résultats semblent affirmer les constatations émises à propos de l'I_c. Cela est dû à la réaction de l'ajout avec la chaux libérée de l'hydratation du ciment qui produit un C-S-H plus compact que celle des bétons ordinaires.

% d'ajouts	Absorption capillaire d'eau en (g/cm ²)			
	0 %	10 %	15 %	20 %
AC laitier	19.37	12.9	10.5	9.7
AC pouzzolane	19.37	10.39	13.72	-
AC fumée de silice	19.37	5.65	8.07	8.88

Tableau (3.4) : Absorption d'eau du béton

3-5-7 Retrait

Les essais de retrait sont réalisés sur des éprouvettes 7×7×28 cm, ces éprouvettes sont conservées à l'air libre à une température de 25° C.

Dans ce qui suit nous allons examiner l'effet du rapport E/C sur le retrait du béton sans ajout, puis faire une comparaison entre l'effet de chaque ajout (laitier, pouzzolane, fumée de silice) sur la déformation au retrait. Le béton au laitier n'a pas été traité pour des raisons de disponibilité en matière et que ses performances ne sont pas très intéressantes.

a- L'effet du rapport E/C :

La figure 3.29 indique clairement que le retrait du béton est influencé par la variation du rapport E/C. Lorsque le rapport E/C diminue la déformation due au retrait diminue. Cela nous laisse penser pour que un béton qui contient une grande quantité d'eau, les pores capillaires sont nombreux et le séchage est ainsi accéléré.

b- Effet des ajouts minéraux :

On remarque sur les figures 3.30, 3.31 que les bétons avec ajout ont une déformation au retrait plus faible que celle des bétons sans ajout. En effet pour que les bétons à haute résistance l'hydratation du ciment donne un C-S-H de structure plus dense que celle des bétons ordinaires. Ce silicate qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels[7].

On remarque aussi qu'une augmentation davantage du pourcentage des ajouts a une faible influence sur la déformation au retrait.

D'une manière générale on retiendra que la déformation au retrait des bétons à hautes performances est plus faible que celle des bétons ordinaires. Ce résultat est conforme aux références [38], [41].

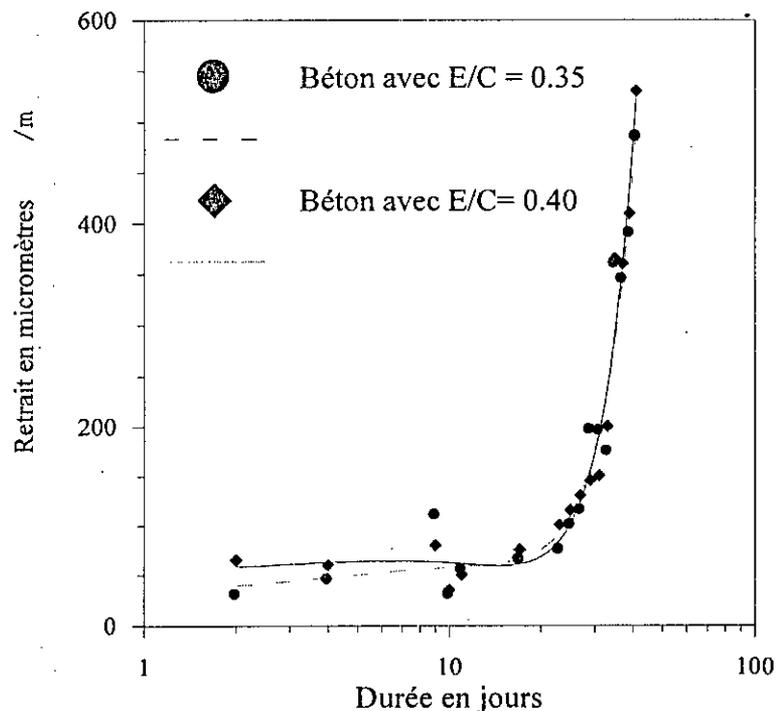


Fig.(3.29) : L'effet du rapport E/C sur le retrait du béton

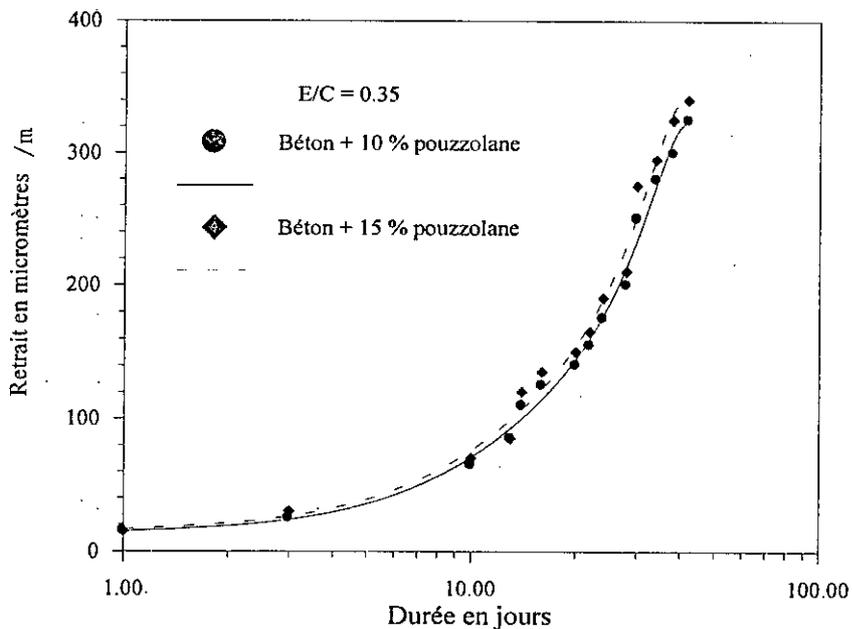


Fig.(3.30) : Retrait du béton à la pouzzolane

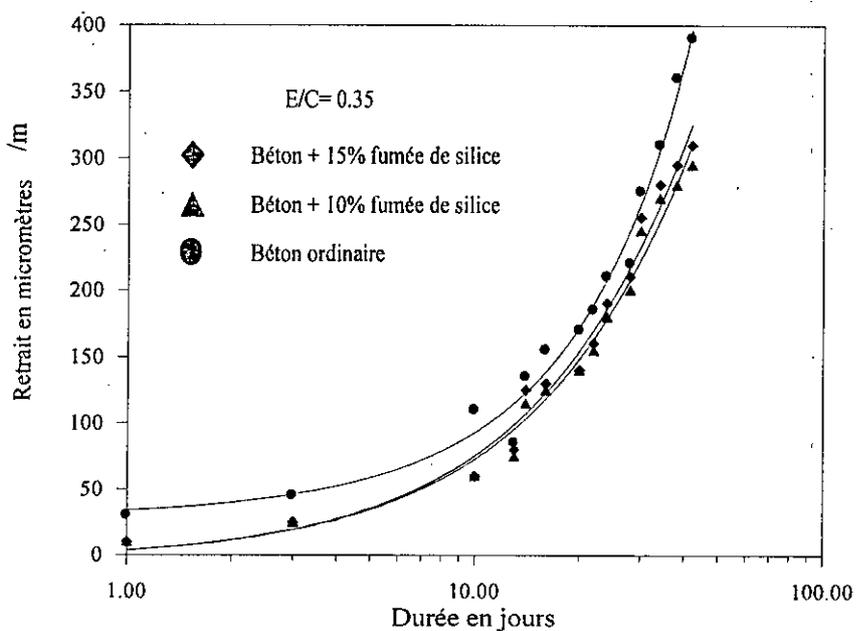


Fig.(3.31) : Retrait du béton à la fumée de silice

Conclusion

Les indices d'hydraulicité indiquent que le laitier d'El-Hadjar est classé dans la catégorie des laitiers médiocres, nous avons espéré que les résultats des résistances mécaniques contrediront ce classement. Malheureusement, ces derniers ont plutôt confirmé la médiocrité de ce laitier.

Ainsi une activation (chimique ou thermique) ou une amélioration dans les procédés de fabrication du laitier, sont nécessaire pour remédier à cette situation et améliorer la qualité du laitier. Les références [6], [7], [9], [23], indiquent que pour un pourcentage égal à 5 % de pouzzolane, 10 % de fumée de silice et 30 % de laitier, les bétons ainsi confectionnés donnent les meilleures résistances ($R_c = 88 \text{ Mpa}$ pour 10 % de fumée de silice). Alors que dans notre cas le meilleur béton obtenu avec le laitier d'El-Hadjar ne contient que 15 % de laitier avec une résistance à la compression égale à 58 Mpa. Cela est dû au ciment utilisé qui contient dans sa composition un certain pourcentage d'ajout, ainsi à la qualité du laitier d'El-Hadjar. Les bétons avec 15 % de fumée silice et 10 % de pouzzolane présentent une meilleure résistance par rapport à celle donnée par le laitier ($R_c = 66 \text{ Mpa}$ pour 10 % de pouzzolane et $R_c = 72 \text{ Mpa}$ pour 15 % de fumée de silice). Ainsi le comportement du béton à hautes performances avant la rupture est quasiment linéaire. Ce résultat est conforme à la référence [40].

Après un étude comparative entre les modules d'élasticité statique du béton à hautes performances établie selon les références [38], [40], on constate que la variation du module d'élasticité du béton à hautes performances est similaire à celle de la résistance à la compression en fonction de l'âge. Les bétons à la fumée de silice ou à la pouzzolane présentent le plus grand module d'élasticité ($E_{st} = 35 \text{ Mpa}$).

Les essais ultrasoniques ont révélé que le béton à la fumée de silice traité par immersion d'eau douce, présente une compacité et un indice de continuité très élevée que ceux d'un béton ordinaire, induisant ainsi un degré de fissuration moindre.



**CONCLUSIONS ET
RECOMMANDATIONS**

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but de notre travail était d'élaborer un béton à hautes performances ainsi que l'étude de quelques propriétés fondamentales de ces bétons. En fait l'obtention d'une haute performance et consiste surtout en l'obtention d'une résistance à la compression à 28 jours qui dépasse 60 Mpa avec une plasticité adéquate.

En pratique les formulations des bétons à hautes performances conduisent à la recherche de la matrice de béton la plus dense. De ce fait plusieurs méthodes sont utilisées, pour atteindre ce dernier but. Dans notre étude, nous avons incorporé dans le béton des ajouts actifs pour un rapport E/C inférieur à 0.40.

Au début de la réaction d'hydratation ces ajouts remplissent les interstices entre les grains de ciment et de ce fait leur rôle se limite essentiellement au remplissage. A long terme ces ajouts contribuent par leur pouvoir hydraulique ou pouzzolanique à la formation d'un silicate de calcium hydraté (C-S-H) assimilé au produit de l'hydratation de ciment portland mais de structure plus dense.

Dans cette étude nous avons pu disposer de trois types d'ajouts d'origine très diverses : le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni-Saf et la fumée de silice d'origine Canadienne. Un adjuvant superplastifiant accélérateur de prise sous forme liquide est ajouté au béton avec un pourcentage de 2 %.

Pour un rapport E/C égal à 0.35 les bétons fabriqués avec un ciment CPJ 45 qui renferme 5 à 10 % de pouzzolane ou 15 % de fumée de silice présentent des propriétés performantes. En effet avec 5 à 10 % de pouzzolane la résistance à la compression à 28 jours du béton mesurée sur éprouvette cubique est supérieure à 60 Mpa avec un affaissement de 8 cm. Toutefois ce niveau de résistance reste toujours difficile à atteindre surtout dans les conditions du chantier et il est généralement limité à moins de 70 Mpa. Le recours à l'utilisation de la fumée de silice a conduit à des résistances de plus de 70 Mpa pour un pourcentage de fumée de silice égal à 15 %. L'effet de ces ajouts est fortement accru lorsque la cure s'effectue à l'eau douce. Les résultats ainsi obtenus nous laisse penser que cet ajout coïncide mieux aux conditions du chantier

Les autres caractéristiques de béton sont aussi améliorées. En effet la résistance à la flexion s'améliore avec les ajouts de la même façon que la résistance à la compression :

Les autres caractéristiques de béton sont aussi améliorées. En effet la résistance à la flexion s'améliore avec les ajouts de la même façon que la résistance à la compression : Les bétons à hautes performances développent une résistance à la flexion plus grande que celle d'un béton ordinaire. Cette résistance est de l'ordre de 4 Mpa.

De plus le retrait au séchage des bétons à hautes résistances est plus faible que celui de béton ordinaire.

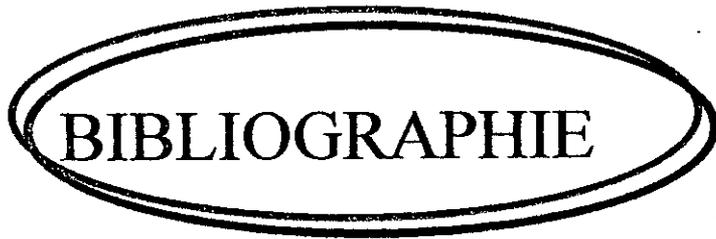
D'une manière générale on voit que les BHP ainsi obtenus offrent des caractéristiques globalement améliorées.

A travers cette étude nous émettrons les recommandations suivantes :

- pour l'élaboration d'un béton à hautes performances sans difficultés il est avantageux d'utiliser un ciment sans ajouts tel que un CPA 55.
- la composition chimique joue un rôle important dans l'élaboration d'un BHP ; de ce fait les ciments riches en silice et qui contient un taux d'aluminate tricalcique faible sont les meilleures.
- un BHP ne peut être obtenu que pour un rapport E/C de moins de 0.40. Pour cela nous recommandons aux fabricants des BHP de bien choisir l'adjuvant adéquat

Cette étude reste toujours insuffisante à cause de nombre de propriétés des BHP mal connues. En perspective nous proposons les axes de recherches suivantes :

- l'élaboration d'un béton à très hautes performances.(résistance à la compression supérieure à 100 Mpa) par l'utilisation des matériaux de très bonne qualité.
- l'élaboration d'un béton à hautes performances sur chantier : essais de fabrication in situ et mise au point de procédures et formulations adaptées.
- la ductilité des bétons à hautes performances.
- le fluage des bétons à hautes performances.
- le retrait d'hydratation des bétons à hautes performances.
- la durabilité des bétons à hautes performances vis-à-vis des différentes attaques.
- le maintien de la maniabilité des bétons à hautes performances.
- L'effet du pourcentage d'armature sur la ductilité des bétons à hautes performances.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. **P.C. Aitcin** : la technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord. *Matériaux et construction*, 1987,20,180-189.
2. **I. Soroka** : concrete in hot environments. *Modern concrete technology*, serie 1993.
3. **F. de Larrard, C. Puch** : formulation des bétons à hautes performances : la méthode des coulis. *Bull. Liaison*. p et ch. 181, mai -juin 1989.
4. **J. M. Torrenti** : résistance du béton au jeune âge. *Bull. Liaison*, p et ch. 179, mai-juin 1992 pp 31-41.
5. **A. M. Paillere, J. Serrano** : influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiant sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumée de silice. *Bull. Liaison*. P. et ch. 170. Nov-déc 1990.
6. **H. Khelafi, D. Rahal, al** : vers un béton de haute résistance élaboré à partir de matériaux locaux. *Revue marocaine en génie civil* No. 70, août/septembre 1997.
7. **S. Seki, M. Morimoto et al.** : recherches expérimentales sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous produits industriels. *I.T.B.T.P.* No. 436 juillet-août 1985.
8. **M. N. Oudjit** : réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou du ciment portland. Thèse d'état, I.N.S.A. Toulouse, 1986.
9. **K. H. Khayat, P. C. Aitcin** : silica fume- a unique supplementary cementitious material. *Progress in cement and concrete*,
10. **F. de Larrard** : particules ultrafines pour l'élaboration des bétons à très hautes performances. *I.T.B.T.P.* No. 466, juillet- août 1988.
11. **H. H. Bache** : densified cement / ultra- fine particule based material. 2nd int. Conf. Superplasticizers in concrete, june 1986, Ottawa, Canada.
12. **F de Larrard et Buil** : granulat et compacité dans les matériaux de génie civil. *Matériaux de construction*, 1987, 20, 117-126.

13. **J. P. Olivier, A. C. Gibergues et B. Hanna** : activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée de silice dans la matrice de béton de hautes performances. *Cement and concrete research*, vol. 18, pp. 438-445, 1988.
14. **M. Buil** : comportement physico-chimique du système ciment- fumée de silice. *I.T.B.T.P. No. 483*, mai 1990.
15. **F. de Larrard et J. F. Gorse** : efficacité comparée de divers fumées de silice comme additif dans les bétons à hautes performances. *Bull. Liaison p et ch. 168*, juillet- août 1990.
16. **M. Buil and P. Delage** : some further evidence on a specific effect of silica fume on the pore structure of Portland cement mortars. *Cement and concrete research*, vol. 17, pp. 65-69, 1987.
17. **A. Goldman et A. Bentur** : bond effects in high strength silica-fume concrete. *ACI materials journals No. 86*, september-october, 1989.
18. **F. de Larrard** : prévision des résistances en compression des bétons à hautes performances aux fumées de silice ou une nouvelle jeunesse pour la loi de Féret. *I.T.B.T.P. No. 483*, Mai 1990.
19. **S. Seki et M. Morimoto et N. Yamane** : formation et propriétés de la fumée de silice. *I.T.B.T.P. No. 436*, juillet- août 1985.
20. **Rachel J. Detwiler et P. K. Mehta** : chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete. *ACI materials journals No. 86*, November- December 1989.
21. **M. Moranville, Regourd** : microstructure des bétons à hautes performances. *Les B.H.P. édition E.N.P.C 1990*.
22. **C. Ozyildirim** : laboratory investigation of low- permeability concrete containing slag and silica fume. *ACI materials journals*, No. 91, march- April 1994.
23. **A. Kriker** : durabilité du béton à base du laitier. Thèse de magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger 1992.
24. **D. M. Roy et R. I. A. Malek** : hydration of slag. *Progress in cement and concrete*.
25. **K. Luke and F. P. Glasser** : internal chemical evolution of the constitution of blended cement. *Cement and concrete research*, vol. 18; pp. 495-502, 1988.

26. **T. Häkkinen** : the influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete. *Cement and concrete research*, vol. 23 ; pp. 518-530, 1993.
27. **E. E. Berry** : strength development of some blended cement mortars, *cement and concrete research*, vol ; 10, pp. 1-11, 1980.
28. **W. U. Xuequan and D. M. Roy** : slag cement utilization, *cement and concrete research*, vol. 14, pp. 521-528, 1984.
29. **M. N. Haque and T. chulilung** : strength development of slag ternary blended concrete, *cement and concrete research*, vol. 20, pp. 120-130, 1994.
30. **P. C. Aitcin** : l'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances. *Les B.H.P. du matériau à l'ouvrage*, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1990.
31. **P. C. Aitcin, C. Jolicoeur et J. G. Macgregor** : superplasticizers (how to work and why they occasionally don't), *concrete international*, may 1994.
32. **T. Manginardi and A. E. Paolini** : workability of superplasticized microsilica-Portland cement concretes. *Cement and concrete research*, vol. 18, pp. 351-362, 1988.
33. **H. M. Marzouk and A. Hussein** : properties of high strength concrete at low temperature. *ACI materials journals*, No.87, march-April 1990.
34. **P. C. Aitcin et P. K. Mehta** : effect of coarse- aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *ACI materials journals*, No. 89, march-april 1990.
35. **T. pengchang et N. koonsu** : estimation of coarse aggregate strength in high-strength concrete. *ACI materials journals*, No. 93 january-february 1996.
36. **T. Luppig** : a study of the quantitative relationship between strength and pore-size distribution of porous materials. *cement and concrete research*, vol. 16, pp. 87-96, 1986.
37. **Jiang, S. P and Grandet, J** : évolution comparée des porosités des mortiers du ciment au laitier et des mortiers du ciment portland. *Cement and concrete research*, vol. 19, pp. 487-496, 1986.
38. **F de Larrard . y. Malier** : propriétés constructives des bétons à très hautes performances, *De la micro à la macrostructure*. *Annales de I.T.B.T.P.*

39. **F. de Larrard et C. Boulay** : comportement post-rupture du béton à hautes ou très hautes performances soumis en compression. Bull. Liaison, L.P.C, 179, mai-juin 1992.
40. **J. Xie, A. E. Elwi et al.** : mechanical properties of three high-strength concrete containing silica fume. ACI materials journals, No. 92, march-April, 1995.
41. **J. Alou, C. F. Ferraris et al.** : étude expérimentale des retraits du béton. Matériaux et constructions, 1987, 20, 323-333.
42. **R. Bloom et A. Bentur** : bond effects in high strength silica-fume concretes. ACI materials journals, No. 92, march-april, 1995.
43. **M. Auperin. F. Richard et al.** : retrait et fluage de béton à hautes performances ; annales I.T.B.T.P. No. 474, mai 1989.
44. **J. Grandet** : durabilité du béton à hautes performances vis à vis des attaques chimiques externes. Les BHP, édition ENPC 1990.
45. **M. Moranville-Regourd** : durabilité des bétons à hautes performances, réaction alcalis-granulats et carbonatation. Les BHP édition ENPC 1990.
46. **C. Lévy** : à propos de la carbonatation accélérée des bétons (comparaison béton ordinaire- béton à hautes performances du pont de Joigny). Les BHP, édition ENPC 1990.
47. **Gorisse. F** : essai et contrôle des bétons ; ed. Eyrolles 1978.
48. **Dreux** : nouveaux guide du béton. Ed. Eurolles, 1985.

ANNEXE

**ENTREPRISE DES CIMENTS & DERIVES DE L'EST
ERCE/SpA**

UNITE/CIMENTERIE AIN-EL-KEBIRA
DEPARTEMENT PRODUCTION
SCE/CONTROLE ET QUALITE

Ain-El-Kebira, le 13/04/1998

FICHE TECHNIQUE

TYPE DE CIMENT: C.P.I.45

MOIS: Mars / 98

ANALYSES CHIMIQUES		ESSAIS PHYSIQUES		
ELEMENTS	TENEUR	FINESSE DE MOUTURE	P.S (g/Cm ³)	3,09
Si O2-T	27,74		TEMPS DE PRISE	S.S.B (cm ² /g)
Al 2 O3	4,90	DEBUT		2h 32'
Fe2 O3	3,81	EXPANSION LE "Chatelier"	FIN	4h 22'
CaO-T	56,95		A. CHAUD	1 mm
MgO	1,70	REFUS	A.FROID	/
SO3	1,78		200μ	/
Na2 O	/	CONSISTANCE NORMALE	90μ	4,18 %
K2 O	/			25,40 %
P.A.F.	2,83	OBSERVATION		
CaO Libre	0,77	CIMENT AVEC AJOUT Février 98		
R.Insolub	3,30			
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER		ESSAIS MECANIKES		
A / F	1,13	RESISTANCE A LA FLEXION (Kg/cm ²)	02 JOURS	36
M.S	2,38		07 JOURS	57
L.S.F.	0,92		28 JOURS	76
C3S	59,85	RESISTANCE A LA COMPRESSION (Kg/cm ²)	02 JOURS	182
C2S	17,86		07 JOURS	355
C3A	5,64		28 JOURS	526
C4 AF	13,24			

LE CHEF DE SERVICE CONTROLE QUALITE

Conforme à la norme NF P 18-335

Présentation

Le PLASTIMENT HP est un adjuvant issu d'une nouvelle génération de plastifiants à très hautes performances qui réunit en un seul produit différentes fonctions :

- réducteur d'eau-plastifiant
- accélérateur de durcissement à dosage normal
- hydrofuge
- légèrement retardateur de prise en surdosage.

Il permet de confectionner des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.

Caractères généraux

Le PLASTIMENT HP est un liquide brun de densité 1,18 et de pH voisin de 7.

Il joue le rôle d'un agent de cohésion qui améliore la répartition des grains de ciment dans le béton et favorise leur hydratation.

Le PLASTIMENT HP permet de transformer un béton ferme en un béton plastique tout en améliorant ses résistances mécaniques.

Utilisé comme réducteur d'eau, il permet d'atteindre des gains de résistances importants. Il donne une bonne compacité au béton et réduit sa perméabilité.

A dosage élevé, le PLASTIMENT HP augmente le délai de maniabilité du béton même par temps chaud.

Le PLASTIMENT HP est compatible avec nos accélérateurs de prise (mélange dans l'eau de gâchage).

Domaines d'application

1 - Bétons plastiques à hautes performances

Le PLASTIMENT HP permet de confectionner avec un rapport E/C faible des bétons plastiques (Slump Test : 8 à 10 cm) ayant des résistances équivalentes ou supérieures à celles d'un béton ferme non adjuvanté (Slump Test : 2 à 3 cm).

Il est particulièrement indiqué pour les bétons mis en place à la pompe.

2 - Bétons prêts à l'emploi

Le PLASTIMENT HP permet d'augmenter de l'ordre de 10 à 15 % les performances d'un béton par rapport à un plastifiant classique. Ce gain de résistance peut permettre dans le cas des B.C.N. d'optimiser le dosage en ciment, tout en respectant les dosages minimaux prescrits.

Utilisé à fort dosage, le PLASTIMENT HP permet de confectionner des bétons retardés.

3 - Bétons étanches

Le PLASTIMENT HP diminue l'absorption capillaire des bétons et en augmente la compacité. Il permet donc de réduire la pénétration de l'eau et peut être utilisé dans les cas suivants :

- bétons enterrés
- réservoirs
- piscines
- ... etc...

Dosage

- Plage normale d'utilisation comme plastifiant : 0,34 à 0,46 % du poids du ciment.
- Utilisation en B.P.E. comme réducteur de ciment : 0,25 à 0,4 % du poids du ciment.
- Bétons retardés : 0,6 % du poids du ciment et plus, suivant l'effet recherché et la température; ne pas dépasser 1,2 % sans essai préalable.
- Pour des retards de prise importants, utiliser le PLASTIRETARD.
- Bétons étanches : 0,5 % du poids du ciment.

Conditionnement - Stockage

Fûts de 250 kg - Vrac.

Le PLASTIMENT HP peut geler à -4°C , mais après avoir été dégelé lentement et réhomogénéisé il retrouve ses qualités.

En cas de gel prolongé et intense, vérifier s'il n'a pas été déstabilisé.

PLASTIMENT BV 40

Réducteur d'eau plastifiant pour hautes résistances mécaniques.



Conforme aux normes NF P 18-336 et NF P 18-337.

Présentation

Le PLASTIMENT BV 40 est un réducteur d'eau plastifiant énergétique qui :

- Augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité.
- Facilite la mise en place du béton.
- Permet éventuellement de réduire le dosage en ciment.
- Permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation.

Caractères généraux

Liquide brun foncé ne contenant pas de chlore.

Densité : $1,18 \pm 0,01$

pH : $4,5 \pm 1$

Le PLASTIMENT BV 40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet :

Sur béton frais :

- d'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage.
- de disperser le ciment dans la masse.
- d'améliorer l'adhérence ciment-agrégat-fer.
- de s'opposer à la ségrégation.
- d'améliorer la thixotropie.
- d'étaler éventuellement la prise.

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques.
- d'accroître la compacité.
- d'augmenter l'imperméabilité.
- de diminuer le retrait et le fluage.

Le PLASTIMENT BV 40 est compatible avec tous les ciments et en particulier le ciment fondu.

Domaines d'application

1. Augmentation des résistances mécaniques

Le PLASTIMENT BV 40 permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée.

La compacité et l'imperméabilité sont améliorées.

Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Le PLASTIMENT BV 40 est donc particulièrement indiqué pour :

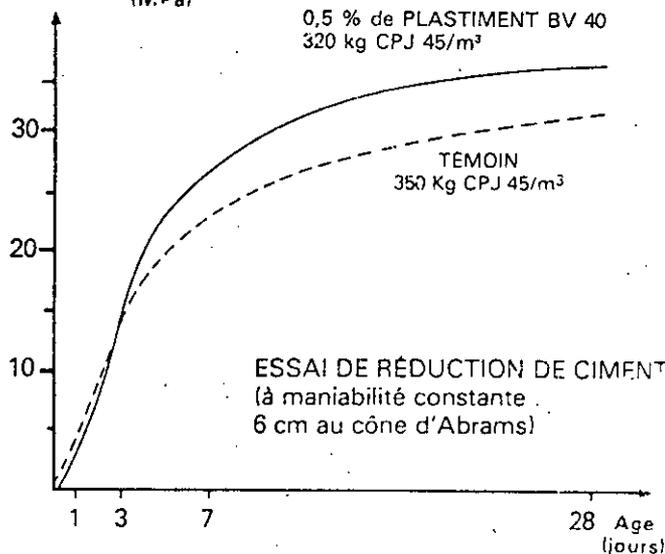
- Les bétons armés à hautes performances.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons préfabriqués étuvés.

2. Réduction du dosage en ciment.

Le PLASTIMENT BV 40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10 % en conservant les résistances mécaniques.

Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

Résistance à la compression (MPa)



CONTACT SUPER

Super plastifiant pour mortiers et bétons

DEFINITION DU PRODUIT

CONTACT SUPER est la synthèse de l'expérience et d'études menées dans le domaine des super-plastifiants, du point de vue économique ce produit est la solution optimale pour améliorer dans des proportions importantes les qualités des bétons et mortiers.

CONTACT SUPER réduit de 40 % le temps de mise en oeuvre des bétons
CONTACT SUPER est conforme aux normes ASTM C 494 type F et NFP 18333.

DOMAINES D'APPLICATION

Tous les bétons: colloïdaux, étuvés, hautes résistances, les coulis, plâtres, enduits ciment, et enduits étanches.

CONTACT SUPER est un enduit défloculent, dispersant, stabilisant, il apporte une forte adhésion aux différents constituants des mélanges.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

- Augmentation des résistances de 30 à 40 % (compression, traction, flexion)
- Permet d'économiser jusqu'à 15 % de ciment sans diminuer les résistances
- Diminue de 40 % le temps de mise en place
- Economise jusqu'à 50 % d'énergie, de fuel, ou de chauffage des bétons.
- Réduction de l'eau de gâchage de 10 à 30 %.
- Forte étanchéité, forte adhérence aux aciers, très faible retrait.
- Diminution de la capillarité, de la fissuration, amélioration de la tenue au gel, à l'érosion et au vieillissement.
- Homogénéité conservée en bétons fluides, pas de ségrégation, effet fluidifiant prolongé de 50 minutes, à une heure par forte chaleur.

MISE EN OEUVRE

CONTACT SUPER s'incorpore dans l'eau de gâchage, ou directement dans les camions toupies juste avant la mise en place du béton, faire tourner la toupie en vitesse accélérée durant 1 minute 30.
Le temps de malaxage dans les malaxeurs à béton dépend du type d'appareil utilisé.

CONTACT

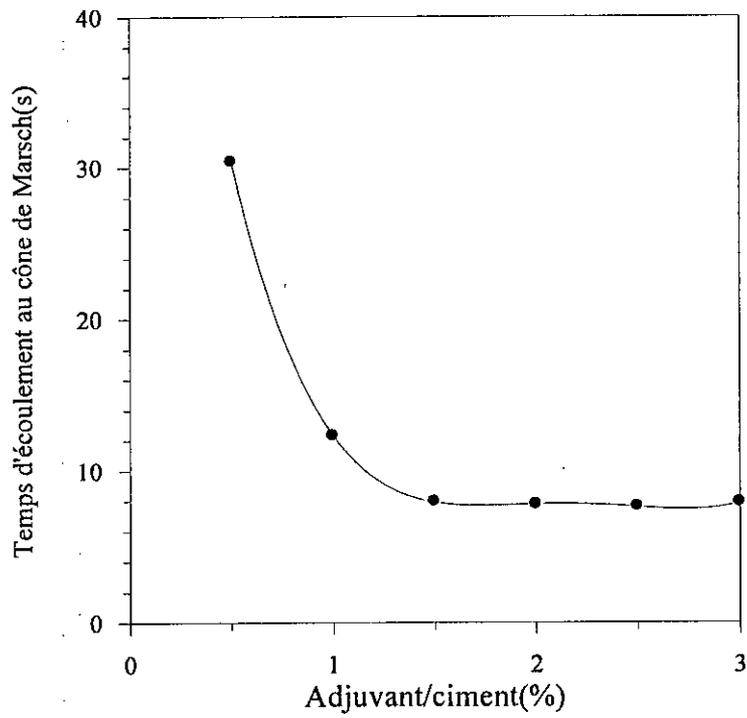


Fig.(1) : Coulis n°2 ciment + 10 % laitier

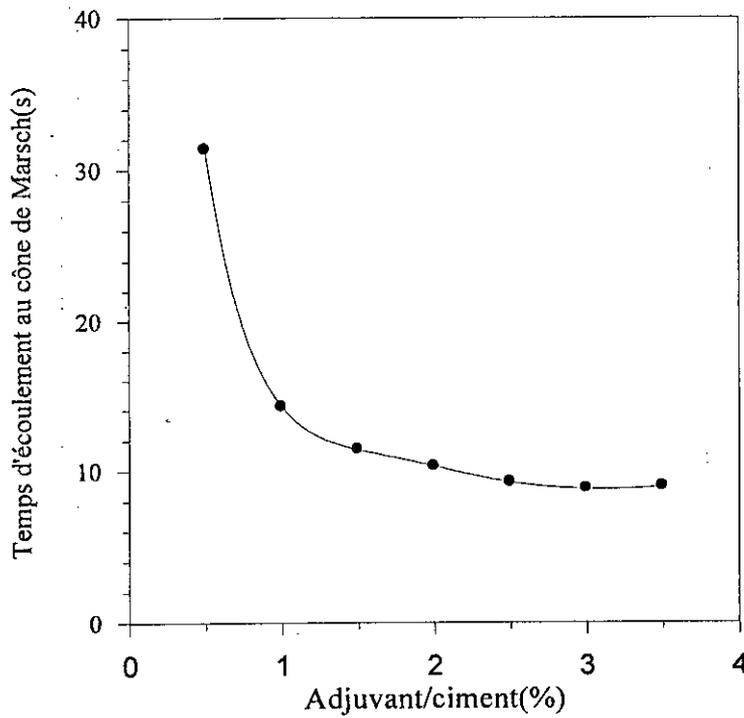


Fig.(2) : Coulis n°3 ciment + 15 % laitier

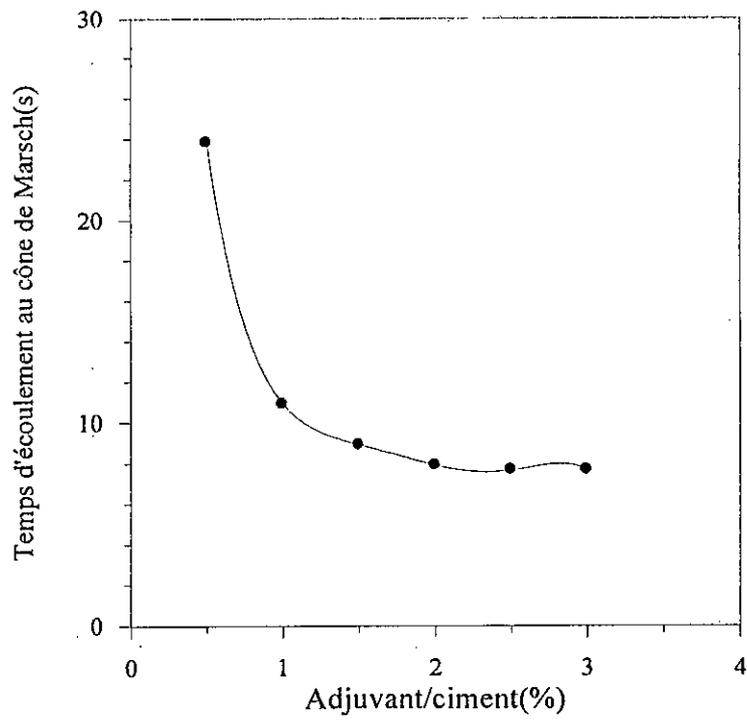


Fig.(3) : Coulis n°4 ciment + 5 % pouzzolane

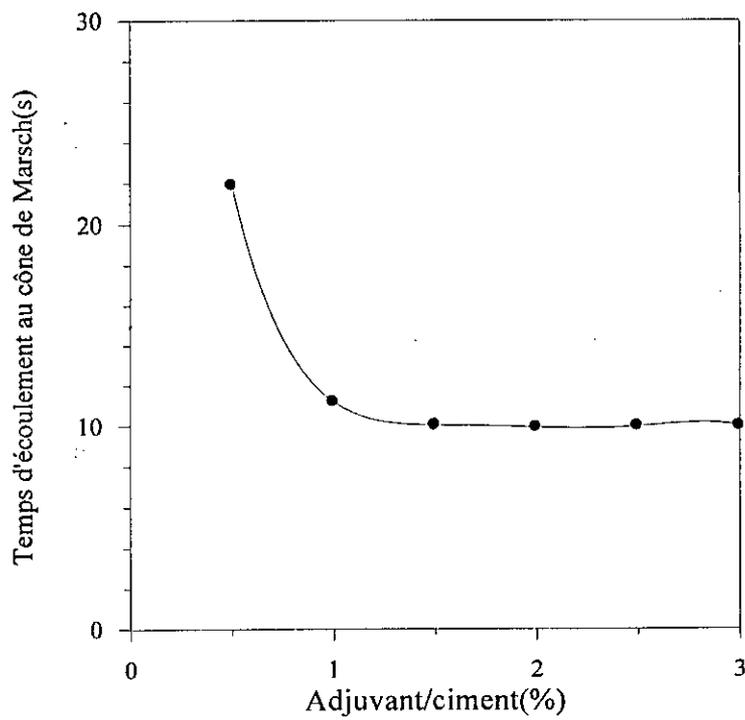


Fig.(4) : Coulis n°5 ciment + 10 % pouzzolane

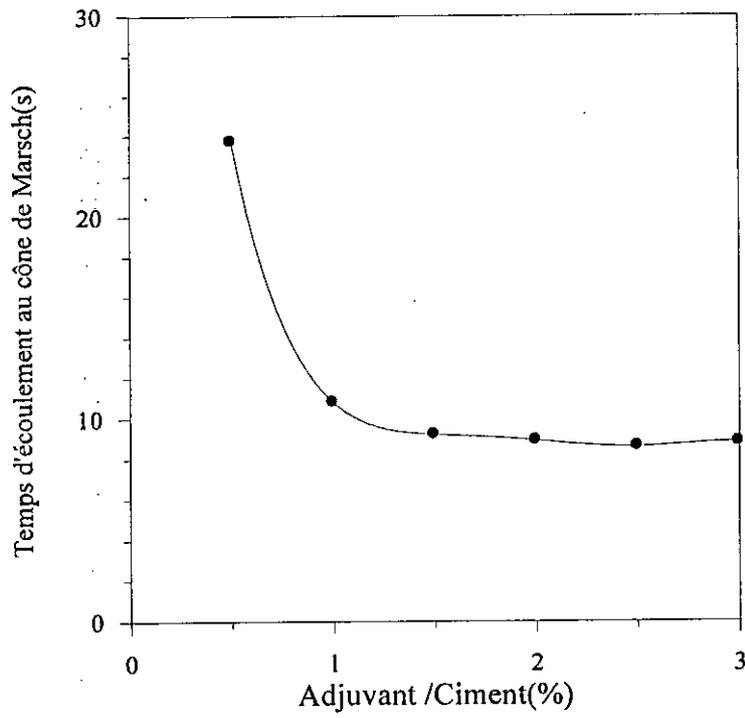


Fig.(5) : Coulis n°6 ciment + 15 % puzzolane

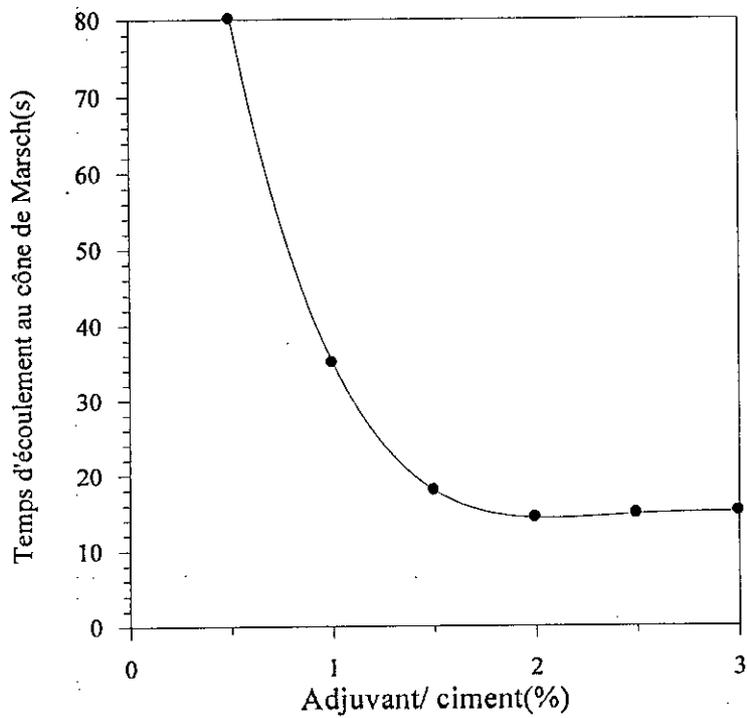


Fig.(6) : Coulis n°7 ciment + 5 % fumée de silice

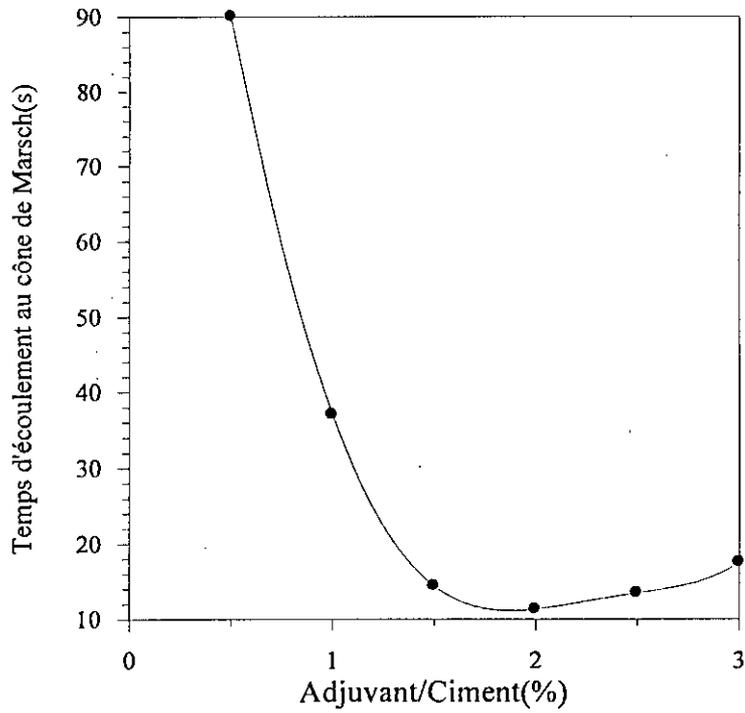


Fig.(7) : Coulis n°8 ciment + 10 % fumée de silice

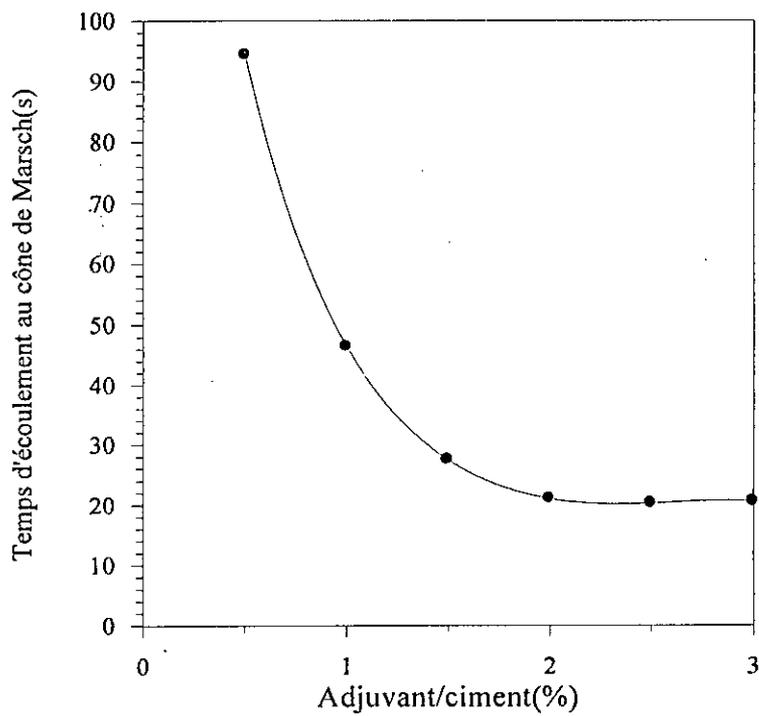


Fig.(8) : Coulis n°9 ciment + 15 % fumée de silice

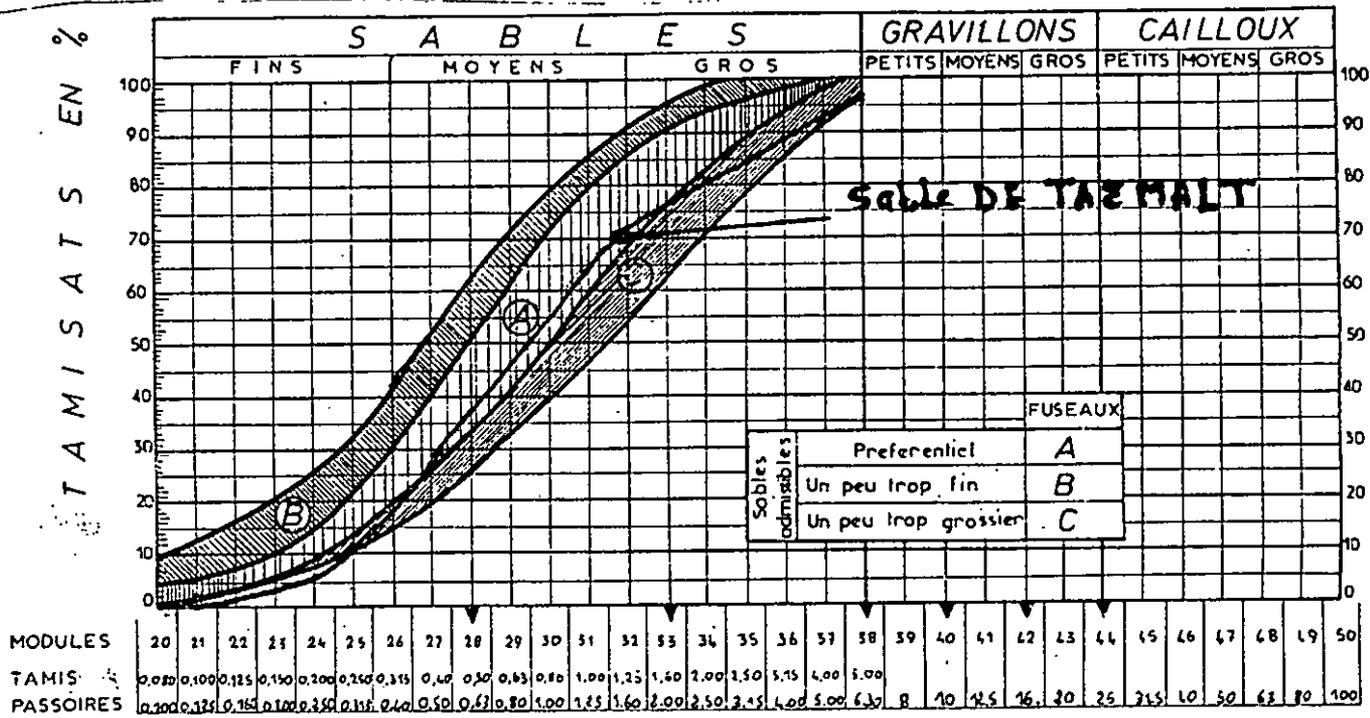


Fig.9 : Fuseaux proposés pour la granulativité des sables à béton (NFP)

Pourcentage du laitier	Durée en jours (à l'eau douce)		Durée en jours(à l'air libre)	
	7 j	28 j	7 j	28 j
0%	48.1	69	39.4	53.4
10%	46.3	66.3	37.6	55.7
15%	51.5	76.3	35.4	53.2
20%	42.66	61.2	33.3	47.9

Tableau 1 : Résistance à la compression du mortier au laitier

pourcentage de la pouzzolane	Durée en jours (à l'eau douce)		Durée en jours (à l'air libre)	
	7j	28 j	7 j	28 j
0%	48.1	69	39.4	53.4
5%	51.2	78.66	41.6	63.3
10%	49.3	77.2	38.4	62.1
15%	50.1	75.2	40.5	61.7

Tableau 2 : Résistance à la compression du mortier à la pouzzolane

Pourcentage de la fumée de silice	Durée en jours(à l'eau douce)		Durée en jours (à l'air libre)	
	7 j	28 j	7 j	28 j
0%	48.1	69	39.4	53.4
10%	51.1	79.6	40.2	63.7
15%	52.2	81.3	42.2	65.04
20%	52.4	52.1	42.5	65.6

Tableau 3 : Résistance à la compression du mortier avec fumée de silice

pourcentage du laitier	Durée en jours(à l'eau douce)		Durée en jours(à l'air libre)	
	7 j	28 j	7 j	28 j
0%	36.34	49.44	30.33	41.44
10%	33.95	51.26	30.38	45.97
15%	37.34	58.27	33.94	46.08

Tableau 4 : Résistance à la compression du béton au laitier

pourcentage de la pouzzolane	Durée en jours(à l'eau douce)		Durée en jours(à l'air libre)	
	7 j	28 j	7 j	28 j
0%	36.34	49.44	30.33	41.44
10%	43.82	66.6	36.08	53.5
15%	30.58	46.16	19.87	29.8

Tableau 5 : Résistance à la compression du béton à la pouzzolane

pourcentage de la pouzzolane	Durée en jours(à l'eau douce)		Durée en jours(à l'air libre)	
	7 j	28 j	7 j	28 j
0%	36.34	49.44	30.33	41.44
10%	47	69	38	55
15%	51	73	44	58

Tableau 6 : Résistance à la compression du béton avec fumée de silice