

9/96



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE

Département: **GENIE CIVIL**

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة —
Ecole Nationale Polytechnique

ELABORATION D'UN BÉTON

À HAUTE ET TRÈS HAUTE PERFORMANCE

PAR LA METHODE DE FRANÇOIS DE LARRARD

Etudié par :

Mr. MEDJHOUDA Sofiane

Mr. SLAMANI Badr-Eddine

Proposé et dirigé par :

Mme.KETTAB .R

* promotion: JUIN 1996 *



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

الجامعة الوطنية للتكنولوجيا
Département **GENIE CIVIL**
Ecole Nationale Polytechnique

ELABORATION D'UN BÉTON

À HAUTE ET TRÈS HAUTE PERFORMANCE

PAR LA METHODE DE FRANÇOIS DE LARRARD

Etudié par :

Mr. MEDJHOUDA Sofiane

Mr. SLAMANI Badr-Eddine

Proposé et dirigé par :

Mme. KETTAB .R

* promotion: JUIN 1996 *

❁ DEDICACES ❁

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail:

A mes très chers parents .

*A mes deux frères: MEROUANE le généreux, OUSSAMA le
magnifique et ma unique sœur: l'adorable LAMISSE.*

*A mes amis: S.TOUFIK, H.AMINE, D. SALIM, I.NASSIM
et à T.AMEL.
et à tous ceux qui aiment l'ALGERIE...*

MEDJHOUDA Sofiane



A ma mère qui m'a accordé tout son amour le long de ma vie.

A mon père pour ses encouragements et son soutien.

*A MAMA FETOUMA, à mes frères et sœurs SARA, AMINA,
F.ZOHRA.*

A celle que j'estime 🌟👉👉👉👉, à tout mes amis.

A tous 🌟

je dédie ce modeste travail

SLAMANI BADR-EDDINE.



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier très sincèrement toutes les personnes qui nous ont aidé pour réaliser ce modeste travail, en particulier :

M^r ANDRE SIRERA pour ses encouragements et ses conseils, M^r Z. BEN CHERIF, Directeur de la cimenterie de AIN EL KEBIRA.

M^r R. FATMI Chef de Laboratoire à la même cimenterie pour la mise à notre disposition de leurs produits cimentaires et leur parfaite collaboration.

M^r S. SITAYEB Responsable de laboratoire de Béton de COSIDER pour nous avoir aidé dans la réalisation du programme expérimentale, M^r ADDAD et M^r KENNAN responsable à la SONATRO, M^r MADANI de GRANITEX, BOUALEM de la carrière JOBERT.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre chère mère et promotrice M^{me} R. KETTAB, Maître de conférence à l'ENP pour nous avoir proposé un sujet passionnant et avoir dirigé et suivi avec intérêt notre travail, pour sa sollicitude, ses conseils et ses encouragements permanents.

Nous exprimons également notre reconnaissance à M^r SILHADDI Maître de conférence et M^r BALI professeur à l'ENP pour nous avoir permis de bénéficier de leurs expériences et de leurs conseils.

Nous tenons à remercier M^{me} MORSLI la Directrice du Département de Génie Civil pour son attention particulière à notre égard, M^{me} MOUHABIDINE, M^r ZEGHLACHE et M^r SAADA.

Nous adressons nos remerciements à M^r S. MEGHNINI le chef de parc, M^r M. DAOUADI le démarcheur de l'école, Rachid le Chauffeur, Rachid le technicien de laboratoire de Génie Civil, MALIKA et OUAHIBA secrétaires au départements, KRIMO, KARIM et SALAH de la Bibliothèque.

Un très grand merci pour S. ZERMOUT et K. BEN MOUHOUB. Nous remercions également S.FACI, H.ABCHICH, K. FOUGHALI, N.RABIA, M. HADJOUTTI, M. ARRACHICHE, K. TOUNSI, FARID, N. ZIDELMEL, S.DEBRI, HAKOU, BOUALEM, K. MEZIANI, NABIL, OUSSAMA, SIDALI, HASSIBA, SIHEM, OUASSILA, ILHEM, RAGHED, OUASSILA, LEILA, KARIMA et AMEL.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos enseignants d'avoir accepté de faire parti de ce jury.

Nous remercions sincèrement, enfin, tous les enseignants au sein de notre département Génie Civil qui ont contribué à notre formation.

✿ Sommaire ✿

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I: INTRODUCTION

1.1- Généralité.....	1
1.2- Historique.....	2
1.3- Classification des bétons.....	4
1.4- Microstructure des bétons à hautes performances.....	5
1.5- Conclusion.....	7

CHAPITRE II: METHODE DE FORMULATION

2.1- Introduction.....	9
2.2- Rappel de formulations des bétons ordinaires.....	10
2.2.1- La méthode d'ABRAMAS.....	10
2.2.2- La méthode de BOLOMEY.....	11
2.2.3- La méthode de FAURY.....	11
2.2.4- La méthode de DREUX - GORISSE.....	13
2.3- Formulation des bétons à haute performances.....	15
2.3.1- La méthode de ERNTROY - SHACKLOCK.....	15
2.3.2- La méthode de l'Institut Américaine du béton.....	20
2.3.3- La méthode de De larrard.....	22
2.3.4- La méthode de .Pedeches.....	23
2.4- Conclusion.....	25

CHAPITRE III: PROPRIETES MECANIQUES

3.1- Introduction.....	28
3.2- Résistance à la compression.....	28
3.3- Loi de comportement.....	29
3.4- Résistance à la traction.....	31
3.5- Fragilité et ductilité.....	33
3.6- L'adhérence	33
3.7- Conclusion	42

CHAPITRE IV: MATERIAUX UTILISES

4.1- Introduction	44
4.2- Choix et sélection des constituants.....	45
4.2.1- Gravillons.....	45
4.2.2- Le sable.....	50
4.2.3- Eau de gâchage.....	52
4.2.4- Le ciment.....	54
4.2.5- Adjuvants du béton	57
4.2.6- Additions minérales.....	62

CHAPITRE V: FORMULATION D'UN BETON ORDINAIRE

5.1- Tracé de la courbe granulair de référence.....	66
5.2- Coefficient de compacité	67
5.3- Composition avec ciment CPA 325.....	68
5.4- Composition avec ciment CRS 400.....	69
5.5- Composition avec ciment CPJ 450.....	70

CHAPITRE VI: FORMULATION D'UN BETON H.P:

6.1- Méthodologie.....	71
6.2- Composition avec ciment CRS 400	71
6.3- Interprétation	74
6.4- Conclusion	75
6.5- Composition avec ciment CPJ 450.....	75
6.6- Composition avec ciment CPJ 450 par la méthode des coulis.....	77
6.7- Composition avec ciment CPA 550	85
6.8- Etude comparative.....	91

CHAPITRE VII: CONCLUSION GENERALE et RECOMMANDATIONS

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Car il est plus facile une fois qu'on acquies une certaine connaissance des équations, d'en imaginer en suite la démonstration, que si l'on recherchait celle-ci sans aucune notion préalable.

ARCHIMEDE

I.1. Généralités :

Depuis longtemps, les constructeurs ont cherché à remédier à la fragilité des maçonneries. L'invention de béton depuis plus d'un siècle résoud non seulement le problème de fragilité et il apporte aussi un grand intérêt au plan de l'économie et des possibilités d'expressions architecturales.

Le béton se présente comme un mélange artificiel de cailloux, de graviers et de sable réunis entre eux à l'aide d'un liant hydraulique. Ce matériau composite est utilisé de nos jours aussi bien pour la réalisation des constructions les plus modestes, les ouvrages d'art les plus hardis, en passant par les bâtiments de grande hauteur.

L'emploi du béton, en quantité considérable, nous permet d'affirmer que ce matériau est toujours en évolution. Ainsi, aujourd'hui, on dispose d'une large gamme de bétons et l'on choisit donc, pour chaque type d'ouvrage le béton adéquat. Nous citerons comme exemple les bétons légers, les bétons maigres, les bétons lourds, les bétons de réparation ...etc.

Avec les exigences de la construction et la nature des ouvrages à réaliser, les chercheurs sont amenés à améliorer les propriétés du béton. La technologie des bétons à hautes performances a vu le jour avec une problématique : Trouver la formule représentant le meilleur compromis entre maniabilité et résistance, ces deux caractéristiques étant généralement antinomiques.

Bien que la qualité du liant et la nature des agrégats soient des facteurs très importants pour avoir un béton de qualité, l'obtention d'un béton à hautes performances fait appel à d'autres constituants secondaires : les ajouts minéraux et les ajouts macromolécules organiques.

- Les ajouts minéraux sont destinés à :
 - Améliorer l'ouvrabilité du béton.
 - Rendre le béton plus stable en milieu agressif
 - Réduire la chaleur d'hydratation de la pâte de ciment.
 - Améliorer la compacité du béton.
 - Retarder ou accélérer la prise de la pâte de ciment et le durcissement du béton.
- Les ajouts macromolécules organiques sont destinés à :
 - Fluidifier le béton.
 - Réduire la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour avoir une ouvrabilité donnée

I.2. Historique :

C'est en Amérique du Nord que la technologie des B.H.P et B.T.H.P a connu son développement, notamment dans la région de Chicago où se situe le siège social de "l'Association du ciment Portland", grâce à l'intérêt qu'y apportèrent un concepteur WILLIAM SCHMIDT et producteur progressiste JONH ALBINGER de la compagnie "Materials Services".

Le tableau ci-dessous présente quelques ouvrages réalisés en B.H.P durant ces dernières années.

Année	Le projet	Ville (Pays)	résistance à la compression à 28 jours (MPa)
les années 50	Un béton de laboratoire	Chicago (USA)	35
1962	Edifice : Lake Shore Plaza	Chicago (USA)	40
1965	Edifice : Lake Point bulding	Chicago (USA)	50
1972	Edifice : Mid continental Plaza bulding	Chicago (USA)	60
1976	Edifice : River Plaza Project	Chicago (USA)	75
1984	Un béton de laboratoire	Montréal Canada	100
1986	Edifice : abritant la banque nouvelle Ecosse	Toronto Canada	80
1987-1988	Scotia Plaza	Toronto Canada	83,4
1988	L'Arche de la défense	Paris France	70,2
1988-1989	Two Union Square	Seattele (U.S.A)	120
1991	La grande mosquée Hassan II	Casablanca Maroc	92,5

I.3. Classification des Bétons :

I.3.1. Généralités sur les catégories des bétons de structure :

Nous pouvons distinguer les bétons de structures de la façon suivante :

- Les bétons ordinaires: utilisés depuis longtemps et dont la résistance caractéristique varie entre 20 et 50 Mpa.
- Les bétons à hautes performances : sont composés avec des granulats classiques, des adjuvants fluidifiants et éventuellement des ultrafines; et dont la résistance caractéristique varie, elle est comprise entre 50 et 80 Mpa.
- Les bétons à très hautes performances : pour lesquels les granulats doivent être choisis, incluant adjuvants, fluidifiants et ultrafines; et dont la résistance caractéristique est au delà de 80 Mpa.
- Bétons exceptionnels : certains organismes de recherche ont composé des bétons dont la résistance mécanique dépasse 150 Mpa.

I.3.2. Classification des bétons H.P et T.H.P :

La classification la plus récente des bétons à hautes et très hautes performances est basée sur la résistance à la compression et la facilité avec laquelle cette résistance peut être atteinte sur le lieu de construction, elle distingue quatre classes de résistances, mesurées à 91 jours sur des éprouvettes cylindriques de type (100 x 200) mm. Il a été montré que cette résistance n'augmente plus au delà de ce délai, toute l'eau de gâchage ayant alors réagi.

Classe I : $75 \pm 12,5$ Mpa

Les bétons de cette classe sont obtenus avec :

- Des matériaux de qualité.
- Un rapport E/C compris entre 0.3 et 0.4.
- Un ajout minéral : non nécessaire mais préférable.
- Un super plastifiant ou un haut reducteur d'eau.

Classe II : $100 \pm 12,5$ Mpa

Ces bétons peuvent être obtenus avec:

- un rapport E/C compris entre 0.25 et 0.3.
- L'utilisation d'un super plastifiant est obligatoire.
- Des matériaux de très bonne qualité.
- Un ajout minéral.
- Un retardateur de prise.

Classe III : $125 \pm 12,5$ Mpa

Ils sont obtenus grâce à :

- Des matériaux d'excellente qualité.
- De la fumée de silice.
- Des techniques de malaxage très efficaces.
- Un degré de contrôle élevé.
- Un rapport E/C compris entre 0,20 et 0,25.
- Un fort dosage en super plastifiant et retardateur.

Classe IV : Au dessus de 150 Mpa

Ils ne sont encore fabriqués qu'en laboratoire, un béton de 280 Mpa avec un rapport E/C de 0,16 a été obtenu dans un laboratoire Danois.

I.4. Microstructure des bétons à hautes performances :

FERET, 1897 a exprimé la résistance à la compression par la relation suivante :

$$f_{c28} = K_g \frac{R_{c28}}{\left(1 + \frac{3,1 E/C}{1,4 - 0,4 e^{-11S/C}}\right)^2}$$

f_{c28} : La résistance moyenne de compression à 28 jours.

E, C et S : sont les poids respectifs d'eau, de ciment et de fumée de silice au m³ de béton.

R_{c28} : est la classe vraie de ciment.

K_g : est un paramètre dépendant de la qualité des granulats (pour les granulats courants, la valeur $K_g = 4,91$ conduit à des résultats corrects).

La réduction du rapport E/C entraîne une augmentation de la résistance, il y a cependant une limite à ce rapport qui est liée à la maniabilité du béton frais. Lors de la formulation des bétons H.P, on réduit le dosage en eau par étalement de la partie fixe de leur granularité et par ajout de superplastifiant ou des hauts reducteurs d'eau; cet état initial explique pour une large part la microstructure du béton durci.

L'utilisation des fluidifiants pour une meilleure dispersion des particules solides permet une réduction du rapport E/C. Des études en résonance magnétique nucléaire du proton ont montré que le fluidifiant s'adsorbe sur les particules solides formant des pellicules dans lesquelles les molécules d'eau gardent une grande mobilité. A l'effet pelliculaire s'ajoute celui de la dispersion des particules solides, les deux créant une meilleure rhéologie de suspension.

Si on s'intéresse aux volumes non solides (liquide ou gaz) du béton durci et en affinant progressivement l'échelle d'observation, on trouve les vides suivants :

- Les bulles d'air occlus entraînées lors de malaxage du béton en faible quantité du fait de la fluidité du béton H.P.
- Les interfaces pâte-granulats : les caractéristiques pâte de ciment-granulat comprennent la surface de fracture, la fissuration, la composition et la texture des hydrates.
- Sur la surface lisse des granulats le dépôt d'hydrates est composé d'un film de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de fibre de silicate C-S-H, ce dépôt n'est liée que très faiblement aux granulats et s'en détache facilement.

- Les vides constitués des vestiges des espaces intergranulaire de la pate fraiche: ces interstices sont incomplètement comblés par les hydrats du fait de la contraction et de la non-combinaison d'une partie de l'eau de gachage, mais l'eau libre est en quantité très limitée dans les bétons H.P et T.H.P, grâce au faible dosage initial. Par ailleurs dans cette gamme de rapports E/C, la quantité d'hydrates est probablement plus faible que dans un béton ordinaire ayant le même dosage en ciment.
- Les vides présents dans la structure même des hydrates: ces vides sont à l'échelle de nanomètre.

En conclusion la microstructure des bétons à hautes et très hautes performances est très dense et globalement amorphe, et elle comporte un volume inhabituel de grains anhydres (restes de ciments non combinés par manque d'eau disponible). De plus les interfaces pate-granulats sont peu poreux et ne présentent pas l'accumulation de cristaux de chaux .

1.5. Conclusion :

Pour conclure ce chapitre, il est intéressant de reprendre la phrase du profeseur P.C.AITCIN de l'université de Sherbrooke : "il n' y a pas de B.H.P sans fluidifiant". En effet, la résistance du béton en général augmente lorsque le rapport E/C diminue, d'autre part la microstructure des bétons H.P et T.H.P ne laisse pas de doute; cependant l'obtention d'un mortier résistant, d'un e surface de contact pate-granulats rugueuse et des granulats résistants est primordial pour atteindre les meilleures résistances à la compression.

Les bétons de la nouvelle génération ont l'avantage par rapport aux bétons ordinaires :

- De reprendre un certain niveau de charge avec moins de béton.
- De réduire la section de certains éléments de structure tels que les poteaux, les voiles, les fondations etc....
- D'utiliser moins de coffrage et moins d'armatures,
- De limiter le coût de mise en oeuvre.

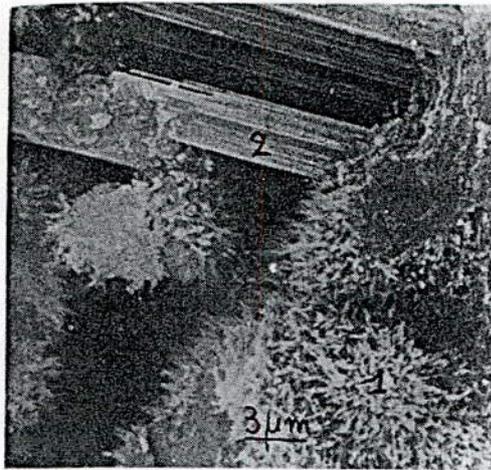


photo 1 Fig1. Pâte de ciment Portland e/c = 0,5
(1)C-S-H fibreux,(2)Ca(OH)₂,(3) pore capillaire

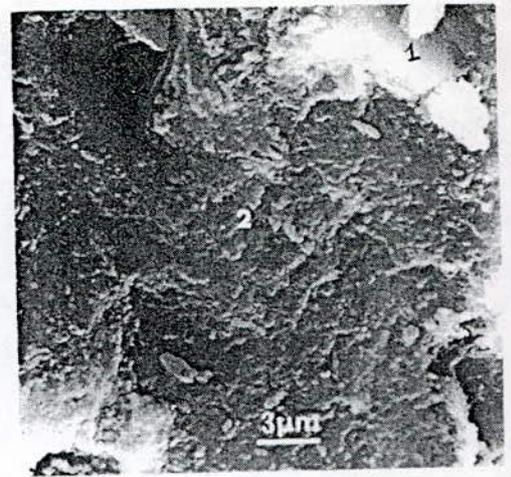


photo 2 Fig2. DSP (Fumée de silice)
(1)Ca(OH)₂,(2)C-S-H amorphe



photo 3 Fig3. Pâte de ciment MDF
Fins cristaux de Ca(OH)₂ dans une matrice amorphe

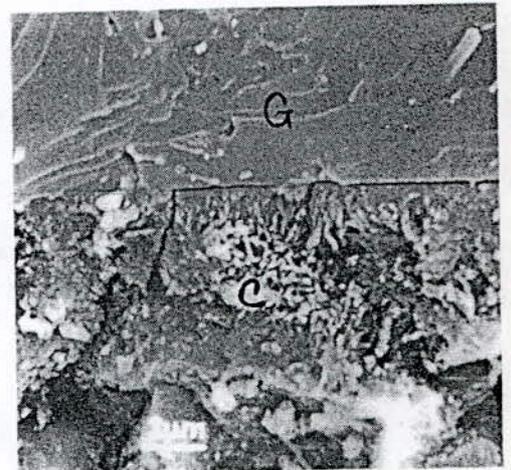


photo 4 Fig4. Liaison pâte de ciment-granulat
Interface poreux et fissuré (G=granulat, C=ciment)

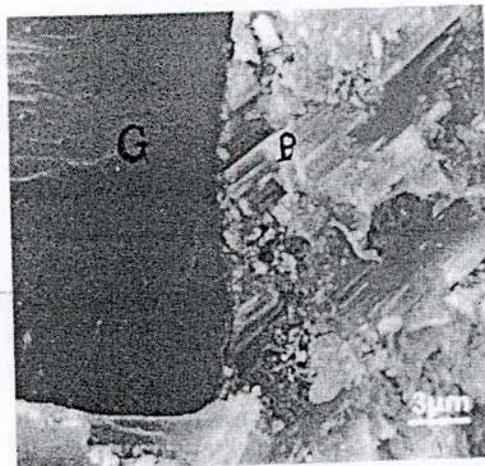


photo 5 Fig5. Interface pâte de ciment-granulat
Cristaux de Ca(OH)₂ orientés (P) sur le granulat

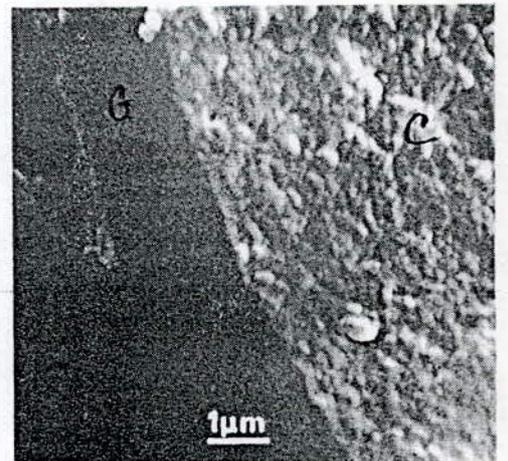


photo 6 Fig6. béton DSP
Liaison transgranulaire, pâte de ciment-granulat matrice homogène. Pas de fissure à l'interface.

CHAPITRE II

METHODES DE FORMULATION

La pensée n'est qu'un éclair au milieu d'une longue nuit, mais
cette éclair qui est tout.

HENRI POINCARRE

I-Introduction:

Le béton est le résultat d'une technologie simple , il suffit de peser et de mélanger un certain nombre d'ingrédients liquides ou solides , mais surtout d'une série de réactions physico-chimiques fort complexes dont on ne maîtrise pas encore toujours toutes les subtilités .

L'amélioration des propriétés du béton fait de ce matériau un emploi industriel en constante hausse dans la construction . Cette hausse exige qu'on optimise sa composition en tenant compte de l'état d'avancement des connaissances scientifiques et techniques . C'est dans ce contexte que les méthodes de composition optimales ont vu le jour .

Elles se divisent en méthodes traditionnelles et nouvelles, Les méthodes traditionnelles sont destinées à optimiser des mélanges de bétons classiques ($f_c 28 < 40$ MPA).

Elles peuvent être classées en trois générations:

- 1- Les méthodes de première génération (de 1880 à 1917).
- 2- Celles de la seconde génération (de 1918 à 1963) se fondent sur le principe de la compacité maximale .
- 3- Les méthodes de la troisième génération (à partir de 1970) . Elles se basent sur les caractéristiques du béton qui conviennent aux conditions du chantier , à l'environnement et aux dimensions de l'ouvrage à réaliser pour déterminer la quantité de ciment, ainsi que la grosseur maximale des granulats à utiliser.

Quant aux nouvelles méthodes , elles sont destinées à l'optimisation de la composition des bétons de hautes performances .

2- Rappel de formulations des bétons ordinaires:

2.1 - La méthode d'Abrams (1918) :

Abrams dans sa méthode , exploite les travaux de Thompson -Fuller et ceux de Féret , il donne une expression de la résistance du béton à 28 jours en fonction du rapport

eau/ciment = x .

$$R_{28j} = A / B^x$$

où :

* A et B sont des constantes.

Abrams utilise le module de finesse M_f des granulats pour comparer les bétons . Ainsi en fonction de la dimension maximale des granulats utilisés et de leur module de finesse global M_f , on peut à partir du tableau n°1 déterminer la quantité de ciment à utiliser pour avoir un béton à vide minimum.

Dosage en ciment kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

Tableau 1: valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse de compositions granulats des béton courants .

2.2 -La méthode de Bolomey (1925) :

En 1925, Bolomey propose une loi de granulation continue en s'inspirant de la loi de Thompson -Fuller. Il y a adjoint un coefficient "A" qui permet d'étendre la granulaire des constituants du béton à celle du ciment.

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d} / D \quad (1)$$

où:

- * P est le pourcentage en poids de grains passant par la passoire de diamètre d.
- * D le diamètre du plus gros granulat.
- * A un coefficient de 8 à 16 en fonction du dosage en ciment

Ainsi, la courbe granulométrique globale de tous les constituants granulaires du béton, le ciment compris, doit se rapprocher le plus possible de la courbe de référence définie par l'équation (1).

2.3 - La méthode de Faury (1942) :

Après une étude générale sur le béton, s'appuyant sur l'effet de paroi mis en évidence par Caquot (influence des dimensions du module et des armatures, sur l'arrangement des grains de granulats et sur la capacité d'un béton à couler librement à travers les mailles d'armatures pour occuper correctement le volume qui est imparti dans une pièce d'ouvrage à réaliser) sur la loi de Fuller-Thompson et sur les vides du béton à évalués que la granulométrie de référence de Faury comporte deux domaines $d < D/2$ et $d > D/2$.

Représentée sur une échelle en $\sqrt[3]{d}$, sa courbe comportera deux demi-droites dont le point d'intersection se situe à $D/2$ d'abscisse avec une ordonnée égale à:

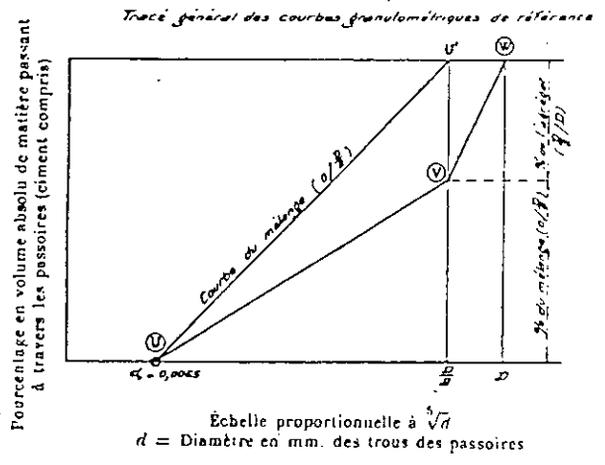


$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D-0.75}}$$

où

- * A = f(D) ; (voir tableau n° 2).
- * R , est le rayon du module (effet de paroi).
- * B = 1 à 2 selon le béton (ferme ou mou).

Ces deux demi-droites constituent la courbe de référence de tous les constituants solide du béton



	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	au-dessous de 22 (à déterminer dans chaque cas)	au-dessous de 24 (à déterminer)	au-dessous de 28 (à déterminer)

tableau .2 : Valeur de A.

Il sera cependant possible pour simplifier les choses de tracer la courbe de référence , pour le squelette granulaire seulement et de déterminer la quantité de ciment en fonction de la résistance moyenne visée .

2.4 - La méthode Dreux Gorisse (1970) :

Cette méthode empreinte des éléments par-ci par-là à certaines des méthodes précédentes , que nous venons de voir .

Elle se base aussi sur l'effet de paroi de la théorie de granulation optimale de Caquot et sur les performances du béton .

Ainsi on part des données de base sur l'ouvrage que l'on veut réaliser , du mode de mise en oeuvre du béton , de la résistance visée et des conditions d'exposition de l'ouvrage (durabilité) pour concevoir le béton .

Les données de base nous amènent à prendre en compte la nature de l'ouvrage (massif , élancé , à sections minces faiblement ou fortement ferrillées) .

La résistance caractéristique du béton nous permettra d'évaluer la résistance moyenne visée à 28 jours par l'expression suivante :

$$\tau_{c\ 28} = \tau'_{n\ 28} + K_1 \cdot S$$

où :

- * $\tau_{c\ 28}$ est la résistance moyenne compression visée à 28 jours .
- * $\tau'_{n\ 28}$ est la résistance caractéristique du béton à 28 jours .
- * K_1 est un coefficient dépendant de l'ordre de risque admis (voir tableau n°3) .
- * S est l'écart type (voir tableau n° 4) .

Remarques :

La consistance désirée du béton est choisie en fonction de la mise en oeuvre disponibles (voir tableau n° 5) .

→ à soumettre p 15 (Calculatrice des BTP)

tableau 3:

Valeur de k_1 en fonction de l'ordre du risque p %

Ordre du risque p	1 %	5 %	10 %	20 %	50 %
Valeurs de k_1	2,33	1,64	1,28	0,8	0

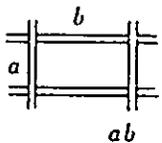
tableau 4 : Valeurs d'écart-types

Fabrication	Ecart-types en MPa	
	Par LOT	Global
Très régulière et très bien contrôlée	< 3	< 5
Régulière et bien contrôlée	3 à 4	5 à 6
Irrégulière, contrôle inexistant ou inefficace	5 à 6	≥ 7

tableau 5 : Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S. (chapitre 2, paragraphe 2.24).

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N nombre de chocs test C.E.S.
Béton très ferme	vibration puissante (1)	0 à 2	> 60
Béton ferme	bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	léger piquage	≥ 14	< 10

tableau 6 : Évaluation approximative de D dimension maximale (Tamis) des granulats, en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive :

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D (Tamis)
e_h espacement horizontal entre armatures		$< \frac{e_h}{1,5}$
e_v — vertical —		$< e_v$
c distance des armatures au coffrage	{ ambiance très agressive > 4 cm { ambiance moyennement agressive > 3 cm { ambiance peu agressive > 2 cm { ambiance non agressive > 1 cm	$< c$
	r rayon moyen du ferrailage	
	Granulats roulés	$< 1,4 r$
	Granulats concassés	$< 1,2 r$
	$r = 2(a + b)$	
h_m hauteur ou épaisseur minimale		$< \frac{h_m}{5}$

La dimension maximale des gros granulats est fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner, des dimensions des mailles de ferrailage, de la provenance des granulats (roulés ou concassés) et de l'environnement où va servir l'ouvrage (voir tableau n° 6).

Le dosage du béton se fera sur la base d'une courbe de référence, et à l'aide de la formule suivante :

$$\tau'_{c28} = G \cdot \tau_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

où :

* G est un coefficient granulaire.

III- Formulation des BHP

3.1- La méthode de H.C / ERNTROY ET B. W. SHACKLOCK (1954):

Cette méthode s'applique à des bétons de ciment portant de plus de 40 MPA à 28 jours, fabriqués avec du gravier de forme irrégulière et de sable naturel, ou avec du granite concassé et du sable naturel.

Les auteurs de la méthode ont préparé des graphiques empiriques qui lient la résistance en compression simple à un nombre de référence arbitraire.

Les étapes de formulation d'un BHP sont :

1- ON choisit le nombre de référence du BHP en fonction des performances à atteindre sur l'une des figures (3 - 1-1 ; 3 - 1 - 2).

→ à partir de f_{28} (1, 2, 3)

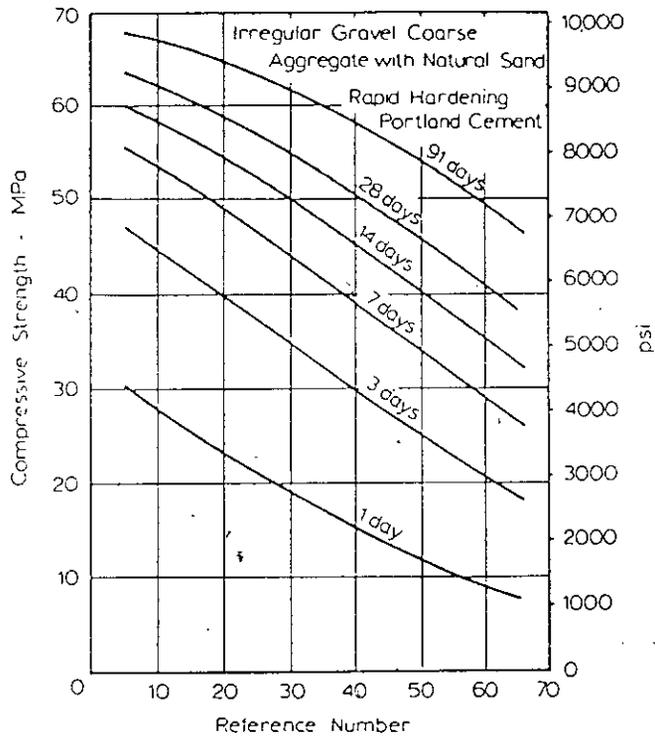


fig 3.1. 1

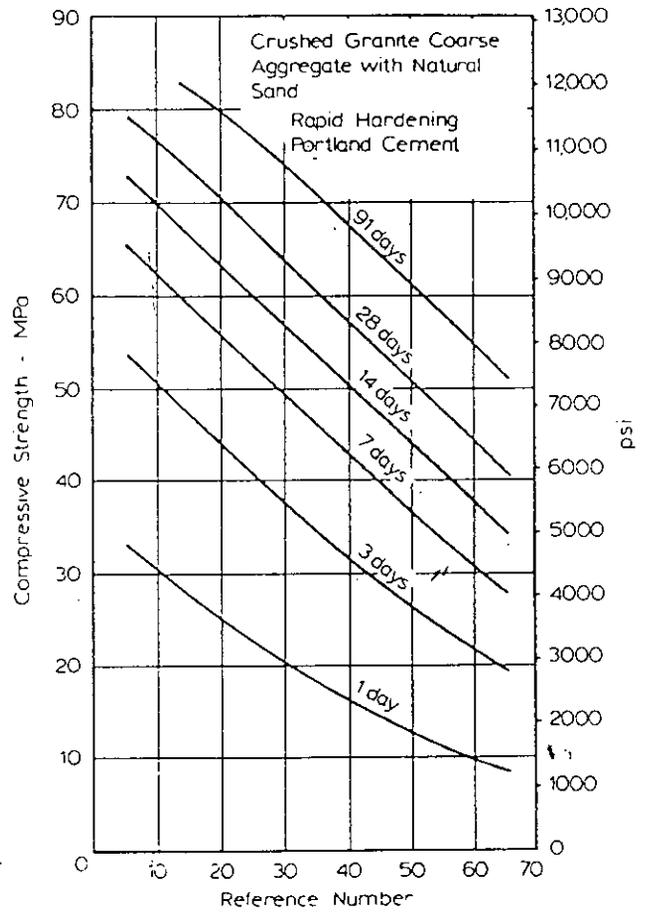


fig 3.1.2

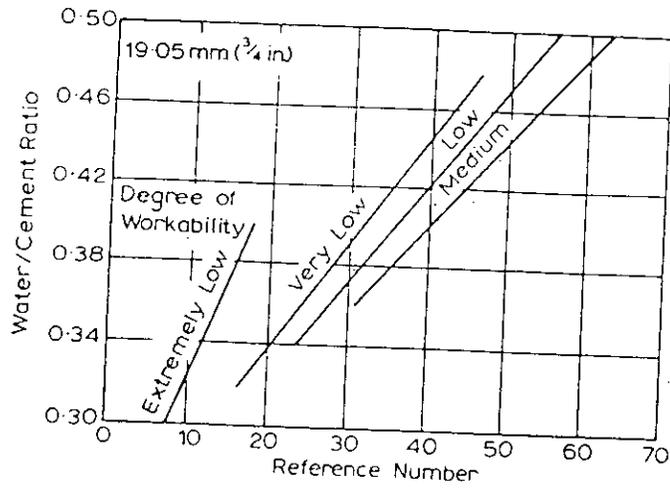


fig 3.1.3

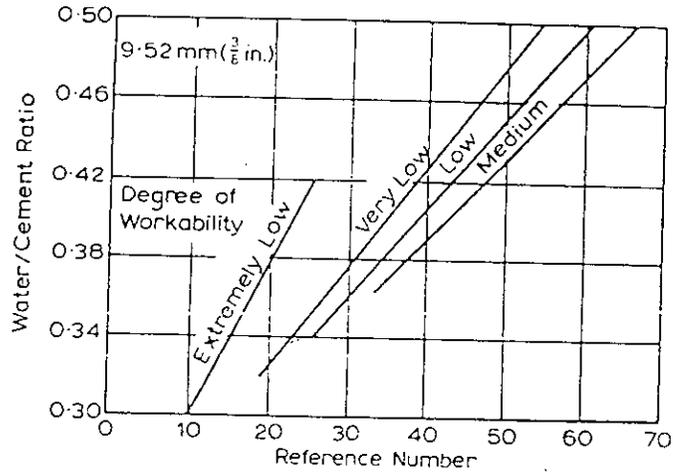


fig 3.1.4

Aggregate/Cement Ratio (by weight) required to give Four Degrees of Workability with Different Water/Cement Ratios using Rapid-hardening Portland Cement^{10,10}

Type of coarse aggregate*	Irregular gravel								Crushed granite								
	19.05 mm (¾ in.)				9.52 mm (⅜ in.)				19.05 mm (¾ in.)				9.52 mm (⅜ in.)				
Degree of workability†	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	
Water/cement ratio by weight	0.32	2.6	—	—	—	—	—	—	2.9	—	—	—	2.5	—	—	—	
	0.34	3.4	2.2	—	—	2.8	—	—	3.6	2.4	—	—	3.2	—	—	—	
	0.36	4.1	2.7	2.3	—	3.5	2.4	—	4.3	2.9	2.4	—	3.9	2.5	—	—	
	0.38	4.8	3.2	2.8	2.3	4.2	2.9	2.4	—	4.9	3.4	2.9	2.4	4.5	3.0	2.5	—
	0.40	5.5	3.7	3.2	2.7	4.9	3.3	2.8	2.3	5.5	3.9	3.3	2.7	5.0	3.4	2.9	2.4
	0.42	—	4.2	3.6	3.0	—	3.7	3.1	2.6	—	4.2	3.6	3.0	5.5	3.8	3.2	2.7
	0.44	—	4.6	4.0	3.4	—	4.1	3.5	2.9	—	4.7	4.0	3.3	—	4.2	3.5	3.0
	0.46	—	5.0	4.3	3.7	—	4.5	3.8	3.2	—	5.1	4.3	3.6	—	4.6	3.8	3.2
	0.48	—	5.5	4.7	4.0	—	4.9	4.1	3.5	—	5.5	4.6	3.9	—	5.0	4.1	3.4
	0.50	—	—	5.0	4.3	—	5.2	4.4	3.7	—	—	4.9	4.1	—	5.3	4.4	3.7

* Natural sand used in combination with both types of coarse aggregate.

†EL = "Extremely Low"

VL = "Very Low"

L = "Low"

M = "Medium"

} see Table 4.2

tableau 3. .1

Aggregate/Cement Ratio (by weight) required to give Four Degrees of Workability with Different Water/Cement Ratios using Ordinary Portland Cement^{10,11}

Type of coarse aggregate*	Irregular gravel								Crushed granite								
	19.05 mm (¾ in.)				9.52 mm (¾ in.)				19.05 mm (¾ in.)				9.52 mm (¾ in.)				
Degree of workability†	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	EL	VL	L	M	
Water/cement ratio by weight	0.30	3.0	—	—	—	2.4	—	—	—	3.3	—	—	—	2.9	—	—	—
	0.32	3.8	2.5	—	—	3.2	—	—	—	4.0	2.6	—	—	3.6	2.3	—	—
	0.34	4.5	3.0	2.5	—	3.9	2.6	—	—	4.6	3.2	2.6	—	4.2	2.8	2.3	—
	0.36	5.2	3.5	3.0	2.5	4.6	3.1	2.6	—	5.2	3.6	3.1	2.6	4.7	3.2	2.7	2.3
	0.38	—	4.0	3.4	2.9	5.2	3.5	3.0	2.5	—	4.1	3.5	2.9	5.2	3.6	3.0	2.6
	0.40	—	4.4	3.8	3.2	—	3.9	3.3	2.7	—	4.5	3.8	3.2	—	4.0	3.3	2.9
	0.42	—	4.9	4.1	3.5	—	4.3	3.6	3.0	—	4.9	4.2	3.5	—	4.4	3.6	3.1
	0.44	—	5.3	4.5	3.8	—	4.7	3.9	3.3	—	5.3	4.5	3.7	—	4.8	3.9	3.3
	0.46	—	—	4.8	4.1	—	5.1	4.2	3.6	—	—	4.8	4.0	—	5.1	4.2	3.6
	0.48	—	—	5.2	4.4	—	5.4	4.5	3.8	—	—	5.1	4.2	—	5.5	4.5	3.8
	0.50	—	—	5.5	4.7	—	—	4.8	4.1	—	—	5.4	4.5	—	—	4.7	4.0

* Natural sand used in combination with both types of coarse aggregate.

EL = "Extremely Low"
 VL = "Very Low"
 L = "Low"
 M = "Medium"

} see Table 4.2

2- Connaissant le nombre de référence du BHP , la grosseur maximale des granulations et l'ouvrabilité du béton , on détermine le rapport E/C requis sur l'une des figures (3 - 1 - 3 ; 3 - 1 - 4) .

3- Sur les tableaux 3 -1 et 3 - 2 on détermine le rapport granulats / ciment , connaissant le rapport E / C , l'ouvrabilité du BHP , le type de gros granulats à utiliser et leur grosseur maximale .

3-2- La méthode de l'institut américain du béton [A.C.I.] (1984):

Cette méthode présente un mode opératoire pour sélectionner et mélanger dans des proportions données , les matériaux de base qui sont eux mêmes de bonnes performances pour la réalisation d'un BHP .

Les étapes que propose cette méthode pour la formulation d'un BHP sont les suivantes :

1- Choisir un rapport E/C nécessaire pour obtenir les performances désirées.

Remarque :

La réalisation $E / C = f(f_c 28)$, conçu pour les bétons ordinaires , reste valable pour les BHP .

2- La quantité de ciment peut être établie par gâchée d'essai , cependant les quantités déjà utilisées varient entre 392 et 557 Kg / m3 de béton .

3- On détermine la quantité des gros granulats connaissant leur grosseur maximale et le module de finesse du sable (voir tableau III - 2) .

4- Le dosage des ajouts minéraux varie entre 10 et 14 % du poids du ciment .

Remarque :

Cette méthode est applicable pour les gros granulats aux alentours de 10 - 14 mm

Volumes des granulats par unité de volume

<i>Grosseur maximale des granulats (in)</i>	<i>Volume</i>			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.66
1 1/3	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

tableau III . 2

3-3- La méthode de DE LARRARD (1988) :

(méthode dite des coulis)

Elle se base sur la méthode expérimentale de formulation des bétons ordinaires , et elle s'appuie sur la loi de FERET généralisée , qui permet d'évaluer la résistance moyenne à 28 jours .

La méthode s'appuie aussi sur le modèle classique de viscosité des suspensions de FARRIS d'un mélange à n classes granulaires .

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\phi_1}{\phi_1 + \dots + \phi_n + \phi_0} \right) H \left(\frac{\phi_2}{\phi_2 + \dots + \phi_n + \phi_0} \right) \dots \dots H \left(\frac{\phi_n}{\phi_n + \phi_0} \right)$$

où

- * $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ sont les volumes occupés par les classes de granulats, 1, 2, ..., n (n est un volume unitaire de la suspension)
- * ϕ_0 le volume du liquide dans le volume unitaire de suspension
- * η_0 la viscosité du liquide seul
- * H une fonction de la variation de la viscosité relative d'une suspension

Les étapes de cette méthode sont :

1- on formule le BHP << 0 >> de référence , en rajoutant au squelette de formule régionale 425 Kg de ciment et l'équivalent de 1,5 % ^{de} ce fluidifiant en extrait sec , et on recherche le dosage en eau qui donnera un affaissement égal à 20 cm .

on formule en coulis

2- La formulation du coulis de référence , Sa composition correspond à celle de la pâte du BHP << 0 >> , sans eau de mouillage des granulats (10 l/ m³ de béton) . Le temps d'écoulement au cône de MARSH entre 5 et 15 secs .

ou méthode

3- On détermine la composition minérale des coulis HP en faisant varier la nature du ciment , le taux de fumée de silice (entre 5 et 10 %) et en prévoyant éventuellement une partie de fines .

4- On détermine le dosage en superplastifiant des coulis HP /

-pour chaque coulis HP avec 0,3 % de superplastifiant , on détermine la quantité d'eau nécessaire pour une consistance fluide mais épaisse , puis on mesure l'évolution des temps d'écoulement en fonction du dosage croissant en adjuvant ou superplastifiant

5- On détermine le dosage en eau des coulis HP fluidifiés de façon à obtenir le temps d'écoulement de référence .

Ces BHP que l'on pourra confectionner avec ces coulis auront la même quantité de pâte et la même maniabilité .

3-4- La méthode de PEDECHES (1988) :

L'auteur de cette méthode propose des courbes de résistances en fonction des dosages E / C et du liant , et ceci en tenant compte du critère économique.

Les étapes de cette méthode sont :

1- établir différents mélanges granulaires à partir des cinq classes suivantes :

0/0,5 ; 0,5/1,25 ; 1,25/3 ; 2,5/5 et 4/10 mm , pour concevoir des BHP avec quatre dosages en liant 250 , 350 , 500 et 600 Kg / m³ .

2- avec la méthode DREUX - GORISE on détermine le mélange dosé à 500 KG /m³ de liant dont le sable 0-5 mm (voir fig. 3-4) .

Remarque :

Le sable a un module de finesse imposé égal à 3 .

Courbes granulométriques des constituants du béton utilisés

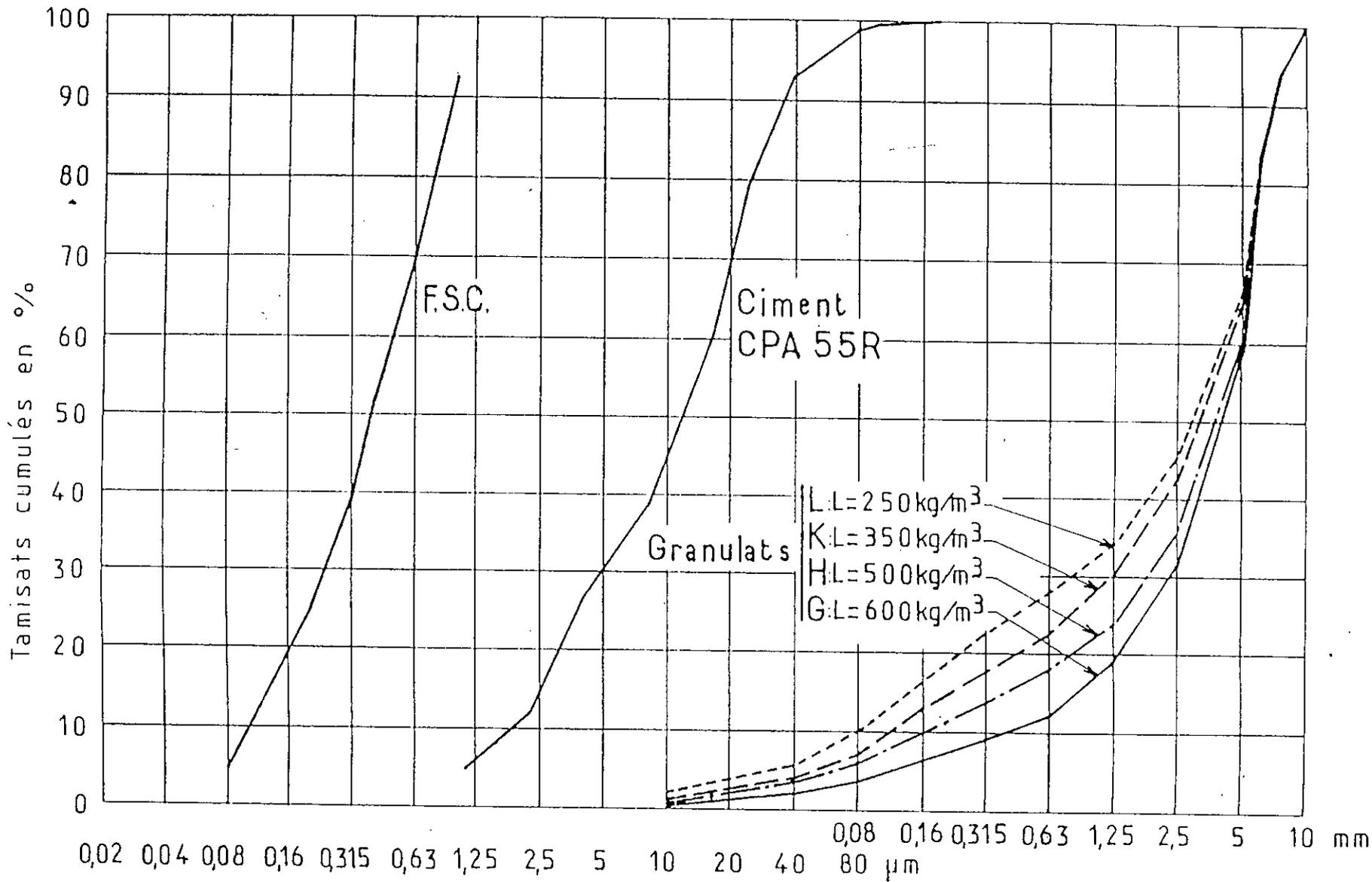


fig 3

3- On trace la courbe granulométrique pour le BHP de composition pondérale $F_{sc} / C = 10\%$, $E / C = 0,305$.

4- On détermine le dosage en eau pour avoir une maniabilité (du BHP de référence) de 10 à 15 sec.

5- On détermine le dosage en eau avec 10 % en F_{sc} .

6- On fait varier le dosage de fumée de silice tout en gardant la quantité d'eau constante

7- La maniabilité des BHP obtenus est réalisé par dosage adéquat de fluidifiant .

Remarques :

* le dosage en fluidifiant n'exède pas les 6 à 7 % .

* on rajoute parfois de l'eau pour obtenir la maniabilité désirée si on est à la limite d'utilisation du fluidifiant .

8- Une fois la composition théorique du BHP terminée , on réalise des gâchées d'essai , on teste les propriétés rhéologiques et mécaniques et enfin , on détermine les proportions du mélange final .

4- Conclusion :

Quelque soit la méthode de formulation utilisée pour confectionner un béton à haute performance , on procède à des essais rhéologiques sur le béton frais et des essais mécaniques sur le béton durci , pour voir si on a atteint les performances recherchées .

Lorsqu'on mesure la résistance en compression (la performance recherchée dans le cadre de notre travail) , 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 .

Donc notre objectif réside à :

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

Pour obtenir le mortier le plus résistant possible , il suffit d'abaisser au maximum son rapport E/C , il faut donc prévoir l'utilisation de fluidifiant ou d'adjuvant .

La méthode ERNTRY et SHACKLOCK ne prévoit ni l'utilisation d'ajout submicroniques ni de fluidifiant . Cette méthode ne peut faire l'objet d'une optimisation de la composition des BHP.

La méthode de l'institut américain repose sur la loi d'Abrams $E/C = f(fc^{28})$ pour la détermination de la résistance en compression simple. Sachant qu'on peut substituer une partie du ciment par des ajouts submicroniques sans changer le rapport E/C (ce qui donne une gamme de BHP dont la résistance en compression simple diffère), nous avons opté pour la non utilisation de cette méthode .

Quant à la méthode de PEDECHE, elle reste limitée par les dimensions des granulats et leurs caractéristiques bien déterminées . Cette méthode se base sur l'obtention des courbes granulométrique des constituants du béton; il est impossible pour nous de tracer avec exactitude les courbes granulométriques du ciment , des laitiers , des filaires et des Kieselgühr et de la fumée de silice qui varient entre 0.08 μm et 80 μm .
Kieselgühr

Cette méthode est également écartée dans notre expérimentation .

Pour optimiser des BHP il faudrait plusieurs gâchées de béton. La méthode de ^{Tyrançois} De larrard procède a des essais sur coulis , et puis vérification sur béton , sans changer le squelette , ou la nature des proportions . Cette méthode réduit donc considérablement le nombre de gâchées . En plus le matériel utilisé sera du matériel usuel de laboratoire de béton , on utilise des granulats et des ciments locaux .

Cette méthode semble la plus adéquate pour notre travail.

CHAPITRE III
PROPRIETES MECANIKES

Une loi est un modèle qui n'est plus (ou pas encore!) contesté
un modèle devient une loi on sombre dans l'oubli.

Boileau

III.1. Introduction :

Les propriétés mécaniques d'un béton et généralement d'un corps quelconque sont intimement liées à sa structure et à la nature de ses liaisons inter-atomiques, ceci donne à ces propriétés un caractère intrinsèque définissant le matériau. Le béton durci présente des caractéristiques mécaniques inférieures à celles de l'acier ou de l'alumine. Les différences les plus importantes apparaissent dans la résistance à la flexion et à la tenacité.

III.2. Résistance à la compression :

L'apport technologique a permis de modifier le béton à haute résistance en un béton à haute performance: en effet la propriété de haute performance est incontestablement la plus spectaculaire, il s'agit en premier lieu de la résistance à la compression. Il est très intéressant de considérer la cinétique de la montée en résistance, celle-ci est notablement plus rapide que celle des bétons ordinaires. Ceci résulte de la proximité initiale des grains de ciment dans le béton frais, ainsi que du rôle catalyseur et d'accélérateur de durcissement de la fumée de silice. La précocité des résistances peut être affinée à volonté dans la pratique à travers le choix et le dosage du ciment, sa teneur en aluminat et sa finesse de mouture, mais aussi par l'incorporation ou non d'un retardateur de prise et d'un accélérateur de durcissement.

Approximativement, la résistance que l'on peut atteindre à 14 heures avec un de ces nouveaux bétons est similaire à celle d'un béton ordinaire à 28 jours. Cette possibilité d'obtention de très hautes résistances en quelques heures peut nous permettre de conduire une approche différente de l'ordonnement du chantier: Les décoffrages et la mise en tension de câbles de précontrainte peuvent être effectués bien plus rapidement; il peut en découler des économies et des simplifications importantes.

A long terme, tous les bétons voient leur résistance augmenter. La résistance en compression est conventionnellement bornée par les règlements à f_{c28} dans les justifications concernant la limitation des contraintes et la résistance des

sections. Cependant les règlements BAEL et BPEL prennent en considération les performances du béton.

Pour les bétons ordinaires ou $f_{c28} < 50 \text{ Mpa}$

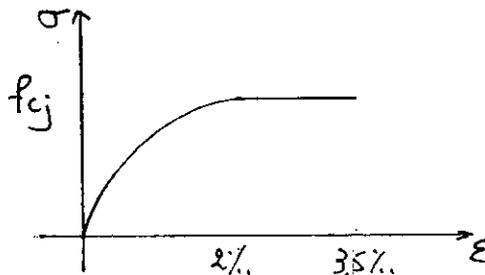
$$f_{c_j} = \frac{J}{4,76 + 0,83J} \cdot f_{c28}$$

Par contre pour les beton HP ($f_{c28} > 50 \text{ Mpa}$)

$$f_{c_j} = \frac{J}{1,40 + 0,95J} \cdot f_{c28}$$

III.3. LOIS DE COMPORTEMENT : diagramme σ - ϵ

Les règlements BAEL et BPEL 91 ont étendu le diagramme parabole-rectangle classique des bétons ordinaires aux betons de 50 Mpa, nous avons donc ainsi :

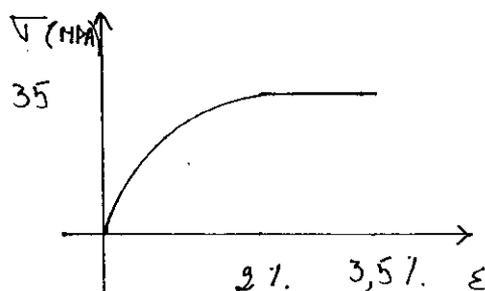


Mais cette lois, si elle semble approximativement valable pour les bétons normaux jusqu'à 50 Mpa de résistance caractéristique, ne l'est plus vraiment pour les BHP et BTHP car elle conduit à une surestimation de la capacité résistante.

On propose les diagrammes conventionnels suivants pour le calcul des sollicitations de rupture dans les différentes classes de béton:

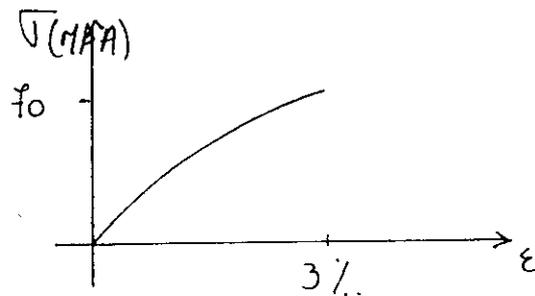
Les bétons normaux $F_{c28} < 50 \text{ Mpa}$:

parabole 2%
rectangle 3,5 %



Les bétons à hautes performances $50 \text{ Mpa} < f_{c28} < 80 \text{ Mpa}$

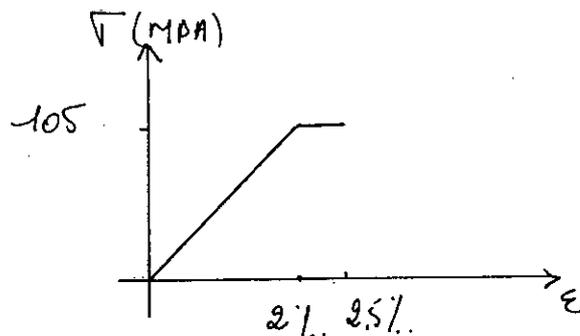
parabole 3 %



Les bétons à très hautes performances $80 \text{ Mpa} < f_{c28} < 120 \text{ Mpa}$

triangle 2%

rectangle 2,5%



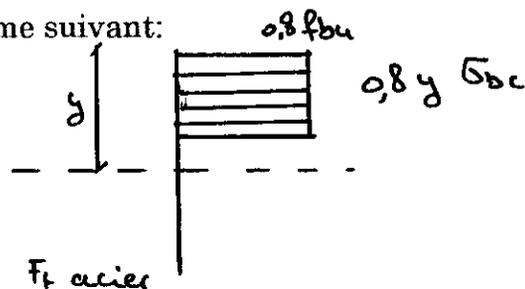
L'inconvénient de tels diagrammes est la phase de discontinuité des sollicitations résistantes calculées lorsqu' à résistance égale, on passe d'un diagramme à un autre.

Les règlements actuels imposent une contrainte admissible du béton de $0,85 f_{c28} / \gamma_b$ pour le calcul à l'état limite ultime, Le terme 0,85 exprime le rapport existant entre la résistance mécanique d'un béton soumis à un chargement de longue durée par rapport à un chargement de courte durée. Cet effet a été récemment mesuré sur différents bétons et on est arrivé globalement à des valeurs plus faibles (0,80 pour des B.O et 0,75 pour des bétons HP), et pour les BTHP il n'est pas sur que le rapport diminue encore.

Quoiqu'il en soit, certains chercheurs proposent, afin d'avoir la même sécurité qu'avec les B.O, de minorer de 0,05 le coefficient 0,85.

Le terme γ_b assure une sécurité par rapport aux incidents toujours possibles lors de la fabrication et de la mise en oeuvre. C'est pourquoi les valeurs de ce coefficient restent inchangées: 1,5 ou 1,15 selon les combinaisons de sollicitations.

Nous pourrions utiliser le diagramme suivant:



Une étude comparative d'un béton ordinaire et d'un béton à haute performance a permis de signaler les différences suivantes :

- La courbe reste lineaire pour une valeur plus élevée du rapport contrainte/contrainte de rupture.
- La deformation unitaire au pic des contraintes s'accroit avec la résistance.
- La valeur du raccourcissement ultime décroît.
- La branche descendante devient plus abrupte.

III.4. RESISTANCE A LA TRACTION :

La densification des matrices et l'interface pâte-granulat sont à l'origine d'une amelioration de la résistance en traction des BHP par rapport aux B.O. Cette résistance croit sensiblement et peut facilement atteindre des valeurs superieures à 6 Mpa ; ces dernieres pourraient être exploiter en béton precontraint.

On ne dispose pratiquement d'aucun resultat de traction directe, l'essai indirect le plus representatif est l'essai de fondage, et le résultat doit être pondéré par un facteur de réduction, (habituellement 0,6) pour tenir compte de la redistribution des contraintes juste avant la rupture.

Cette redistribution peut être fonction de la classe de résistance.

La figure (III 4.1) montre que la loi liant les résistances à la traction f_{tj} et à la compression f_{cj} en Mpa, preconisée par les règles BAEL et BPEL est assez satisfaisante.

Sur l'échantillon des résultats considerés cependant, sur un plus grand ensemble de resultats, il semble qu'une loi en puissance $2/3$ de f_{tj} serait plus proche de la réalité. En effet la loi lineaire risque de surestimer la resistance en traction des

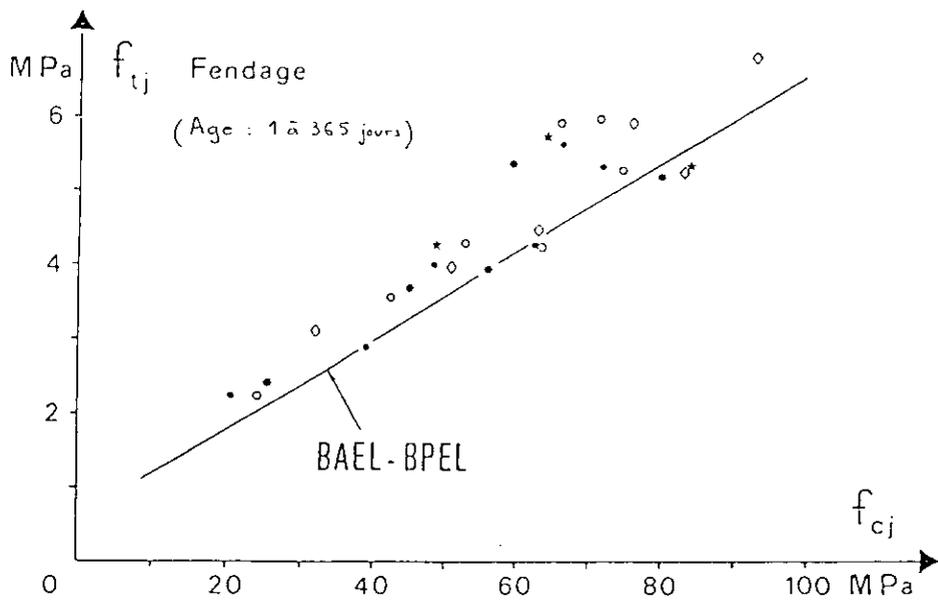


fig III.4.1

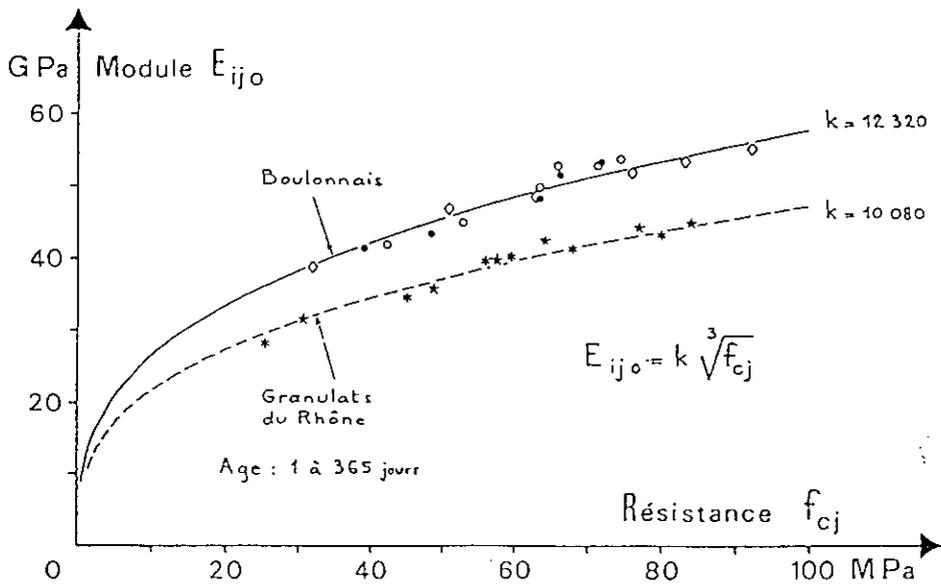


fig III.4.2

BHP qui croit moins rapidement que la résistance en compression, (voir figure III 4.2).

III.5. FRAGILITE ET DUCTILITE :

La fragilité du béton caractérise sa capacité à atteindre la rupture en ne subissant qu'un minimum de déformation.

Les essais de compression effectués sur un béton H.P non armé font apparaître leur caractère fragile, d'autant plus que croît leur résistance.

La surface de rupture des bétons HP et THP montre que les fissures traversent indifféremment la pâte et les granulats, il y a donc une certaine parenté avec le caractère des matériaux fragiles.

Ce caractère fragile, c'est à dire non ductile, pourrait être préoccupant, car les méthodes de dimensionnement modernes reposent entre autres sur les théories de la plasticité des matériaux et prennent en compte leur comportement non-linéaire. Ceci est particulièrement vrai pour les structures soumises aux séismes, aux chocs ou à des déformations imposées.

Les essais de rupture en flexion d'éléments en BHP armés, confirment le fait que la ductibilité réelle de ces éléments est équivalente à celle d'éléments en béton armé ordinaire.

Le caractère fragile des bétons sous compression est éliminé par la présence:

- d'armatures longitudinales, qui permettent un report de l'effort sur l'acier évitant ainsi une rupture quasi-instantanée de l'élément.
- D'armatures transversales, qui empêchent ou retardent le flambement des armatures longitudinales lorsque la résistance du béton est épuisée.

III.6. L'ADHERENCE :

La contrainte d'adhérence τ_{su} est proportionnelle à f_t , elle est donc en fait fonction de la résistance à la compression du béton.

Cela signifie que les BHP permettent une réduction sensible de la longueur de scellement des armatures, longueur qui peut être évaluée par la relation semi-empirique.

$$L_S = \frac{D}{4} \cdot \frac{f_e}{\tau_{SU}}$$

La plus grande réduction de la longueur de scellement, c'est à dire la meilleure adhérence acier-béton, obtenue dans les BHP conduit à une fissuration du tirant caractérisée par un espacement maximal probable entre fissures et à une ouverture moyenne des fissures plus faible que celle qui se produisent dans un béton ordinaire.

Cette ouverture étant fonction de la contrainte de traction des armatures, il est donc loisible de majorer le taux de travail admissible des armatures dans les BHP tout en obtenant des fissures d'ouverture comparable à celle considérée comme acceptable en béton ordinaire.

En conservant les mêmes valeurs conventionnelles d'ouverture de fissure imposées par " les notions de préjudiciabilité " du BAEL et BPEL, il est possible d'utiliser des armatures à limite élastique élevée sans mettre en cause la durabilité du BHP armé.

En fait, les contraintes de traction admissibles dans les armatures devraient être modulées en fonction, d'une part, des conditions d'environnement et d'autre part, de la résistance à la traction et donc à la compression du béton utilisé.

Des chercheurs de laboratoire de mécanique des structures de Génie-Civil à l'INSA de Toulouse se sont penchés sur l'expérimentation de la résistance de la liaison Armature- BHP.

Leur résultat ont montré que cette liaison est fonction de divers paramètres.

- La force F du tirant
- L'âge de béton
- Le dosage en liant
- Le dosage de la fumée de silice
- Le rapport E/C
- La longueur de l'enrobage
- La rugosité de l'armature.

Les résultats obtenus sont présentés sur les courbes de la figure III.7.

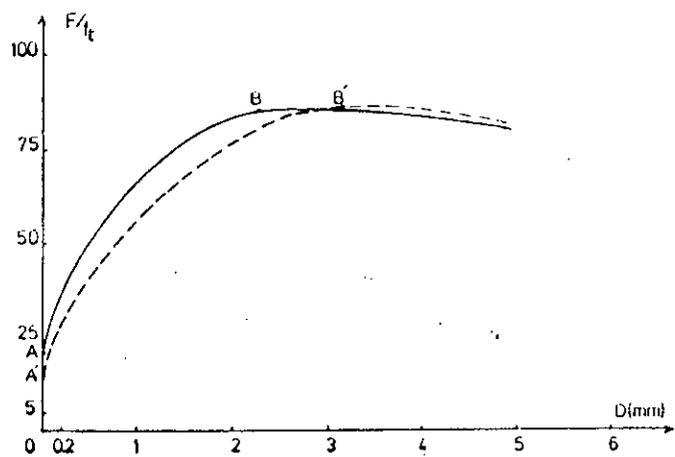


Fig. 1 -- Déplacement de l'extrémité libre de la barre de F/f_t .

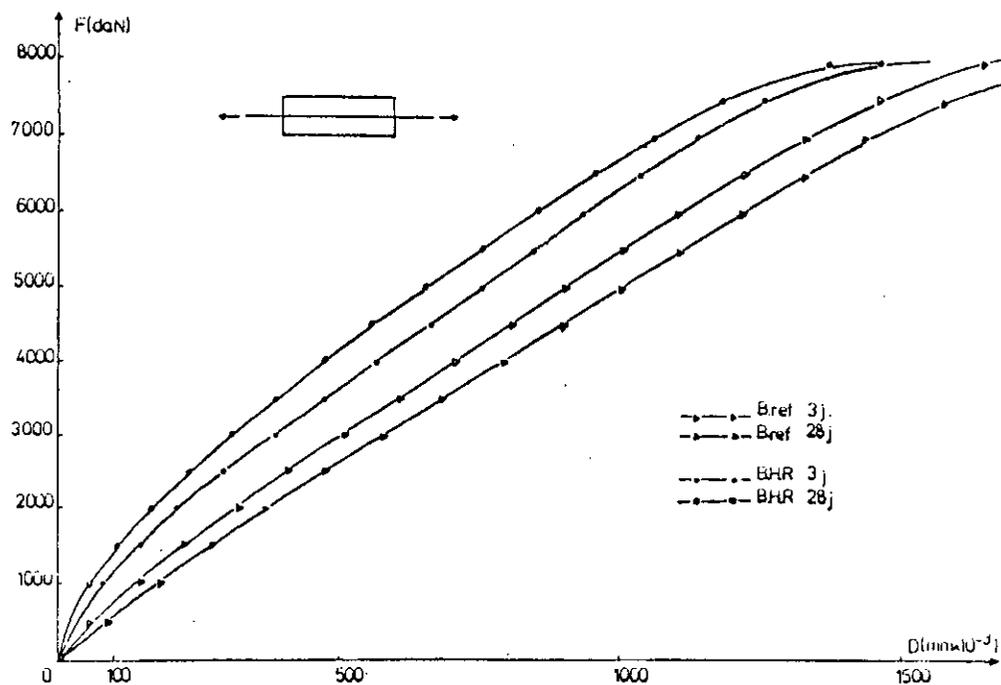


Fig. 2 -- Déplacement de l'extrémité de la barre en fonction de la force F .

Fig III.7 1, 2

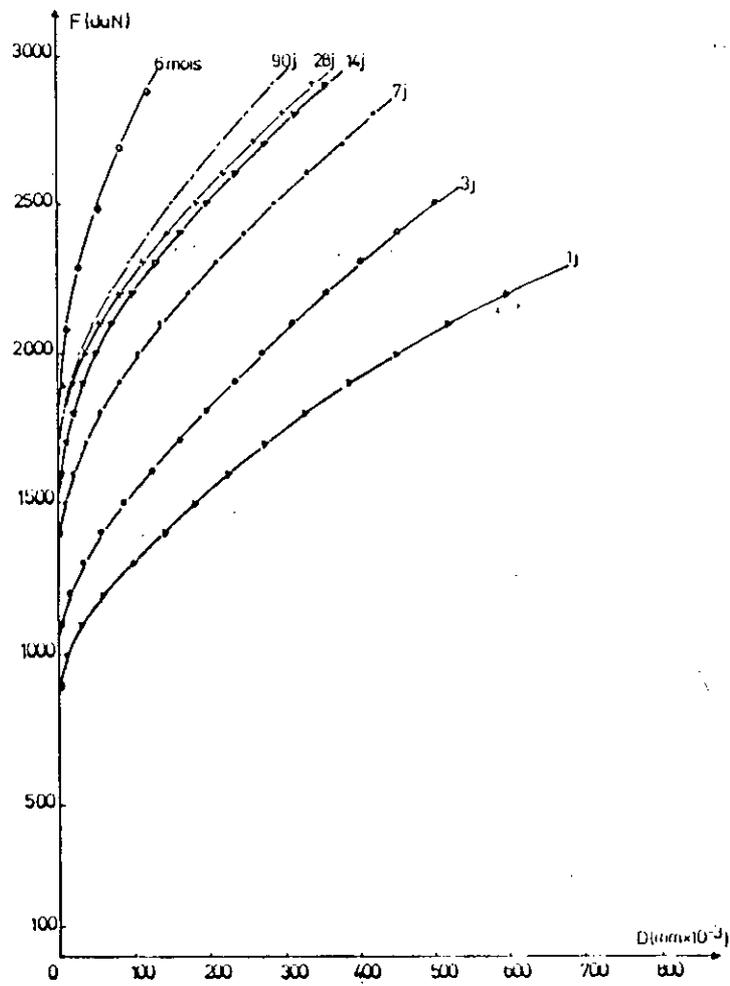


Fig. 3 -- Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de la force F à différents âges du B.I.R.

Fig III. 7 3

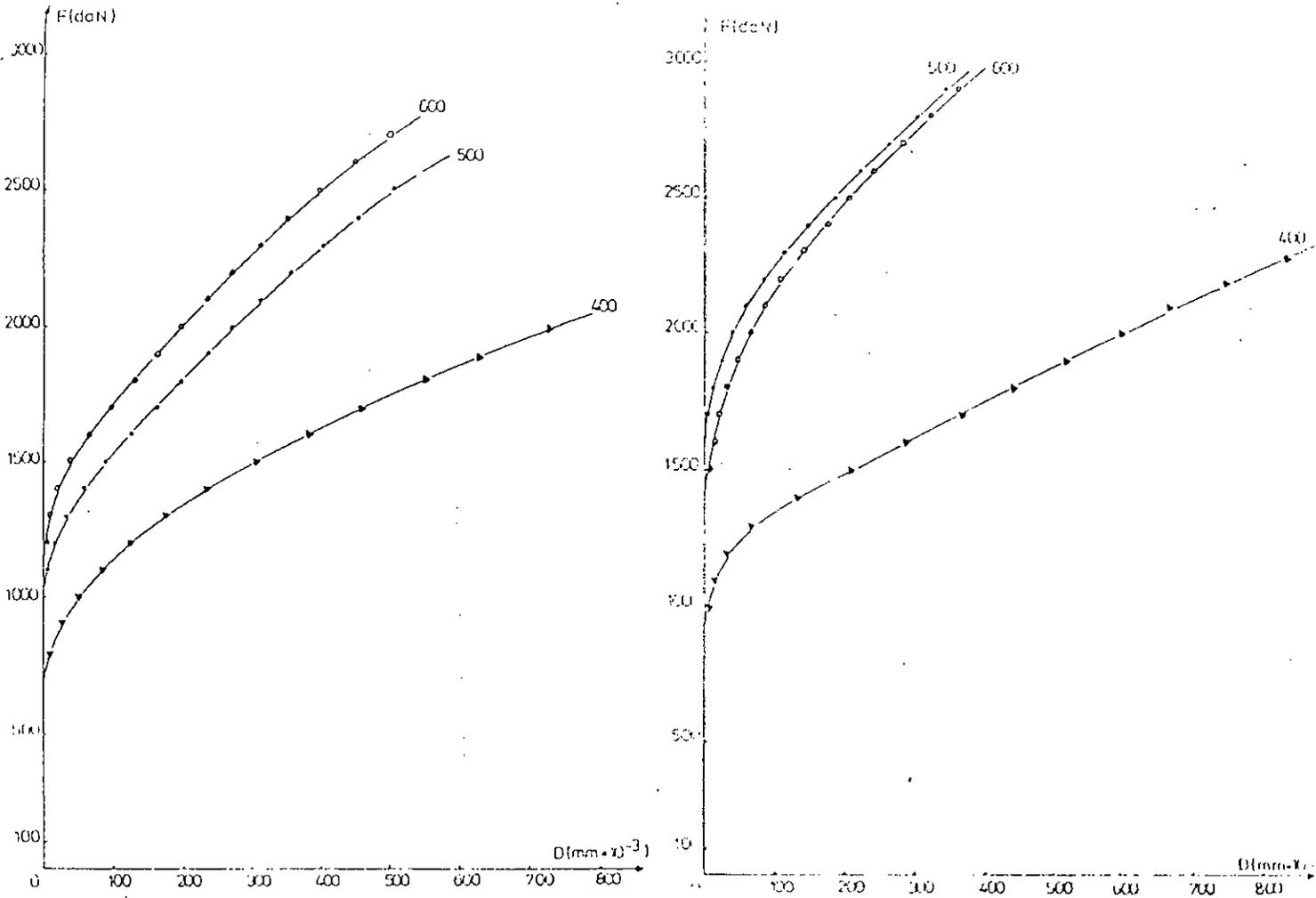


Fig. 4 - Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction du dosage en liant I.

Fig III.7 4

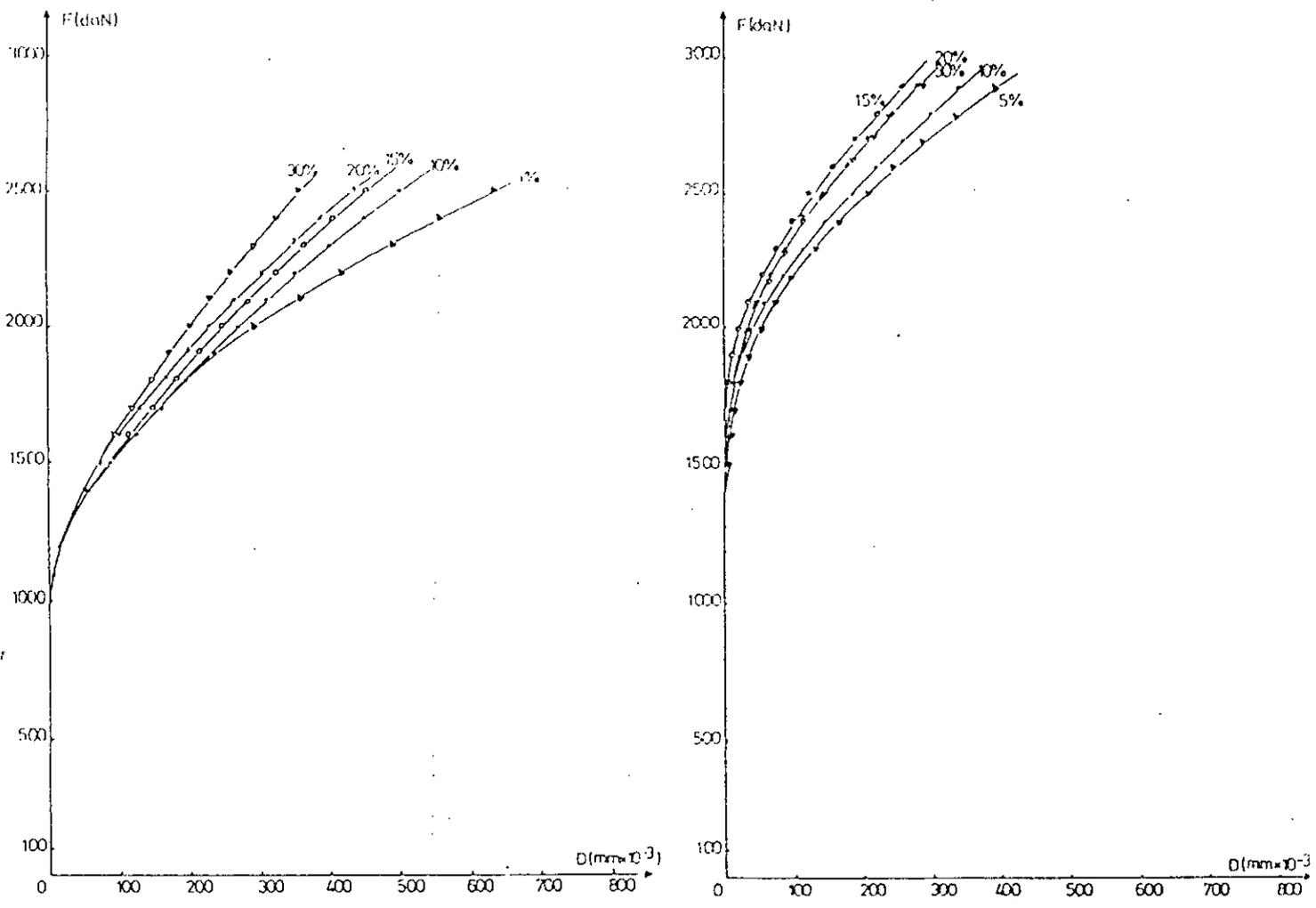


Fig. 5 - Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction du dosage en F.S.C.

Fig III.7.5

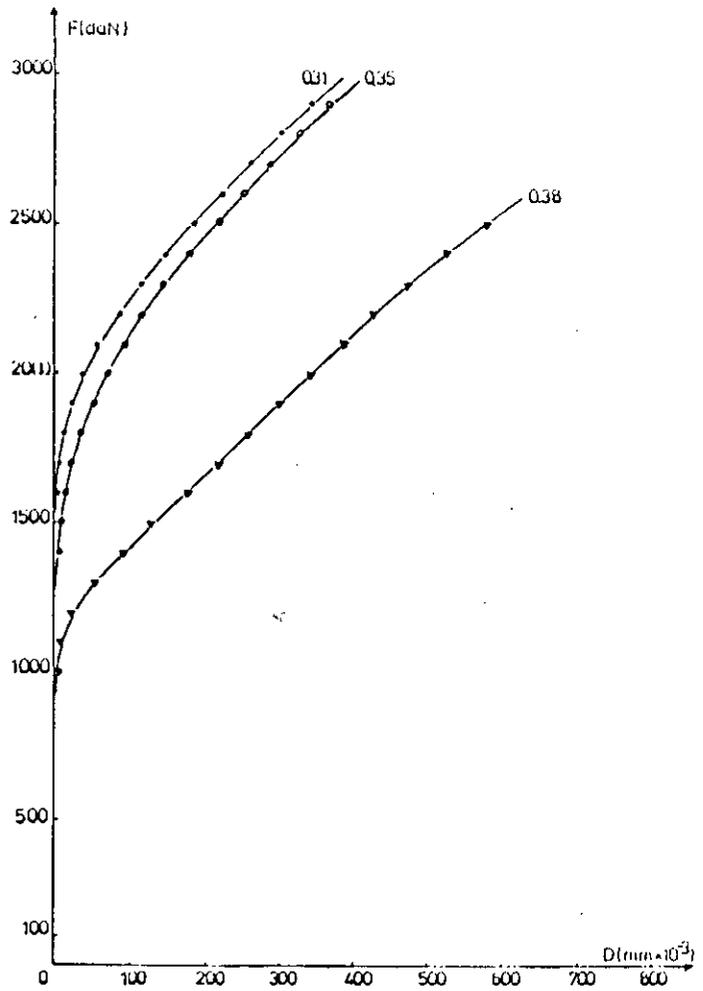
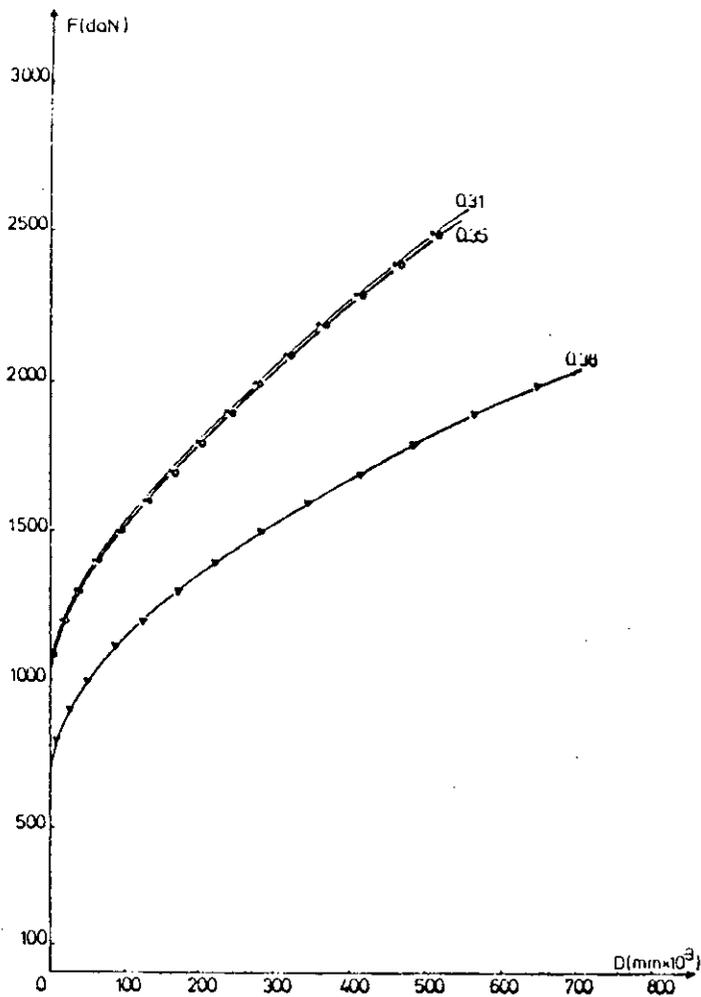


Fig. 6 — Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de EAU/LIANT

Fig III.7 6

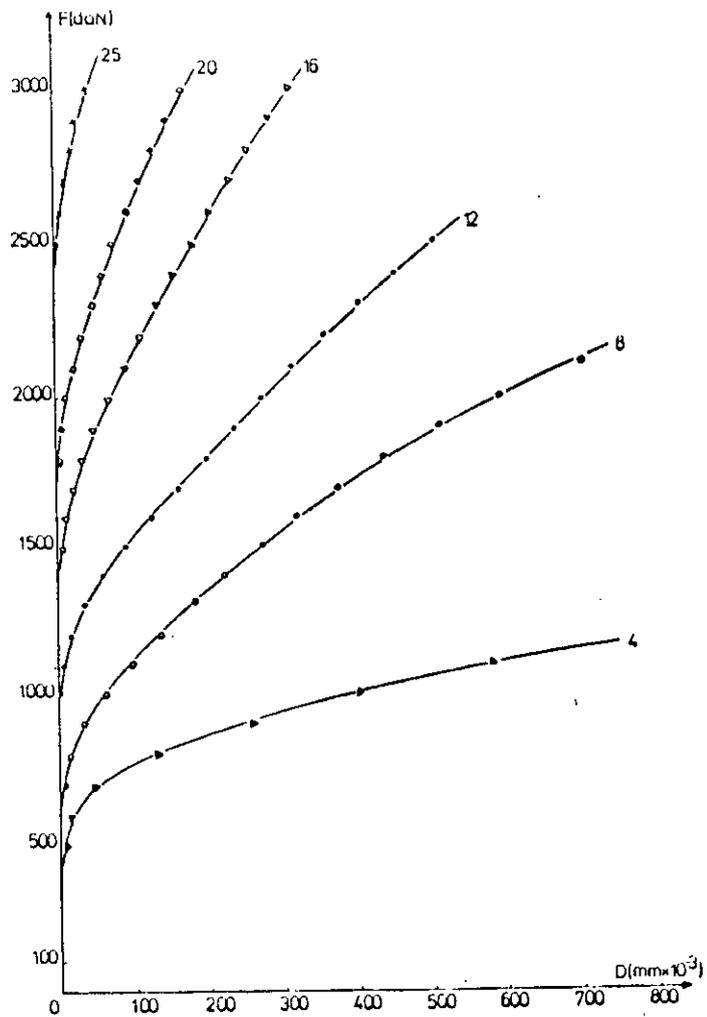


Fig. 7 — Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de la longueur d'enrobage (3 j).

Fig III. 7 7

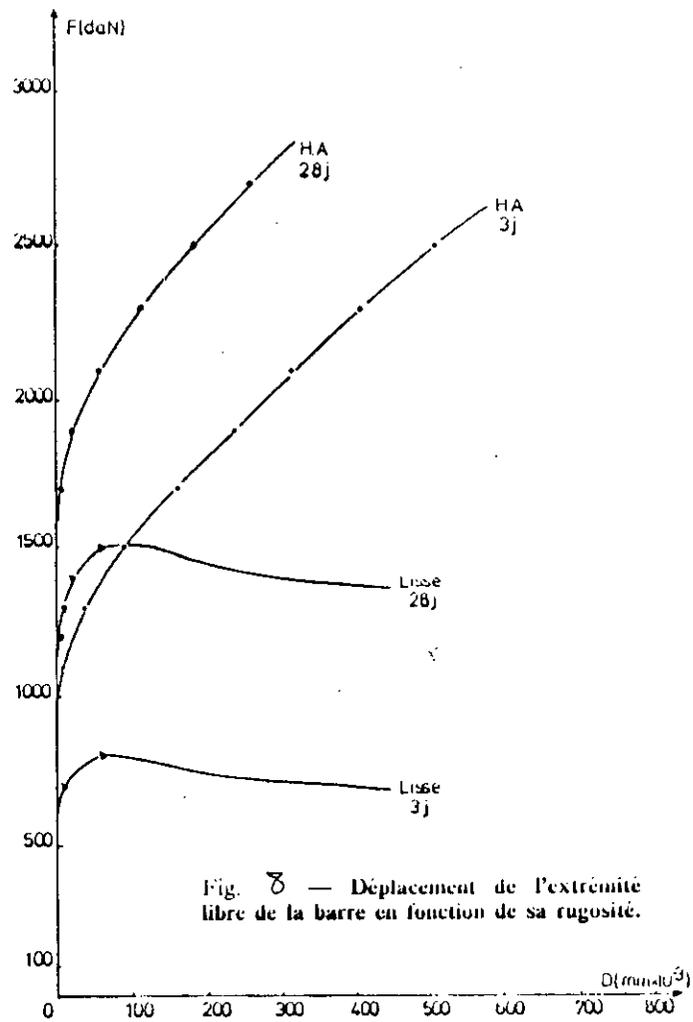


Fig III.7 8

III.7. Conclusion :

Les principaux avantages des B.H.P sont apportés par leur haute résistance en compression d'où la nécessité d'accorder une importance primordiale à cette propriété.

Le caractère fragile des bétons H.P peut être considéré comme un faux problème dans la mesure où les ingénieurs de structure utilisent non pas du béton mais du béton armé, matériau composite dont le degré de ductilité peut être ajusté en fonction des besoins.

Quant à l'adhérence, les B.H.P devraient donc permettre l'emploi d'armatures en acier de 500 à 800 Mpa de limite élastique, conduisant à une réduction notable des quantités d'acier nécessaire.

En béton à haute performance, l'attention doit donc être focalisée sur la résistance en compression, avec la certitude que si cette dernière est meilleure, toutes les autres propriétés s'en trouvent améliorées.

CHAPITRE IV

MATERIAUX UTILISES

Notre ennemi dans l'étude c'est la suffisance; quiconque veut réellement apprendre doit commencer par s'en débarrasser, s'instruire sans jamais s'estimer satisfait et enseigner sans jamais se laisser telle doit être notre attitude.

MAO TSE-TONG

IV-1 INTRODUCTION :

Composer un béton revient à choisir des constituants, puis à en déterminer les proportions afin que le matériau satisfasse à un certain cahier de charges. Pour les BHP, ce cahier de charges comporte au moins deux clauses relatives à son comportement à l'état frais et à l'état durci.

A l'état frais, on est conduit à choisir un affaissement au cône très important; en particulier il est courant de spécifier des slumps de 15 Cm. Ce slump devra être gardé pendant un temps suffisant (généralement 1 à 2 heures), et pour des températures variant dans une certaine gamme de 10° à 30°C par exemple.

En second, la résistance spécifiée est comprise entre 50 et 90 MPA (résistance caractéristique à la compression) et très souvent, on demande en plus une résistance au jeune âge pour décoffrer ou mettre en précontrainte par exemple.

Le cahier de charges peut comporter d'autres dispositions comme une chaleur d'hydratation modérée, un module élastique élevé ou encore un bon comportement au gel. Toutes ces conditions doivent être satisfaites par un choix judicieux des constituants, et par une optimisation bien conduite, tout en recherchant l'économie du matériau et de son étude.

Enfin, l'objectif principal pour élaborer un BHP est d'obtenir la microstructure la plus compacte possible au moment où se développe la matrice solide.

Cela revient à diminuer autant que possible le volume qui ne sert pas à hydrater les grains de ciment aux jeunes âges.

La formulation, la mise au point et la livraison du BHP, ayant des rapports E/C de plus en plus faibles présentent un défi de taille pour tout producteur de béton.

Il a fallu attendre l'arrivée sur le marché de fluidifiants de synthèse efficace et sans effets secondaires pour pouvoir fabriquer des bétons de rapports E/C compris entre 0.3 et 0.4. La mise sur le marché d'un autre résidu industriel à caractère pouzzolanique a permis d'aller encore plus loin dans cette course. Il est désormais possible de livrer des bétons très performants de rapport E/C compris entre 0.2 et 0.3 ayant 20 Cm d'affaissement.

IV-2 Choix et sélection des constituants :

IV-2-1 Gravillons :

Les paramètres importants sont la résistance intrinsèque du gravillon (plus ou moins reflétée par l'essai Los Angeles), la porosité, la forme et la résistance du gravillon peut limiter celle du béton (surtout lorsqu'on cherche à dépasser 100 MA), et il importera de rechercher une porosité de moins de 1% (absorption d'eau), si l'on veut limiter les difficultés de contrôle de la teneur en eau et tout les problèmes connus (slumps irrégulier et peu stable, dispersion des résistances). La taille optimale du granulats dépend de sa nature : pour les calcaires concassés, la règle classique consiste à prendre la dimension maximale compatible avec la mise en oeuvre (20 à 25 mm).

Dans notre étude les granulats sont de type calcaires concassés, de dimensions 3/8, 5/15 et 15/25 ramenés de la carrière JOBERT d'Alger. Ces granulats ont été sélectionnés après avoir étudié :

- 1 La résistance en compression simple.
- 2 La forme des grains.
- 3 Le diamètre maximal.
- 4 La Minéralogie et la granulométrie.

a- Résistance mécanique du granulats :

La résistance à l'écrasement est un facteur important pour fabriquer un BHP.

Elle doit être suffisamment élevée si l'on veut que le béton ait une résistance élevée.

La résistance du granulats doit être comparable à celle du mortier pour mieux contribuer à la résistance du béton. D'une manière générale il ne faut pas que le granulats cède avant le mortier.

Granulat	15/25	5/15	3/18	0/3
Caractéristique				
Masse volumique apparente(Kg/)	1.25	1.28	1.39	1.26
Masse volumique absolue(Kg/)	2.58	2.56	2.60	2.60
Coefficient volumétrique	0.28	0.18	0.16	/
Los Angeles %	25	25	24	/

b- Test de propreté :

Type de granulat	Poids initial(gr)	Poids après lavage\sechage(gr)	Impuretés(gr)	Pourcentage %
15/25	2000	1995.493	4.705	0.225
5/15	2000	1995	5	0.25
3/8	2000	1021	79	3.95

Remarque :

Dreux et Gorisse recommandent que les impuretés ne doivent pas dépasser le 1.5%, c'est le cas du 1^{er} et du 2^{eme} type quand au 3^{eme} il doit être lavé plusieurs fois.

c-Granulométrie :

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires composant un granulat donne $d/D^{(*)}$; dans la mesure où l'on peut admettre que la masse spécifique des graines constituant le granulat analysé est la même, quelque soit la grosseur des graines, la distribution volumétrique est la même que la distribution pondérale.

On trace la courbe granulométrique. Sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisats, les dimension des mailles D en abscisse selon une graduation logarithmique.

Dans notre cas une analyse granulométrique correspondante à un gravier 3/8, 5/15, 15/25 figure sur le tableau ci-après.

WS X

* Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits au D pour les grands.

c-1 Gravier 3/8 :

Φ

Q(mm)	Refus(gr)	Tamisât (gr)	Pourcentage(%)
12.5	2.725	997.275	99.72
8	16.648	900.627	90.62
5	347.659	552.968	55.29
2	513.194	39.774	3.97
1.25	31.105	8.669	0.86
Reste	5.254	/	0.52

c-2 Gravier 5/15 :

Φ

ε

Q(mm)	Refus (gr)	Tamisa(gr)	Pourcentage(%)
12.5	2.725	997.275	99.72
8	16.648	900.627	90.62
5	347.659	552.968	55.29
2	513.194	39.774	3.97
1.25	31.105	8.669	0.86
Reste	5.254	/	0.52

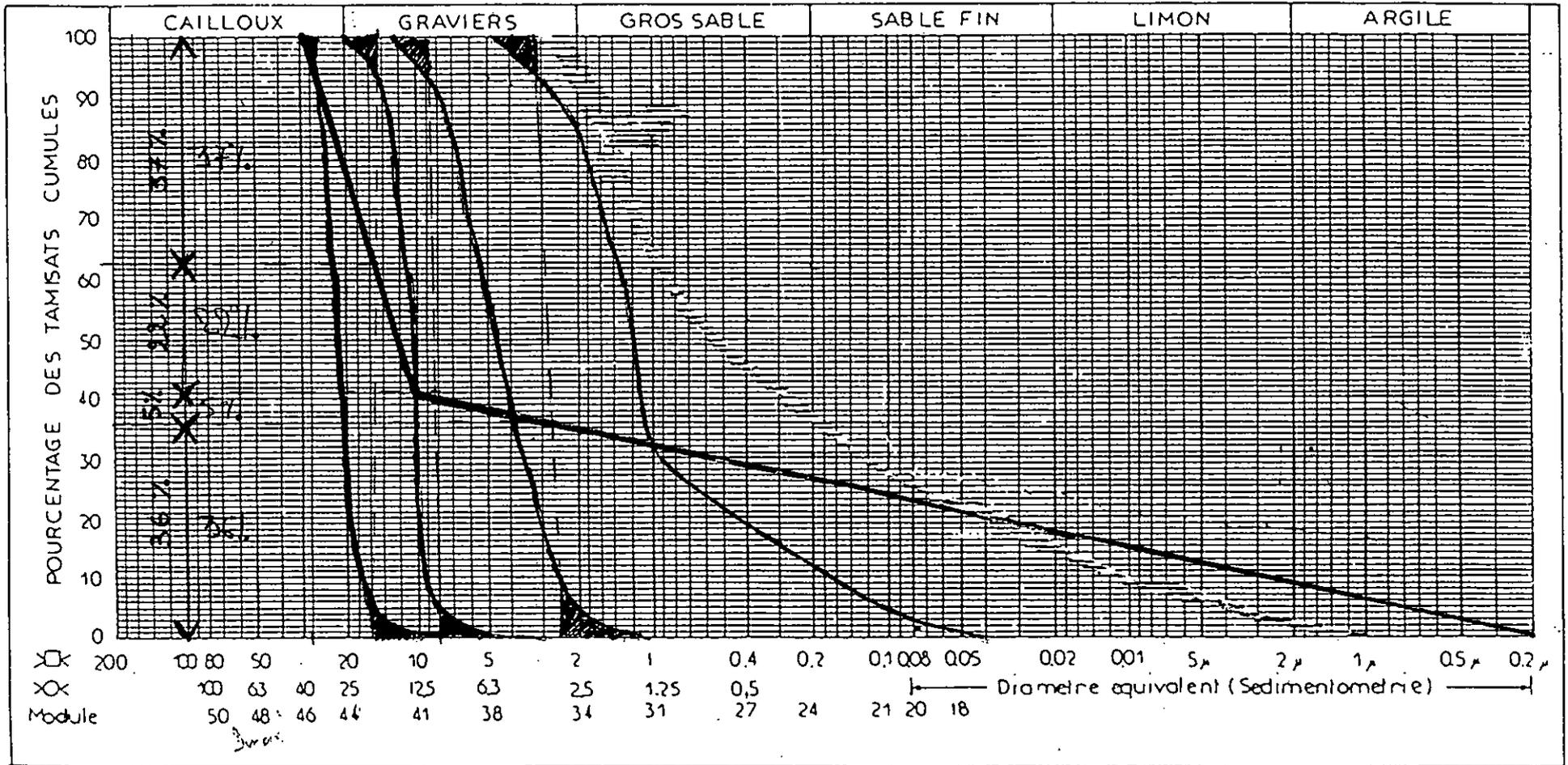
c-3 Gravier 15/25:

Φ

ε

Q(mm)	Refus (gr)	Tamisa(gr)	Pourcentage(%)
32	0	1000	100
25	76.349	923.651	92.36
20	418.167	514.484	51.45
16	180.83	133.654	23.36
12	190.15	43.504	4.35
8	35.75	7.754	0.77
Reste	5.986	/	0.59

La courbe correspondante à chaque type du gravier est représentée sur le graphique ci après.



d- Etude minéralogique:

La nature de ce granulats est caractérisée par sa roche calcaire qui est un peu dure mais présente une bonne adhérence, il est concassé à grains plus ou moins anguleux.

e- Conclusion:

En définitive, ^{nous. poulbes} on ne peut pas dire qu'il existe des critères scientifiques bien établis qui permettent de sélectionner à coup sûr le granulats idéal pour fabriquer du béton à hautes performances tout au plus, sait-on que la roche qui servira à fabriquer le gros granulats devrait avoir une résistance à la compression assez élevée et qu'une granularité discontinue est très recommandée.

* Voir annexe.

IV-2-2 Sable :

Des études systématiques ont été menées, à notre connaissance sur des critères du choix des sables spécifiques des BHP. En pratique les règles à observer paraissent les mêmes que pour tout " bon béton ". Une granulométrie bien étagée est souhaitable, en évitant le manque de continuité avec le ciment (qui conduit à des ressuyages excessifs). Les grains de sable Alluvionnaires ont en général une forme satisfaisante, mais sont parfois trop rares dans l'intervalle [100,500mm]; dans ce cas on améliore le mélange par un ajout de sable concassé. Pour cela on a ^{nous} choisi ^{correctement} un sable concassé qui nous a été fourni par la carrière JOBERT D'ALGER, ce sable est caractérisé par :

IV-2-2-1 Courbe granulométrique :

sable 0/3 M=2000gr.

Q(mm)	Refus (gr)	Tamisât (gr)	Tamisât (%)	Refus (%)
4.75	10.913	1989.08	99.45	0.54
2	449.07	1540.01	77.00	83
1.25	406.07	1133.94	56.69	43.30
0.63	452.59	681.342	34.06	65.93
0.315	274.561	406.78	20.33	79.66
0.125	242.26	164.52	8.22	91.77
Reste	160.17	/	7.99	/

IV-2-2-2 Module de finesse d'un granulat :

Le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents Tamis de la série suivante :

0.125 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2 - 4.75 .

Il est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante; par exemple le sable dont la courbe est tracée ci-après a pour module de finesse $M_f=3.04$ calculé ainsi :

Refus sur le tamis	d=0.125;	=91.77%
//	d=0.315;	=79.66%
//	d=0.63;	=65.93%
//	d=1.25;	=43.30%
//	d=2;	=23.00%
//	d=4.75;	=0.54%

Total=304.

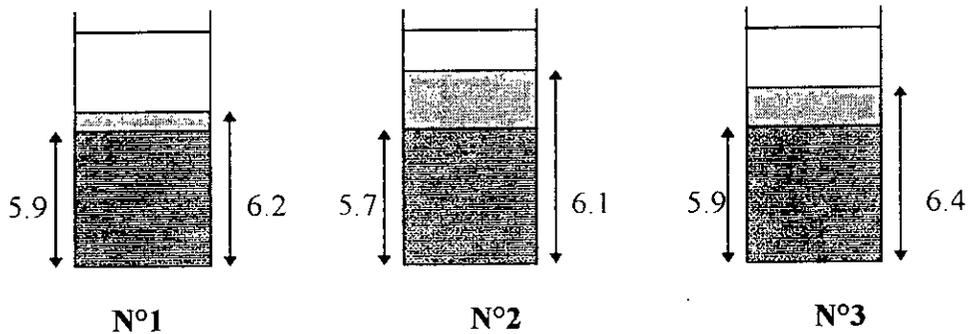
$M_f = (1/100) \times 304 = 3.04$.

* Conclusion :

$2.8 < M_f < 3.1$, correspondant à des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général une bonne ouvrabilité.

IV-2-2-3 Equivalent de sable :

Pour les sables, la propriété peut se contrôler par l'essai dit « ES » on agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante, qu'on laisse reposer. La hauteur du dépôt de sable visible étant h_2 et h_1 la hauteur totale est y compris le granulat (fin en suspension).



-Pour le sable n° 1 on a $h_1=5.9$ et $h_2=6.2$, l'équivalent de sable est $ES=5.9/6.2=95.16\%$.

-Pour le sable n° 2 on a $h_1=5.7$ et $h_2=6.1$, l'équivalent de sable est $ES=5.7/6.1=93.44\%$.

-Pour le sable n° 3 on a $h_1=5.9$ et $h_2=6.4$, l'équivalent de sable est $ES=5.9/6.4=92.18\%$.

* Conclusion :

A partir de ces 3 échantillons on obtient ($ES=93.57 > 85\%$).

Ce qui permet de dire que le sable est très propre et dans ce cas l'absence quasiment totale de terres argileuses risque d'entraîner des défauts de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

IV-2-3 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage pour les bétons à haute performances comme tout béton ordinaire, doit être potable. Ce qu'il faut donc rechercher lorsqu'on désire améliorer la résistance en compression d'un béton, c'est d'augmenter au maximum sa capacité n'introduisant, pour cela dans le béton que la quantité d'eau strictement nécessaire à l'hydratation effective des grains de ciment; toute eau additionnelle affaiblira de façon irréversible la résistance en compression du béton.

En effet la quantité d'eau dans un mètre cube de béton, sert pour 37% à peu près à l'hydratation et à la prise du ciment, tandis que le reste se trouve sous forme d'eau interstitielle de mouillage.

Elle confère au béton des qualités de plasticité et d'ouvrabilité que l'on vérifie, en général, par des mesures d'affaissement au cône d'Abrams, une partie de l'eau peut d'ailleurs être absorbée par les granulats plus au moins poreux.

Le dosage en eau conduit à des rapports eau/ciment (en poids) compris entre 0.25 et 0.35. Comme pour les bétons ordinaires, il importe de diminuer le plus possible ce rapport, tout en gardant une maniabilité convenable. On sait que la valeur 0.35 représente à peu près la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation totale du ciment, ce qui signifie qu'un volume assez important des grains de ciment reste avide dans un béton THP, même à long terme.

Le ciment en plus de sa fonction liante, joue le rôle d'un granulat inerte de petite dimension.

IV-2-3-1 Ciment Portland et eau :

L'eau que l'on introduit dans le béton, lors de son gâchage remplit deux fonctions :

- Une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologique d'un liquide.
- Une fonction dynamique qui contribue au développement de réaction dite d'hydratation.

Le béton idéal serait un béton où la quantité d'eau strictement nécessaire au développement du potentiel hydraulique du ciment, ne jouerait dans ces premiers temps qu'une fonction strictement rhéologique permettant d'assurer une mise en place facile du béton frais.

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

- D'une part, les particules de ciment qui présentent de très nombreuses charges électriques, superficielles non saturées ont une forte tendance à flocculer lorsqu'elles sont, mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau.

- Et d'autre part la réaction d'hydratation n'attend pas que le béton soit placé dans les coffrages pour démarrer. Elle se manifeste aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau.

Ceci est causé par le fait que certains composants du ciment, en particulier Aluminate Tricalcique (C_3A), sont très réactifs et que les ciments Portland actuels présentent de très fines particules 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 de 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 du ciment et de l'eau Pour fabriquer la pâte du béton.

IV-2-4 Le ciment :

IV-2-4-1 Généralité :

Le ciment est une poudre minérale qui résulte du broyage du clinker, roche artificielle obtenue par cuisson a haute température (1500°) d'un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%) comprenant principalement de la chaux (CaO); de la silice($Si O_2$) et de l'alumine ($Al_2 O_3$).

Lors du broyage du clinker, des composants secondaires (GYPSE, LHF, FILLERS, CENDRES VOLANTES, POUZZOLANES) peuvent être ajoutés Pour influencer certaines propriétés.

La poudre du ciment est impalpable, elle représente 30 milliards de particules au centimètre cube; mélangée avec l'eau, elle forme une pate onctueuse qui se solidifie en dégageant de la chaleur lors de l'hydratation ou prise du ciment, son durcissement est progressif.

Les réactions qui se passent des le début du gâchage et se poursuivent dans le temps sont extrêmement complexes. Le ciment Portland contient quatre constituants principaux : le silicate tricalcique(C_3S); le silicate bicalcique (C_2S); l'aluminate tricalcique (C_3A). L'aluminate ferrite tetracalcique (C_4AF).

Ces constituants anhydres donnent, en présence d'eau, naissance a des silicates et des aluminates de calcium hydrates pratiquement insolubles dans l'eau. Il se

forme un gel micro-cristalin, a l'origine du phénomène dit de prise. C'est le développement et la multiplication de ces micro-cristalin dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le ciment durci est une véritable roche artificielle qui évolue dans le temps en fonction des conditions externes.

Avant d'atteindre son stade final, l'évolution du ciment passe par trois phases successives :

a- Phase dormante :

La pâte du ciment (ciment + eau) reste en apparence inchangée pendant certain temps(de quelque minutes a plusieurs heures suivant la nature du liant). En fait, des le malaxage; les premières réactions se produisent mais sont ralenties grâce aux ajouts du gypse.

b- Début et fin de prise :

Après une a deux heures, pour la plupart des ciments, on observe une augmentation brusque de la viscosité: c'est le début de prise accompagnée d'un dégagement de chaleur. La fin de prise correspond au moment ou la pâte cesse d'être déformable et se transforme en matériau rigide.

c- Durcissement :

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue a croître très longtemps.

mais la résistance a 28 jours et la valeur conventionnelle.

IV-2-4-2 Caractéristiques de la poudre :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre soit sur la pâte.

a- La surface spécifique :(Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment.

Elle s'exprime en cm^2/g . Différente suivant la classe des ciments, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 4000 cm^2/g .

b- La masse volumique absolue :

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vide entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 Kg/cm^3 suivant le type de ciment.

IV-2-4-3 Caractéristiques mesurées sur pâte :

a- Début de prise :

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de vicat (aiguille de 1 mm^2 de section pesant 300 gr) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure du ciment.

b- L'expansion :

En gonflement, la détection de ceci peut se faire par l'essai aux aiguilles de LECHATÉLIER de la pâte pure conservée soit à 7 jours à 20°C dans le moule, soit 3 heures à 100°C ne doit pas provoquer un gonflement $h = 10\text{mm}$.

c- Le retrait :

La mesure du gonflement dans l'eau et du retrait dans l'air est effectuée sur prisme de 4x4x16 cm. Sur mortier normal le retrait est limité à 1mm/m pour les ciments CPA et CPJ de classe 45 et 55.

d- Les résistances mécaniques :

Elles caractérisent de façon conventionnelle la résistance du ciment rattaché à une classe de résistance définie par sa valeur nominale. Cette valeur est la moyenne M des deux limites nominales inférieure et supérieure ($M \pm 10\text{MPa}$), c'est la résistance à la compression à 28 jours.

Les ciments pour les BHP sont choisis dans la gamme proposée par les cimenteries pour la confection des bétons classiques; sont donc recommandés les ciments Portland artificiels (CPA) de classe 55 ou HP, éventuellement 55R ou

HPR compose a plus de 97% de Clincker (+3% de FILLER), de surface spécifique blaine de 3500 a 400 cm^2/gr . Ils assurent de bonne résistances mécaniques et donnent a la pâte liante une bonne compacité.

Dans cette étude on a utilise 4 types de ciment : CPA325 de Meftah, CRS400, CPI45 et CPA55 qui nous ont été fournis par l'entreprise ERCE de Ain El Kebira. Les caractéristique physico-chimiques de chaque ciment sont décrites ci-après.

1- Ciment CPA 325 :

Les résistance a la compression du CPA 325 font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître une valeur moyenne. Des résultats obtenus a 28 jours sont de l'ordre de 32.5 MPA.

La masse volumique absolue est de l'ordre de 3100 Kg/m^3 .

2- Ciment CRS 400 :

Voir l'annexe (fiche technique du ciment), la masse volumique absolue est de 3180 Kg/vm^2 .

3- Ciment CPJ 45 :

Voir l'annexe (fiche technique du ciment), la masse volumique absolue est de 3150 Kg/Cm^2 .

4- Ciment CPA 55 :

Voir l'annexe (fiche technique du ciment), la masse volumique absolue est de 3100 Kg/cm^2 .

IV-2-5 Adjuvants du béton :

IV-2-5-1 Généralités :

Aujourd'hui on attend du béton plus qu'aparavant. On utilise une variété sans cesse croissante de constructions de formes diverses et pour des fins bien particuliés. Il doit souvent résister aux conditions rigoureuses du milieu, et faire face a une forte concurrence surtout en ce qui concerne la production en série et la programmation des travaux. Cette évolution a nécessite une connaissance

approfondie de toutes les possibilités et limites des matériaux employés dans le béton.

C'est pourquoi on a eu recours aux adjuvants.

Les adjuvants du béton sont des produits chimiques, liquides pour la plupart, utilisés en solution dans l'eau du gâchage incorporés au béton au moment de la fabrication, il ont pour objectif de modifier les caractéristiques du béton, frais au durci, afin d'améliorer telle ou telle propriété.

Le dosage des adjuvants est faible par rapport à celui des autres constituants, il est toujours en fonction du ciment et varie, selon les produits ; de 0.05 à 5% au plus du poids du ciment.

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, dont l'efficacité peut varier en fonction du dosage de l'adjuvant et des matériaux utilisés. Il peut également présenter accessoirement une ou plusieurs fonctions secondaires, et son emploi peut entraîner des conséquences dites effets secondaires qui, sans être recherchés comme tels sont inévitables.

IV-2-5-2 Utilisation des adjuvants :

Il arrive qu'il soit impossible, compte tenu des constituants disponibles (ciment, granulat) des moyens de fabrication ou de mise en oeuvre et de la somme géométrique de l'élément de structure, de trouver une formulation du béton adaptée aux problèmes de chantier ou convenant à certaines techniques modernes ou cadences.

Dans ces conditions, les entreprises de réalisation et les maîtres d'oeuvres sont amenés à faire appel aux adjuvants dont la fonction principale est susceptible de modifier les caractéristiques du béton tout en les améliorant.

De ce fait les adjuvants peuvent être considérés comme des constituants du béton au même titre que le ciment, les granulats ou l'eau.

Des perfectionnements et des innovations dans le domaine de la fabrication et de la construction en béton s'accomplissent périodiquement et en particulier grâce à l'emploi des adjuvants. On peut citer quelques exemples :

1- L'ouvrabilité des bétons a pu être considérablement augmentée sans ajout d'eau complémentaire grâce à l'emploi des superplastifiants des bétons à très

haute performance, des résistances en compression de 100 MPA a 7 jours ont été obtenus avec un rapport de $E/C=0.32$ et l'ajout de fumée de silice et d'un superplastifiant. Ces bétons possèdent une maniabilité très élevée (affaissement $> 18\text{Cm}$).

Donc l'utilisation des adjuvants peut apporter les améliorations suivantes:

- Facilite de mise en oeuvre, augmentation des résistances mécaniques à tous les âges.
- Augmentation de l'imperméabilité et la résistance a certains agents agressifs.

IV-2-5-3 Classification des adjuvants :

Il existe plusieurs types d'adjuvants dont la classification est la suivante :

- Adjuvant modifiant la prise et le durcissement : accélérateurs et retardateurs de prise.
- Adjuvant modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques, hydrofuges de masse et de produits de cure (les produits de cures sont des produits qui ne rentrent pas dans la fabrication du béton mais ils sont utilisés après la mise en oeuvre du béton).
- Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air: réducteurs d'eau plastifiants, haut réducteurs d'eau, superplastifiants et entraîneurs d'air.

a- Les réducteurs d'eau -PLASTIFIANTS :

Ce sont essentiellement des lignosulfonates et éventuellement certains gluconates destinés à réduire de façon considérable la teneur en eau du béton pour une ouvrabilité identique à celle d'un béton non adjuvanté.

Les réducteurs d'eau-plastifiants sont efficaces lorsque, a maniabilité égale, la diminution d'eau par rapport au béton témoin non adjuvante est d'au moins 6.5% et elle peut atteindre environ 8% avec certains ciments, les réducteurs les plus performants (hauts réducteurs d'eau) plafonnent au environs de 12%. Ces valeurs sont difficiles à dépasser du fait que compte tenu de l'effet retardateur de ces adjuvants, on est limité dans toute augmentation de dosage.

Les réducteurs d'eau-plastifiants s'ajoutent à l'eau de gâchage à des doses variant entre 0.3 et 1.5% du poids du ciment .

Ces adjuvants trouvent leurs emplois dans l'industrie d'un béton manufacturé, qui exige des bétons fermes, pouvant être démoulés rapidement; dans les grands travaux de Génie-Civil nécessitant des résistances élevées, aussi que pour le bétonnage avec coffrages glissants et les bétons destinés à rester apparents.

b- Les superplastifiants :

Ce sont des adjuvants à base résine de synthèse, on distingue deux types de superplastifiants :

a- Superplastifiants à base de formeldehyde et de melamine sulfonate.

b- Superplastifiants à base de formeldehyde et de Naphtalène sulfonate.

Ils ont une action sur les bétons plus importante que celle des réducteurs d'eau plastifiants, en permettant à tenir égale en eau, d'augmenter considérablement l'ouvrabilité du béton (on ne pourrait obtenir les mêmes effets avec des réducteurs d'eau-plastifiants, même en augmentant les doses, en raison des effets secondaires qui sont le retard de prise excessif et l'excès d'air).

Les superplastifiants, mélangés à l'eau de gâchage du béton ne présentent aucune différence avec les réducteurs d'eau-plastifiants, ajoutés directement à la fin du malaxage du béton, leur effet bien que plus notable, n'est guère plus différent de celui obtenu avec les réducteurs d'eau-plastifiant; par contre l'action fluidifiante se produit de façon incontestable lorsque les superplastifiants sont introduits un certain temps après la confection du béton.

Les performances des superplastifiants apparaissent donc, lorsqu'ils sont introduits en différé avec des doses variant de 0.5 à 3% du poids du ciment.

Les superplastifiants sont particulièrement utiles pour la réalisation des fondations, dallages, sols industriels et pratiquement très indispensables pour la confection du BHP.

Hormis les adjuvants décrits ci-dessous, on trouve :

-Les entraîneurs d'air.

-Les retardateurs et les accélérateurs de prise.

-Les hydrofuges de masse.

IV-2-5-4 Récapitulatif :

Les caractéristiques intrinsèques de chaque adjuvant figurent sur le tableau ci dessous.

	Réducteurs d'eau-plastifiants	Superplastifiants
A base	Lignosulfonate	1-Melamine sulfonée. 2-Naphtalene sulfonée.
Fabrication	Traitement du bois par voie chimique	1-Reaction résine de Mélanie (formaldehyde+ sulfatation par solution de soduim+polymerisation). 2-Reaction Naphtalène (formaldehyde+sulfonation+neutralisation a la soude+plymerisation).
Forme commerciale	Liquide de couleur brun fonce	1-Soultion aqueuse a 20% d'extrait sec, couleur laiteuse. 2-Solution aqueuse entre 10 a 45% d'extrait sec couleur brune.
Dosages	Généralement 0.5%	Généralement 0.5 a 3 %
Introduction	Dans l'eau de gâchage	Dans le béton avant coulage.
Effet sur la mise en oeuvre	Réduction d'eau de 6.5% a maniabilité Cte	E/C constant, cône > 8Cm grande fluidification
Résistances	Supérieur a celle du témoin augmentation	Légère diminution/au témoin.
Effets secondaires favorables	-Augmentation de compacité. -Diminution de perméabilité. -Améliorations des résistances aux agents agressifs	L'emploi de ces adjuvants permet de réaliser des BHP en utilisant de faible E/C.
Autre effets	Possibilité d'une	légères Augmentation du retrait

Dans cette recherche, on a utilisé le plastiment fluide, le plastifiant HP de SIKA et le Medaretard RPF de Granitex, ces adjuvants sont des plastifiants réducteurs d'eau (voir l'annexe).

On a utilisé également un superplastifiant qui nous a été fourni par le laboratoire de béton de COSIDER:

le RHEOBUILD 1000 est une solution aqueuse de couleur brune, à base de formaldéhyde et NAPHTALENE sulfonée, à 30% d'extrait sec et d'une masse volumique obtenue de 1020 Kg/cm³(voir l'annexe).

IV-2-6 Additions minérales :

Les fines de grosseur similaire à celle du ciment (fillère-calcaires ou silicieux, cendres volantes, laitiers broyés) seront principalement employées lorsqu'on désire limiter la chaleur d'hydratation du béton. Elles ont cependant d'autres avantages, avec des garanties suffisantes de régularité, elles peuvent réduire les risques de perte d'affaissement, réduire la ségrégabilité du béton ou encore améliorer l'aspect des parements obtenus au démoulage.

IV-2-6-1 Sable de dune :

C'est un sable provenant de la région de AIN SEFRA, l'étude de la composition granulométrique, minéralogique et chimique a été effectuée à l'unité de recherche et étude géologique (UREG) de Boumerdes.

a- Composition granulométrique :

Tamis (mm)	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,125	0,08
Tamisat en %	100	99,99	99,97	99,95	95,96	54,23	2,72	0,01

b- Composition minéralogique :

les constatations suivantes ont été faites sur la composition minérale du sable

- Le QUARTZ forme plus de 85% du sable. Les grains sont parfois anguleux et dans la majorité des cas arrondis.
- Le GYPSE se trouve sous forme de grains fins de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas 2 à 3 %.
- La CALCITE se manifeste par des grains de couleurs différentes et ne dépassant pas les 10 %.
- Le FELDSPATH s'il est existant, ne dépasse pas 4%.

c- Caractéristiques physiques :

Les propriétés physiques moyennes déterminées figurent sur le tableau ci-après :

Humidité naturelle (%)	0,50
Masse volumique apparente (Kg/m ³)	1485
Masse volumique absolu (Kg/m ³)	2660
Equivalent de sable (%)	95

d- Composition chimique :

La composition chimique moyenne est représentée au tableau ci-après, ce sable est caractérisé par une teneur en silice (SiO₂) qui est relativement importante.

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MNO	MO
pourcentage %	96,86	0,89	0,66	0,39	0,29	0,32	0,02	0,08	0,05	0,09

IV-2-6-2 Fillers calcaires :

Les fillers nous ont été fournis par la cimenterie de AIN EL KEBIRA, ils sont destinés à corriger l'indice des vides du sable ($M_f > 3$), à améliorer la cohésion, à diminuer la fissurabilité et à limiter le dosage en ciment pour un niveau de performance donné. Une étude entreprise par BERTRADY a montré que la maniabilité des bétons, augmentait avec l'ajout de fillers calcaires. On peut aussi réduire dans le cas des BHP le rapport eau/ciment et obtenir de meilleures résistances.

Le calcaire utilisé atteignait jusqu'à 1 mm de diamètre et plus, alors que le sable de dunes ne dépasse pas 0,63 mm; logiquement le filler devrait avoir un diamètre inférieur à celui du sable pour atteindre le but visé.

Dans cette étude le broyage a été effectué dans un broyeur à boulets, pendant deux heures, jusqu'à ce que la totalité des grains obtenus soit de diamètre inférieur à 125 μm .

Ce sont les fillers les plus fins possible que le matériel disponible a permis d'obtenir.

La masse volumique absolue de ce filler a pour valeur moyenne de 2000 kg/m^3 .

IV-2-6-3 Le KIESELGUHR :

Le KIESELGUHR est ramené de l' ENOF d'El Harrach, ce sont des produits d'addition pulvérulents extrêmement fins qui, ajoutés au béton lui confèrent une meilleure plasticité améliorant aussi ses qualités de maniabilité et d'ouvrabilité (voir annexe).

IV-2-6-4 Les fines calcaires :

C'est le résidu minéral de concassage des graviers utilisés, cette poudre de couleur blanche a une finesse de 160 μm . (90% des éléments)

IV-2-6-5 Le laitier de haut fourneau :

Le LHF de la cimenterie de AIN EL KEBIRA est un sous produit de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau, la norme AFNOR définit le terme "laitier" de la façon suivante : Matériau provenant de la solidification d'un produit non métallique en fusion et composé essentiellement de silicates et alumino-silicates de calcium et autres éléments basiques qui se forment simultanément avec le fer dans un haut fourneau.

Les laitiers sont obtenus par trempe (refroidissement brusque) du liquide qui surnage la fonte en fusion dans le haut fourneau.

Après broyage et mouture appropriée du produit de cette trempe, on obtient une poudre brune d'une finesse de 125 μm ayant un certain pouvoir liant. *mais*

Le LHF présente l'avantage de :

- Réduire la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation.
- Augmenter la compacité de la pâte hydratée.
- Améliorer la durabilité face aux sulfates et à l'eau de mer.

Son inconvénient principal réside dans la diminution sensible de la résistance en compression à très court terme, ce qui peut freiner le décoffrage du béton.

CHAPITRE V

FORMULATION D'UN BETON ORDINAIRE

Les gens de qualité savent tout sans avoir rien appris

MOLIERE

METHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BETONS

(Dreux-Gorisse)

Cette methode a pour but de permettre de definir, d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié mais que, seules quelques gachées d'essai avec confection d'éprouvette permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

V-1 Tracé de la courbe granulaire de référence :

Sur un graphique d'analyse granulométrique (logarithmique en dimensions des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB

- Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat.

$$X_B = 25 \text{ mm}$$

$$Y_B = 100\%$$

- Le point de brisure A est ainsi défini :

* En abscisse :

L'abscisse est située au milieu du "segment GRAVIER" limité par le module correspondant à 5 mm et celui correspondant à D.

$$X_A = 12 \text{ mm}$$

* En ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K$$

Le terme correcteur K est déterminé à partir de la table XXIV (nouveau guide du béton Dreux-Gorisse)

$$K = -4 \Rightarrow Y_A = 41$$

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier au point de 5% de la courbe du granulats suivant; et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec les droites de partage. Le pourcentage en volume absolu des granulats G1, G2, G3 et S est donné par :

- Gravier 15/25 = 37 %
- Gravier 5/15 = 25 %
- Gravier 3/8 = 6 %
- Sable 0/3 = 32%

V-2 Coefficient de compacité :

Les pourcentages relevés graphiquement pour chacun des granulats composant le béton s'appliquent aux volumes absolus de ces granulats.

Soit V_G , V_S , V_C les volumes absolus en litres des granulats (gravier + sable) et du ciment contenus dans un mètre cube de béton frais en oeuvre; l'ensemble de ces grains de matières solides ne remplissent pas intégralement les 1000 litres car s'y trouvent également de l'eau interstitiel et les bulles d'air.

Le coefficient de compacité γ est le rapport des volumes absolus des matières solides $V_M = V_G + V_S + V_C$ au volume total du béton frais en oeuvre soit 1 m^3 :

$$\gamma = V_M (\text{litres}) / 1000$$

La connaissance de γ est nécessaire pour calculer les volumes absolus réels des divers granulats.

V-3 Compositions avec ciment CPA 325 :

V-3-1 Composition N° 1:

- Le dosage en ciment est de 350 Kg/m³
- De la table XXV (*) on choisit le coefficient de compacité $\gamma = 0,828$.

$$V_C = 350/3,1 = 112,903 \text{ L,} \quad \text{d'après l'équation } 1000 \gamma = V_C + V_G$$

$$\text{On aura } V_G = 828 - 112,903 = 715,096 \text{ L}$$

* **Résultats** : valeurs données par m³ de béton

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	715,096			
Volume absolu (Litre)	264,585	178,774	42,905	228,830
Densité absolu (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolu (Kg)	682,629	457,661	111,553	594,959

V-3-2 Composition N° 2 :

- Le dosage en ciment est de 350 kg/m³
- De la table XXV (*) on choisit le coefficient de compacité $\gamma = 0,830$

$$V_C = 112,903 \text{ L,} \quad \Rightarrow V_G = 828 - 112,903 = 717,097 \text{ L}$$

* **Résultats** : valeurs données par m³ de béton

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	717,097			
Volume absolu (Litre)	265,325	179,274	43,025	229,471
Densité absolu (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolu (Kg)	684,538	458,941	111,865	596,624

(*) Nouveau guide du béton

V-3-3 Composition N° 3 :

- De la table XXV (*) on choisit le coefficient de compacité $\gamma = 0,832$

* **Résultats** : valeurs données par m³ de béton.

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	719,097			
Volume absolu (Litre)	266,065	179,774	43,145	230,111
Densité absolu (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolu (Kg)	686,447	460,221	112,177	598,288

V- 4 Compositions avec ciment CRS 400 :

- On maintient $\gamma = 0,832$

- Le dosage en ciment est de 400 kg/m³

$$V_C = 400/3,18 = 125,786 \text{ L}, \quad \Rightarrow V_G = 828 - 125,786 = 706,213 \text{ L}$$

* **Résultats** : valeurs données par m³ de béton.

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	706,213			
Volume absolu (Litre)	261,299	176,553	42,372	225,998
Densité absolu (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolu (Kg)	674,151	451,951	110,167	586,568

(*) Nouveau guide du béton

V-5 Composition avec ciment CPJ 45 :

$$V_C = 400/3,15 = 126,984 \text{ L}, \quad \gamma = 0,832 \quad \Rightarrow \quad V_G = 828 - 126,984 = 705,015 \text{ L}$$

* **Résultats** : valeurs données par m³ de béton.

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	705,015			
Volume absolu (Litre)	260,855	175,253	42,300	225,604
Densité absolu (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolu (Kg)	673,005	451,207	109,98	585,572

RECAPITULATIF :

N° Composition	E/C	Ciment (Kg)	Eau (l)	Cone (cm)	fc _{3 j} (Mpa)	fc _{7 j} (Mpa)	fc _{28 j} (Mpa)
01	0,45	350	157,5	14	8,70	12,00	19,67
02	0,45	350	157,5	12	11,80	15,18	25,32
03	0,45	350	157,5	9,5	12,50	16,90	27,85
04	0,4	400	160	3,5	-	28,13	45,91
05	0,45	400	180	3,5	-	29,57	47,62

V-6 Conclusion :

Cette optimisation empirique, reposant sur le concept de courbe granulaire de référence, nous épargne la confection de plusieurs gachées étant donnée que la méthode de BARON-LESAGE suppose des manipulations relativement nombreuses.

Cependant le choix le plus comode est de prendre un coefficient de compacité $\gamma = 0,832$ dans le but d'avoir un squelette granulaire optimisé pour un béton de structure B30/B50 .c'est le cas des deux dernières compositions qui peuvent être conservées pour la formulation d'un béton à haute performance gamme B50/B90.

CHAPITRE VI

FORMULATION D'UN BETON A HAUTE PERFORMANCE

**Lorsqu'un théoricien trouve un résultat nouveau, personne n'y croit sauf
lui, lorsqu'un expérimentateur trouve un résultat nouveau, tout le monde croit sauf lui.**

J.LEMAIRE

FORMULATION D'UN BETON

A HAUTE PERFORMANCE

VI-1 Methodologie :

FRANCOIS de LARRARD a présenté une méthode de composition qui a fait l'objet d'un certain nombre d'applications en vraie grandeur: la méthode du coulis. Cette démarche s'appuie sur les constatations suivantes :

- Optimiser un BHP, c'est résoudre un système comportant un grand nombre de paramètres (de 5 à 8); sans méthode rigoureuse. On peut réaliser des dizaines de gachées d'essais sans parvenir à un béton satisfaisant :
- Formuler un BHP à partir du squelette granulaire de la formule régionale.
- Le point le plus critique pour une formule de BHP réside dans son comportement rhéologique.
- Les aspects rhéologiques du béton peuvent être, pour l'essentiel, réglés par des essais sur la pâte du béton. On peut aussi sélectionner le couple ciment/ adjuvant, régler le dosage du superplastifiant, juger si l'emploi du retardateur s'avère nécessaire, estimer la probabilité d'obtenir des pertes d'affaissement à différentes températures etc.

Pour des raisons purement économiques et chronologiques, nous étions dans l'obligation d'entraîner nos investigations sur deux axes:

1. Une optimisation directe d'un béton à haute performance par la formulation de différentes compositions, le dosage de 425 Kg/m³ de ciment représente l'optimum économique.
2. Une optimisation d'un BHP par la méthode de coulis.

Les mesures de résistances à la compression ont été effectuées à 7 et à 28 jours, pour chaque composition, trois éprouvettes au moins ont été testées.

VI-2 Composition avec ciment CRS 400 :

VI-2-1 Composition N°1 :

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.

$$V_c = 425/3,18 = 133,647 \text{ L}, \quad V_c + V_G = 1000 \gamma$$

$$\gamma = 0.832 \Rightarrow V_G = 698,351 \text{ L}$$

- Le plastifiant HP avec un dosage de 0,46 % C
- Le KIESELGUHR avec un dosage de 10 % C

*** Résultats :** valeurs données par m³ de béton

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	698.352			
Volume absolu (Litre)	258,390	174,588	41,90	223,472
Densité absolue (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolue (Kg)	666,646	446,945	108,94	581,028

VI-2-2 Composition N°2 :

- Le même dosage de ciment et de plastiment HP.
- Les fins calcaires avec un dosage de 14 % de C

*** Résultats :** valeurs données par m³ de béton

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	698.352			
Volume absolu (Litre)	258,390	174,588	41,90	223,472
Densité absolue (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolue (Kg)	666,646	446,945	108,94	581,028

VI-2-3 Composition N°3 :

- Le même dosage de ciment et de plastiment HP.
- Le sable de dune avec un dosage de 14 % C

*** Résultats : valeurs données par m³ de béton**

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	698.352			
Volume absolu (Litre)	258,390	174,588	41,90	223,472
Densité absolue (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolue (Kg)	666,646	446,945	108,94	581,028

VI-2-4 Composition N°4 :

- Le même dosage de ciment et de sable de dune.
- Le plastiment fluide avec un dosage de 1,5 % C

*** Résultats : valeurs données par m³ de béton**

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Poucentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	698.352			
Volume absolu (Litre)	258,390	174,588	41,90	223,472
Densité absolue (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolue (Kg)	666,646	446,945	108,94	581,028

VI-2-5 Composition N°5 :

- Le même dosage de ciment et de sable de dune.
- Le MEDARETARD RPF avec un dosage de 1,5 % C

* **Résultats :** valeurs données par m³ de béton

Nature de granulat	15/25	5/15	3/8	0/3
Pourcentage %	37	25	6	32
Volume total (Litre)	698,352			
Volume absolu (Litre)	258,390	174,588	41,90	223,472
Densité absolue (Kg/litre)	2,58	2,56	2,60	260
Masse absolue (Kg)	666,646	446,945	108,94	581,028

RECAPITULATIF :

N° Comp.	E/C	Ciment (Kg)	Eau (l)	Fine Kg	Adjuvant (l)	Cone (cm)	f _{c07j} (Mpa)	f _{c28j} (Mpa)
01	0,44	425	187	42,5	1,656	3	27,47	49,46
02	0,40	425	170	59,5	1,656	4,5	31,12	50
03	0,35	425	148,75	59,5	1,656	4,5	39	51,06
04	0,35	425	148,75	59,5	5,592	4,5	42,7	53,15
05	0,35	425	148,75	59,5	5,592	5	45,36	54,8

VI-3 Interprétations :

Le but visé dans cette étape est d'obtenir des résistances en compression de 500 bars au moins, pour pouvoir changer le ciment CRS 400 par un CPJ45, étant données les performances signalées par le fabricant en ce qui concerne ce type de ciment.

Depuis leur confection à leur écrasement, les éprouvettes ont été conservées dans un bac d'eau dont la température a été maintenue à 20° C. Avant chaque essai les éprouvettes sont essuyées et séchées. Les éprouvettes soumises à la compression sont de forme cylindrique de type 16 x 32 et 11 x 22.

La machine d'essai est une presse hydraulique à deux plateaux horizontaux appliquant la charge d'une manière continue et sans choc.

La forme de rupture de ces éprouvettes était en général une rupture en biseau causée par un mauvais surfaçage. L'adhérence de la pâte de ciment avec le squelette solide était très remarquable dans les compositions adjuvantées par le plastifiant fluide de SIKA.

VI-4 Conclusion :

Etant donné que le sable de dune nous a permis de diminuer le rapport E/C jusqu'à 0,35 pour avoir un affaissement de 5 cm, nous avons choisi la quatrième et la cinquième composition pour une utilisation avec un ciment CPJ45.

VI-5 Composition avec ciment CPJ 45 :

VI-5-1 Composition N° 1 :

- Sable de dunes avec un dosage en ciment de 14 %
- MEDA RETARD avec un dosage de 1.5% de ciment
- Ciment Cpj45 avec un dosage de 425 Kg/m³.

$$V_c = 425/3.1 = 134.920 \text{ l} \quad \text{et comme} \quad \gamma = 0.832$$

$$V_g = 1000 \cdot \gamma - 134.920 \Rightarrow V_g = 697.079 \text{ l}$$

* Résultats: Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total (l)	697.079			
Volume absolu (l)	257.919	174.269	41.824	223.065
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	665.431	446.128	108.742	579.969

VI-5-2 Composition N° 2 :

- Le dosage en ciment est de 425 Kg/m³.
- Le Plastiment fluide avec un dosage de 1.5% C.
- Kiesulguhr avec un dosage de 10% C.

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats'	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	697.079			
Volume absolu (l)	257.919	174.269	41.824	223.065
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	665.431	446.128	108.742	579.969

5-3 Composition N° 3 :

- On change le Kiesulguhr pour le sable de dune avec un dosage de 14% C

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats'	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	697.079			
Volume absolue (l)	257.919	174.269	41.824	223.065
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	665.431	446.128	108.742	579.969

* **Récapitulatif :**

N° composition	E/C	ciment (kg)	eau (l)	Fine (kg)	Plastifiant (kg)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1	0.35	425	148.75	59.5	5.795	5.5	43	54.28
2	0.35	425	148.75	42,5	5.59	4.5	44.23	55.17
3	0.33	425	140.25	59.50	5.59	6	42.5	55.35

VI-6 Composition avec CPJ45 par la méthode des coulis:

VI-6-1 Généralités :

a- But de la méthode:

Formuler un BHP de consistance fluide et de résistance mécanique en compression spécifié (de 50 à 100 MPA en résistance moyenne a 28 jours) à partir de matériaux de construction régionale (formule régionale des bétons de structure).

b- Matériel utilisé :

- Matériel usuel des laboratoires de béton.
- Cône de MARSH avec différent ajutages.
- Flacon de 100 a 200 cm³.

VI-6-2 Différentes étapes de la méthode :

Voir chapitre II

VI-6-3 Résultats d'essais:

Les tableaux suivants montrent l'évolution du temps d'écoulement.

Tableau I

N° coulis	dosage en ciment (Kg)	Sable de dune (Kg)	RPF (L)	Eau (l) ~	E/C	Cône de MARSH (s)
1	490	24.5	10.58	156.8	0.32	9
2	475	47.5	10.68	154.4	0.325	9
3	460	69	10.98	147.2	0.32	10

Tableau II

N° coulis	dosage en ciment (Kg)	Kiesulgur (Kg)	Plastiment fluide (L)	Eau (l) ~	E/C	Cône de MARSH (s)
1	490	39.1	7.84	190.50	0.388	14
2	445	44.5	7.92	182.00	0.409	14
3	410	49.2	7.99	164	0.42	14

VI-6-4 Compositions sur le couple (RPF ,Sable de dune):**a- Composition N°1: " BHP(0)"**

- Le dosage en ciment est de 425 Kg/m³.
- Le RPF avec un dosage de 1.5 % en extrait sec (2.14% de C).

*** Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulates	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	697.079			
Volume absolu (l)	257.919	174.269	41.824	223.065
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	665.431	446.128	108.742	579.969

b- Composition N°2:(coulis N°1)

- Le dosage en ciment est de 490 Kg/m³.
- Le RPF avec un dosage de 1.52% en extrait sec (2.16% de C).
- Le sable de dune avec un dosage de 5 % de C.

et comme $V_c = 490 / 3.15 = 155.555 \text{ l}$

$$V_c + V_g = 1000 \text{ .y et comme } \gamma = 0.832$$

$$\Rightarrow V_g = 676.444 \text{ l}$$

*** Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulates	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	676.444			
Volume absolu (l)	250.284	169.111	40.586	216.462
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	645.7321	432.924	105.523	562.801

c- Composition N°3:(coulis N°2)

- Le dosage en ciment est de 475 Kg/m³.
- Le RPF avec un dosage de 2.25% en extrait sec ~(1.57% de C).
- Le sable de dune avec un dosage de 10 % de C.

*** Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des'granulats'	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	681.206			
Volume absolu (l)	252.046	170.301	40.872	217.986
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	650.278	435.970	106.267	566.763

d- Composition N°4:(coulis N°3)

- Le dosage en ciment est de 460 Kg/m³.
- Le RPF avec un dosage de 1.67% en extrait sec ~(2.39% de C).
- Le sable de dune avec un dosage de 15 % de C.

*** Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des'granulats'	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	685.968			
Volume absolu (l)	253.808	171.492	41.158	219.509
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	654.824	439.019	107.010	570.725

*** Récapitulatif :**

N° composition	E/C	ciment (kg)	eau (l)	sable de dune (kg)	Plastifiant RPF (L)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1	0.32	4.25	136	/	8.28	11.5	13.3	25.68
2	0.32	490	156.8	24.5	9.62	15	20.5	41.5
3	0.325	475	154.37	47.5	9.715	16.5	4.6	32
4	0.32	460	147.2	69	9.99	13	8	41.20

VI-6-5 Interprétation des résultats:**a- Justification des coulis :**

Nous ramenons toutes les compositions à un volume total de l'ordre de 330 l, cette valeur est déterminée à partir d'un calcul semi-empirique d'un certain nombre de BHP ayant le même volume de pâte.

Coulis 1

Total

V=331.181

caractéris matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Ciment	490	3.15	155.55
Eau	156.8	1.0	156.8
Sable de dune	24.5	2.66	9.21
RPF	10.58	1.1	9.61

Coulis 2

Total

V=332.735 l

caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Ciment	475	3.15	150.793
Eau	154.37	1.0	154.37
Sable de dune	47.5	2.66	17.857
RPF	10.68	1.10	9.715

	caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 3	Ciment	460	3.15	146.031
	Eau	147.2	1.0	147.2
Total	Sable de dune	69	2.66	25.94
V=329.161 l	RPF	10.98	1.1	9.99

b- Conclusion:

Cette optimisation nous a permis d'avoir un béton ayant une maniabilité appréciable (un Slump-test qui s'étale de 11.6 cm à 16.5 cm), ce qui veut dire qu'une bonne ouvrabilité est assurée

Mais le dépassement de la gamme de dosage limité par le fabricant a provoqué un retard de prise très remarquable

- Une très mauvaise adhérence
- Une ségrégation
- Une chute quasi total de la résistance mécanique .

par conséquent on a réutilisé cette méthode une deuxième fois ,mais cette fois on a déterminé le dosage de fluidifiant de chaque coulis par rapport au poids propre de ciment et non a l'extrait sec de fluidifiant .

VI-6-6 Compositions sur le couple (PF ,KIESULGHUR):

a- Composition N°1: "BHP (0)"

- Le dosage en ciment est de 425 Kg/m³.
- Le PF avec un dosage de 1.5 % de C.

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats'	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	697.079			
Volume absolu (l)	257.999	174.269	41.824	223.065
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	665.431	446.128	108.742	579.969

b- Composition N°2:(coulis N°1)

- Le dosage en ciment est de 490 Kg/m³.
- Le PF avec un dosage de 1.6 C .
- Le Kusulghur avec un dosage de 8 % de C.

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	676.444			
Volume absolu (l)	250.284	169.111	40.586	216.462
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	645.7321	432.924	105.523	562.801

c- Composition N°3:(coulis N°2)

- Le dosage en ciment est de 445 Kg/m³.
- Le PF avec un dosage de 1.78% C .
- Le Kiesulghur avec un dosage de 10 % de C.

$$V_c = 445 / 3.15 = 141.269 \Rightarrow V_g = 690.730 \text{ l}$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	681.206			
Volume absolu (l)	255.570	172.681	41.443	221.033
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	659.370	442.065	107.751	574.687

d- Composition N°4:(coulis N°3)

- Le dosage en ciment est de 410 Kg/m³.
- Le PF avec un dosage de 1.95 de C .
- Le Kiesulghur avec un dosage de 12 % de C.

$$V_c = 410 / 3.15 = 130.158 \Rightarrow V_g = 701.841$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	701.84			
Volume absolu (l)	259.681	175.460	42.11	224.589
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	669.976	449.177	109.486	583.93

* **Récapitulatif :**

N° composition	E/C	ciment (kg)	eau (L)	Kiesulguhr (Kg)	Plastiment Fluide (L)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1	0.37	425	158.52	/	5.592	10.5	23.26	49.8
2	0.388	490	190.12	39.2	6.877	14	24.9	36
3	0.409	445	182	44.5	6.948	10	16.5	30
4	0.42	410	164	49.2	7.013	8.30	34.50	44.75

VI- 6-7 Interprétation des résultats:

a- Justification des coulis :

Nous ramenons toutes les compositions à un volume total de l'ordre de 590 l cette valeur est déterminée à partir d'un calcul semi-empirique d'un certain nombre de BHP ayant le même volume de pâte.

	caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 1	Ciment	490	3.15	155.55
	Eau	190.50	1.0	190.5
Total	Kiesulghur	39.2	0.17	230.588
V=590.39 l	PF	17.84	1.1	6.877

	caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 2	Ciment	445	3.15	150.793
	Eau	182.005	1.0	154.37
Total	Kiesulghur	44.5	0.17	261.764
V=591.868 l	PF	7.92	1.14	6.948

	caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 3	Ciment	410	3.15	130.158
	Eau	164	1.0	1642
Total	Kiesulghur	49.2	0.17	289.41
V=590.581 l	PF	7.09	1.14	7.013

b- Conclusion :

L'emploi d'un fluidifiant est obligatoire pour l'obtention de performances intéressantes ; C'est donc dans cette perspective d'emploi que nous nous plaçons .La tendance est donc d'augmenter les dosages en fluidifiant afin d'abaisser au maximum le rapport E/C, Pour ce qui est de notre recherche les résultats sont.

- le fluidifiant est un réducteur d'eau plastifiant a base de lignosulfonates . Ces réducteurs d'eau plafonnent au environs de 1.5% c ,ces valeurs sont difficiles a dépasser, compte tenu de l'effet retardateur de ces adjuvants ,on est par conséquent limité dans toute augmentation de dosage.

- Une importante chaleur d'hydratation a nécessité un apport d'eau.
- Une mauvaise adhérence des éléments justifie la mauvaise compacité.
- Une ségrégation considérable.

D'une façon définitive on était contraint ^{mais de} changer la nature du liant et de procéder comme suit .

- Utiliser un ciment CPA55 de faibe teneur en C₃A.
- Utiliser des ajouts minéraux tels que le Filler calcaire et le laitier de haut fourneau afin de diminuer la chaleur d'hydratation du béton.
- Ne pas dépasser la limite de dosage du fluidifiant 1.5% de C .
- Garder la composition N°3 de l'optimisation directe pour une utilisation ultérieure .

VI-7 Compositions avec ciment CPA55

VI-7-1- Compositions par la méthode des coulées

a- compositions N°1" BHP (0)"

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.
- Le plastifiant fluide avec un dosage de 1.5% en extrait sec ~2.02% C.

$$V_c = 425/3.1 = 137.096 \text{ l} \quad \text{et comme } \gamma = 0.832$$

$$V_c + V_g = 1000 \cdot \gamma \Rightarrow V_g = 694.903 \text{ l}$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des → granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
VOLUME total (l)	964.903			
VOLUME absolu (l)	257.114	177.725	41.694	222.368
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	663.354	444.737	108.404	578.159

b- Compositions N°2 (coulis)

- Le dosage en ciment est de 490 kg/m³
- Le dosage en sable de dune est de 5% C
- Le Filler calcaire avec un dosage de 10 % C
- Le plastifiant fluide avec un dosage de 2.22 % C

$$V_c = 490/3.1 = 158.064 \Rightarrow V_g = 673.935 \text{ l}$$

Résultats: Valeurs données par m3 de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	964.935			
Volume absolu (l)	249.356	168.483	40.436	215.659
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	643.338	431.318	105.134	560.714

c- Compositions N°3 (coulis2)

- Le dosage en ciment est de 475 kg/m3
- Le dosage en sable de dune est de 10% C
- Le Filler calcaire avec un dosage de 10 % C
- Le plastiment fluide avec un dosage de 2.46 % C

$$V_c = 475/3.1 = 153.225 \Rightarrow V_g = 678.774 \text{ l}$$

Résultats: Valeurs données par m3 de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	678.774			
Volume absolu (l)	251.170	169.693	40.726	217.207
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	647.957	434.415	105.888	564.740

d- Compositions N°4 (coulis3)

- Le dosage en ciment est de 460 kg/m³
- Le dosage en sable de dune est de 15% C
- Le Filler calcaire avec un dosage de 10 % C
- Le plastiment fluide avec un dosage de 2.64 % C

*** Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats →	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	983.613			
Volume absolu (l)	252.936	170.903	41.096	218.765
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	652.574	437.511	106.641	568.766

*** Récapitulatif:**

N° Comp	E/C	ciment (kg)	eau (l)	Filler (kg)	Sable dune (Kg)	Plastiment fluide (kg)	temps cône Marsh(s)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1 BHP	0.30	425	127.5	néant	néant	8.6	10	10.1	19.31	31.25
2 Coulis 1	0.30	490	147	49	24.5	10.91	11	10	15.32	35.00
2 Coulis 2	0.305	475	144.8 7	47.5	47.5	11.73	11	9.5	18.13	31.43
3 Coulis 3	0.30	460	138	46	69	12.16	12	6.8	8.0	20.42

IV-7-2 Interprétation et conclusion :

a- Justification des coulis :

Nous ramenons toutes les compositions à un volume de 350 l

	caractèris	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 1	matériaux			
	Ciment	490	3.1	158.06
	Eau	147	1.0	147
Total	Sable de dune	24.5	2.66	9.21
	Filler calcaire	49	2.00	24.50
V=349.71	Plastiment fluide	11.43	1.14	10.91

	caractèris	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 2	matériaux			
	Ciment	475	3.1	153.225
	Eau	149.875	1.0	144.875
Total	Sable de dune	47.5	2.66	17.857
	Filler calcaire	47.5	2.00	23.75
V=351.41	Plastiment fluide	13.37	1.14	11.73

	caractèris	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
Coulis 3	matériaux			
	Ciment	460	3.1	148.38
	Eau	138	1.0	138
Total	Sable de dune	69	2.66	25.94
	Filler calcaire	46	2.00	23.00
V=348.01	Plastiment fluide	13.86	1.14	11.16

b- Conclusion :

Les essais précédents ont confirmé que la chute des résistances mécaniques en compression n'est pas due à la nature du liant, mais plutôt au surdosage en fluidifiant.

VI-7-3 Compositions de l'optimisation directe :**a- Composition n°:1 :**

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.
- Le sable de dune avec dosage de ... % C.
- Le plastifiant fluide avec un dosage de ... % C.

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats →	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total (l)	694.903			
Volume absolu (l)	257.114	173.725	41.694	222.368
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	663.354	444.737	108.404	578.159

b- Composition n°:2

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.
- Le filler calcaire avec dosage de ... % C.
- Le plastifiant fluide avec un dosage de ... % C.

* Le même squelette granulaire est maintenu

c- Composition n°:3 :

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.
- Le laitier de haut fourneau avec dosage de % C.
- Le plastiment fluide avec un dosage de % C.

* Le même squelette granulaire est maintenue

Récapitulatif:

N° composition	E/C	ciment (kg)	eau (l)	Fine (kg)	Plastiment fluide (kg)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1	0.32	425	136	SD=		5	49.3	62.23
2	0.32	425	136	Filler		6.1	52	64.75
3	0.32	425	136	Laitier		6	58.61	73.42

VI-7-4 Interprétations et conclusions:

Les constatations suivantes ont été faites sur les compositions des BHP avec un ciment CPA55

- Plus le ciment est broyé finement plus la chaleur d'hydratation est élevée c'est le cas du CPA55 utilise (Blaine : 3664 cm²/g), mais cet inconvénient est rattrapé par une faible teneur en C3A (4%) ce qui justifie la bonne maniabilité du béton.

- Malgré sa composition chimique siliceuse, nous avons estimé que l'inconvénient majeur du sable de dune et qu'il présente un pourcentage de vide assez élevé (50 % des constituants est supérieur à 160 µm → Voir analyse granulométrique du sable de dune) engendrant une faible compacité du béton et réduisant aussi les résistances .

- Le filler calcaire semble jouer un rôle dans l'augmentation des résistances mécaniques, réduisant le rapport E/C et en conservant une maniabilité acceptable.

- Le laitier des hauts fourneaux a permis d'augmenter considérablement les résistances en compression. Vu sa forte teneur en silice; cependant l'exigence de finesse provient d'avantage dans le cas qui nous intéresse de la nécessaire compacité de la pâte, le broyage du laitier jusqu'à 125 μm et un malaxage à sec a diminué la teneur en air du béton. Ce qui justifie l'absence relative des bulles d'air sur la face extérieure et à l'intérieur des éprouvettes.

En définitive, l'objectif d'avoir un béton haute performance de classe B60 / B65 a été largement atteint dans cette étape. En effet avec l'utilisation d'un ciment de type HP ou HPR, nous pourrions avoir de bons résultats.

VI-8 Etude comparative :

Un des soucis actuels est de voir dans quelle mesure il est possible de réaliser des bétons à hautes performances avec des matériaux disponibles localement. Le surcoût des bétons hautes performances ainsi conçu reste raisonnable, et leur emploi devient alors crédible.

Afin de montrer la possibilité de réaliser des bétons à hautes performances et dans le but d'étudier la comptabilité des produits locaux avec des fluidifiants et des hyper fines importées, deux objectifs ont été focalisés dans cette expérimentation.

1- La formulation d'un C_{HP} (80 Mpa à la rupture à 28 j) avec les matériaux et matériels disponibles dans le laboratoire de Génie Civil de l'ENPA

2- Le béton à l'état frais doit avoir un Slump-test de 12cm au moins mesuré au cône d'ABRAMS.

Au niveau de ultrafines la fumée de silice constitue l'addition la plus efficace. C'est un sous produit de l'électrometallurgie du silicium et de ses alliages.

Pour fabriquer le silicium, on charge un four avec du quartz, de la houille et parfois des copeaux de bois. L'ensemble est chauffé à (1500°, 2000°) par des

arcs électriques ; on obtient d'une part le silicium liquide , d'autre part des gazes charges de poussières dont certaines s'oxydent à l'air pour donner la fumée de silice ,c'est une poudre volatile dont les grains sont des sphères quasi-parfaites , de taille accusant une grande dispersion .

La grande finesse de cette poudre lui permet de s'insérer entre les grains du ciment et de diminuer aussi le pourcentages des pores ,sa nature chimique la rend capable de s'associer à la chaux libérée au cours de l'hydratation du ciment pour donner des silicates hydratés C-S-H particulièrement denses et amorphes , qui remplissent progressivement les vides restant dans la structure . Cette réaction pouzzolanique se produit dans des conditions normales de température (20 °) principalement entre le 7^{ème} et le 14^{ème} jour après le gâchage.

VI-8-1 Matériaux utilisés :

a- Gravier : (3 - 25 mm)

(3 - 25 mm) ,de nature calcaire ,de densité variant de (2.56 à 2.6) concassé ,il provient de la carrière « JOBER →Voir chapitre précédent .

b- Sable : (0-3mm)

Provenant de la même carrière mais le concassage a été effectuée au niveau du chantier de l'ENGOA (EL MOHAMEDIA) de densité 2.60 ,il est essentiellement siliceux, très propre (ES~90) et d'un module de finesse $M_f = 3.01$

c- Ciment :

Le ciment utilisé est un CPA 55 de la cimenterie de AIN EL KEBIRA, ce ciment a été retenu car, bien qu'ayant des performances intrinsèques plus modestes que celles d'autres ciments type CPJ 45, CRS il ne contient que très peu de C₃A (4%).

d- Fumée de silice :

Celle ci nous a été fournie par le laboratoire de béton de COSIDER, elle se présente sous forme densifiée (voir l'annexe) . Un malaxage a sec avec le liant sera donc nécessaire pour pulvériser les granules et disperser les particules (microniques) au sein du matériau

e- Fluidifiant :

Le RHEOBUILD fourni par le même laboratoire est un superplastifiant à base de formaldéhyde et naphthalène sulfinate, c'est une solution aqueuse de couleur brune à 36% d'extrait sec et d'une masse volumique de 1020 Kg/cm².

VI-8-2 Formulation par la méthode des COULIS:**a- compositions N°:1 " BHP (0)"**

- Le dosage en ciment est de 425 kg/m³.
- Le Rheobuild avec un dosage de 1.5% C.

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	694.903			
Volume absolu (l)	257.114	173.725	41.694	222.368
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	663.354	444.737	108.404	578.159

b- compositions N°:2 (coulis 1)

- Le dosage en ciment est de 485 kg/m³.
- La fumée de silice avec un dosage de 7% C.
- Le Rheobuild avec un dosage de ... % C.

$$V_c = 485/3.1 = 156.45 \text{ l} \quad \text{et comme } \gamma = 0.832$$

$$V_c + V_g = 1000 \cdot \gamma \Rightarrow V_g = 675.548 \text{ l}$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total (l)	675.548			
Volume absolu (l)	249.951	168.887	40.531	216.175
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	644.878	431.350	105.383	562.055

c- compositions N°:3 (coulis 2)

- Le dosage en ciment est de 450 kg/m³.
- La fumée de silice avec un dosage de 10% C.
- Le Rheobuild avec un dosage de ... % C.

$$V_c = 450/3.1 = 145.161 \text{ l} \quad \text{et comme } \gamma = 0.832$$

$$V_c + V_g = 1000 \cdot \gamma \Rightarrow V_g = 686.831 \text{ l}$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	686.838			
Volume absolu (l)	254.130	171.709	42.220	219.788
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	655.655	430.575	107.146	571.448

d- compositions N°:4 (coulis 3)

- Le dosage en ciment est de 420 kg/m³.
- La fumée de silice avec un dosage de 13%C.
- Le Rheobuild avec un dosage de 13% C.

$$V_c = 420/3.1 = 135.483 \quad \text{et comme } \gamma = 0.832$$

$$V_c + V_g = 1000 \cdot \gamma \Rightarrow V_g = 696.516 \text{ l}$$

* **Résultats:** Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total(l)	686.838			
Volume absolu (l)	257.710	174.129	41.790	222.885
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	66.892	445.770	108.654	579.501

Récapitulatif:

N° composition	E/C	ciment (kg)	eau (l)	Fumée de silice (kg)	Rheobuil (kg)	cône (cm)	comp 7 j MPA
1	0.3	425	127.5	néant		14	52.26
2	0.32	485	155.2	33.95		12	65.35
3	0.32	450	144	45		9.50	67.17
4	0.32	420	134.4	54.6		8	69.57

VI-8-3 Interpretations et conclusions :

a- Justification des coulis :

Nous ramenons toutes les compositions à un volume de pâte de 378 l déterminé à partir d'un calcul semi empirique

	caractéri matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
<u>Coulis 1</u>	Ciment	485	3.1	156.45
	Eau	155.2	1.00	155.2
Total	fumée de silice	33.85	0.50	67.9
V:387.395 l	Rheobuild	8.001	1.01	7.845

	caractèris matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
<u>Coulis 2</u>	Ciment	450	3.1	145.61
	Eau	144	1.00	144
Total	fumée de silice	45	0.50	90
V:387.551 l	Rheobuild	8.0991	1.01	7.941

	caractèris matériaux	Masse (Kg)	Densité (Kg/L)	Volume (l)
<u>Coulis</u>	Ciment	420	3.1	135.48
	Eau	134.4	1.00	134.4
Total	fumée de silice	54.6	0.50	109.2
V387.395 l	Rheobuild	8.316	1.02	8.153

Pour des raisons purement économique le dosage en super-plastifiant a été fixé par rapport au poids propre du ciment .

VI-8-4 Compositions N°1:

- Le dosage en ciment est de 420 kg/m³
- La Fumée de silice avec un dosage de 13% C
- Le Rheobuild avec un dosage de % C
- Le LHF avec un dosage de % C

Résultat: Valeurs données par m³ de béton

Nature des granulats	15/25	5/15	3/8	0/3
pourcentage %	37	25	6	31
Volume total (l)	696.516			
Volume absolu (l)	257.710	174.129	41.790	122.885
densité (kg/l)	2.58	2.56	2.60	2.60
masse absolue (kg)	664.891	445.770	108.654	579.501

VI-8-5 Composition finale:

La formulation de la 1^{ère} composition a été retenue; nous avons introduit en plus le super plastifiant directement dans le béton 2 min après le gâchage .

Résultats :

N° composition	E/C	ciment t (kg)	eau (l)	Fumée de silice (kg)	L'aitier L.H.F (Kg)	Rheobuild (kg)	cône (cm)	comp 7 j MPA	comp 28j MPA
1	0.32	420	134.4	54.6			10	-	84.5
2	0.32	420	134.4	54.6			16	-	71.6

VI-8-6 conclusion

Nous pourrions conclure ce qui suit :

-l'écrasement des éprouvettes à trois et sept jours, nous a permis de déduire une estimation qualitative et non pas quantitative du béton durci.

- le malaxage à sec de la Furée de silice avec le ciment a provoqué un comportement qui se rapproche d'un liquide visqueux, cela est du à notre avis à la pulvérisation des granules et à la dispersion et l'homogénéisation de toutes les particules au sein du matériau.

-l'introduction du superplastifiant dans l'eau de gâchage ne présente aucune différence avec un réducteur d'eau plastifiant, ce qui a été confirmé lors de son introduction directe dans le béton quelque minutes après le gâchage.

-l'utilisation des LHF broyés à 125 μm a diminué de façon considérable le rapport E/C.

CHAPITRE VII

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous disposons aujourd'hui de suffisamment de connaissances pour être à même de réaliser des bétons à hautes performances satisfaisant un cahier de charges précis et exhaustif, après un nombre raisonnable d'essais en laboratoire l'expérience nous a permis de tirer les conclusions et recommandations suivantes:

1- c'est dans la pâte de ciment que résident les composants spécifiques des BHP, le squelette solide n'a pas de raison de changer de nature ni de proportions par rapport à celui d'un béton ordinaire, cela a été confirmé par les résultats obtenus, d'autant plus que le béton recherché est de la classe B50/B100.

2- l'utilisation d'un sable concassé de la même roche mère que celui des gros granulats est un choix judicieux, mais l'inconvénient majeur de ce sable réside dans sa nature granulométrique représentée par un module de finesse éventuellement important ce qui justifie une mauvaise ouvrabilité. Ce problème peut être remédié par ajout minéral d'éléments fins.

3- Sauf exception, les ciments de classe 55 ne permettent que difficilement d'atteindre sans addition le niveau des B60, nous leur préférons donc les classes HP (CPA ou CPJ), une faible teneur en aluminates C_3A réduit en général les risques de raidissement précoce, ainsi que l'exothermie en cours de prise.

4 -Le principe d'obtention des BHP consiste à réduire le rapport eau/ciment du mélange, tout en leur conservant une ouvrabilité convenable, ceci grâce à l'emploi de fluidifiant.

Cependant cette recherche nous a confirmé que la formulation des BHP avec et sans fumée de silice passe obligatoirement par l'utilisation d'adjuvant appartenant à la famille des superplastifiants.

5- Nous n'avons pas soupçonné que moyennant un choix de fluidifiant et un dosage convenable, nous pouvons avoir un béton avec des propriétés

profondément modifiées. En effet, il faudrait connaître la différence entre les superplastifiants et les réducteurs d'eau-plastifiants.

Les premières sont à base de mélamine sulfonate ou de naphthalen sulfonate, les secondes sont essentiellement des lignosulfonates et éventuellement certains gluconates .

Les superplastifiants ont une action sur les bétons plus importante que celle des réducteurs d'eau-plastifiants, en permettant à teneur égale en eau d'augmenter considérablement l'ouvrabilité du béton ce qui est impossible avec les réducteurs d'eau-plastifiants même en augmentant les doses en raison du retard de prise et l'excès d'air.

6- Le RHEOBUILD, mélangé à l'eau de gâchage du béton ne présente aucune différence avec les réducteurs d'eau-plastifiants, ajouté directement à la fin du malaxage, son effet bien que notable n'est guère plus différent de celui obtenu avec un réducteur d'eau plastifiant (plastiment fluide). Les performances de ce superplastifiant apparaissent donc lorsqu'il est introduit en différé directement dans le béton.

7- Les additions minérales telles que le KUSULGUHR et le Filler, semblent jouer un rôle dans l'augmentation des résistances mécaniques en réduisant le rapport E/C pour le cas des Filler, mais nous sommes persuadés qu'on aurait pu avoir des résistances appréciables dans le cas où un malaxage à sec des KUSULGUHR avec le ciment a été effectué.

8- L'influence du laitier de haut fourneau sur la diminution de la chaleur d'hydratation du ciment a été visiblement remarquable. Ce qui nous a conduit à diminuer le rapport E/C. Pour tenir finalement un béton de classe 70 MPA.

9- Les buts recherches ont bien été atteints, ce béton réalisé dans un premier temps est un B70 sans fumée de silice ayant un Slump-test de 6 cm au cône d'ABRAMS. En deuxième étape nous avons réussi à avoir un B90 qui peut être considéré comme un BTHP, ce béton a une ouvrabilité très grande (15 cm au cône d'ABRAMS). Nous pouvons penser que ces effets bénéfiques sont la conséquence de la modification de la microstructure du béton, conséquence de l'ajout de fumée de silice et du super-plastifiant

En conclusion, nous pensons ne pas dépasser la gamme des B70 avec un tel affaissement (15 cm) . Sans avoir recours à la fumée de silice et aux super-plastifiants.

10- Ce n'est finalement qu'avec quelques ciments portant très peu de réactifs additionnés de fumée de silice et quelques super plastifiants couplés à des granulats particulièrement performants , qu'il est possible d'abaisser le rapport E/C entre 0.2 et 0.25 de béton HP ayant un affaissement supérieur à 15 cm et un⁹ résistance qui peut atteindre 150 MPA.

RECOMMANDATIONS

Nous ne prétendons pas avoir des réponses définitives a tous les problèmes que pose la mise a l'essai des bétons a haute performance. Cependant , nous pensons par notre modeste contribution dans le vaste domaine des recherches de BHP qu'il faudra aborder les aspects suivants .

1- Le comportement rhéologique des BHP afin de rendre celui-ci plus régulier et plus maîtrisable.

2- Il faudrait progresser dans la compréhension des phénomènes physico-chimiques spécifique du béton tels que le retrait , la compacité, l'imperméabilité et la carbonatation.

3- Il faut aussi comprendre la nature essentiellement chimique des adjuvants et les réactions qu'ils suscitent en raison de la disponibilité de plusieurs marques sur le marché ;chacun comportant plus d'ingrédients de base et parfois variables quant à leur composition et les formules changent sans que l'utilisateur en soit averti.

4- Il ne faut pas hésiter à utiliser de la fumée de silice et des superplastifiants car le surcoût d'un BHP est souvent composé par l'économie de mise en place et de réduction du risque de mauvaise exécution.

Le marché des bétons à hautes performances est tout a fait marginale pour l'instant ,mais c'est un marché d'avenir, c'est le marché qui différenciera les bons bétons des moins bons .C'est un défi que tout producteur de béton progressif se doit de relever ,ce n'est pas toujours facile car il n'y a pas deux ciments et deux fluidifiants qui réagissent de la même façon ,mais ce n'est pas une raison pour renoncer à l'avance .

Enfin les hommes de chantier devront apprendre à mieux connaître ce matériau, avec lequel certaines habitudes doivent être changées.

ANNEXES

ANNEXES FICHES TECHNIQUES



CIMENTS PORTLAND

CPJ 45

NORME NF P 15 301

LE CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ 45

EMPLOIS COURANTS

- Maçonnerie.
- Béton courant (non armé ou faiblement armé: remplissage fondations, portées réduites, décoffrage différé);
- Béton armé sollicité : structures porteuses, etc.;
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis, etc.);
- Stabilisation des sols et graves ciment ;
- Bétons routiers ;
- Travaux en grandes masses moyennement sollicités qui exigent une chaleur d'hydratation modérée ;
- Travaux de fondation en milieu non agressif.

CONTRE-INDICATIONS

- Ouvrages en milieux agressifs (eaux salines, eaux séléniteuses,...).
- Travaux souterrains, fondations importantes en milieux agressifs.
- Liants incompatibles.
- Lorsque l'aspect entre en ligne de compte (béton apparent p.ex.); il convient de prêter une attention particulière aux constituants qui peuvent modifier la teinte.

MARQUAGE

RECOMMANDATIONS ET CONSEILS

IL CONVIENT DE S'ATTACHER PLUS PARTICULIEREMENT :

• Lors de la préparation du béton :

— Au choix du ciment pour lequel il convient de s'assurer qu'il satisfait à l'essai de stabilité;

— Au dosage en ciment : un excès provoque une tendance à la fissuration, une insuffisance un manque d'homogénéisation dans la résistance;

— A la propreté des granulats et à l'élimination des sables et granulats argileux;

— A limiter la quantité d'eau en fonction des moyens de serrage.

• Lors de la mise en œuvre :

— A ne pas couler le béton au contact d'éléments poreux secs.

— A éviter toutes ségrégations du béton (éviter les grandes hauteurs de chute,...);

— A atteindre la compacité maximale compatible avec les moyens de mise en œuvre;

— A lier au mieux les gâchées successives en s'attachant notamment à vibrer convenablement la zone de transition entre les gâchées.

• Pendant le durcissement :

— A éviter la dessiccation rapide des zones superficielles en maintenant le béton humide ou en employant des produits de cure ;

— Bien que l'évolution des caractéristiques du béton permette des décoffrages rapides, il faut toutefois éviter qu'ils ne soient prématurés afin de conserver au mieux les résistances à long terme.

ENTREPRISE DES CIMENTS ET DÉRIVÉS - EST "E.R.C.E. / S.p.A"

Zone Industrielle "Le Palma" - BP 567 - CONSTANTINE (Capital social 820.000.000 D.A.)



CIMENTS PORTLAND

CPJ 45

NORME NF P 15 301

CONFORMÉMENT À L'INSTRUCTION MINISTÉRIELLE N° 0016 / DRN DU 09 SEPTEMBRE 1989, LES RÉGLEMENTS TECHNIQUES ET NORMES DE CONSTRUCTION RETENUS POUR LES LIANTS HYDRAULIQUES ET EN USAGE EN ALGÉRIE À TITRE TRANSITOIRE SONT LES NORMES AFNOR (NF).

LE CIMENT PORTLAND COMPOSÉ CPJ 45

DEFINITION

Le ciment Portland composé CPJ 45 résulte de la mouture :

- d'au moins 65 % de CLINKER PORTLAND
- du complément à 100 % d'un ou plusieurs constituants secondaires : (Laitier, Filler calcaire, ...);
- de sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

CE CIMENT CONFORME A LA NORME NF P 15 301 EST DESIGNÉ : CPJ 45

- Le retrait à 28 jours du mortier normal est inférieur à 800 micro-mètres / mètre.
- L'expansion mesurée à chaud et à froid sur éprouvette de pâte pure est inférieure à 10 mm.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

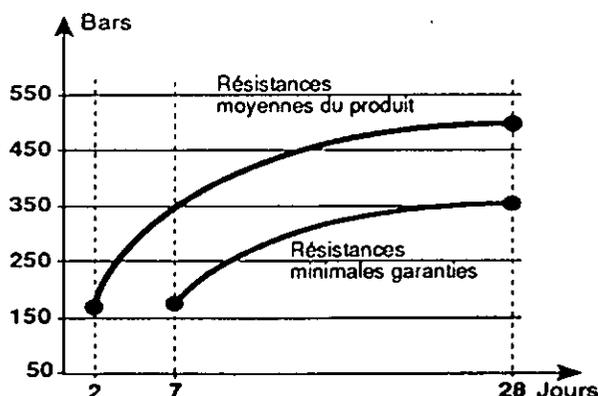
- La proportion des sulfates (SO₃) dans le ciment est inférieure à 4 %.
- La teneur en chlorures (Cl⁻) est inférieure à 0,05 %.

L'ADDITION DE SELS SOLUBLES TELS QUE CHLORURES OU SULFATES EST INTERDITE

CARACTERISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES

- Les résistances à la compression du CPJ 45 font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître une valeur moyenne des résultats obtenus à 28 jours voisine de 450 Bars (45 MPa).
- La majorité des résultats obtenus se situe entre 350 Bars et 550 Bars (35 et 55 MPa).
- Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du CPJ 45.
- En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont :
 - 175 Bars (17,5 MPa) à 7 jours.
 - 350 Bars (35 MPa) à 28 jours.
- Le temps de début de prise, à 20 °C, mesuré sur pâte pure est supérieur à 90 minutes.

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION



ENTREPRISE DES CIMENTS ET DÉRIVÉS - EST "E.R.C.E. / S.p.A"

Zone Industrielle "Le Palma" - BP 567 - CONSTANTINE (Capital social 820.000.000 D.A.)

CIMENTS PORTLAND

CPA 55

NORME NF P 15 301

CONFORMÉMENT À L'INSTRUCTION MINISTÉRIELLE N° 0016 / DRN DU 09 SEPTEMBRE 1989, LES RÉGLEMENTS TECHNIQUES ET NORMES DE CONSTRUCTION RETENUS POUR LES LIANTS HYDRAULIQUES ET EN USAGE EN ALGÉRIE À TITRE TRANSITOIRE SONT LES NORMES AFNOR (NF).

LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL CPA 55

DEFINITION

Le ciment Portland artificiel CPA 55 est réputé sans ajout. Sa teneur en clinker (produit constitué principalement de silicates et aluminates de calcium est au moins égale à 97 % ; le complément à 100 % étant du filler (matériau inerte).

Du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

CE CIMENT CONFORME A LA NORME NF P 15 301 EST DESIGNÉ : CPA 55

- Le retrait à 28 jours du mortier normal est inférieur à 1000 micro-mètres / mètre.
- L'expansion mesurée à chaud et à froid sur éprouvette de pâte pure est inférieure à 10 mm.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

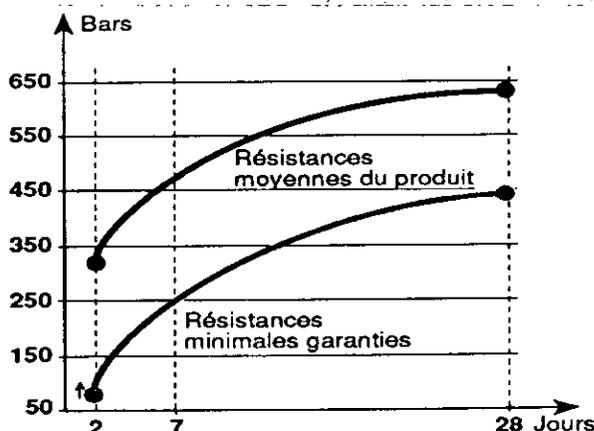
- La proportion des sulfates (SO_3) dans le ciment est inférieure à 4 %.
- La teneur en chlorures (Cl^-) est inférieure à 0,05 %.
- La teneur en magnésie (MgO) ne doit pas dépasser 5% de la masse du ciment

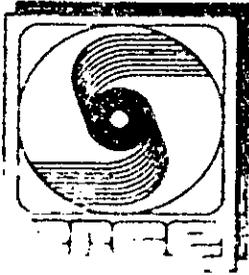
L'ADDITION DE SELS SOLUBLES TELS QUE CHLORURES OU SULFATES EST INTERDITE

CARACTERISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES

- Les résistances à la compression du CPA 55 font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître une valeur moyenne des résultats obtenus à 28 jours voisine de 550 Bars (55 MPa).
- La majorité des résultats obtenus se situe entre 450 Bars et 650 Bars (45 et 65 MPa).
- Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du CPA 55.
- En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont :
 - 100 Bars (10 MPa) à 2 jours.
 - 450 Bars (25 MPa) à 28 jours.
- Le temps de début de prise, à 20 °C, mesuré sur pâte pure est supérieur à 60 minutes.

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION





CIMENTS PORTLAND

CPA 55

NORME NF P 15 301

LE CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL CPA 55

EMPLOIS COURANTS

- Béton armé fortement sollicité (structures porteuses, etc...) ne nécessitant pas des résistances initiales particulièrement fortes ;
- Béton armé avec décoffrage accéléré ;
- Éléments préfabriqués en béton armé (poutres, poutrelles, éléments de grande surface, etc.) ;
- Béton précontraint ;
- Travaux exigeant des performances mécaniques exceptionnelles ;
- Bétons routiers.

CONTRA-INDICATIONS

- Ouvrages en milieux agressifs (eaux salines, eaux séléniteuses,...).
- Travaux souterrains, fondations importantes en milieux agressifs.
- Liants incompatibles.
- Lorsque l'aspect entre en ligne de compte (béton apparent p.ex.); il convient de prêter une attention particulière aux constituants qui peuvent modifier la teinte.

MARQUAGE

**CIMENT
PORTLAND CPA**
ARTIFICIEL

55

MOYENNE

50 KG

NF

P 15 - 301

RECOMMANDATIONS ET CONSEILS

IL CONVIENT DE S'ATTACHER PLUS PARTICULIEREMENT :

• Lors de la préparation du béton :

- Au choix du ciment pour lequel il convient de s'assurer qu'il satisfait à l'essai de stabilité;
- Au dosage en ciment : un excès provoque une tendance à la fissuration, une insuffisance un manque d'homogénéisation dans la résistance;
- A la propreté des granulats et à l'élimination des sables et granulats argileux;
- A limiter la quantité d'eau en fonction des moyens de serrage.

• Lors de la mise en œuvre :

- A ne pas couler le béton au contact d'éléments poreux secs.
- A éviter toutes ségrégations du béton (éviter les grandes hauteurs de chute,...);
- A atteindre la compacité maximale compatible avec les moyens de mise en œuvre;
- A lier au mieux les gâchées successives en s'attachant notamment à vibrer convenablement la zone de transition entre les gâchées.

• Pendant le durcissement :

- A éviter la dissiccation rapide des zones superficielles en maintenant le béton humide ou en employant des produits de cure ;
- Certains CPA 55 particulièrement résistants aux agents agressifs (faible teneur en aluminat tricalcique C3A) voient le développement de leurs résistances, aux jeunes âges fortement ralenti par le froid : éviter soigneusement tout sous-dosage.

ENTREPRISE DES CIMENTS ET DERIVES DE L'EST

" E . R . C . E "

-o- CIMENTERIE DE AIN EL KEBIRA -o-

EPT/PRODUCTION

CE/CONTROLE ET QUALITE

A.E.K, LE 08.01. 1996

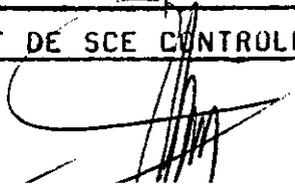
RS

.R.S

-o- // ICHE // ECHNIQUE -o-

ANALYSES CHIMIQUES		ESSAIS PHYSIQUES		
ELEMENTS	TENEUR	FINESSE	P.S(σ /CM ²)	3.18
Sio 2	22.30	MOTURE	S.S.B(Cm ² /n)	3238
AL 203	4.52	TEMPS DE PRISE	Debut	2H51
Fe 203	5.09		Fin	5H16
CaO	62.76	Expansion le "Chatelier"	A. Chaud	/ 12
M.G.O.	1.59		A. Froid	0.04
SO3	2.02	Refus	700	-
NA 20			90	7.33
K 20		CONSISTANCE NORMALE		24.60
P.A.F	1.19	A. ESSAIS MECANIQUE NOVEMBRE		
CAO Libre	0.67			
R.Insolub	1.13			
COMPOSITION POTENTIELLE		RESISTANCE A. LA FLEXION (KG/CM ²)	2 JOURS	30.70
A.F	0.89		7 JOURS	54
M.S	2.20		28 JOURS	75
L.S.F	0.89			
C3 S	48.48	RESISTANCE A. LA COMPRESSION (Kg./CM ²)	2 JOURS	166
C2S	24.18		7 JOURS	356
C3 A	3.38		28 JOURS	559
C4 AF	15.49			

LE CHEF DE SCE CONTROLE QUALITE.



SPECHI-I

ZA du Houff du Breuil
77380 COMES LA VILLE

Tel: (16-1) 64 88 90 60

Fax: (16-1) 64 88 90 33 Téléc: 694 033

MICROFUME *

origine

MICROFUME est un produit minéral amorphe d'une très grande finesse et de haute qualité.

MICROFUME provient exclusivement des usines de Pechiney Electrométallurgie produisant du Silicium ou des alliages à base de Silicium (Ferro-Silicium).

MICROFUME prend naissance dans les fours électriques de réduction par un certain nombre de réactions.



caractéristiques techniques

MICROFUME se présente sous la forme d'une poudre fine grise.

- Granulométrie

MICROFUME apparaît sous forme de billes sphériques compactes de 0,2 à 0,5 microns au microscope électronique (MET ou MEB).

La granulométrie apparente est plus élevée car les billes de Silice se rassemblent en agglomérats de faible cohésion.

MICROFUME

DIVISION SIDERURGIE

SPECHI-I

ZA du Haut du Breuil

77380 COMBS LA VILLE

Tel: (16-1) 64 88 90 60

Fax: (16-1) 64 88 90 33 Téléc: 694 033

- Surface spécifique
18 à 23 m²/g (soit 50 fois plus élevée que le ciment)
- Densité apparente
0,1 – 0,2 sans traitement
0,4 – 0,6 après traitement (traitement à sec)
- Analyse chimique
suivant origine SiO₂ > à 85 % CaO < à 2 %
 SiO₂ > à 70 % CaO > à 5 %

Les impuretés telles que Al₂O₃, MgO et dioxyde (Na₂O et K₂O) sont l'objet de contrôles réguliers

Une analyse détaillée peut être remise sur demande.

propriétés

MICROFUME a deux fonctions différentes :

- 1 - Substitut du ciment (réduction de la quantité de ciment pour des raisons économiques).
- 2 - Adjuvant améliorant les propriétés du béton à l'état frais ou à l'état durci

MICROFUME réagit comme une pouzzolane vis-à-vis des bétons et des liants hydrauliques et améliore les propriétés.

- Manipulabilité : **plus grande**
- Ouvrabilité supérieure, meilleur écoulement du béton dans les coffrages.
- Imperméabilité : **accrue**
- Bétons extrêmement compacts - Homogénéité de la structure.
- Durabilité : **plus élevée** des bétons armés ou renforcés par des fibres (acier, verre...).
- Résistance : **plus grande** aux agressions chimiques (action des agents corrosifs de l'atmosphère, des sels de déverglaçage, etc...).

SPECHI-I

ZA du Haut du Breuil
77360 COMBS LA VILLE

Tel: (16-1) 64 88 90 60

Fax: (16-1) 64 88 90 33 Téléx: 204 003

- Cohésion : améliorée du béton et donc réduction de la ségrégation, des nids de cailloux et du ressuage.
- Productivité : supérieure
- Décoffrage plus rapide (gain de 30 %). Accélération du durcissement.
- Diminue : les risques d'efflorescence et de réactions alcalis (granulats alcalis bloqués et perméabilité très réduite).
- Caractéristiques mécaniques : renforcées
- Compression flexion traction : les résistances mécaniques suivant conditions d'emploi sont doublées ou triplées.

Exemple : 70 à 120 Mpa avec MICROFUME
35 à 40 Mpa sans MICROFUME
pour un même dosage en ciment
Retrait et fluage moins important avec MICROFUME

gamme de produit

MICROFUME N (produit standard non traité $D^* = 0,1 - 0,2$)

MICROFUME D (produit traité $D^* = 0,4 - 0,6$)

stockage - emballages - livraisons

MICROFUMÉ est traité à sec sur certains sites de Pechiney Electrometallurgie.
Sa densité est de : 0,4 - 0,6.

Ce traitement complémentaire permet de manipuler, stocker et transporter ce produit dans des conditions économiques avantageuses (transport en vrac en camions aérariés)

* D : densité apparente

SPECHT-I

ZA du Haut du Breuil
77360 COMBES LA VILLE

Tel: (16-1) 64 88 90 60

Fax: (16-1) 64 88 90 33 Télex: 694 033

- Emballage

MICROFUME N Big-Bag de 200 kg

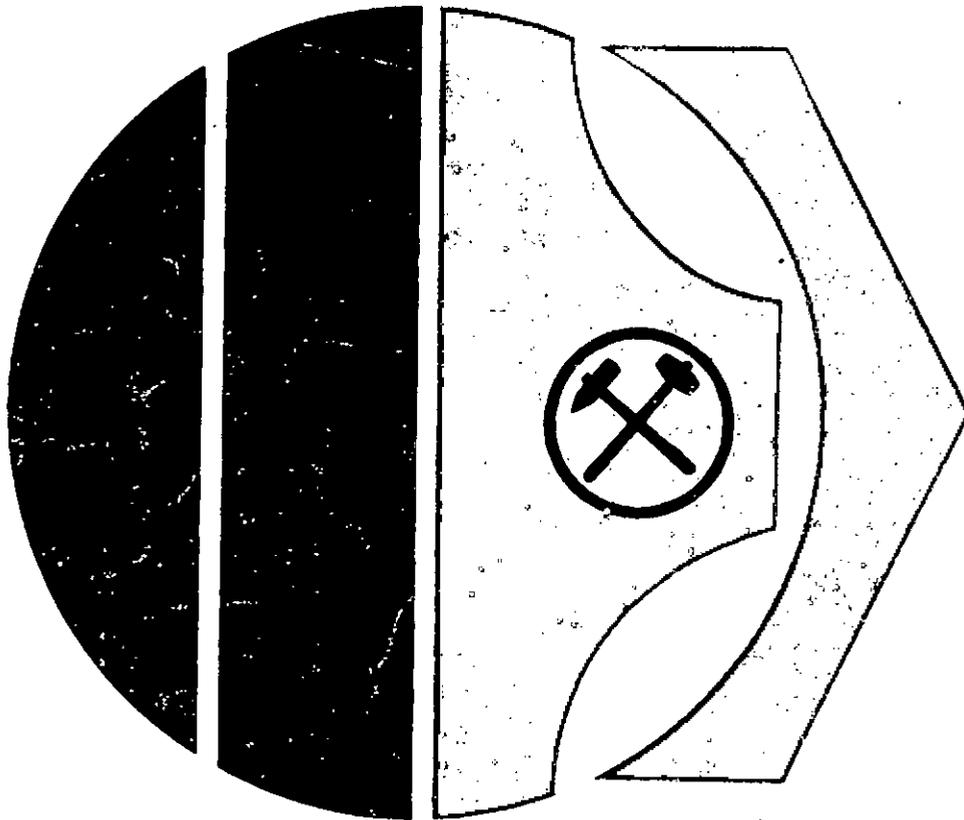
MICROFUME D Big-Bag de 500 kg

- Vrac

MICROFUME N camions citernes de 7 à 8 t

MICROFUME D camions citernes de 15 à 10 t

(ENALSO AN(DANVUITEE) E STRATION



ENTREPRISE
NATIONALE DES
PRODUITS MINIERS
NON-FERREUX ET DES
SUBSTANCES UTILES
ENOF

31, Rue Mohamed Hattab – Belfort / El-Harrach – Alger
Téléphone 76.62.42/46 – Téléc 64-161 & 64.220

KIESELGÜHR (DIATOMEES) DE FILTRATION

1. PRODUCTION : - mine de Sig

2. CARACTERISTIQUES DU PRODUIT :

Composition chimique :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO	H ₂ O	CO ₂	PAF
77,4	2,69	1,19	1,94	—	7,85	0,04	0,54	0,42

Caractéristiques physico-mécaniques :

- couleur blanche
- densité chatelier : 0,16-0,17 g/cm³
- filtration : 1700-1800cc en 10 mn
- PH : 7-9
- granulométrie (64 microns) : 95%

3. UTILISATION :

- filtration produits alimentaires (sucre, bières etc...) et pharmaceutiques;
- fabrication produits d'entretien et cosmétiques.

4. PORT EMBARQUEMENT :

- Oran
- Mostaganem.

avis technique n°3/94-4

avis technique adjuvant pour béton, mortiers et coulis

Adjuvant

Médaretard RPF

Titulaire : Granitex - Nouveaux - Produits
BP 85 Zone Industrielle
16200 Oued Smar - ALGER

Usine : Oued Smar

Commission chargée de formuler des Avis Techniques
Groupe Spécialisé N°3
"Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis"

CNERIB

Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment
Cité Nouvelle El-Mokrani Soudania - W.TIPAZA
Tél. : (02) 37.00.78/79 Tlx. : 65.494 CGS Fax : (02) 37.04.31

**DOSSIER TECHNIQUE ETABLI
PAR LE FABRICANT**

FABRICANT : GRANITEX NOUVEAUX PRODUITS / SPA
Zone Industrielle BP 85 (16200)
Oued.Smar.

DENOMINATION COMMERCIALE DU PRODUIT : MEDARETARD RPF

A - Destination du produit

- a - Fonction principale :** Retardateur de prise
- b - Fonction secondaire :** Fluidifiant - Plastifiant
- c - Effet secondaire :** Augmente les résistances mécaniques

B - Description du produit

1 - Caractéristiques intrinsèques du produit

- 1.1 - Le Médaretard RPF est un adjuvant liquide
- 1.2 - Masse volumique : 1,12 g/cm³
- 1.3 - Couleur : Marron (tend vers brunâtre)
- 1.4 - Teneur en Chlore < 1 g/litre
- 1.5 - PH : 5,3 ± 0,2

2 - Emploi du produit

2.1 - Le produit est utilisable avec :

- CPA à forte teneur en 3 CAO. Al2O3 que l'on écrit C3A (comprise entre 8 et 10 %).
- CPA à faible teneur en 3 CaO Al2O3 (inférieur à 4 %)

2.2 - Le Médaretard RPF doit être introduit dans la 2ème fraction d'eau de gâchage.

2.3 - Influence du produit sur les qualités des mortiers et bétons

2.3.1 - Sur le béton frais

- Réduction d'eau
- Maniabilité
- Entraînement d'air
- Durée de prise
- Ségrégation
- Pompabilité

2.3.2 - Sur béton après prise

- Accélération de durcissement
- Résistance à la compression
 - * à court terme
 - * à long terme
- Résistance au cycle gel et dégel
- Retrait
- Capillarité

	Amélioration	Diminution	Sans effet
- Réduction d'eau	x		
- Maniabilité	x		
- Entraînement d'air			x
- Durée de prise	x		
- Ségrégation	x		
- Pompabilité			
- Accélération de durcissement	x		
- Résistance à la compression	x		
* à court terme	x		
* à long terme	x		
- Résistance au cycle gel et dégel	x		
- Retrait		x	
- Capillarité		x	

2.4 - Les effets du produit varient si on s'écarte des dosages recommandés et si le mode d'emploi n'est pas suivi à la lettre.

2.5 - Médaretard RPF peut être utilisé pour les bétons plastiques, et mous.

2.6 - Dose d'emploi du produit : 1,2 %

2.7 - Plage d'efficacité : 0,5 à 1,5 % (limite inférieure et supérieure à ne pas dépasser).

2.8 - Médaretard RPF est compatible avec les matériaux rentrant normalement dans la composition des bétons.

2.9 - Médaretard RPF ne présente pas de risques pour le personnel ayant à le manipuler.

2.10 - Médaretard RPF ne craint pas le contact des matières contenues dans l'eau, dans le sol ou dans d'autres matériaux de construction (enduits, plâtre, peintures, papiers peints, colles ou autres revêtements traditionnels des bétons).

PLASTIMENT HP

Plastifiant hydrofuge à hautes performances.

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.

Indications normalisées
Temps de fin de prise selon NF P 18-356

	CPA 55 HTS Le Teil		CPA SPAM Gargenville	
	20 °C	5 °C	20 °C	5 °C
Témoin	7 h 45	17 h 00	6 h 30	17 h 00
PLASTIMENT HP 0,34 %	9 h 15	17 h 30	8 h 00	16 h 30
PLASTIMENT HP 0,46 %	10 h 30	22 h 00	9 h 00	20 h 00

"Le produit est assuré auprès de la Société Mutuelle d'Assurance du Bâtiment et des T.P. (Contrat n° 004 966 M 752) au titre de la responsabilité professionnelle fabricant."

Sika O.M.
 38, rue Mohamed Douba
 Hussein Dey, Alger
 Tél. : 77.87.00/77.82.07
 Télex : 53496 SIKOM

Les renseignements fournis par la présente notice sont donnés à titre indicatif. Ils sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Ils n'entraînent aucune dérogation à nos conditions générales de vente. Ils ne peuvent en aucun cas impliquer une garantie de notre part, ni engager notre responsabilité quant à l'utilisation de nos produits.

ADJUVANTS DU BÉTON

PLASTIMENT FLUIDE

Fluidifiant et plastifiant pour béton

Présentation

PLASTIMENT FLUIDE, produit de synthèse, est un fluidifiant et plastifiant réducteur d'eau qui améliore la mise en place du béton et augmente ses résistances mécaniques à long terme.

Caractères généraux

Liquide brun, de densité 1,14 environ, ne contenant pas de chlorure.

Par son action physico-chimique, le PLASTIMENT FLUIDE permet :

● Sur béton frais :

- D'augmenter considérablement la fluidité du béton donc de faciliter sa mise en place en diminuant les temps unitaires.
- D'améliorer la pompabilité du béton.

● Sur béton durci :

- D'augmenter les résistances mécaniques.
- D'accroître la compacité.
- D'augmenter l'imperméabilité.

● En préfabrication étuvée :

- D'économiser l'énergie (chauffage, vibration, matériel).
- D'améliorer la rotation des coffrages.

PLASTIMENT FLUIDE est compatible avec tous les ciments, à l'exception des liants alumineux.

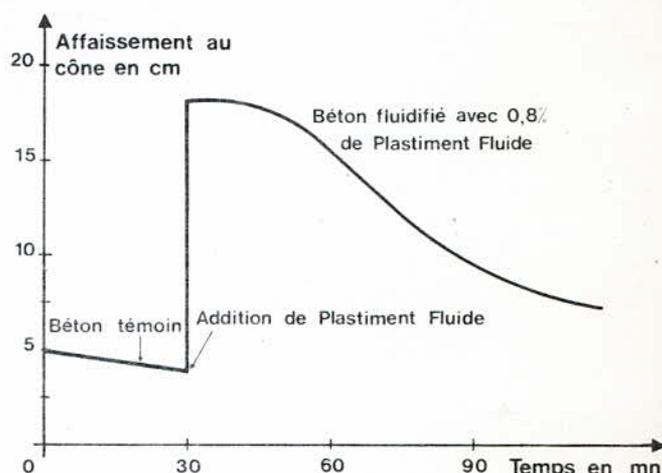
Domaines d'application

PLASTIMENT FLUIDE s'utilise dans deux domaines privilégiés :

1. Amélioration de la maniabilité

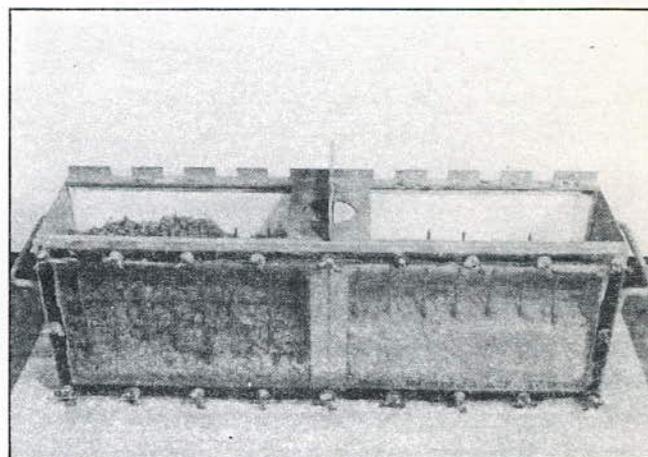
(sans réduction d'eau, au dosage de 0,5 à 1,25 % du poids de ciment).

PLASTIMENT FLUIDE a la propriété de transformer un béton ferme ou plastique (cône 3 à 7 cm) en un béton mou ou très mou (slump 15 à 20 cm), tout en conservant ses résistances.



Courbe : Evolution de la plasticité

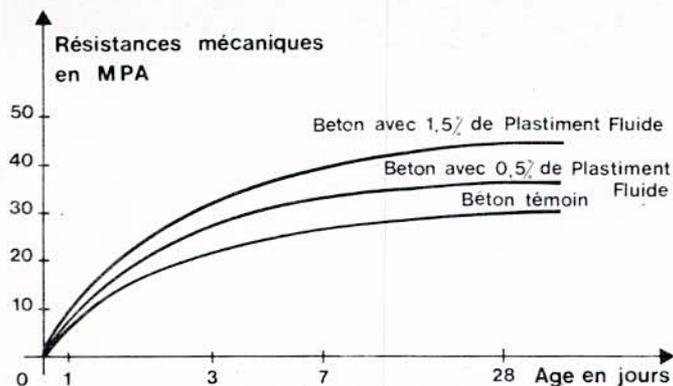
Le béton se met en place très facilement avec une très légère vibration. Un piquage soigné est nécessaire si l'on ne vibre pas.



PLASTIMENT FLUIDE est particulièrement recommandé pour les bétons très ferrillés :

- En bâtiment : Planchers, poutres, poteaux, panneaux.
- En ouvrages d'art : Tabliers de ponts, pieux, voiles minces en réservoirs...

2. Amélioration des résistances et de la maniabilité (avec réduction d'eau de 5 à 10 % au dosage de 0,75 à 1,5 % du poids de ciment).

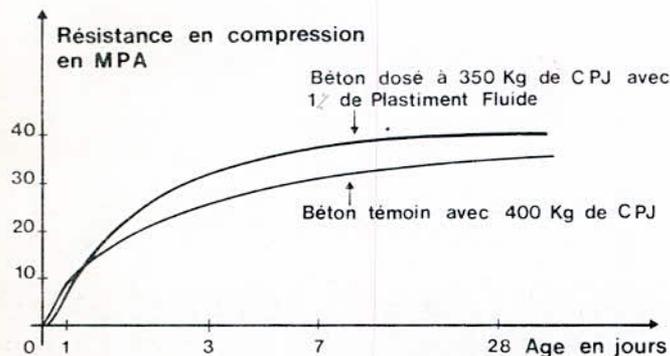


Courbe : Amélioration des résistances mécaniques d'un béton dosé à 350 kg de CPJ (cône 11 cm) par addition de PLASTIMENT FLUIDE

PLASTIMENT FLUIDE permet également d'améliorer la mise en place des bétons en augmentant en même temps leurs résistances (15 à 40 %) par l'association de ses deux effets.

PLASTIMENT FLUIDE est utilisé dans ce cas pour :

- Les bétons armés de toutes performances.
- Les bétons préfabriqués (étuvés ou non).



Courbe : Amélioration des résistances d'un béton même avec réduction de ciment.

Dosage

PLASTIMENT FLUIDE s'emploie à raison de 0,5 à 1,5 % du poids du ciment suivant son domaine d'application, la catégorie de ciment utilisé et les conditions climatiques sur chantier.

Mode d'emploi

1. Amélioration de la maniabilité.

PLASTIMENT FLUIDE présente le maximum d'efficacité lorsqu'il est introduit dans le béton déjà mouillé par l'eau de gâchage.

Nous préconisons donc les emplois suivants :

— Chantiers et préfabrications

PLASTIMENT FLUIDE sera ajouté au béton au début du dernier tiers du temps de malaxage après la fin de l'introduction de l'eau de gâchage.

— Béton prêt à l'emploi

• Introduction à la centrale

Dès que le dernier mètre cube sera déversé dans le camion, arrêter la rotation de la toupie et introduire le PLASTIMENT FLUIDE au dosage voulu, directement sur le béton.

Le transport du béton se fera sans rotation de la toupie.

Dès l'arrivée sur chantier, la toupie sera mise en route à grande vitesse pendant quelques minutes avant déversement dans les coffrages.

• Introduction sur le chantier

PLASTIMENT FLUIDE est ajouté au béton dans le camion malaxeur.

Malaxer à grande vitesse pendant quelques minutes.

2. Amélioration des résistances et de la maniabilité.

Même mode d'emploi mais en réduisant la quantité d'eau de gâchage de 5 à 10 %.

Conditionnement - Stockage Emballage

Fût métal ou plastique de 250 kg, container et vrac.

Limite d'utilisation : 5 ans.

Le produit peut geler à basse température (à partir de -2°C), mais une fois dégelé, il retrouve ses qualités d'origine.

Si la température de stockage est élevée, éviter toute évaporation en vérifiant la fermeture hermétique des fûts.

Précautions

Manipulation non dangereuse.

En cas de contact avec la peau, un simple lavage à l'eau suffit.

Sika s.a.

Siège social

101, rue de Tolbiac

75654-Paris cedex 13

Tél. : (1) 583.44.11 + Telex Sika 200 530 F

ANNEXE ETALONAGE

LECTURE A LA PRESSE (KN)	LECTURE (KN) CAPTEUR DE FORCE
40	67
50	75
60	84
70	91

ANNEXES PHOTOS

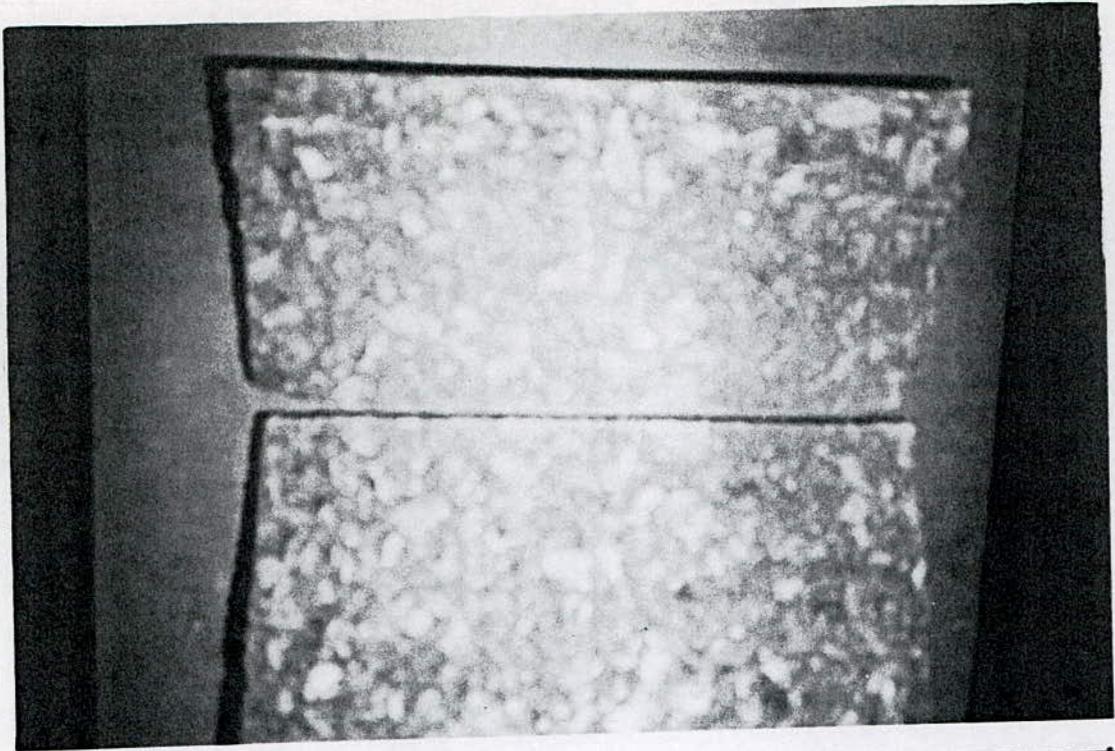


photo 1

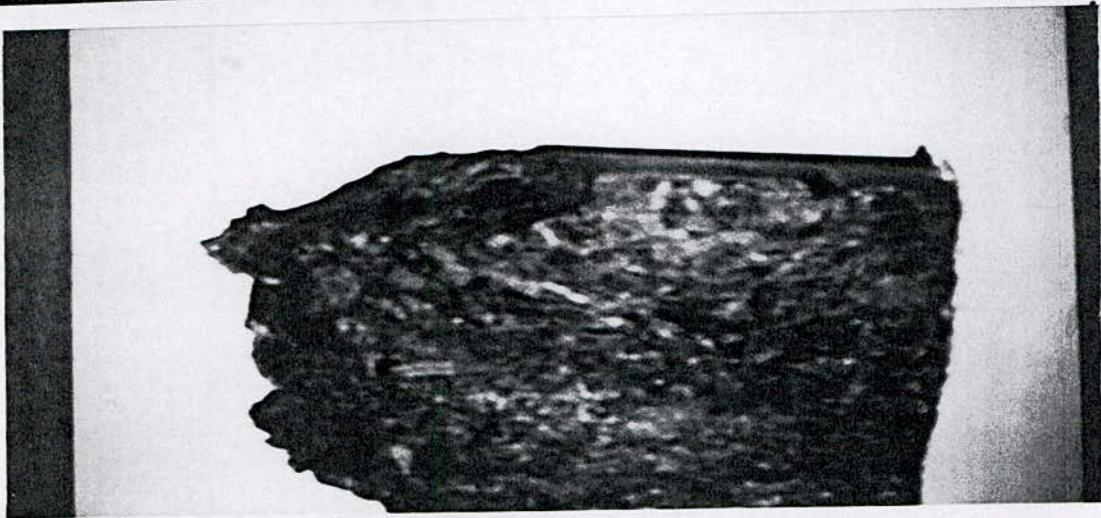


photo 2

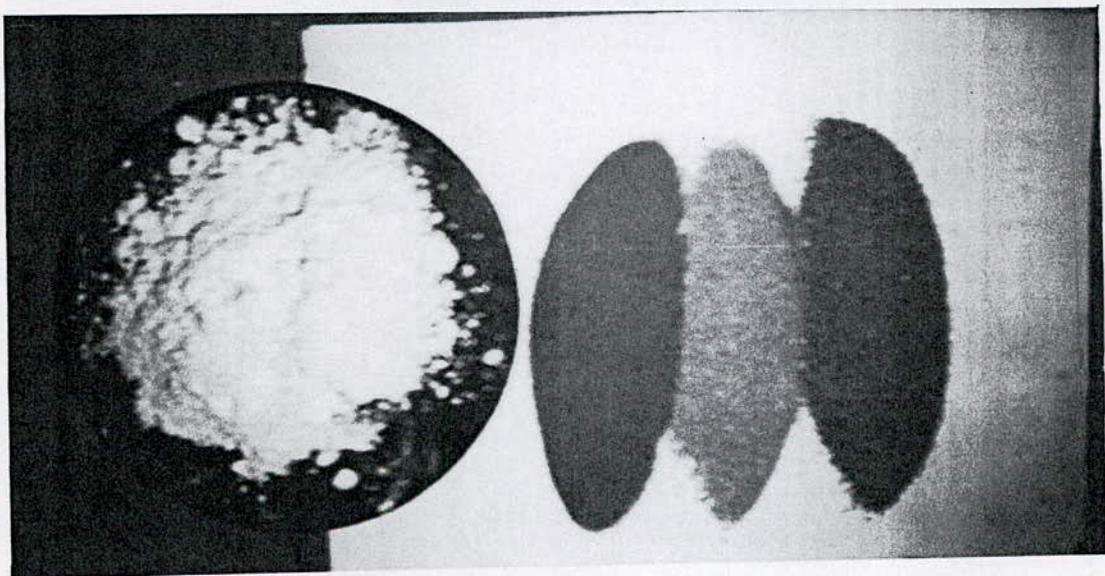


photo 3

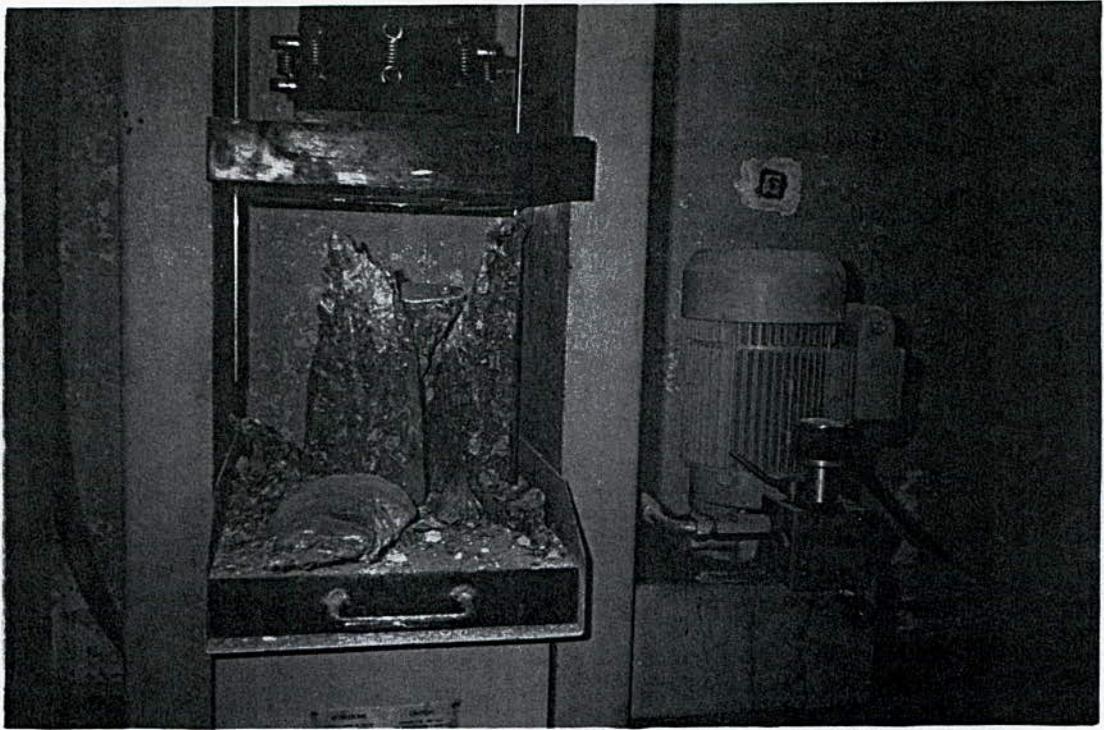


photo 4



photo 5



photo 6



photo 7



photo 8

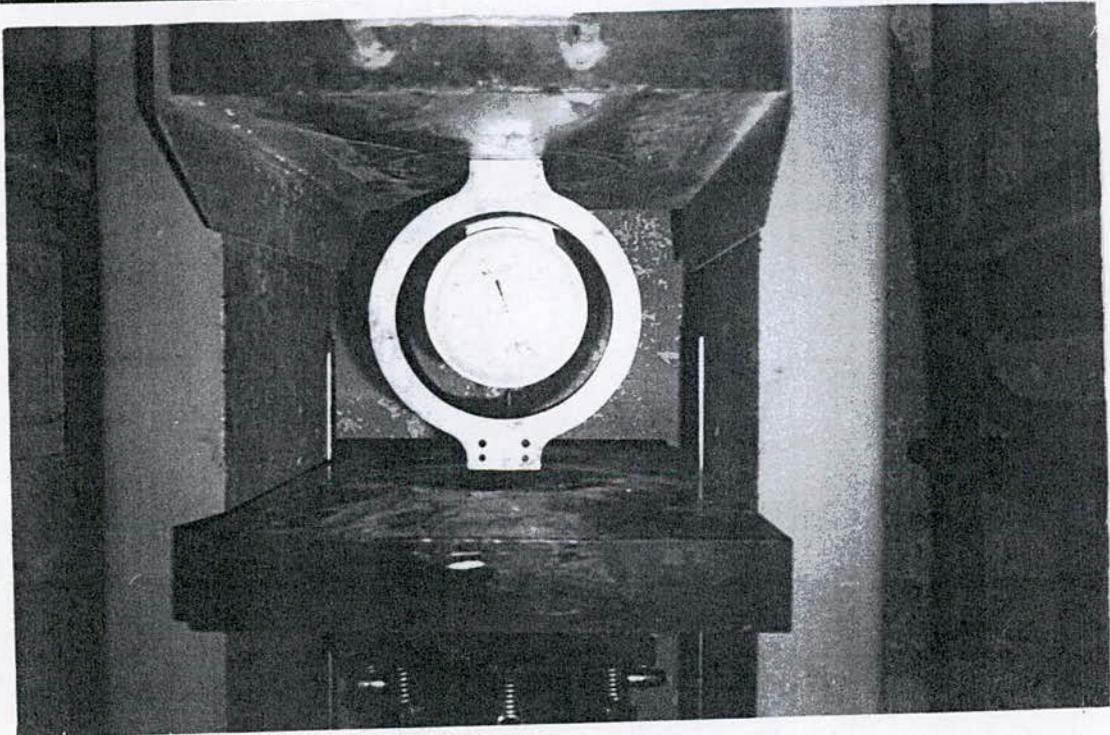


photo 9

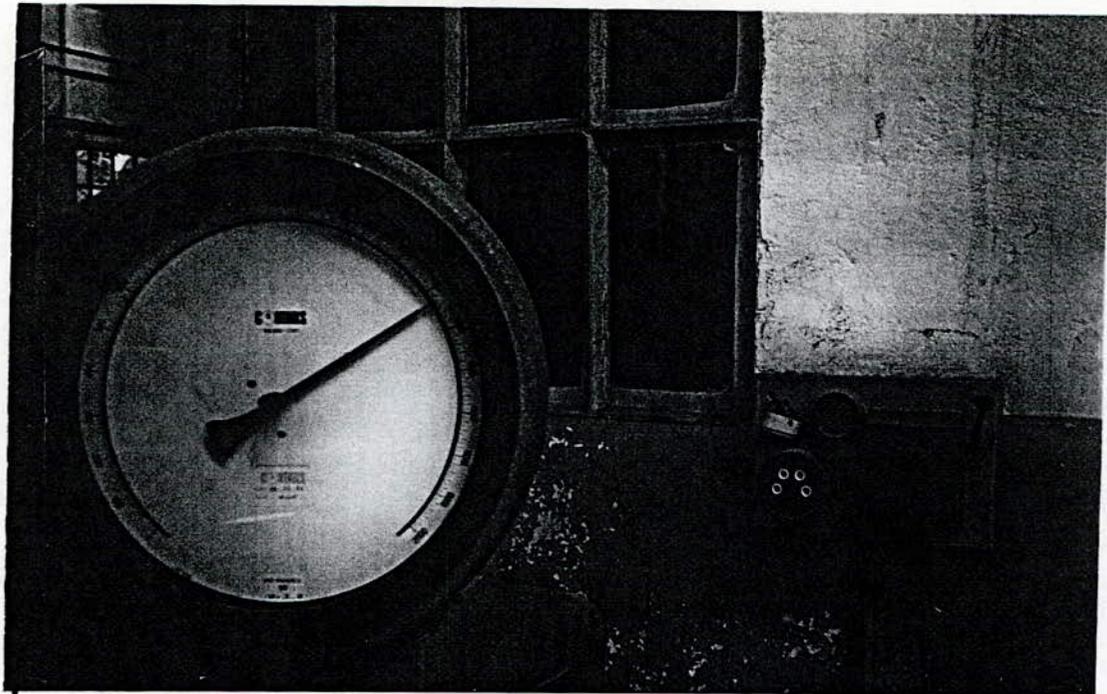


photo 10



photo 11

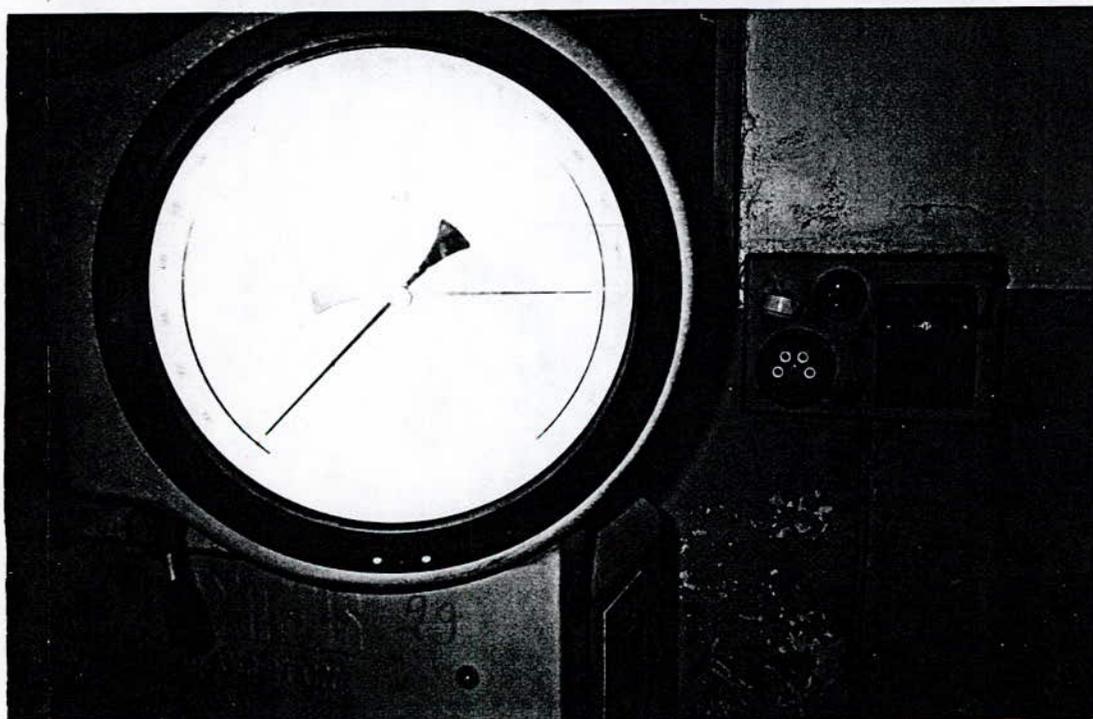


photo 12

BIBLIOGRAPHIE

- [1] " Le béton à haute performance du matériau à l'ouvrage"
Presses de L'ENPC
- [2] " Lois de compositions des bétons à hautes performances"
YAYA DIATA INSA de Toulouse.
- [3] " Formulation des bétons à hautes performances par la méthode des coulis "
F. DE LARRARD, C. PUCH
- [4] " Construction en béton à hautes performances"
ENSAIS - Mai 1994.
- [5] " Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des BHP"
A. M. PAILLERE, J.S SERRANO
- [6] " Particules Ultrafines pour l'élaboration des bétons à très hautes performances "
F. DE LARRARD , Annales de ITBTP
- [7] " Les bétons à hautes performances, expérience Nord Américaine et Française "
P. C AITCIN, J. M. ALBINGER
Annales de ITBTP
- [8] " Les bétons à hautes et très hautes performances Aujourd'hui"
Mémoire d'ingénieur Rémi Viscaye 1994
Conservation nationale des arts et métiers
- [9] " Le béton à hautes résistances au U.S.A"
J.M. ALBINGER
- [10] " Méthode expérimentale de composition"
Extrait de bulletin de liaison de laboratoire des ponts et chaussées
- [11] " Nouveau guide de béton"
Dreux et Gorisse
- [12] " Les adjuvants du béton "
S. SITAYEB Laboratoire de béton de COSIDER

- [13] " Les essais sur les bétons à très hautes performances "
P.C. AITCIN
- [14] " Résultats récents concernant l'essai de compression du béton"
J.M. TORRENTI, C. BOULAY
- [15] " BTHP du laboratoire au chantier "
- [16] " Theory of slump loss as related to the use of chemical admixtures"
L. M. MEYER W.F. PERECHIO
- [17] " Retardation effect of super plasticized on different cement fraction"
P. C. AITCIN S. L.SARKAR M. REGOURD
- [18] "Retrait et fluage de bétons à très hautes performances influence de l'âge au chargement"
F. de LARRARD, P.ACKER, P. RICHARD.
- [19] " Contribution à l'étude de l'endommagement de la liaison armature-béton de haute performance"
M.LORRAIN, H. KHELAFI
- [20] " Béton à très hautes performances du laboratoire au chantier"
Bulletin de liaison de L.P.C, Mai-juin 1987.
- [21] " Propriétés of fresh concrete at early âges" , State of the art, Report RILEM , Matériaux et construction, N°84 Vol 14.
- [22] " Déformations libres des BHP", les BHP: caractérisation, durabilité et applications, presse de l'ENPC, F. De LARRARD, P. ACKER.
- [23] " Développement des BHP en Amérique du Nord"
P. C. AITCIN, presse de l'ENPC Janvier 1992.
- [24] " Les bétons à très haute résistance" , Bulletin de liaison de l'ENPC Juillet-Aout 1989, P.C. AITCIN.
- [25] " Propriétés constructives des BTHP de la micro à la macro structure"
In bétons performances: caractéristiques, durabilité et application, presse de l'ENPC 1992. F. DE LARRAR, Y. MALLIER.
- [26] " Les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis"
Annexe de CIMBETON.