

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène
Faculté de Génie Civil et Génie Mécanique
Département de Génie Civil

Thèse

Présentée par : Melle Karima ARROUDJ
Ingénieur d'état en Génie Civil de l'U.S.T.H.B
En vue de l'obtention du diplôme de Magister
Option : CONSTRUCTION

Thème

Influence des Ajouts sur
la Prise et le
Durcissement des Bétons

Soutenue le :14/11/2001

Devant le jury composé de :

Mr A. BALI : Professeur de l'E.N.P.....Président
Mr. M.N. OUDJIT : Chargé de cours de l'U.S.T.H.B.....Dteur .de thèse
Mr. M.T. ABADLIA : Professeur de l'université de BOUMERDES.....Examineur
Mr. M.CHEMROUK : Maître de conférences de l'U.S.T.H.B.....Examineur
Mr. N. LARADI : Maître de conférences de l'U.S.T.H.B.....Examineur
Mr. S. HADDADI : Chargé de cours de l'U.S.T.H.B.....Examineur

Liste des figures

Première partie: Synthèse Bibliographique

Fig 1-1: Plage des clinkers dans le diagramme de Rankine.....	6
Fig 1-2: Variation de résistance d'un béton en fonction de la finesse du ciment.....	7
Fig 1-3: Action du plastifiant sur le ciment basique ,portland ..ect « Mécanisme de la défloculation et de la séparation des colonies de grains fins ».....	11
Fig 1-4: Action des plastifiants sur les ciments « Mécanisme de la réduction d'eau sans diminution de la maniabilité ».....	11
Fig 1-5: La coagulation de la fumée de silice en présence de ciment et sa dispersion par un fluidifiant.....	15
Fig 1-6: Effet du rapport E/C sur la porosité initiale.....	18
Fig 1-7: Effet du rapport E/C et le degré d'hydratation sur la porosité initiale de la pâte de ciment.....	19
Fig 1-8: Effet des granulats sur la résistance du béton	19
Fig 1-9: Représentation schématique de la prise et du durcissement du ciment portland d'après Taylor	22
Fig 1-10 : Hydrolyse initiale de C_3S	26
Fig 1-11 : Germination et croissance des cristaux à la fin de la période d'induction	26
Fig 1-12: Formation de produit CSH interne	27
Fig 1-13.a : Grain de C_3A entouré d'une coagule épaisse d'Ettringite.....	30
Fig 1-13.b : Courbes calorimétriques de $C_3A+12.5\%$ de gypse (avec et sans $CaCO_3$) obtenues au calorimètre à conduction	30
Fig 1-14: Vitesse d'hydratation des principaux constituants du ciment portland	32
Fig 1-15: Accroissement de la résistance des minéraux du ciment portland	32
Fig 1-16: Courbe calorimétrique d'un C_3S obtenue au calorimètre à conduction	33
Fig 1-17: Représentation schématique d'un mélange CSF-CPA à partir du modèle de H.H.BACHE	36
Fig 1-18: Représentation schématique du CSF avec et sans carbone	36
Fig 1-19: Variation des constituants anhydres et hydratés des liants étudiés en fonction du temps	37
Fig 1-20: L'effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment	38
Fig 1-21: L'effet de la fumée de silice sur la chaleur d'hydratation du ciment	38
Fig 1-22: Quantité de chaleur émise dans un essai isotherme à $20^{\circ}C$ en fonction du rapport E/C	39
Fig 1-23 Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction du rapport E/C.....	40
Fig 1-24: Influence de la nature de ciment et des adjuvants sur la consistance normalisée.....	41
Fig 1-25: Effet plastifiant de la fumée de silice.....	41
Fig 1-26: Essai au cône d'écoulement.....	42

Fig 1-27: Moule tronconique de l'appareil Vicat.....	43
Fig 1-28 : Evolution de la réaction d'hydratation au cours du temps et variation concomitante de l'élévation de température et du taux de cisaillement interne de la pâte ...	44
Fig 1-29: MEB « microstructure de deux types de béton (béton ordinaire et BHP) sur un même chantier (pont de Joigny) ».....	46
Fig 1-30: MEB .Pâte de ciment portland à 28 jours.....	47
Fig 1-31: MEB .Pâte de DSP* avec fumée de silice à 28 jours.....	47
Fig 1-32: Images obtenues au microscope électronique à balayage (grossissement 200) sur la section polie d'échantillons de bétons âgés de 90 jours	48
Fig 1-33: Retrait des bétons à hautes performances	52
Fig 1-34: Fluage des bétons à hautes performances	53
Fig 1-35: Schéma de l'essai d'arrachement direct	54
Fig 1-36 Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de la force F	54
Fig 1-37 Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de F/f_t	55

Deuxième partie : Etude Expérimentale

Fig 2-1 : Démonstration de la loi de Bragg.....	61
Fig 2-2 : Schéma de principe d'un diffractomètre X.....	62
Fig 2-3 : Diffractogrammes de rayons X des liants utilisés.....	64
Fig 2-4 : Courbe granulométrique des différentes classes de granulats.....	66
Fig 2-5 : Essai d'équivalent de sable.	66
Fig 2-6 : Schéma statique de l'essai de traction par flexion.....	72
Fig 2-7 : Mesure de l'absorption capillaire.....	73
Fig 2-8: Mode de mesure de la capacité d'absorption d'eau.....	74
Fig 2-9 : Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C.....	75
Fig 2-10 : Variation du temps de fin de prise en fonction du temps du début de prise.....	76
Fig 2-11 : Evolution du cisaillement de la pâte en fonction du temps pour (0% d'ajout).....	77
Fig 2-12 : Evolution du cisaillement de différentes pâtes en fonction du temps.....	78
Fig 2-13: Diffractogrammes aux Rayons X des différentes pâtes.....	80
Fig 2-14 : Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge des bétons sans ajouts.....	85
Fig 2-15 : Effet du % de sable de dune sur la résistance à la compression des bétons.....	86
Fig 2-16 : Effet de la nature de l'ajout sur la résistance à la compression.....	87
Fig 2-17 : Evolution de la résistance à la flexion des bétons sans ajouts.....	88
Fig 2-18: Evolution de la résistance à la flexion des bétons avec ajouts	88
Fig 2-19 : Effet de la nature de l'ajout sur la résistance à la flexion.....	89
Fig 2-20 : Courbes Contraintes- Déformations à 28 jours.....	90
Fig 2-21 : Effet du rapport E/C sur le retrait des bétons sans ajouts.....	92
Fig 2-22 : Effet du sable de dune et de CSF sur le retrait des bétons.....	92

Fig 2-23 : Evolution de l'absorption massique en fonction du temps et du rapport E/C...	94
Fig 2-24 : Effet du pourcentage du sable de dune sur Am (E/C=0.27).....	95
Fig 2-25 : Effet du pourcentage du sable de dune sur Am (E/C=03).....	95

Liste des tableaux

Première partie : Synthèse Bibliographique

Tableau 1-1 : Classification des granulats.....	8
Tableau 1-2 : Hydratation des différents composants du ciment portland.	33
Tableau 1-3 : Evolution des caractéristiques mécaniques du béton THP.....	49
Tableau 1-4 : Valeurs numériques comparatives de retraits mesurées (en $\mu\text{m/m}$) sur un béton témoin et un BTHP	51

Deuxième partie : Etude Expérimentale

Tableau 2-1 : Composition chimique du ciment de RAIS HAMIDOU.....	60
Tableau 2-2 : Composition chimique des ajouts utilisés.....	60
Tableau 2-3 : Composition minéralogique du ciment utilisé.....	62
Tableau 2-4 : Masses volumiques des granulats.....	67
Tableau 2-5 : Porosité des granulats.....	68
Tableau 2-6 : Tableau récapitulatif.....	68
Tableau 2-7 : Récapitulatif du dosage des matériaux.....	69
Tableau 2-8 : Classes de consistance mesurée au cône d'Abrams.....	71
Tableau 2-9 : Variation du temps de prise en fonction du rapport E/C.....	76
Tableau 2-10 : Influence du sable de dune sur le temps de prise.....	77
Tableau 2-11 : Différentes compositions étudiées.....	82
Tableau 2-12 : Affaissement et masse volumique des différentes compositions testées.....	82
Tableau 2-13 : Masse volumique du béton durci pour différentes compositions testées.....	84
Tableau 2-14 : Résistances à la compression des bétons sans ajouts.....	84
Tableau 2-15 : Résistances à la compression des bétons avec ajouts.....	85
Tableau 2-16 : Résistance à la flexion des différentes variantes de bétons.....	88
Tableau 2-17 : Modules d'élasticité des bétons avec et sans ajouts.....	89
Tableau 2-18 : Valeurs de l'absorption capillaire des différentes composition.....	93

INTRODUCTION GENERALE

Le matériau béton depuis son existence demeure l'élément clé de la construction et présente toujours une partie intégrante dans la construction de l'ossature de l'ouvrage.

Le gâchage des bétons avec un excès d'eau assure une bonne maniabilité, mais l'évaporation rapide de l'eau de gâchage ; aux jeunes âges ; provoque une diminution des performances.

C'est pour cela que les bétons utilisant des quantités d'eau de gâchage plus faibles sont très recherchés.

Plusieurs recherches ont montré qu'il est possible de réaliser des bétons de hautes résistances avec des quantités d'eau plus faibles que celles des bétons ordinaires ; en introduisant un fluidifiant qui assure une bonne ouvrabilité. Ces résultats ont poussé les chercheurs à améliorer encore plus les performances des bétons à savoir la compacité, les résistances mécaniques et chimiques ainsi que la durabilité. Mais cette amélioration n'est possible que par l'incorporation des ajouts ultrafins qui densifient la pâte du ciment.

Ces ajouts sont en général des sous produits tels que les laitiers des hauts fourneaux et les cendres volantes. Au début des années 70 un nouveau sous produit commence à être disponible sur le marché : c'est la *fumée de silice condensée* (CSF) qui joue un double rôle :

- ◆ Un rôle pouzzolanique qui consiste à fixer la chaux libérée par le ciment lors de l'hydratation pour former des phases de CSH qui augmentent les résistances mécaniques et la compacité.
- ◆ Et un rôle de remplissage puisqu'il s'insère entre les grains de ciment, vu sa grande finesse (de l'ordre de $20\text{m}^2/\text{g}$), et encore ; en présence d'un fluidifiant ; ce matériau provoque une fluidification supplémentaire ce qui permet de diminuer le rapport E/C (jusqu'à 0.25).

Actuellement ; en Amérique du Nord il est possible de réaliser un *béton à hautes performances* prêt à l'emploi, dont la résistance à la compression dépasse 150 MPa, et ceci en utilisant des matériaux de bonne qualité (granulat résistant, ciment de haute classe ainsi un couple ciment/fluidifiant aussi compatible que possible).

En Algérie, la non-disponibilité des matériaux de très haute classe ainsi que la fumée de silice, a conduit nos chercheurs à améliorer la qualité du béton algérien en utilisant les matériaux locaux.

De nombreuses recherches ont montré qu'il est possible de confectionner un béton algérien économique dont la résistance est voisine de 60 MPa, et ceci en introduisant des ajouts locaux (tels que les laitiers d'EL HAJAR).

Notre recherche consiste à valoriser les matériaux locaux utilisés dans la construction, et étudier l'effet de l'incorporation d'un ajout siliceux sur les propriétés des bétons ; et pour cette raison nous avons utilisé un ciment CPJ 45 fabriqué par la cimenterie de RAIS-HAMIDOU, un fluidifiant SF (produit de Granitex) et comme ajouts «le sable de dune » de BOUSAADA finement broyé ainsi qu'une petite quantité de CSF à titre comparatif.

Afin de réaliser ce travail nous avons adopté le plan suivant :

- ◆ Première partie : Une étude bibliographique dont nous avons exposé des généralités sur les composants des bétons, une description du phénomène d'hydratation des ciments ainsi que l'élaboration et les caractéristiques des BHP.
- ◆ Deuxième partie : Une étude expérimentale dont nous avons exposé les caractéristiques des bétons physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés et les méthodes d'essais réalisés sur les pâtes de ciment et les bétons frais et durcis, ainsi une présentation et interprétation de ces essais.
- ◆ Et enfin une conclusion générale et des recommandations.

Généralités

I- 1-1-Introduction :

Les propriétés et les qualités qui font du béton un matériau irremplaçable sont aujourd'hui l'objet de progrès importants.

Des bétons de 80 à 100 MPa avaient été obtenus au cours des années 1940 en particulier par FREYSSINET et F.DUMAS. La fabrication de ces bétons reposait sur l'emploi des technologies et méthodes de fabrication et de mise en œuvre difficiles à généraliser.

Ces méthodes avaient toutes pour but de maximiser la compacité du béton, c'est à dire de réduire, autant que possible, sa porosité.

Un nouveau matériau avait été inventé par les Américains et les Norvégiens dénommé « béton à hautes performances » (high strength concrete), ce matériau peut s'obtenir par deux voies :

- La première voie repose sur la défloculation des grains de ciment et ceci par l'emploi de produits organiques, elle permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle ; cette voie conduit à une réduction de la quantité d'eau nécessaire, tout en améliorant la maniabilité d'où diminution de la porosité du béton.
- La deuxième voie repose sur l'extension du spectre du mélange granulaire en utilisant des éléments ultrafins (qui sont en général des déchets d'origine naturels ou artificiels tels que : les laitiers des hauts fourneaux, les cendres volantes issues des centrales thermiques ou des roches naturelles, la fumée de silice ..etc) destinés à remplir les microvides de l'empilement de grain en améliorant ainsi la compacité du mélange tout en modifiant le comportement rhéologique des matériaux à l'état frais et la quantité d'eau peut être aussi réduite.

Ce nouveau matériau a les propriétés suivantes :

- Meilleure compacité d'où une grande imperméabilité.
- Un module d'élasticité élevé.
- Déformations différées minimales.
- Meilleure résistance aux agents agressifs et aux cycles gel/dégel.
- Meilleure durabilité et bonne adhérence avec l'acier.

I-1-2- Matériaux et composant des bétons :

I-1-2-1 Ciment :

C'est l'élément actif du mélange du béton qui a été inventé par les romains en mélangeant la chaux et les pouzzolanes . Au 18^{ème} siècle ,les cimentiers ont réussi à fabriquer un produit hydraulique par mélange de calcaire et d'argile chauffé dans un four.

Selon la norme française NFP15-301 (juin 1994): « le ciment est un liant hydraulique ; c'est à dire ;une matière inorganique finement moulue ,gâchée avec de l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui , après durcissement , conserve sa résistance ».

Selon la même norme on peut distinguer deux types de ciment portland :

- Les ciments portland artificiel (CPA) :contenant au moins 97% de clinker et le reste c'est du filler.
- Les ciments portland composé (CPJ) : contenant au moins 65% de clinker, l'ajout pouvant être constitué de laitier de hauts fourneaux, pouzzolanes, cendres volantes ou fillers (la quantité des ajouts est limitée à 35%).

Dans notre étude on a utilisé un ciment portland composé provenant de la cimenterie de RAIS –HAMIDOU d'ALGER ; dont le procédé technologique de sa fabrication peut se résumer comme suit :

- Production (extraction) du calcaire et de l'argile⁽¹⁾.
- Préparation des matières premières et des adjuvants correcteurs.
- Homogénéisation du mélange de composition donnée.
- Cuisson du mélange dans le four (1400 à 1500 °C).
- Refroidissement du clinker par des courants d'air.
- Broyage du clinker en poudre fine en présence du gypse et 15% de tuf.

Le clinker est le plus important constituant du ciment portland, constitué de quatre minéraux qui sont :

Silicate tricalcique (**Alite**) : $C_3S^{(2)}$

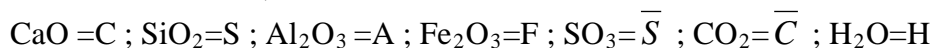
Silicate bicalcique (**Belite**) : βC_2S

Aluminate tricalcique (**Celite**) : C_3A

Alumino-ferrite tétracalcique (**Celite**) : C_4AF .

(1) : le calcaire est composé principalement de deux oxydes :CaO et CO₂ et l'argile est composée surtout de trois oxydes :SiO₂ ,Al₂O₃ et Fe₂O₃.

(2) : en chimie des ciments ,on utilise les notations suivantes :



Le deuxième constituant du ciment portland est le gypse, son rôle est de retarder la prise qui est très rapide.

La teneur en gypse (représentée par la teneur en SO_3) est déterminée en fonction des teneurs en Alcalis solubles (Na_2O , K_2O), en C_3A et de la surface spécifique (BLAINE) du clinker.

Cette teneur en gypse est donnée par les deux formules suivantes :

- La formule statique ne tenant pas compte de la finesse du clinker ; formule de LERCH :

$$(\%)SO_3 = 0.093.(\%)C_3A + 1.71.(\%)Na_2O + 0.94.(\%)K_2O + 1.23 \quad (1-1)$$

Et la formule empirique ne tenant pas compte de la teneur en alcalis; formule de JIRKO :

$$(\%)SO_3 = 6.8 \cdot 10^{(-5)}.B.(\%)C_3A \quad (1-2)$$

Avec B : surface spécifique Blaine en cm^2/g du ciment.

Dans la chimie des ciments on utilise le diagramme de Rankine pour positionner la nature du ciment en fonction des oxydes considérés . A cet effet les oxydes choisis dans le système triangulaire sont : CaO , Al_2O_3 et SiO_2 .A titre d'exemple la figure1-1 illustre la position des différents types de matériaux utilisés dans la cimenterie :

On remarque que la zone des verres est plus proche du sommet de la silice (les verres siliceux ne sont pas hydrauliques) et que la zone des ciments portlands est proche du sommet de la chaux mais la zone des laitiers est intermédiaire (la teneur en alumine est supérieure à celle des ciments portland).

Influence de la surface spécifique du ciment sur la résistance des bétons :

Le ciment intervient principalement par sa composition chimique et par sa finesse : plus la teneur en C_3S est élevé et plus le ciment est résistant (surtout aux premiers âges)[1].

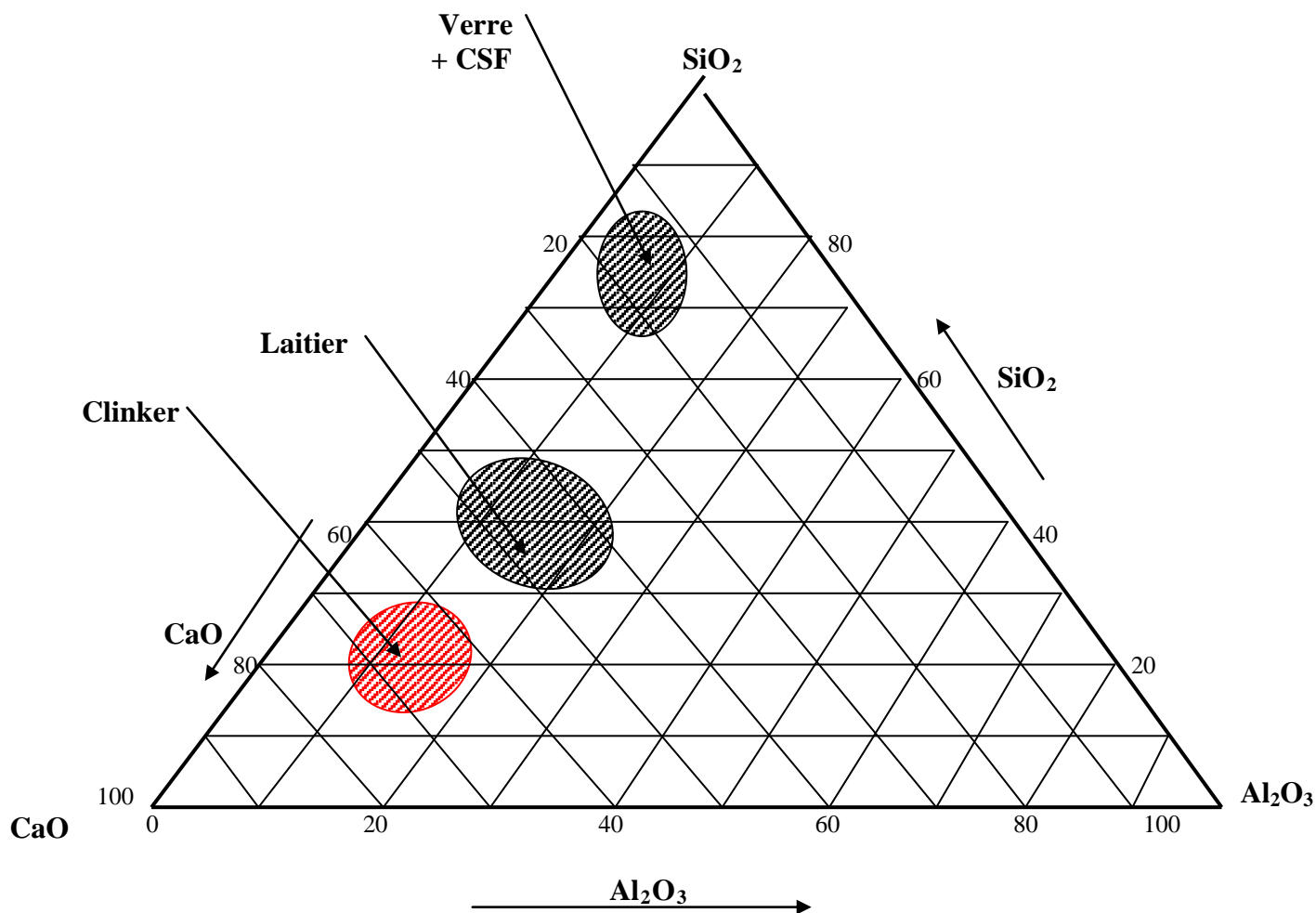


Fig 1-1 : Plage des clinkers dans le diagramme de Rankine [2].

L'influence des grains fins de ciment est considérable quant aux résistances en compression aux jeunes âges. Pratiquement ce sont les grains inférieurs à $10\mu\text{m}$ qui donnent les résistances à un ou deux jours; et ceux moins de $20\mu\text{m}$ donnent les résistances à 7 et 28 jours .

D'après la figure suivante il est remarqué que les résistances croissent linéairement en fonction de la finesse de mouture aux premiers âges mais qu'au-delà du 3^{ème} jour l'influence de la finesse devient relativement de moins en moins importante.

Selon Mme M. Regourd (1982) un CPA broyé à $5000\text{ cm}^2/\text{g}$ offre une grande résistance en compression qu'un CPA identique broyé à $3500\text{ cm}^2/\text{g}$.

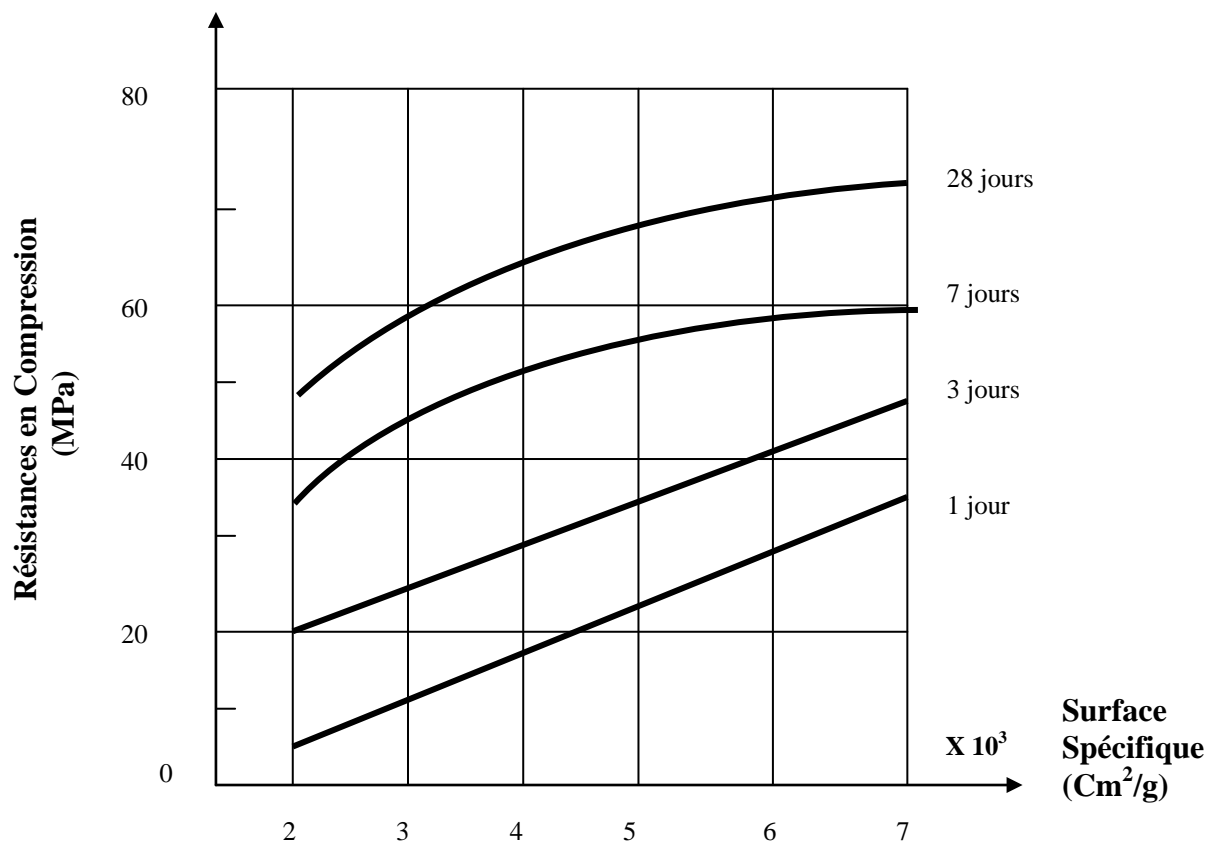


Fig 1-2 : Variation de résistance d'un béton en fonction de la finesse du ciment [3].

I-1-2-2 Granulats :

« Les granulats sont des matériaux grenus de provenance naturelle ou artificielle destinés; avec l'utilisation d'un liant; à la confection des bétons »[4].

D'après FERET (1892 -1896): les granulats sont des produits de remplissage ,mais MATHER (1975) a indiqué que :tous les granulats sont réactifs ,ils diffèrent seulement par la nature des réactions auxquelles ils participent ,par l'intensité et la vitesse de ces réactions et leurs effets, par exemple :

- L'argile crée des zones mécaniquement faibles et peut perturber le durcissement du ciment .
- Les silices amorphes et les calcaires magnésiens marneux peuvent réagir avec les alcalis du ciment provoquant l'altération du béton et des désordres graves dans la construction .

Par contre le laitier granulé et les pouzzolanes fixent la chaux libérée par le ciment lors de l'hydratation, ce qui augmente la résistance de béton, en plus de leur rôle de remplissage lorsqu'ils sont très fins.

Par ordre de grosseur croissante , on distingue les fillers ,les sables ,les gravillons ,cailloux et graves.

Et selon la norme NF p 18 -301 : les dimensions de ces classes sont données dans le tableau suivant :

les fines 0/D	$D \leq 0.08 \text{ mm}$
les sables 0/D	$D \leq 6.3\text{mm}$
les gravillons d/D	$d \geq 2 \text{ mm et } D \leq 31.5\text{mm}$
les cailloux d/D	$d \geq 20 \text{ mm et } D \leq 80 \text{ mm}$
les graves 0/D	$6.3 \text{ mm} \leq D \leq 80 \text{ mm}$

Tableau1-1 : Classification des granulats.

La détermination des valeurs d et D des classes granulaires d/D ainsi définis se fait en considérant que les granulats correspondants à ces dimensions doivent être présents en proportion suffisantes [5] .

Le granulat constituant le squelette du béton doit être le plus compact et le plus durable possible, car plus le granulat est poreux et plus sa résistance diminue ;et pour qu'il joue un rôle de remplissage les caractéristiques géométriques ,mécaniques et physiques doivent être appropriées à la destination du béton [6].

I-1-2-2-a Gros granulat :

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

➤ Influence des granulats sur la maniabilité des bétons frais :

Les principales caractéristiques du gros granulat qui influent sur la maniabilité sont : la taille, la forme et l'état de surface du granulat ; l'eau mouille la surface du granulat, sépare les particules et de cette façon agit comme un lubrifiant . Par conséquent une plus grande surface

des particules nécessite une plus grande quantité d'eau pour obtenir la maniabilité désirée ,et vice versa.

L'expérience pratique montre que c'est avec de gros granulats de 10 mm de diamètre maximum que l'on peut obtenir des bétons à très hautes résistances et maniabiles ,et ceci est lié à la compacité du squelette solide, de plus leur forme doit être sphérique.

En général ,on utilise un gros granulat de diamètre 10 à 12.5 mm pour fabriquer les bétons à haute résistance.

➤ **La résistance de l'interface pâte /granulat :**

Les caractéristiques de l'interface pâte de ciment /granulat sont liées aux caractéristiques mécaniques et physiques des composants du béton et plus ou moins aux produits des réactions chimiques qui ont lieu entre le ciment et les agrégats qui remplissent l'interface.

En pratique, les principaux facteurs à considérer dans l'étude de l'interface pâte - granulat sont le rapport E/C l'état de surface des agrégats :

- Une diminution du rapport E/C conduit à augmenter simultanément la résistance de la pâte, ainsi que la résistance de l'interface pâte – granulat.
- L'obtention d'un béton à haute résistance nécessite l'utilisation des granulats ayant une surface rugueuse. Les résultats expérimentaux montrent que la résistance d'un béton fabriqué avec des agrégats concassés cubiques est plus grande que celle du béton fabriqué avec des agrégats roulés, cela est dû au chevauchement des granulats concassés qui limite leur mouvement dans le squelette solide.
- L'orientation des hydrates notamment celle de la portlandite.

I-1-2-2-b Granulat fin :

Pour les granulats fins il est préférable d'utiliser un sable plutôt grossier ,et il n'est pas nécessaire que le sable apporte beaucoup d'élément fins au mélange .

I-1-2-3 Eau :

L'eau intervient à toutes les étapes de la vie du béton par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques.

Après le gâchage du béton, l'eau est multiforme : libre, adsorbée à la surface des constituants solides, combinées dans les hydrates du ciment et absorbée par les granulats à porosité ouverte.

Selon LE CHATELIER ; la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation complète du ciment est de l'ordre de 30% du poids de ciment; mais selon Mme Regourd (1982) les grains de ciment ne s'hydratent pas complètement « les gros grains de ciment ne s'hydratent jamais :ils jouent

le rôle du filler », c'est pour cela qu'il faut différencier le rapport E/C théorique et le rapport E/C effectif [7].

Le rapport E/C théorique c'est le rapport que l'on calcule habituellement en divisant la masse d'eau utilisée lors du malaxage par la masse totale de ciment introduit dans le mélange. Par contre le rapport E/ C effectif est le rapport entre la masse d'eau qui a effectivement servi à hydrater les grains de ciment et la masse du ciment qui s'est effectivement hydraté.

Actuellement, les bétons de chantier à très hautes résistances ont des rapports E/C théoriques de l'ordre de 0.25 [7] mais probablement des rapports effectifs plus élevés.

Influence du rapport E/C sur la résistance des bétons :

Selon FERËT (1896) la résistance en compression d'un béton s'écrit :

$$R_c = K \left(\frac{C}{E + V + C} \right)^2 \quad (1-3)$$

Avec : C : le dosage en ciment

E : le dosage en eau

V : le volume des vides

Donc plus le rapport E/C augmente et plus la résistance diminue et ceci est lié aussi à la porosité (voir § II-2).

En effet il faut viser à augmenter la résistance à la compression du béton tout en augmentant au maximum sa compacité; et ceci en introduisant seulement la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des grains de ciment.

I-1-2-4 Les adjuvants :

Augmenter la compacité en réduisant seulement la quantité d'eau peut poser un problème de maniabilité, d'où l'utilisation d'adjuvants de type fluidifiants- réducteurs d'eau qui ont pour rôle de diminuer la quantité d'eau tout en augmentant la maniabilité de la pâte fraîche.

Les fluidifiants allongent la période dormante et l'hydratation des constituants du ciment (voir annexe des adjuvants) ; ce qui permet d'utiliser une quantité d'eau nettement supérieure à celle de l'hydratation du ciment (voir figures 1-3 ;1-4).

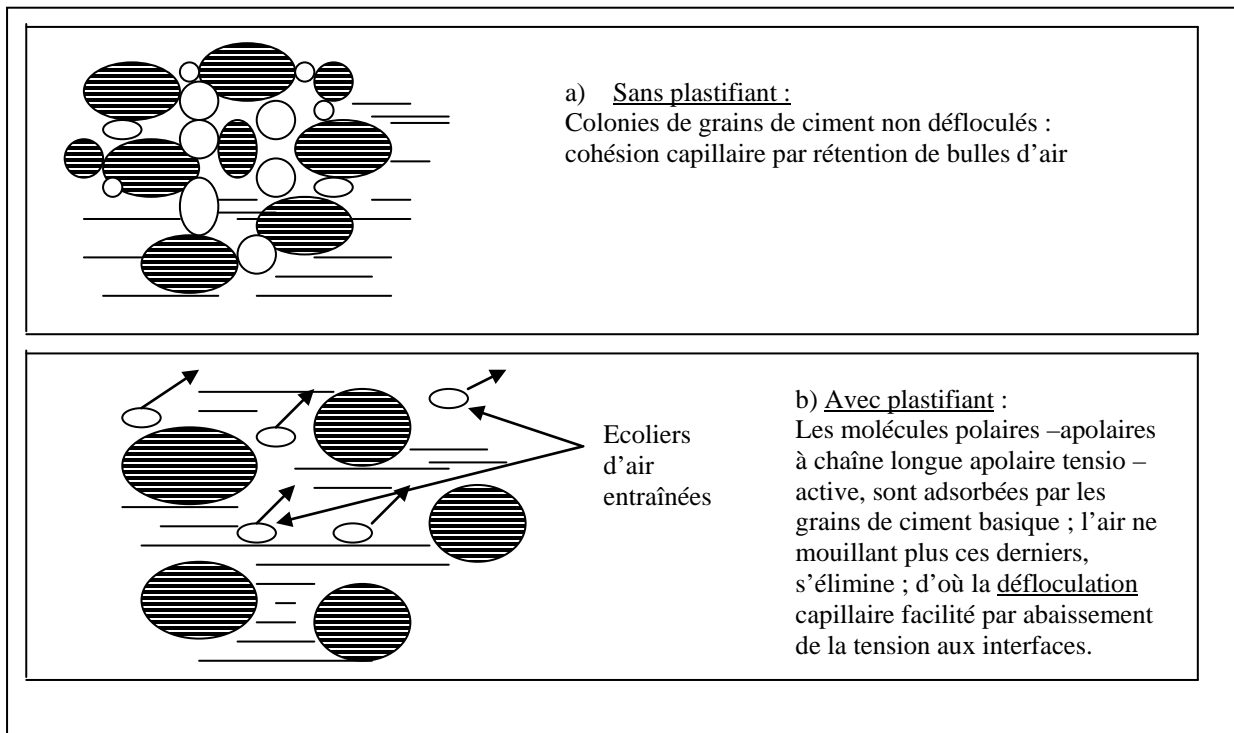


Fig 1-3 : Action du plastifiant sur le ciment basique ,portland ..etc

« Mécanisme de la défloculation et de la séparation des colonies de grains fins »

(élimination de l'air inclus dans les colonies)[4] .

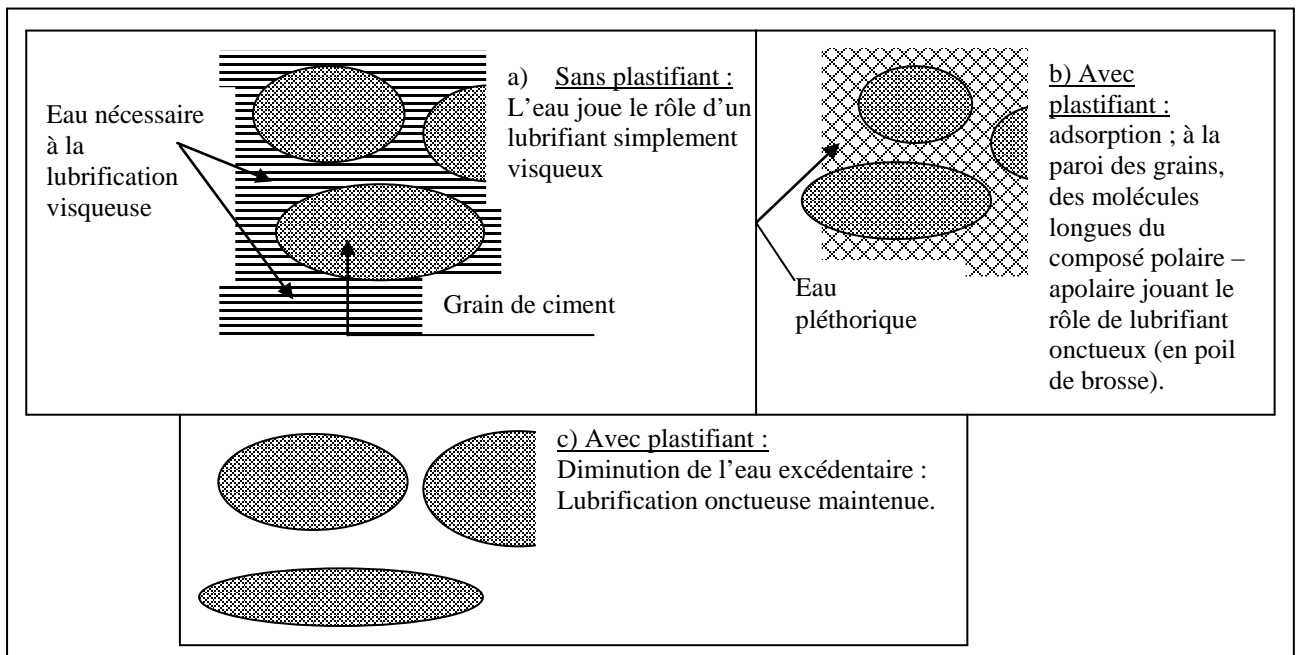


Fig 1-4 : Action des plastifiants sur les ciments « Mécanisme de la réduction d'eau sans diminution de la maniabilité »[4].

I-1-2-5 Les ajouts :

Avec l'apparition des bétons à hautes performances, des ajouts actifs sont utilisés pour améliorer les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du béton frais et durci; ces ajouts sont généralement des déchets naturels ou artificiels (roches volcaniques, tuf, laitier de haut fourneau, cendres volantes et fumée de silice) qui sont utilisés comme des fillers .

I-1-2-5-a Définition des fillers :

Les fillers sont des poudres dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns .
Le mot filler provient de l'anglais « to fill » signifiant « remplir » donc leur rôle principal est le remplissage .

Selon la norme française NF P 15-301 « les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée, en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques du ciment (telles que l'ouvrabilité ou le pouvoir de rétention d'eau).

Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, hydrauliques latentes ou pouzzolaniques: aucune exigence n'est toute fois requise à cet égard ».

Les fillers sont souvent obtenus par le broyage de roches de différentes natures : siliceuses, calcaires, silico-calcaires; mais il existe des fillers naturels qui sont suffisamment fins ne nécessitant pas le broyage tel que : Kieselguhr, bentonite ...etc., ainsi que des fillers provenant de la fabrication de certains produits industriels tel que : le laitier finement broyé .

Selon la même norme : « un filler est dit siliceux s'il contient plus de 90% de silice, et un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium » .

Les fillers sont utilisés principalement comme :

- constituant du ciment
- ajout aux mortiers ou béton, afin de corriger la granulométrie et d'augmenter la compacité.

I-1-2-5-b Propriétés et mode d'action des fillers :

L'action des fillers est très complexe et dépend de plusieurs facteurs :

- Composition chimique et minéralogique .
- structure, forme et état de surface.
- Finesse des matériaux auxquels ils sont ajoutés.
- Teneur du clinker en C₃A.

Les fillers influent sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment : « la cohésion ,le frottement interne est augmenté et aussi la viscosité qui augmente (effet lubrifiant) » et ceci en fonction de l'état de surface; la finesse et la porosité des fillers ajoutés.

Certains fillers (surtout contenant du calcaire) peuvent être actifs chimiquement : les fillers silico-calcaires sont - en général à finesse égale - moins réactifs que les fillers calcaires mais plus réactifs que les fillers siliceux.

I-1-2-5-c Les fillers calcaires :

D'après des études faites au CERILH [8] : les calcaires finement broyés réagissent chimiquement en :

- * modifiant la vitesse d'hydratation de certains constituants du ciment .
- * modifiant la morphologie des cristaux de CSH formés.
- * rentrant en concurrence avec le gypse.

La partie périphérique des grains de calcaire passe en solution, le carbonate de chaux forme avec C_3A un monocarboaluminate de chaux de formule « $C_3ACaCO_3 \cdot 10H_2O$ » ou bien « $C_4A\bar{C}H_{10}$ ».

RAMACHANDRAN et Chun-Mei (1986) [9] ont observé que le carbonate de calcium ($CaCO_3$) empêche ou retarde la formation d'hydrate d'aluminate cubique dans l'hydratation de C_3A (ceci est attribué à la formation préférentielle de monocarboaluminate hydraté), et il accélère la formation d'Ettringite et sa conversion en phase monosulfoaluminate lorsqu'il s'ajoute au mélange $C_3A + \text{gypse} + H_2O$ (ceci est dû à l'épuisement accéléré du gypse en présence de $CaCO_3$).

Mais avec certains fillers calcaires le monosulfoaluminate ne se produit pas [8].

FARRAN et MASO ont remarqué que les cristaux de portlandite (provenant de l'hydratation des silicates de calcium du ciment) pouvant pénétrer dans le réseau cristallin des grains de calcite augmentent l'adhérence de type physico-chimique.

I-1-2-5-d Les silices ultrafines :

Les ultrafines sont généralement de la fumée de silice .

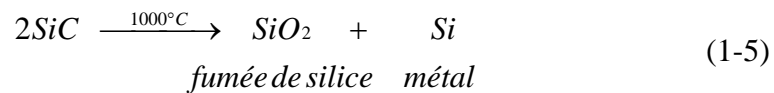
La fumée de silice est un sous produit de l'industrie de silicium (alliage et ferrosilicium) récupéré dans les fumées émises par les fours électriques, cette fumée de silice se présente sous forme d'une poudre extrêmement fine dont les grains ont environs 0.01 et 100 microns de diamètre, de surface spécifique $20m^2/g$ et de densité 2.2.

Les fumées de silices condensées (CSF) sont riches en silice SiO_2 (environ 80%).

Les CSF renferment toujours du carbone de silicium SiC, ce dernier résulte de la réaction chimique dans la zone la plus chaude du four entre le mono-oxyde du silicium (SiO) et le carbone .

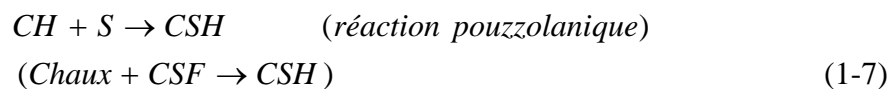
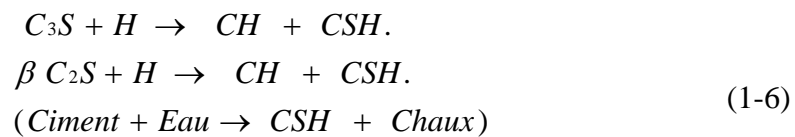


Le SiO étant thermodynamiquement instable dans cette zone (1000°C) a tendance à se transformer en silicium (Si) et dioxyde de silicium (SiO₂)



➤ Pouzzolanité de la fumée de silice :

La nature chimique de la CSF la rend capable de réagir avec la chaux libérée par le ciment (c'est le rôle pouzzolanique), il se forme des silicates de calcium hydratés CSH selon la réaction suivante :



Cette réaction contribue, par la phase liante, au renforcement des propriétés mécaniques du ciment.

La grande finesse de la fumée de silice lui permet de s'insérer entre les grains de ciment et de diminuer ainsi le pourcentage des pores (c'est le rôle de remplissage).

➤ Mode d'action de la fumée de silice :

Lorsque l'on ajoute à une pâte de ciment fraîche une quantité assez faible de CSF (10% du poids de ciment), un raidissement quasi-instantané sera constaté—au point où le mélange devient impossible à malaxer —; il faut ajouter une quantité importante d'eau pour obtenir la fluidité normale; donc l'ajout de la fumée de silice seule à un béton ne présente aucun intérêt puisqu'on est conduit à augmenter la quantité d'eau d'où augmenter la porosité du béton.

Ainsi les gains de performance que l'on peut espérer du mélange (ciment + CSF) sont annulés .Par contre si on ajoute à ce mélange un fluidifiant « en dose suffisante », le raidissement ne se provoque pas, et de plus il conduit à une fluidification supplémentaire du mélange; c'est cette action des fluidifiants classiques des bétons qui confère tout leur intérêt aux fumées de silice en les rendant compatibles avec le ciment .

En présence de CSF, les hydroxyles de surface des particules de silice sont ionisés en SiO^- et les cations calcium provoquent une « coagulation » de la silice en créant des ponts entre les groupes SiO^- (fig 1-5.a); par contre en présence d'un fluidifiant classique (par exemple le polynaphtalène sulfonate) les ions de calcium forment des ponts entre les groupes superficiels SiO^- et l'anion organique (fig 1-5.b).

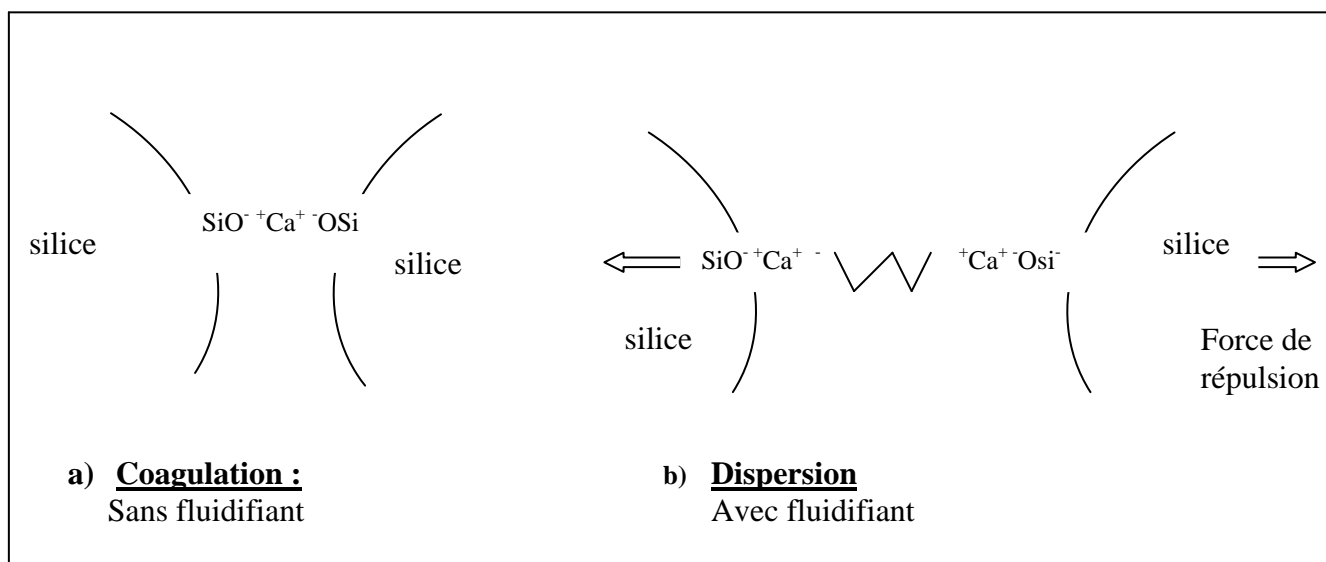


Fig 1-5 : La coagulation de la fumée de silice en présence de ciment et sa dispersion par un fluidifiant [10].

Formulation des BHP

I-2-1 Introduction :

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

1. Dans le mortier .
2. Au niveau de l'interface granulat/mortier.
3. Dans le granulat .

Pour fabriquer un béton à très haute résistance ; il faut donc viser à :

- a) Obtenir un mortier le plus résistant possible .
- b) Maximiser l'adhérence granulat/mortier.
- c) Utiliser les granulats les plus résistants possible [7].

I-2-2 Obtention d'un mortier plus résistant :

Pour obtenir le mortier le plus résistant il suffit d'abaisser au maximum son rapport E/C tout en lui conservant une fluidité suffisante .

La pâte de ciment anhydre est caractérisée par une haute structure poreuse . Dans un solide poreux, la relation entre la résistance (S) de la pâte et sa porosité (P) peut être exprimée d'une manière générale par :

$$S = S_0 \exp (-b.p) \quad (1-8)$$

Avec :

S_0 : est la résistance de la pâte de ciment pour une porosité nulle (P=0)

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

I-2-2-1 Influence du rapport E/C sur la porosité initiale :

La porosité initiale ou bien la distance initiale entre les grains de ciment hydratés joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'eau relative nécessaire à l'hydratation du ciment.

La figure 1-6, montre la relation croissante entre la porosité et le rapport E/C; cette relation peut s'exprimer comme suit :

$$P_i = W / (V_c + W) \quad (1-9)$$

∫ V_c : est le volume spécifique du ciment et W est le rapport E/C.

On voit clairement que la porosité initiale (P_i) augmente avec l'augmentation du rapport E/C; donc pour avoir une structure plus compacte il faut diminuer au maximum le rapport E/C d'où diminution de la porosité.

I-2-2-2 L'effet combiné du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la porosité :

Le volume du produit d'hydratation est deux fois plus grand que le volume du ciment non hydraté. Par conséquent la distance entre les grains du ciment diminue ainsi que la porosité de la pâte avec le processus d'hydratation. La porosité de la pâte et sa résistance associée sont déterminées par le rapport E/C et le degré d'hydratation (le degré d'hydratation est la quantité de ciment hydraté par rapport à la quantité totale de ciment). L'effet combiné du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la porosité est donné par l'équation :

$$P_t = 1 - \frac{0.32 - 0.187\alpha}{0.32 + W} \quad \begin{cases} P_t : \text{porosité totale de la pâte} \\ W : \text{rapport E/C} \\ \alpha : \text{le degré d'hydratation} \end{cases} \quad (1-10)$$

Tout en considérant que le volume du solide augmente avec un facteur 2.2 fois et le volume spécifique du ciment est égale à $0.32 \text{ cm}^3/\text{g}$.

Cette expression représentée sur la figure 1-7 confirme que la porosité diminue avec l'augmentation du degré d'hydratation et la diminution du rapport E/C.

I-2-3 Effet des propriétés des granulats sur la résistance à la compression :

I-2-3-1 Effet de la résistance des agrégats :

Puisque le béton est un matériau composite, sa résistance mécanique est très influencée par celle des agrégats (voir fig 1-8). Généralement, pour le même rapport E/C les bétons fabriqués avec des agrégats légers sont moins résistants que ceux fabriqués avec des agrégats lourds.

Comme on a cité; dans un béton, la rupture peut se produire à trois niveaux :

- Dans le granulat.
- A l'interface matrice– granulat .
- Dans la matrice.

Dans le premier cas la résistance du béton est beaucoup plus contrôlée par celle des agrégats. Dans le deuxième cas la résistance du béton est liée à la mauvaise adhérence entre la pâte et l'agrégat, dans le dernier cas la résistance du béton est contrôlée par celle de la pâte ; une diminution du rapport E/C apporte une augmentation automatique de la résistance du béton .

I-2-3-2 Effet du module d'élasticité des agrégats :

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

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

Mais; pour les BHP; il est préférable d'utiliser un gros granulat dont le module d'élasticité est aussi voisin que possible de celui du mortier qui l'enrobe de façon à minimiser les déformations différentielles au niveau de l'interface mortier – gros granulats qui pourraient nuire à l'adhérence du mortier ou de la pâte de ciment hydraté sur le gros granulat .

En définitif il n'existe pas des critères scientifiques bien établis qui permettent de sélectionner le granulat idéal pour fabriquer des bétons à très haute résistance.

A Chicago, Montréal et Toronto, il est trouvé que c'est les calcaires dolomitiques qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats.

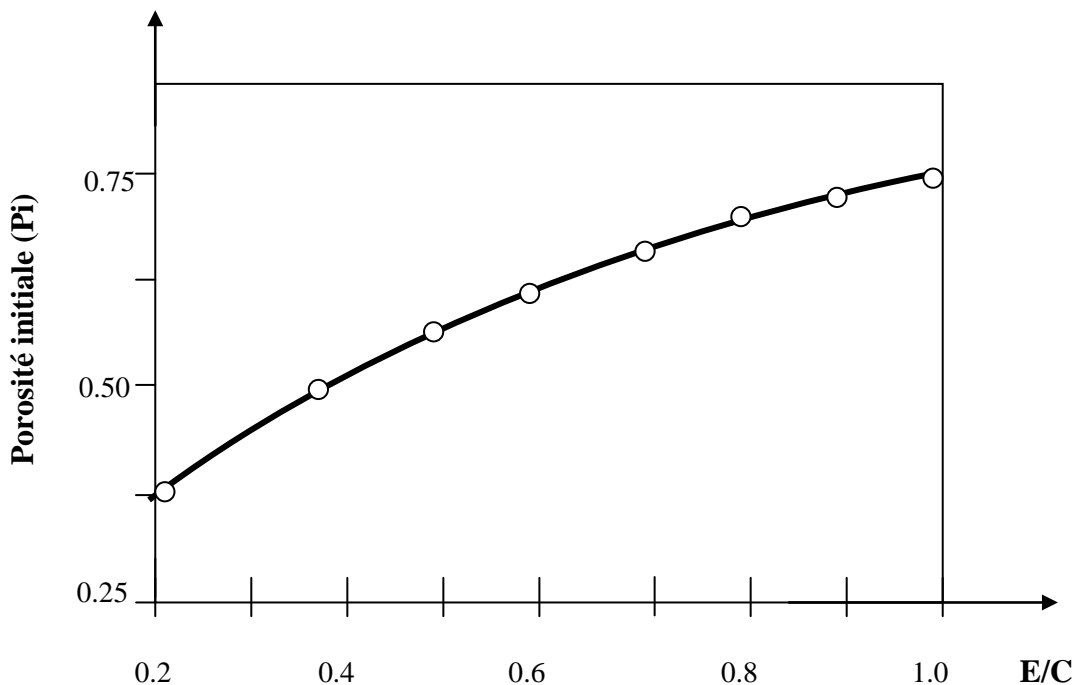


Fig 1-6 : Effet du rapport E/C sur la porosité initiale [11].

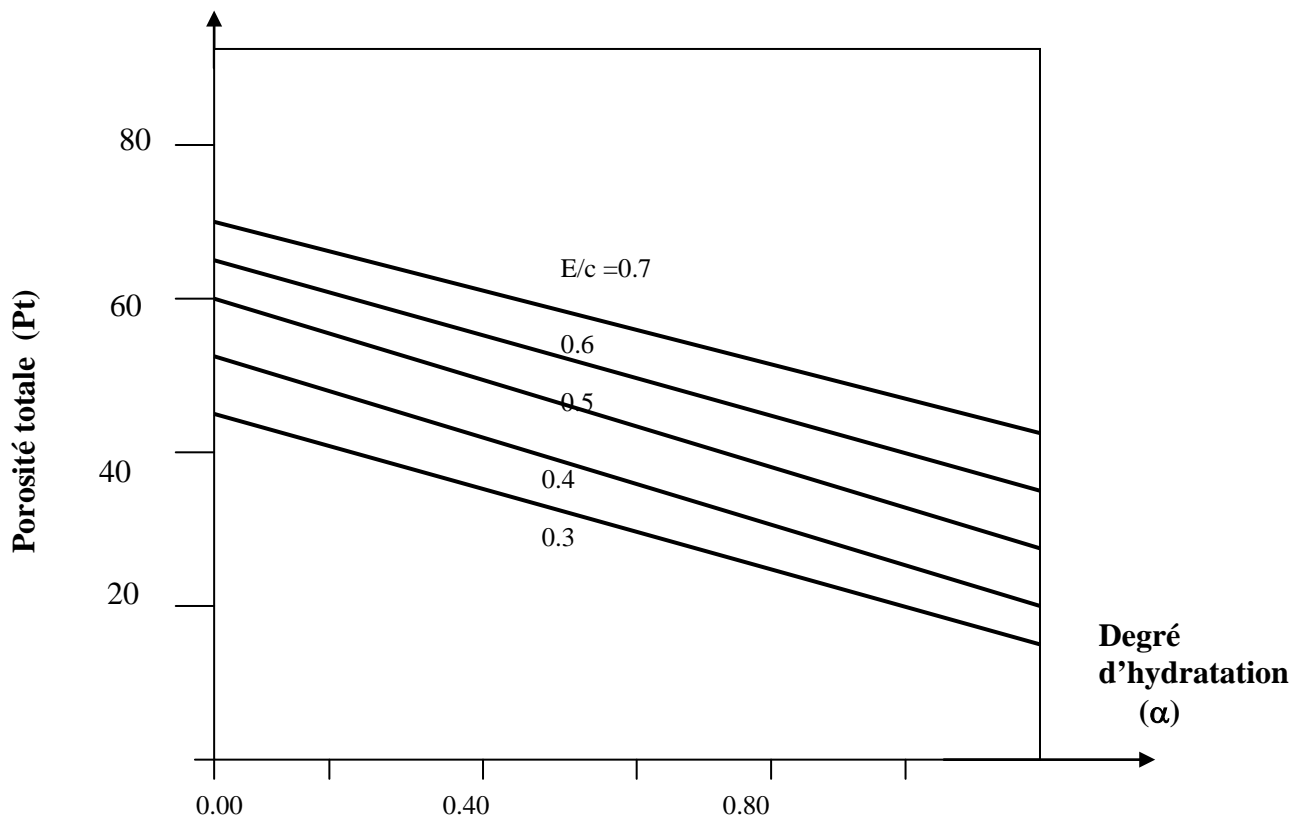


Fig 1-7 : Effet du rapport E/C et le degré d'hydratation sur la porosité initiale de la pâte de ciment [11].

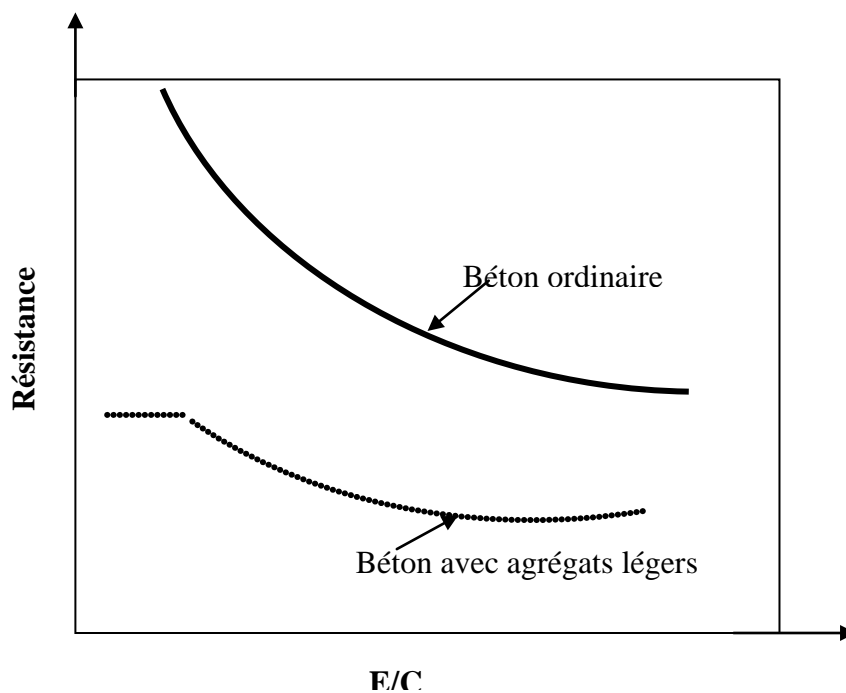


Fig 1-8: Effet des granulats sur la résistance du béton [11] .

Hydratation et Prise des ciments

I-3-1 Introduction :

Un ciment portland est un matériau pulvérulent qui présente vis-à-vis de l'eau, une double aptitude : celle de durcir sous son influence et celle de résister, après durcissement, à son action prolongée.

Ainsi, l'hydraulicité implique, qu'après gâchage avec de l'eau, le durcissement, qui peut d'ailleurs avoir lieu tant dans l'air que sous l'eau, résulte d'un mécanisme d'hydratation de ses constituants minéralogiques. Il paraît, ici, utile de préciser le sens du mot « *hydratation* ». Le mot « *hydratation* » désigne en chimie classique le processus par lequel l'eau se fixe sur un corps. Par exemple la chaux vive CaO s'hydrate en chaux éteinte Ca(OH)_2 . En chimie des ciments, on entend par hydratation toutes les formes d'action de l'eau intervenant dans le mécanisme de prise et de durcissement du ciment. Or ces formes sont nombreuses : dissolution, ionisation, hydrolyse, solvation, adsorption et enfin vraie hydratation. C'est donc à défaut d'autre mot que nous utilisons « *hydratation* » dans cette acceptation usuelle mais incorrecte pour exprimer l'action globale de l'eau sur le ciment [12].

Dans cette partie, on va essayer d'expliquer tout le phénomène d'hydratation de ciment ainsi la prise et le durcissement.

I-3-2 Hydratation du ciment portland :

I-3-2-1 Prise et durcissement du ciment portland :

Après gâchage d'un ciment, à un moment donné, une augmentation brutale de la viscosité de la pâte est constatée : c'est le début de prise ; en même temps un dégagement de la chaleur commence à se produire occasionné par la précipitation des hydrates formés. Au moment où la pâte cesse d'être pratiquement indéformable on définit conventionnellement une fin de prise. Après cette période, le phénomène d'augmentation de la viscosité se poursuit c'est la période de durcissement.

Deux théories d'hydratation ont été proposées à la fin du 19^{ème} siècle [3,12,13] par :

La théorie cristalloïdale : de H. LE CHATELIER (1887) ; dont le mécanisme d'hydratation se produit par le passage en solution des grains de ciment.

La théorie colloïdale : de V.MICHAELIS (1893) ; dont le mécanisme d'hydratation se produit par des réactions topochimiques à l'état solide ; c.-à-d. que l'eau traverse le grain de ciment.

D'après LE CHATELIER : les constituants anhydres du ciment portland, mis en présence d'eau, donnent naissance à une solution sursaturée. Des hydrates se forment dans cette solution et précipitent en donnant des microcristaux ; cela correspond au début de la prise. Les hydrates formés étant moins solubles que les composés anhydres ; ceux-ci peuvent continuer à se dissoudre et à précipiter de sorte que la réaction se poursuit jusqu'à la mise en solution de la totalité du ciment. Le durcissement est dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

Tandis que MICHAELIS a expliqué le phénomène de prise et de durcissement en considérant que l'alite est immédiatement décomposé par l'eau ; la chaux et l'aluminate de chaux entrent en solution mais la silice reste à l'état solide (elle est insoluble dans l'eau de chaux même faiblement concentrée). L'hydrogel est enrichi en anions et dès que la concentration de l'eau de chaux a suffisamment augmenté ; les cations calcaires Ca^{2+} vont vers les anions, il se forme la combinaison d'hydrosilicate calcaire très difficilement soluble. L'hydrogel est d'abord riche en eau, mais la masse intérieure des grains lui enlève son eau avec avidité pour s'hydrater elle-même. L'hydrogel se condense de plus en plus à la surface des grains et l'hydratation se poursuit par transfert de l'eau vers le grain anhydre à travers la membrane de gel qui durcit.

En fait, on admet que les deux théories coexistent (LE CHATELIER et MICHAELIS) :

- La théorie par passage en solution semble mieux expliquer les réactions en milieu aqueux dilué ou au cours des premières étapes de l'hydratation (aux jeunes âges).
- Le mécanisme sans passage en solution semble prédominant aux âges avancés lorsque la diffusion des ions libérés par les grains anhydres devient plus difficile.

Les vues actuelles sur l'hydratation des ciments font donc appel aux deux théories .

La figure (1-3-1) représente une schématisation de la prise et du durcissement du ciment portland qui a été proposé par Taylor et qui peut se résumer en 4 étapes [12] :

- Le gâchage crée une dispersion des grains de ciment dans l'eau (voir fig 1-9.a), les grains de ciment ne sont pas jointifs très rapidement apparaît sur chaque grain une couche de produit d'hydratation. Ils empruntent une partie de l'espace initial des grains anhydres et une partie du volume d'eau (voir fig 1-9.b) : leurs dimensions sont celles de colloïdes de 10 à 100 Å°, mais quelques cristaux beaucoup plus gros de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ notamment, existent déjà. La solution se sature rapidement en Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^- et cations alcalins .
- Puis les revêtements de produits hydratés s'étendent, commencent à se toucher et un gel se forme ainsi entre les grains (voir fig 1-9.c) ceci constitue la prise.

- Puis les produits formés entre les grains augmentent et se touchent en nombreux points .La densité du gel varie d'un endroit à l'autre et des pores s'y forment (fig 1-9.d).
- Des cristaux supérieurs à $1\mu\text{m}$ sont disséminés dans le gel ou se déposent dans les pores par cristallisation.

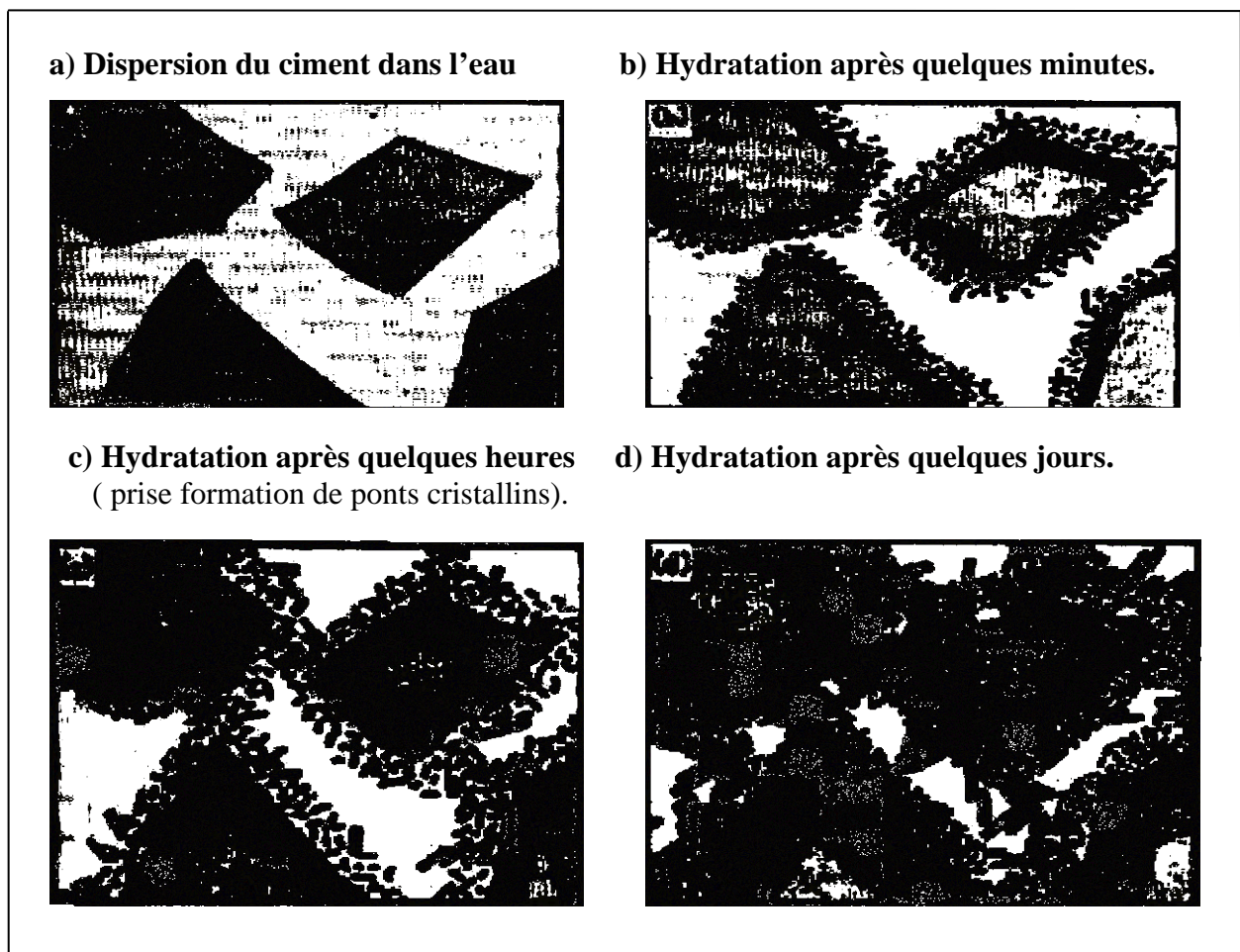
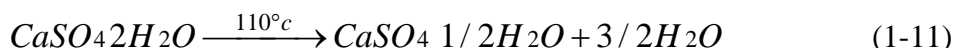


Fig 1-9 :Représentation schématique de la prise et du durcissement du ciment portland d'après Taylor [14] ; [12].

Un autre phénomène peut se manifester pendant ou après le gâchage : c'est la fausse prise qui est due à la déshydratation du gypse .M.Venuat (1976) a expliqué ce phénomène comme suit :

- le gypse peut se déshydrater lors d'un stockage prolongé en silos, et aussi si la température dans le broyeur à ciment reste longtemps $>100^{\circ}\text{C}$ ce qui est suffisant pour transformer le gypse en semi-hydrate selon la réaction suivante :



- Le semi-hydrate (qui n'est pas combiné aux aluminates dès le départ) très avide d'eau redonne des cristaux de gypse en forme d'aiguille qui rigidifient la pâte lors du malaxage. Ce phénomène de fausse prise peut être évité en poursuivant le malaxage qui conduit à la rupture des liaisons formées (il est déconseillé de rajouter de l'eau car il fait diminuer la résistance tant initiale que finale).

Pour combattre ce phénomène, on peut aussi refroidir le broyeur dès que la température dépasse 110°C.

I-3-2-2 Hydratation des minéraux du clinker :

I-3-2-2-a Silicate tricalcique (C₃S) :

Le C₃S se forme vers 1400 – 1450°C; c'est le constituant majeur d'un composé que l'on appelle « Alite » et qui contient, en solution solide, des impuretés de type Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃.

Donc du fait que le C₃S est le composant le plus important des ciments portland, il est responsable de la majorité des propriétés mécaniques de la pâte de ciment durci, l'hydratation du C₃S est souvent utilisée comme un modèle pour expliquer l'hydratation du ciment .

Lorsque le C₃S entre en contact avec l'eau, il réagit immédiatement en une réaction exothermique de courte durée : c'est la période de « *pré-induction* » suivie d'une période appelée « *période d'induction* » ou période « *dormante* » de relative inactivité; durant cette période il se produit un échange d'ions entre la solution et le C₃S anhydre solide qui conduit finalement à une période dite « *d'accélération* » ou de « *poste -induction* » .

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer ces trois périodes dont on peut citer :

Théorie de la protection des hydrates : (proposée par JONG et collaborateurs (1967) [15])

Une couche d'hydrate de protection se forme qui empêche la poursuite de l'hydratation de C₃S , c'est la période d'*induction*.

Le premier hydrate C₃SH_n se transforme en second hydrate qui a un rapport C/S plus faible (0.8 à 0.15) et qui est plus perméable à la diffusion des ions provenant ou rejoignant la surface de C₃S, la formation de cet hydrate annonce la fin de la période d'induction et le début de la période d'accélération, cet hydrate se transforme en troisième hydrate fibreux.

Le gel de silicate de calcium hydraté a une composition qui varie au cours de la réaction d'hydratation, elle dépend également de la teneur en eau (E/C) et de la température de cure.

Ce gel est noté CSH sans préciser la composition. Toutes les formes de CSH sont presque amorphes lorsqu'ils sont formés au cours de l'hydratation des ciments portlands à la température ambiante.

Une autre théorie a été proposée par ODLER et DORR (1979) [15] qui peut se résumer comme suit :

- une fois que le C_3S entre en contact avec l'eau les ions Ca^{2+} sont lessivés de la surface pour former la chaux en solution (CH) et simultanément les molécules d'eau sont fixées sur la surface pour former les CSH. Une fois la phase liquide est sursaturée vis à vis de CH, aucun ion de Ca^{2+} ne trouve place, des germes de second hydrate se forment .

Au cours de la période d'*induction* aucun hydrate ne peut se former à cause de la sursaturation de la phase liquide en CH et à la taille des germes qui est plus petite que la taille critique .

La fin de la période d'*induction* est caractérisée par l'augmentation de la taille des germes du second hydrate jusqu'à la taille limite .

La réaction se poursuit jusqu'à la consommation du C_3S anhydre.

➤ Mécanisme d'hydratation de C_3S :

Un mécanisme d'hydratation a été proposé par SKALNY et YOUNG (1980) [15 ;16] (en se basant sur des données expérimentales et sur les idées de Taylor) qui peut se résumer en quatre stades :

Premier stade (I): (voir fig. 1-10)

L'hydrolyse initiale par l'eau cause une fixation de protons O^{2-} en OH^- et SiO_4^{2-} en $H_nSiO_4^{(n-4)}$ et Ca^{2+} .

Les ions Ca^{2+} et OH^- passent en solution , puis il se forme une couche superficielle qui est l'assemblage d'ions de silicates comme H_3Si^4+ et $H_4Si_2O_7^{2-}$ liés par des liaisons hydrogènes et quelques ions calcium .

L'équilibre électrique est maintenu par la perte de Ca^{2+} en solution pour compenser la prise en charge de H^+ provenant de l'eau durant l'hydrolyse; il se forme une double couche électrique entre les Ca^{2+} qui sont relativement mobiles et la couche superficielle du silicate qui est immobile.

Deuxième stade (II):

La couche superficielle continue à se développer et le passage des Ca^{2+} et OH^- en solution se poursuit aussi, mais le processus est lent parce que les ions doivent traverser la double couche électrique.

Des germes se forment par l'assemblage des atomes en solution mais ne sont pas capables d'atteindre la taille critique nécessaire pour leur croissance, ces germes seront soit des CH soit des CSH et contiennent Ca^{2+} , OH^- et silicates.

Troisième stade (III):(voir fig.1-11)

La solution devient plus concentrée en ions ce qui permet aux germes de grossir.

La croissance est observée en premier lieu une fois la solution est devenue sursaturée en hydroxyde de calcium CH.

La croissance du CSH se limite à la surface à cause de la difficulté de transport de la silice (mécanisme de surface) et la croissance du CH peut se produire initialement à la surface mais il peut y avoir des cristaux loin des grains qui croissent plus rapidement près de la surface .

La croissance du CH est contrôlée par la sursaturation de la phase liquide.

Quatrième stade (IV): (voir fig 1-12)

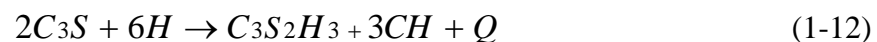
Quand la sursaturation de la phase liquide diminue ,la croissance rapide de CH et de CSH se ralentit .

La croissance initiale affecte essentiellement l'extérieur du grain dans l'espace rempli d'eau, par contre la croissance ultérieure a lieu à l'intérieur du grain d'origine , d'où le nom *produit interne* pour les CSH .

L'interface et la couche riche en silice se déplacent en direction de l'intérieur et le CSH précipite sous forme des aiguilles extérieures qui agissent comme une barrière s'opposant au transport des ions .

Le CSH interne et externe peut être totalement différent ,ou bien peut avoir un gradient de structure et de composition .

Dans le cas d'une hydratation complète la réaction du C_3S avec l'eau peut se traduit comme suit :



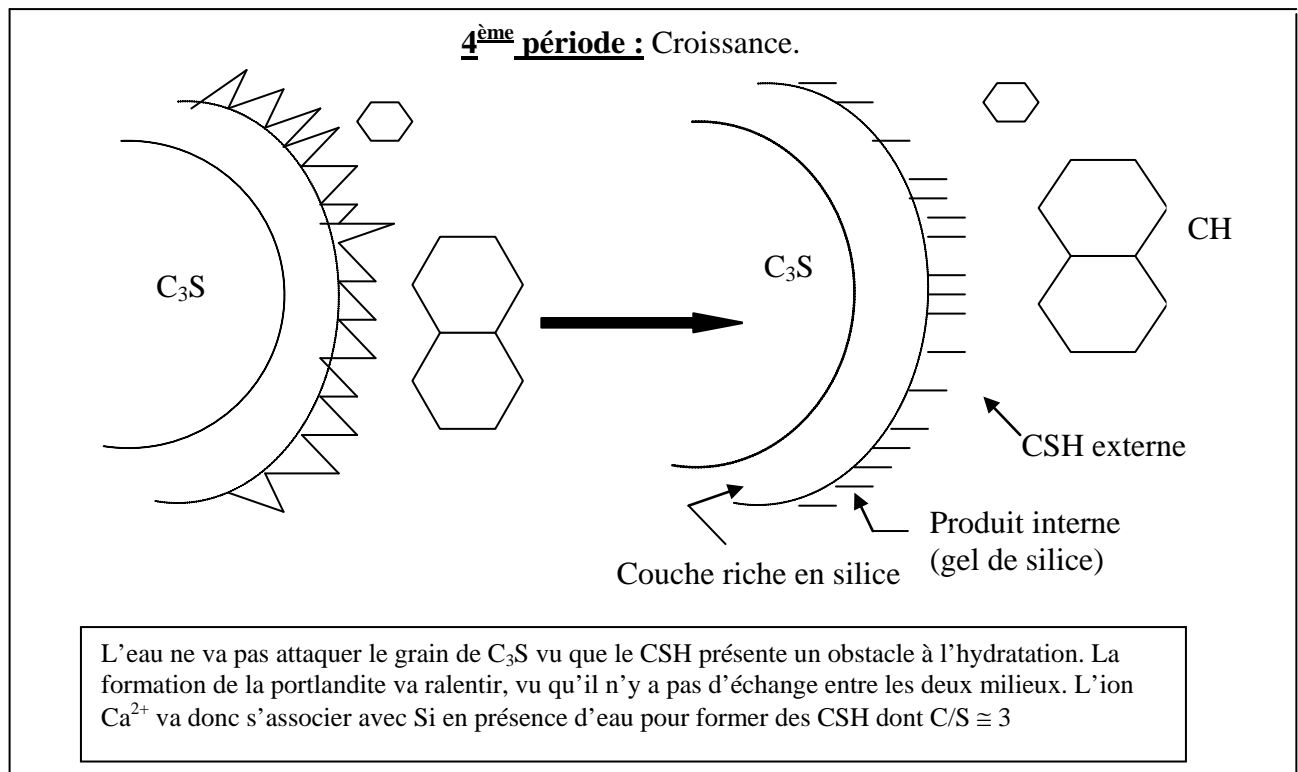


Fig 1-12 : Formation de produit CSH interne [15].

I-3-2-2-b Silicate bi calcique (C_2S) :

Le silicate bicalcique est le deuxième composant du ciment portland, il existe sous différentes variétés polymorphiques α , β , γ et α' .

L'hydratation de ces variétés a été examinée par S.N. GHOSH et collaborateurs (1979) :

➤ Hydratation de γC_2S :

La forme γ est la moins réactive à la température ordinaire. Dans les conditions normales cette forme n'a pas été trouvée dans le clinker.

L'hydratation de γC_2S est limitée, elle se produit selon un mécanisme par *dissolution intermédiaire*, la vitesse et le degré d'hydratation sont plus faibles que pour les autres variétés polymorphiques α et β .

➤ Hydratation de βC_2S :

Cette forme allotropique de βC_2S est le constituant majeur d'un composé que l'on appelle la « Bélite » et qui contient, en solution solide, des impuretés (P_2O_5 , BaO); βC_2S se forme vers $1200^\circ - 1300^\circ C$.

L'hydratation de βC_2S est sensible à la température.

Les différences qui existent entre l'hydratation de βC_2S et celle de C_3S sont :

- La faible vitesse d'hydratation de $\beta\text{C}_2\text{S}$ par rapport à celle de C_3S .
- L'absence d'une sursaturation marquée en CH.
- La faible vitesse du développement de chaleur qui rend l'étude des réactions au moyen de la calorimétrie difficile.

La composition et la morphologie du CSH formé à partir du C_2S et du C_3S semblent être similaires .

D'après YOUNG et TONG (1977) [15] la vitesse de libération des ions ,au cours de l'hydratation de $\beta\text{C}_2\text{S}$ est lente, et puisque le degré de sursaturation est en relation avec la germination de CH et de CSH, donc la petite sursaturation observée pour $\beta\text{C}_2\text{S}$ signifie la faible vitesse d'hydratation .

D'après FUJI et KONDO (1979); l'hydratation initiale de $\beta\text{C}_2\text{S}$ se produit de manière similaire que celle du C_3S que l'on peut résumer comme suit :

- Dissolution initiale du silicate .
- Adsorption d'eau par les molécules sur la surface des particules.
- Précipitation du CSH d'où diminution de la concentration en ions silicates .
- Formation des germes d'hydrates de silicate de calcium .
- Diffusion des Ca^{2+} et OH^- à l'intérieur de la solution ce qui engendre une sursaturation en hydroxyde de calcium CH; a ce stade l'hydratation de $\beta\text{C}_2\text{S}$ (contrairement à celle de C_3S) commence à s'accélérer et quand le degrés de l'hydratation atteint approximativement 20% , une diminution de vitesse suivie par une nouvelle accélération est observée.

➤ Hydratation de α' et $\alpha\text{C}_2\text{S}$:

La réaction des variétés α et α' dépend des impuretés utilisés pour stabiliser la structure.

Le $\alpha\text{C}_2\text{S}$ n'est pas réactif sauf s'il est dopé.

Les formes α et α' sont moins réactives que la forme β mais beaucoup plus réactives que la forme γ .

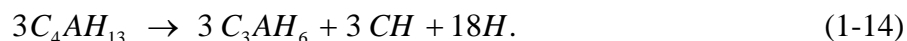
Le degré d'hydratation et la résistance à la compression sont plus élevés dans la forme α' .

I-3-2-2-c Aluminate tricalcique (C_3A) :

L'interaction de C_3A avec l'eau est très rapide et se produit avec un fort dégagement de chaleur; elle se traduit par la réaction suivante :



Au cours de l'hydratation de C_3A il se forme rapidement une couche d'hydrate hexagonale C_4AH_{13} (aluminate tétracalcique) et C_2AH_8 (aluminate bicalcique) à la surface des grains, ces hydrates se transforment rapidement en C_3AH_6 (aluminate tricalcique cubique) vu que la chaleur d'hydratation du C_3A est importante, selon la réaction suivante :

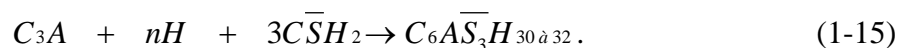


Cette transformation des aluminates hexagonaux en aluminates cubiques (plus stables) est connue sous le nom de conversion qui se traduit par une augmentation de la porosité et diminution de résistance mécanique des aluminates.

RAMACHANDRAN et collaborateurs (1986) [9] ont fait une étude sur l'hydratation de C_3A par la diffraction aux rayons X, et ils ont remarqué que :

- L'intensité des pics exothermiques diminue plus l'hydratation de C_3A se poursuit.
- A 10 minutes il se forme la phase hexagonale, les phases cubiques et hexagonales coexistent à 1 heure mais à 2 jours seule la phase cubique existe.
- La vitesse très élevée d'hydratation entraîne une régidification très rapide de la pâte de ciment d'où problème de maniabilité des bétons, c'est pour cela que la réaction est contrôlée par un ajout de gypse $C\bar{S}H_2$ qui conduit à retarder la prise.

Selon CORSTANJE et collaborateurs (1973)[1] (qui ont fait une étude d'un mélange de $C_3S + C_3A + C\bar{S}H_2$) : la cause primaire du retard de C_3A n'est pas l'ion sulfate, mais la précipitation d'un $Al(OH)_3$ amorphe sur la surface des grains de C_3A . La formation d'hydrates hexagonaux (C_4AH_{13} , $C_4A\bar{S}H_{12}$ et leurs solutions solides) fournit une couche isolante qui isole chaque grains de l'ensemble de la solution. Cette couche n'est pas suffisante pour retarder l'hydratation de C_3A puisque l'eau et les ions peuvent la traverser ; ce qui a conduit à donner une autre explication plus connue de l'influence du gypse sur l'hydratation de C_3A dont les teneurs optimales du gypse ont été données par les formules de LERCH et JIRCO (voir paragraphe II-1). La réaction du C_3A en présence du gypse est :



L'ajout de $C\bar{S}H_2$ donne naissance à des aiguilles d'Ettringite entourant les grains de C_3A (COLLEPARDI et collaborateurs (1978) et RAMACHARDAN (1986)) (voir fig1-13.a).

Ceci a été mis en évidence par des essais calorimétriques. La figure 1-13.b, montre l'apparition tardive du pic exothermique du flux de chaleur relatif à l'hydratation du C_3A en présence du gypse.

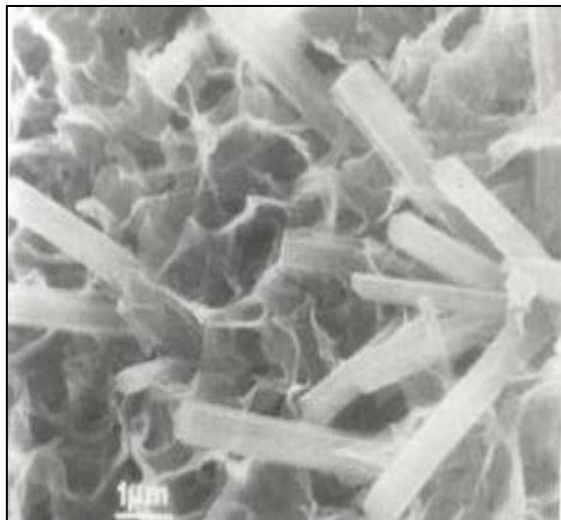


Fig 1-13.a : Grain de C_3A entouré d'une coagule épaisse d'Ettringite

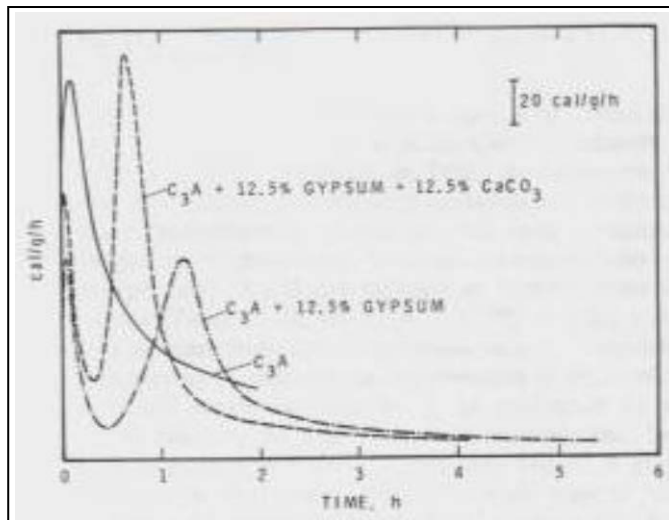
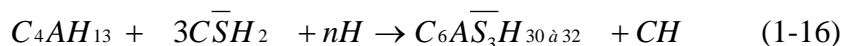


Fig 1-13.b : Courbes calorimétriques de C_3A +12.5% de gypse (avec et sans $CaCO_3$) obtenues au calorimètre à conduction [9].

La formation de ces aiguilles d'Ettringite au début de la réaction d'hydratation n'est pas gênante, elle contribue à créer des résistances initiales, par contre la formation ultérieure d'Ettringite après durcissement peut occasionner la destruction du béton, car la réaction suivante :



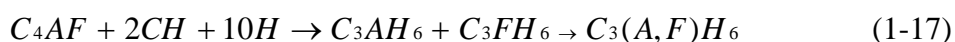
se fait avec un fort accroissement de volume et ceci se produit dans les cas suivants :

- Cas des eaux contenant des sulfates.
- Cas des sulfates libérés tardivement [14].

I-3-2-2-d Alumino -ferrite de calcium (C_4AF) :

L'hydratation de C_4AF est similaire à celle de C_3A , mais la vitesse d'hydratation est plus faible que celle de C_3A , la réactivité est proportionnelle au rapport A/F .

La réaction d'hydratation de C_4AF peut s'écrire comme suit :



En absence de sulfate le $C_4(A,F)H_{13}$ est le produit stable aux basses températures, mais à $20^\circ C$ il se transforme en $C_3(A,F)H_6$.

D'après BEAUDOIN et collaborateurs (1980) la conversion de $C_4(A,F)H_{13}$ en $C_3(A,F)_6$ est plus lente que celle du C_3A parce que la pâte de C_3A peut atteindre des températures plus élevées en raison du fort dégagement de chaleur au cours de l'hydratation .

A plus hautes températures (plus de $50^{\circ}C$) il se forme seulement le $C_3(A,F)H_6$.

En présence de gypse, il se forme d'abord de l'Ettringite puis du monosulfoaluminate ($C_4\bar{A}SH_{12}$) lorsque le gypse est épuisé; la courbe calorimétrique a la même allure que celle observé pour le C_3A , mais l'hydratation initiale de C_4AF est fortement retardée par le gypse que pour le C_3A d'où l'apparition tardive du premier pic exothermique.

I-3-2-3 Interaction entre les composés du ciment au cours de l'hydratation :

Les principaux composés du ciment ne réagissent pas isolement ,il est remarqué que :

- L'hydratation de C_3S est retarder quand le C_3A est impliqué dans les réactions initiales non contrôlées .
- Le C_3S ralenti la vitesse d'hydratation de C_4AF par la libération de grande quantité de chaux dans la solution .
- La formation de silico-aluminate de calcium indique l'interaction de C_3S avec le C_3A au cours de l'hydratation .

D'après YOUNG et TONG (1977) il suffit de petites quantités de C_3S pour fixer la concentration en Ca^{2+} dans la solution en contact car la germination plus rapide de CH en présence de C_3S peut accélérer l'hydratation de βC_2S .

I-3-2-4 Cinétique et chaleur d'hydratation :

Les minéraux du ciment présentent des vitesses d'hydratation différentes :

Le C_3A et C_3S s'hydratent plus vite que le C_4AF et βC_2S (voir fig. 1-14).

La cinétique d'hydratation de ces minéraux détermine la vitesse de leur durcissement; plus l'hydratation du minéral est rapide plus vite s'accroît sa résistance (voir fig 1-15) .

Le dégagement de chaleur commence pratiquement avec le début de prise mesuré à l'aide de l'aiguille de Vicat .

La courbe de dégagement de chaleur s'infléchit dès la fin de prise .

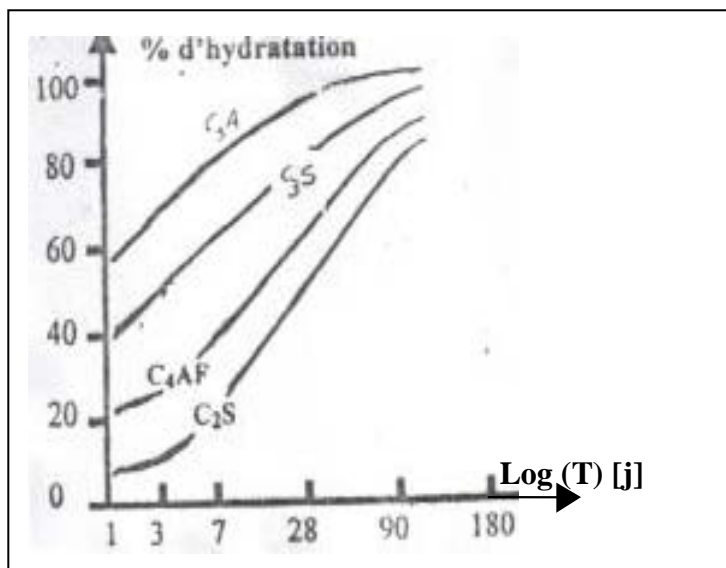


Fig 1-14 : Vitesse d'hydratation des principaux constituants du ciment portland.

(d'après F. M. LEA).

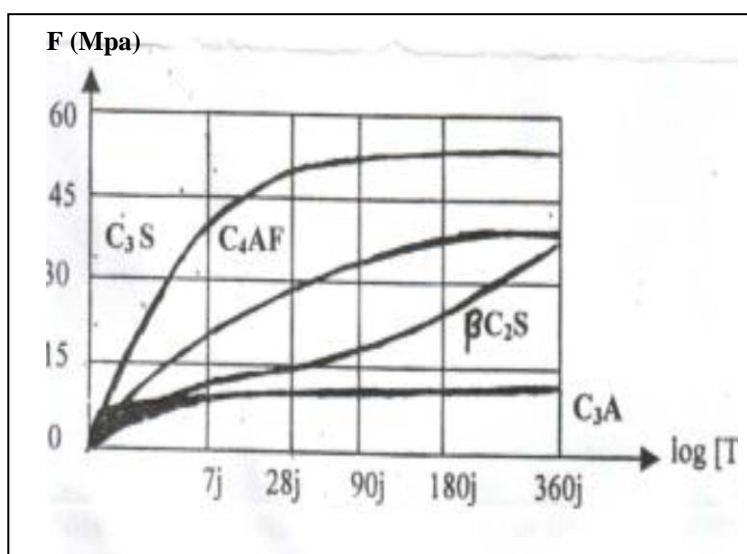


Fig 1-15: Accroissement de la résistance des minéraux du ciment portland [11;14].

Les quatre périodes d'après (SKALNY et YOUNG) relatives à l'hydratation de C_3S peuvent s'expliquer par la courbe calorimétrique (voir fig 1-16) [13] obtenue à l'aide d'un calorimètre à conduction :

- Elle présente un signal caractéristique dès les premiers instants de l'hydratation suivi d'une période dormante de quelques heures précédant un nouvel effet exothermique qui s'étale sur plusieurs heures.

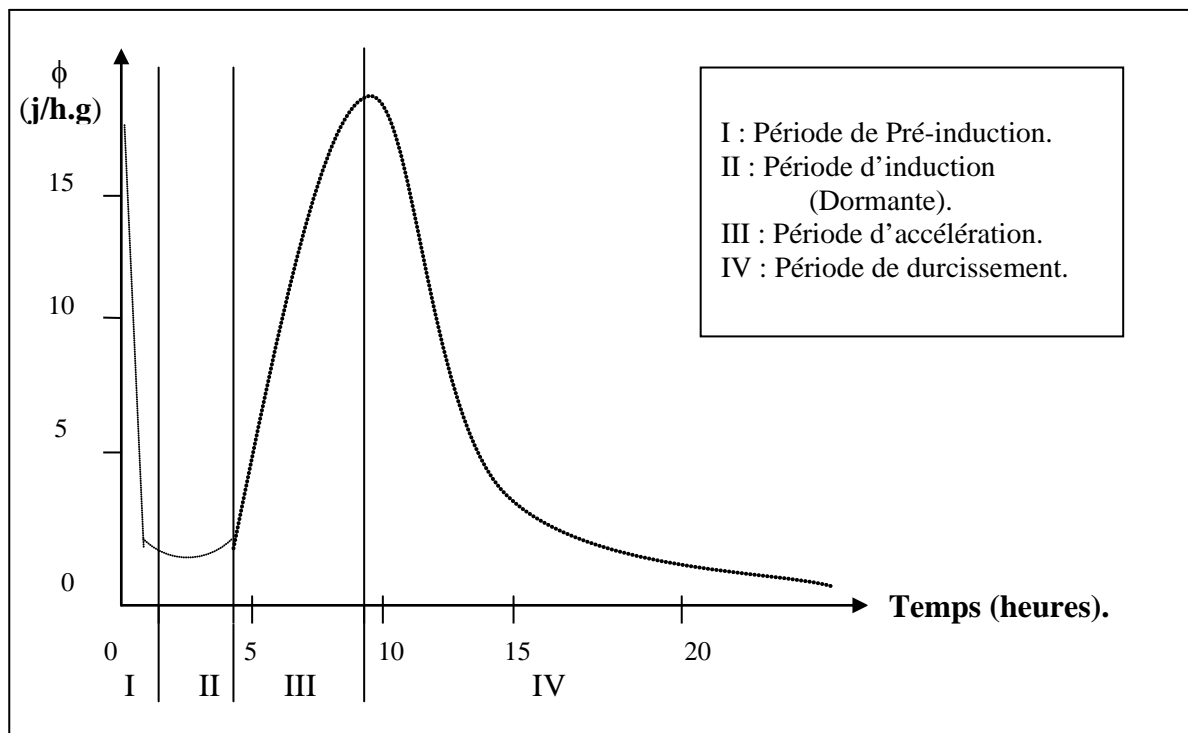


Fig 1-16 : Courbe calorimétrique d'un C_3S obtenue au calorimètre à conduction [13].

I-3-2-4-a Facteurs influençant la cinétique d'hydratation :

➤ Constituant minéralogiques :

Le tableau ci -après montre que l'hydratation de C_3S et C_3A entraîne un effet thermique dès les premières échéances ,elle n'évolue pas de façon sensible entre 28 jours et 6 mois ,alors que le βC_2S et C_4AF continuent à s'hydrater progressivement .

Constituants du ciment portland	Chaleur d'hydratation (J/g)		
	7 jours	28 jours	6 mois
C_3S	460	502	502
βC_2S	84	189	251
C_3A	773	857	865
C_4AF	168	209	293

Tableau 1-2 : Hydratation des différents composants du ciment portland [13].

Un CPA riche en C_3S (ciment Alitique) présente à court terme une résistance en compression supérieure à celle d'un CPA riche en βC_2S parce que son hydratation est plus rapide.

➤ La finesse de mouture :

A partir d'un même clinker de base, plus le ciment est finement broyé, plus la chaleur d'hydratation est élevée, surtout aux premiers jours [2]. Vu que le ciment finement broyé présente une plus grande surface libre à l'action de l'eau donc son hydratation est en effet plus rapide car les réactions d'hydratation sont des réactions de surface.

➤ Les adjuvants :

Les accélérateurs de C_3S interviennent au cours de la période précoce de l'hydratation. Ils affectent essentiellement la nucléation des CSH et CH.

Par contre les retardateurs allongent la période dormante de C_3S et retarde la précipitation de CH.

Les plastifiants peuvent retarder l'hydratation de C_3S et C_3A quand ils sont anioniques comme les gluconates de calcium et les lignosulfonates de calcium. (M. Regourd (1982))

D'après SPIERINGS et al (1976) les ions Na^+ dans la solution interstitielle retardent l'hydratation de C_3A en formant du précipité amorphe de $Ca(OH)_2$ lié à la forte basicité du milieu.

Il faut signaler que le ciment portland contient toujours du gypse qui joue le rôle d'un retardateur d'hydratation de C_3A . En présence de $CaCl_2$, l'effet retardateur du gypse est atténué.

➤ L'éventement :

Lorsque le ciment est conservé trop longtemps en atmosphère humide, une partie de ses éléments les plus fins s'hydrate et se carbonate causant ainsi une perte d'activité du ciment. Cet éventement se traduit par une diminution de la chaleur dégagée, et corrélativement une augmentation de la durée de prise et une chute des résistances mécaniques.

I-3-2-5 Influence de la fumée de silice (CSF) sur l'hydratation des ciments :

I-3-2-5-a Influence de l'impureté de la fumée de silice sur l'hydratation des ciments :

La composition des CSF est très variable, et ceci selon le type d'arc électrique de fabrication et selon qu'il fonctionne avec ou sans système de conservation de chaleur.

Les CSF obtenues des fours avec système de conservation de chaleur ont le taux d'imbrûlés (par exemple le carbone) faible.

Le CSF ayant une très grande surface spécifique enrobe le grain de ciment et fait écran entre le C_3S (ou le C_3A) et l'eau (voir fig1-3-9), cet écran disparaît après la dissolution du CSF dans la solution intergranulaire du C_3S (ou le C_3A).

Le carbone imbrûlé entourant le CSF a un rôle intéressant sur la réactivité du C_3S (ou le C_3A), car le carbone réduit la surface libre de la silice du CSF d'où retard de sa dissolution.

Ces résultats ont été confirmés par Dr M.N.OUDJIT (voir figures 1-17 ; 1-18) qui a remarqué sur des CSF (**A** et **R**) issues de la même usine que :

- Le carbone fixé sur les grains du CSF**R** retarde l'hydratation de C_3S (jusqu'à 7^{ème} jour) d'où l'apparition tardive de la portlandite (apparition au 7^{ème} jour d'hydratation) alors qu'une quantité importante est déjà formée dans le cas du CSF**A** et du témoin à la même époque.
- L'élimination du carbone du CSF**R** par chauffage à 500°C améliore l'hydratation du ciment portland.
- L'ajout de carbone ne modifie pas d'une façon significative ; la réactivité du CSF**A** sur l'hydratation du ciment portland.

On peut donc conclure que :

- Le mode de fixation du carbone joue un rôle important sur l'hydratation des ciments.
- La teneur totale des impuretés n'est pas un facteur prépondérant, beaucoup plus important est la nature de l'impureté.

Fig 1-17 :
Représentation schématique d'un mélange CSF-CPA à partir du modèle de H.H.BACHE [in17].

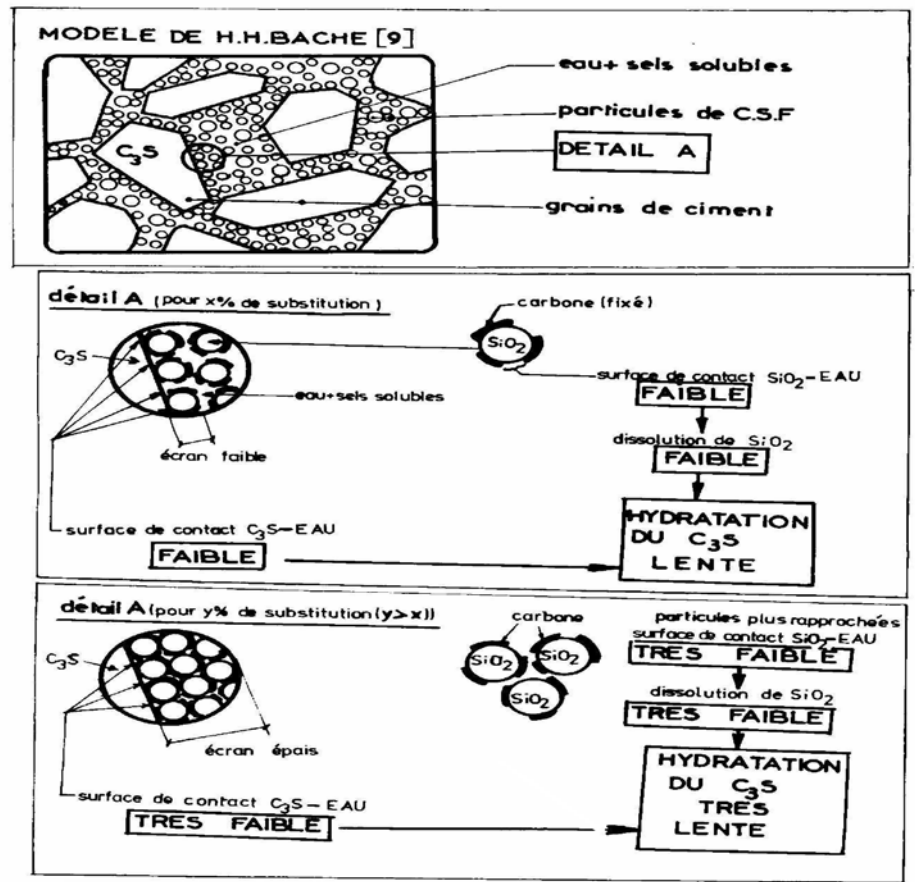


Fig 1-18 :
Représentation schématique du CSF avec et sans carbone [17]

C.S.F - R -	C.S.F- R 500 -	C.S.F-A+Carbone -
<p>Carbone</p> <p>SiO₂</p> <p>Eau+Sels solubles</p>	<p>SiO₂</p> <p>Eau+Sels solubles</p>	<p>Carbone</p> <p>SiO₂</p> <p>Eau+Sels solubles</p>
<p>Interface SiO₂-Eau réduite par le carbone fixé</p>	<p>Interface SiO₂-Eau importante</p>	<p>Interface SiO₂-Eau non modifiée par la présence de carbone dispersé</p>
<p>Dissolution de SiO₂ lente</p>	<p>Dissolution de SiO₂ améliorée</p>	<p>Dissolution de SiO₂ non modifiée</p>

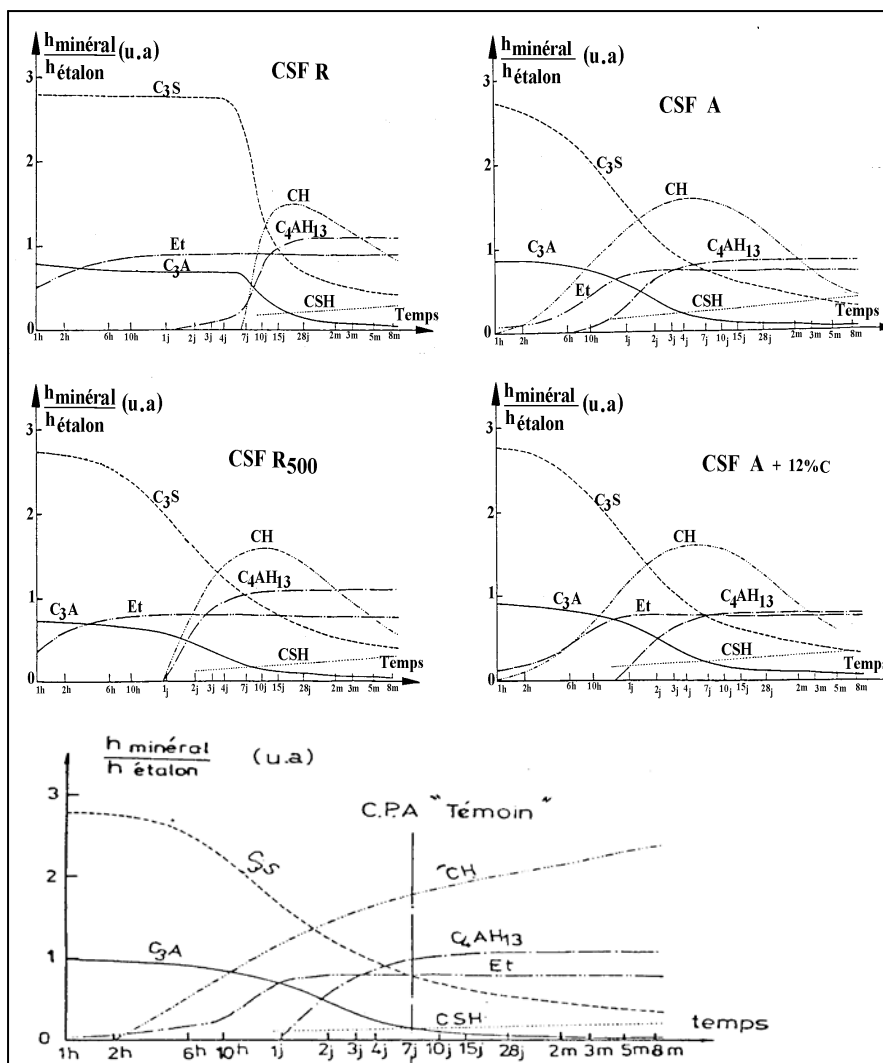


Fig 1-19 : Variation des constituants anhydres et hydratés des liants étudiés en fonction du temps (E/C=0.5, T=20°C) [18].

I-3-2-5-b Influence de la fumée de silice sur la chaleur d'hydratation :

La chaleur libérée par la réaction pouzzolanique est plus faible que celle résultant de l'hydratation du ciment. Le remplacement partiel du ciment par la pouzzolane engendrera une diminution de la chaleur d'hydratation qui augmente avec le volume de remplacement du ciment par la pouzzolane [11,19].

Les résultats représentés sur la figure 1-20 confirment les effets exceptionnels de l'ajout pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation des ciments. Ces effets sont aussi confirmés par les résultats représentés sur la figure 1-21 dans laquelle le ciment est partiellement remplacé par la CSF.

Les résultats de Helland (1987) montrent que le couple CSF+ superplastifiant n'influence que légèrement la quantité de la chaleur libérée pour des faibles rapports E/C (voir fig 1-22).

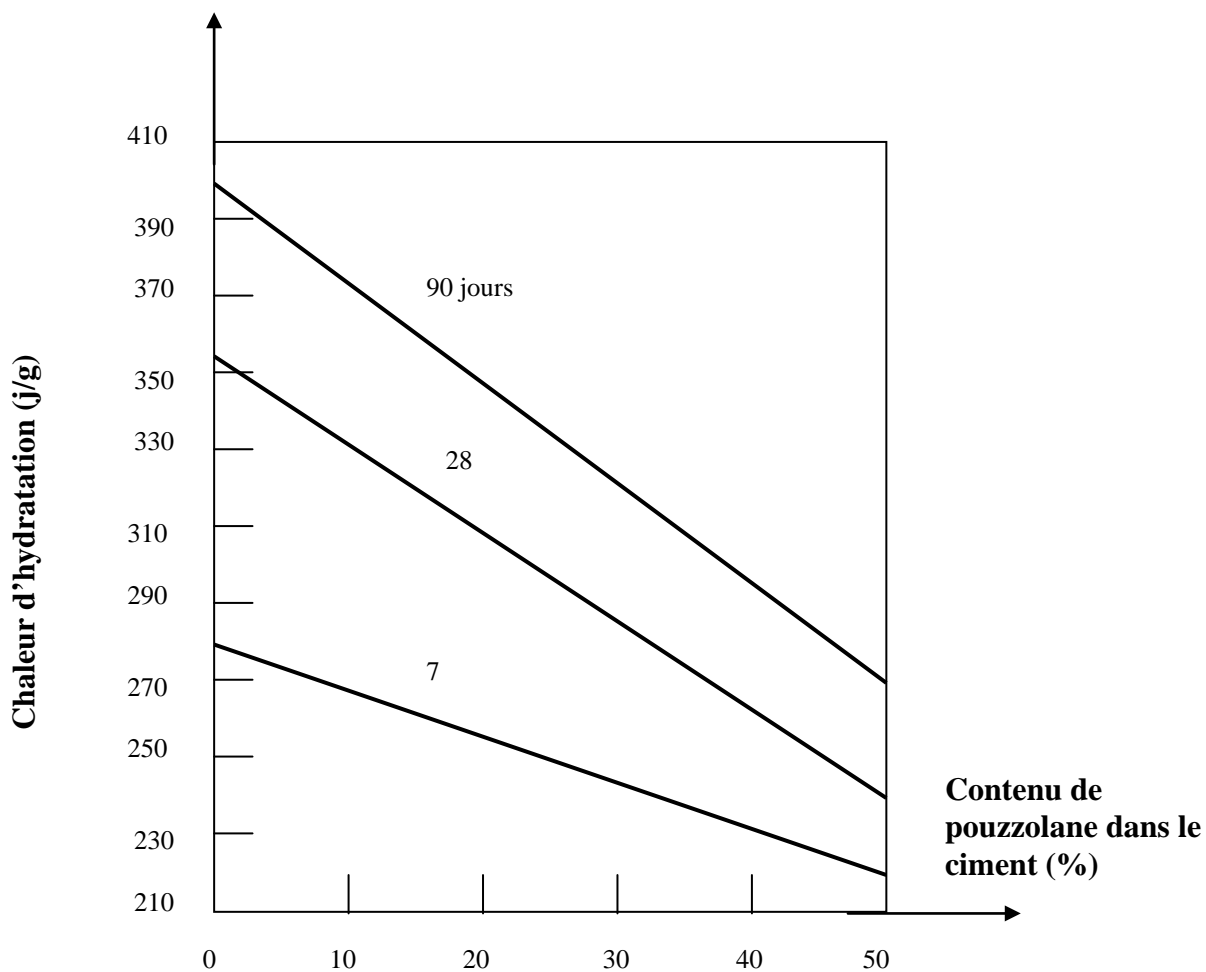


Fig 1-20: L'effet de la pouzzolane sur la chaleur d'hydratation du ciment [11].

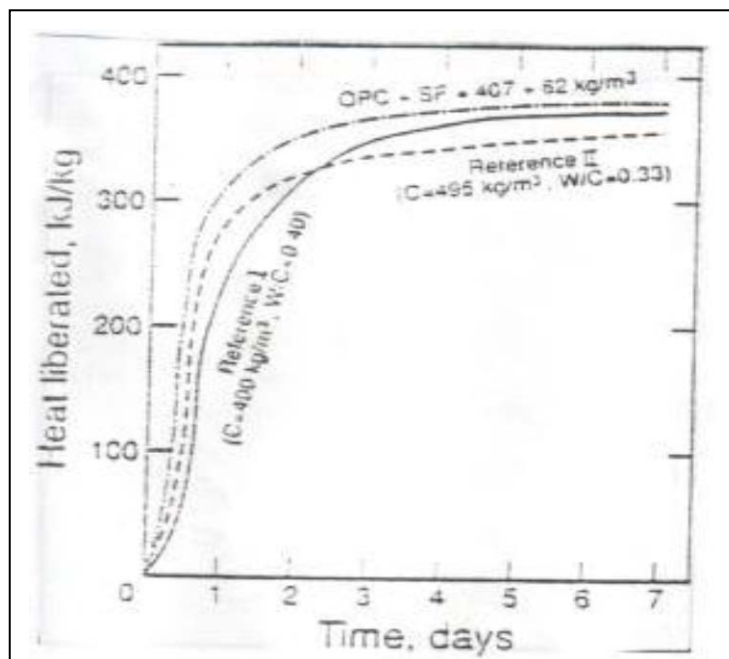


Fig 1-21: L'effet de la fumée de silice sur la chaleur d'hydratation du ciment [11].

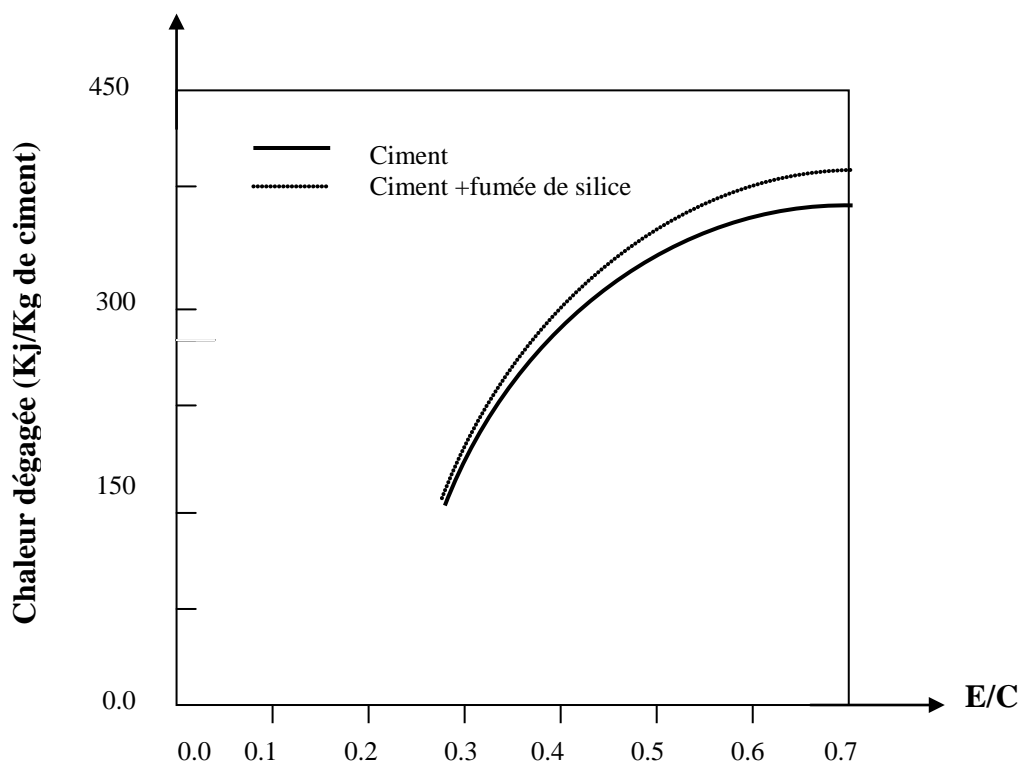


Fig 1-22 : Quantité de chaleur émise dans un essai isotherme à 20°C en fonction du rapport E/C [11].

I-3-3 Essais de consistance et de prise sur la pâte de ciment :

I-3-3-1 Essais de consistance :

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Deux essais normalisés permettant d'apprécier cette consistance :

- essai de consistance avec l'appareil de Vicat (norme EN 196-3)
- essai d'écoulement au cône (norme NF p 18-358)

I-3-3-1-a Essai de consistance avec l'appareil de Vicat «consistance Vicat » :

Cet essai consiste à mesurer l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique (sonde) sous l'effet d'une charge constante (300g).

L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance soit plus fluide.

La consistance est dite normalisée lorsque la distance « d » (distance entre l'extrémité de la sonde ($\phi = 10\text{mm}$) et le fond du moule) égale à $6\text{mm} \pm 1\text{mm}$; quatre minutes après le début du malaxage .

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la consistance :

1- Rapport E/C :

La figure1-23 explique l'influence du rapport E/C sur la consistance, il est constaté que la consistance normalisée est obtenue pour un rapport E/C = 0.25, est pour un

rapport >0.18 l'ajout d'eau se traduit par une fluidification de la pâte, par contre pour des valeurs plus faibles l'ajout d'eau conduit à augmenter la cohésion du mélange .

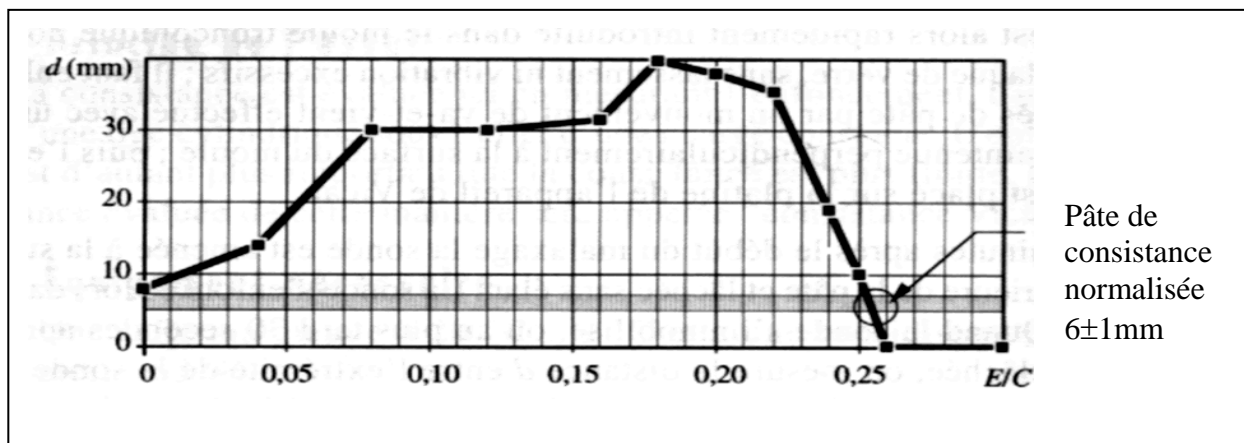


Fig 1-23: Evolution de la consistance d'une pâte de ciment en fonction du rapport E/C [5].

2- Défloculation de la pâte au moyen d'adjuvant :

Il est possible de fluidifier la pâte avec de moindres quantités d'eau en utilisant les plastifiants ou les superplastifiants (voir annexe I des adjuvants).

Les courbes n°1 et 2 de l'essai de consistance représentées sur la figure 1-24 montrent que l'usage de superplastifiant permet une diminution importante du dosage en eau (Pour un ciment sans adjuvant « courbe n°1 » la pâte de consistance normalisée était obtenue pour un rapport E/C = 0.25 ; mais avec adjuvant « courbe n°2 » le même résultat a été obtenu pour E/C = 0.2.)

3- Influence de la fumée de silice :

La pâte n°3 de la figure 1-24 est réalisée à partir d'un ciment composé de 90% de ciment et de 10% de la fumée de silice. La floculation sera plus importante et il faudra un dosage en eau important (E/C=0.28) pour obtenir la consistance normalisée; par contre pour des rapports E/C plus faibles et en utilisant des doses convenables d'adjuvant, on peut obtenir cette consistance avec E/C=0.18 (courbe n°4).

En effet, les grains de la fumée de silice peuvent se substituer en partie à l'eau pour combler les vides entre les grains de clinker; mais cela à condition d'ajouter un adjuvant convenable (voir § I-1-2-5 d).

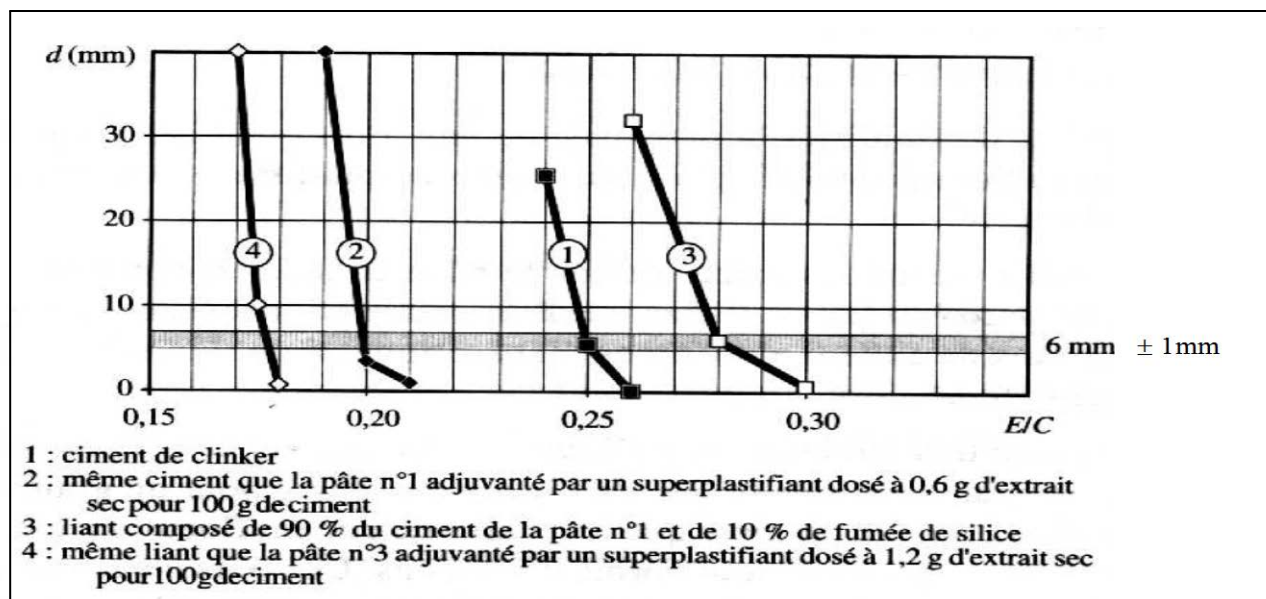


Fig 1-24: Influence de la nature de ciment et des adjuvants sur la consistance normalisée[5].

La fumée de silice joue un rôle de superplastifiant, et ceci a été montré par P.C.AITCIN qui a remarqué qu'un mélange de CPA + adjuvant + fumée de silice est plus maniable (fluide) qu'un mélange CPA +adjuvant (voir fig 1-25).

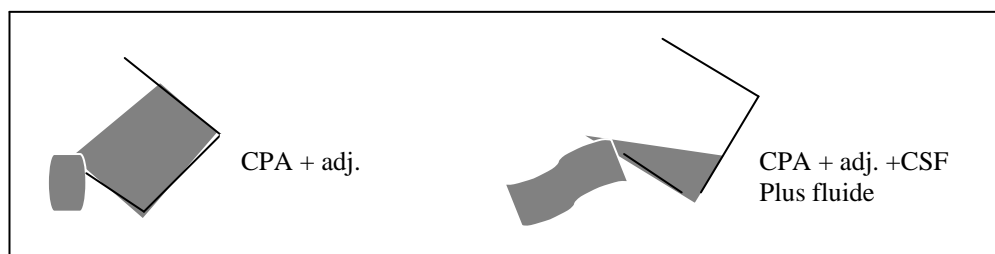


Fig 1-25 : Effet plastifiant de la fumée de silice.

I-3-3-1-b Essai d'écoulement au cône :

Généralement, les pâtes de ciment entrant dans la composition des mortiers ou des bétons, ont des consistances beaucoup plus fluides et donc des dosages en eau plus importants. Quant aux pâtes utilisées pures pour l'injection des câbles de précontrainte, elles sont plus fluides et appelées « coulis »; pour tester la consistance de ces coulis on utilise le cône d'écoulement.

L'essai consiste à mesurer la rapidité d'écoulement du coulis (voir fig 1-26) sous l'effet de son poids propre à travers un ajutage; plus l'écoulement sera rapide et plus le coulis sera réputé être fluide.

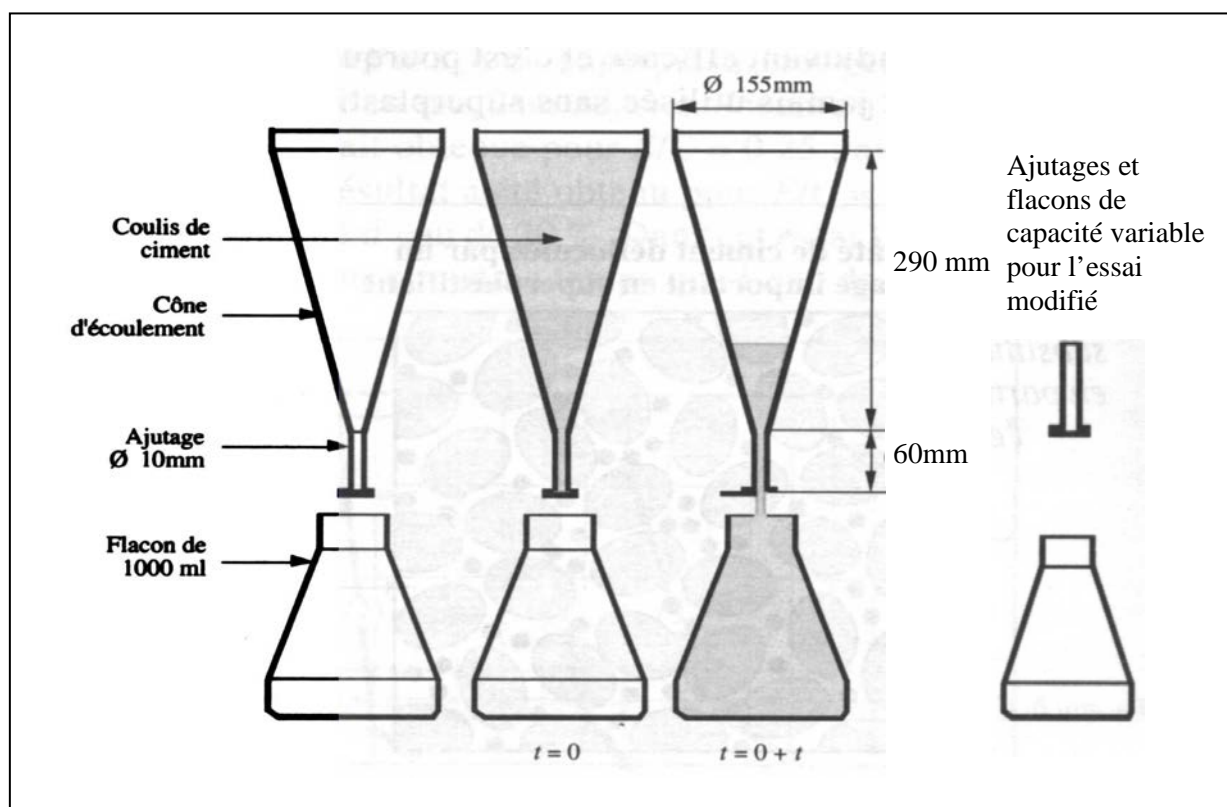


Fig 1-26 :Essai au cône d'écoulement.

I-3-3-2 Essai de prise :

Cet essai consiste à mesurer l'enfoncement de l'aiguille de Vicat de 1.13 mm de diamètre dans le moule en fonction du temps .

Le temps du début de prise est le temps qui correspond à un enfoncement de l'aiguille de 37.5mm, et le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5mm (EN 196-3).

On peut bien déterminer les différentes phases d'hydratation de ciment en traçant une courbe qui représente le cisaillement en fonction du temps .

$$\tau = P / (S_1 + 10 S_p) \quad (1-18)$$

Avec :

P : le poids propre de la sonde (300g).

S_1 : surface latérale immergée de l'aiguille de diamètre ϕ ($S_1 = (40\text{mm} - d)\pi\phi$; et d : distance entre le fond du moule et l'extrémité inférieure de l'aiguille).

S_p : surface transversale de l'aiguille ($S_p = \pi \phi^2 / 4$) (voir fig 1-27).

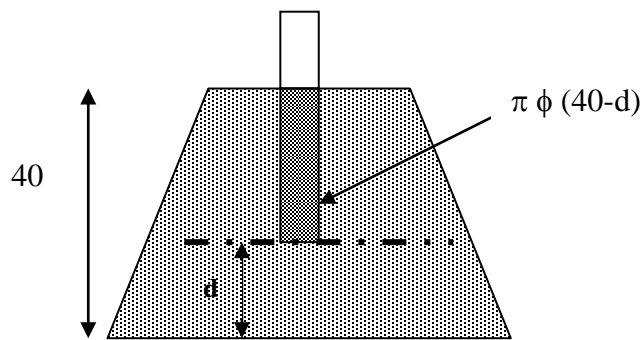


Fig 1-27 : Moule tronconique de l'appareil Vicat.

On peut en parallèle mesurer l'évolution de la température, il est constaté qu'après une rapide augmentation dans les minutes qui suivent le malaxage, la température se maintient à peu près constante pendant une certaine durée, puis augmente à nouveau et de manière beaucoup plus importante .

D'après la figure 1-28, on peut définir :

- La période dormante c'est la période où la température stagne et où la consistance évolue très lentement.
- Le temps du début de prise est le moment où l'hydratation du ciment passe de période dormante à une période beaucoup plus active, au cours de laquelle la pâte de ciment connaît un brusque accroissement de sa viscosité jusqu'au moment où elle atteint la consistance d'un solide, c'est le « temps de fin de prise » au-delà duquel commence le durcissement qui peut durer des années .

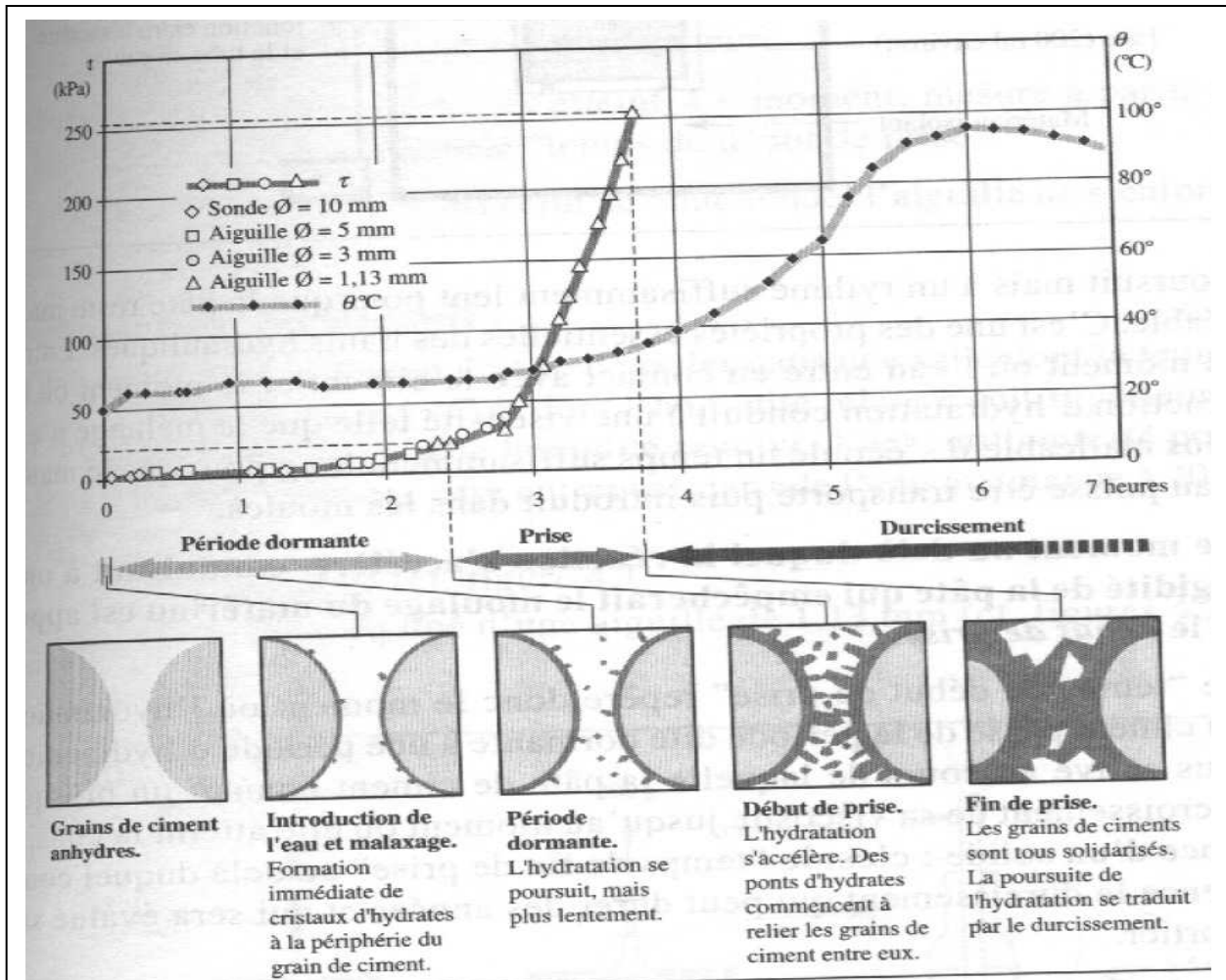


Fig 1-28 : Evolution de la réaction d'hydratation au cours du temps et variation concomitante de l'élévation de température et du taux de cisaillement interne de la pâte [5].

I-3-3-2-a Facteurs influençant la prise :

Les ciments ordinaires ont à 20°C des temps de début de prise entre 2 h 30 min et 4 h 30 min et une fin de prise comprise entre 4 h 30 min et 7 h . De nombreux facteurs influent sur ces durées de prise :

1) Composition de liant :

Les temps de prise d'un ciment portland varient principalement avec la teneur en aluminate tricalcique C_3A , en sulfates de calcium, en alcalis et avec la finesse de mouture :

- Plus la teneur en aluminate tricalcique (C_3A) plus la prise est rapide ; mais on peut facilement retarder la prise par l'ajout de sulfate de calcium (généralement le gypse) .
- La durée de prise est d'autant plus courte que la finesse de mouture du ciment est plus élevée : l'hydratation des grains fins est très rapide .

- Le sulfate de calcium existe en trois formes différentes qui sont : le gypse naturel ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ; l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite naturelle (CaSO_4).
Odler et Wonneman [in 11] ont étudié l'influence de ces trois matériaux sur l'hydratation du C_3A et ils ont montré que pour une même teneur en SO_3 (3%) le temps de début de prise dépend de la nature du sulfate utilisé. Il est plus court avec l'hémihydrate (15 min.). Cette prise rapide est liée à la conversion du gypse. Il devient plus élevé avec l'anhydrite (115 min.) et ensuite avec le gypse (180 min.).
B.Cottin a remarqué que le gypsage optimal se situe entre 2.5 et 5% de SO_3 , même avec le clinker le plus riche en C_3A .

2) Composition du béton :

- L'eau en surplus de celle nécessaire à l'hydratation du ciment joue le rôle de retardateur de prise. D'une façon générale plus le rapport E/C est élevé et plus la prise est retardée .
- Le sable également joue un rôle non négligeable, s'il est renfermé d'argile, celle-ci peut retarder la prise en agissant par enrobage des grains de ciment; c'est pour cela que pour les bétons, généralement, le sable doit avoir un $\text{ES} \geq 80\%$.

Certains adjuvants « chimiques » sont incorporés au béton afin de modifier la prise et le durcissement, ce sont les accélérateurs et les retardateurs de prise et de durcissement (voir annexe I des adjuvants).

3) Influence du milieu :

Dans les essais normalisés les corps d'épreuve sont conservés dans l'eau à 20°C, cela présente les avantages suivants :

température plus uniforme et pas de risque d'évaporation, mais cela présente aussi quelques inconvénients : on s'éloigne des conditions de la pratique, et dans le cas d'utilisation d'adjuvant ou autres produits très solubles il y a risque de diffusion d'une partie des ces produits dans l'eau de conservation .

Le temps de prise est diminué lorsque la température du milieu est élevée et vis versa.

Caractéristiques des BHP

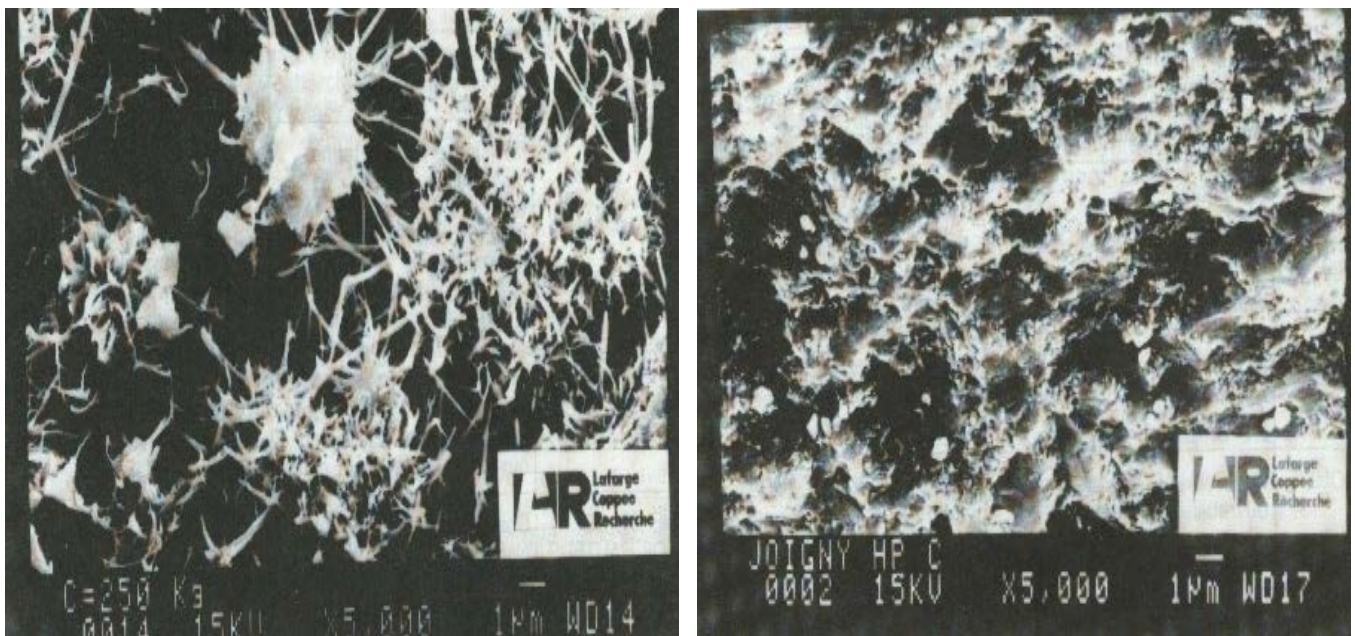
I-4-1 Microstructure des bétons à hautes performances :

Effet de la fumée de silice :

Le remplacement du ciment par la fumée de silice conduit à un système de pore fin . Cet effet de CSF est attribué partiellement à l'effet filler des fines particules de CSF . Cet effet est remarqué aussi pour les autres pouzzolanes constitués de particules ayant une taille similaires aux particules du ciment.

En France, et dans le cadre du projet national [21]; une observation de la microstructure du béton a montré que :

- Dans un BHP de 65 MPa (pont de Joigny), réalisé sans fumée de silice, la porosité capillaire est réduite par rapport à celle du béton ordinaire. La texture des hydrates reste cependant la même et l'interface pâte de ciment – granulats est encore poreuse et cristallisée (voir fig.1-29).
- Dans un BHP de 105 MPa, avec fumée de silice, la matrice est parfaitement homogène, d'apparence amorphe. Les particules de fumée de silice, uniformément réparties entre les grains de ciment sont des sites de nucléation des hydrates. La porosité capillaire est réduite et discontinue, contrairement à celle des autres bétons qui est interconnectée.



a) Béton ordinaire

b) BHP

Fig 1-29 : MEB : microstructure de deux types de béton (béton ordinaire et BHP) sur un même chantier (pont de Joigny)[21].

Les particules de CSF jouant un rôle de filler et de pouzzolane, densifient l'interface pâte de ciment –granulat.

La fumée de silice joue un rôle physique « filler » en se dispersant uniformément dans la pâte de ciment; et elle réagit comme une pouzzolane avec la chaux libérée; elle forme des hydrates liants C-S-H moins bien structurés que ceux du ciment portland (voir fig 1-30 et 1-31) et Ca(OH)_2 en cristaux plus fins que ceux du ciment portland.

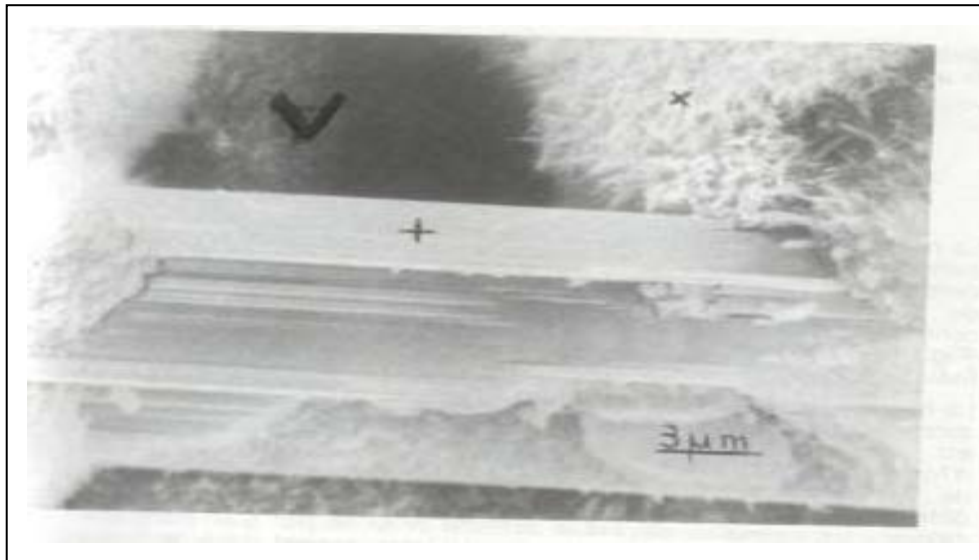


Fig 1-30 : MEB .Pâte de ciment portland à 28 jours
X : C-S-H fibreux , + : Ca(OH)_2 , V : pore capillaire[22].

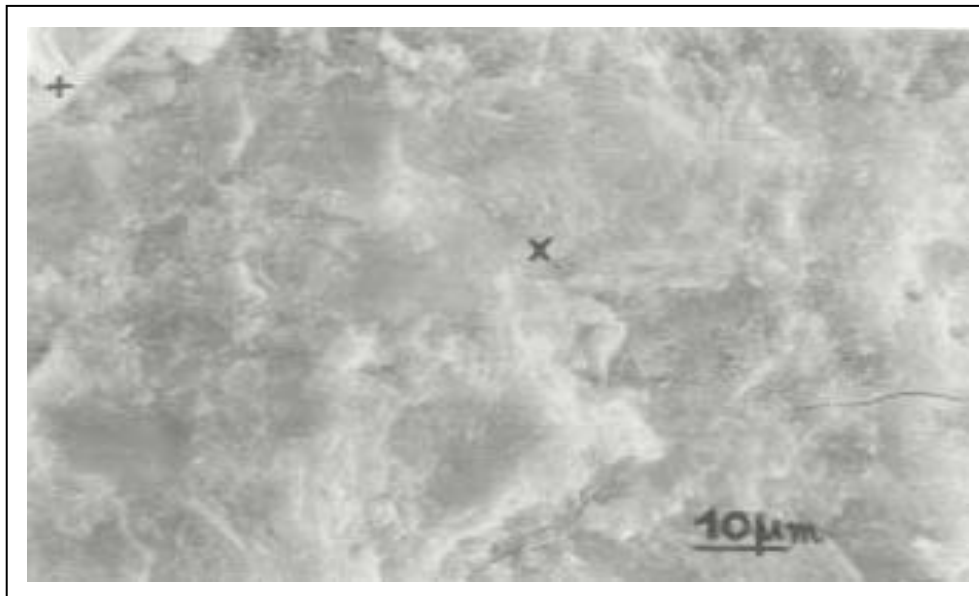


Fig 1-31 : MEB .Pâte de DSP* avec fumée de silice à 28 jours
X : C-S-H fibreux , + : Ca(OH)_2 [22].
• : DSP :Densified System Containing ultra-fine partilcle.

Il apparaît à partir des essais aux MEB (Microscope Electronique à Balayage) réalisés sur des bétons ordinaires B30 et bétons HP B80 (contenant le fumée de silice) [23](voir fig 1-32) que la proportion des grains anhydres du ciment (représentés par des tâches blanches) est plus importante dans le B80 comparativement au B30 à 90 jours d'âge. Ce résultat est dû au faible rapport E/C utilisé pour les B80. Ce faible taux d'hydratation ne nuit en rien aux propriétés des BHP, car le très faible rapport E/C conduit à la formation d'une faible couche de CSH dense servant de colle (matrice) et les grains de C_3S interviennent comme agrégats idéaux vu que la transition continue entre le C_3S et les CSH n'introduit pas de zone interfaciale aux caractéristiques plus faibles.

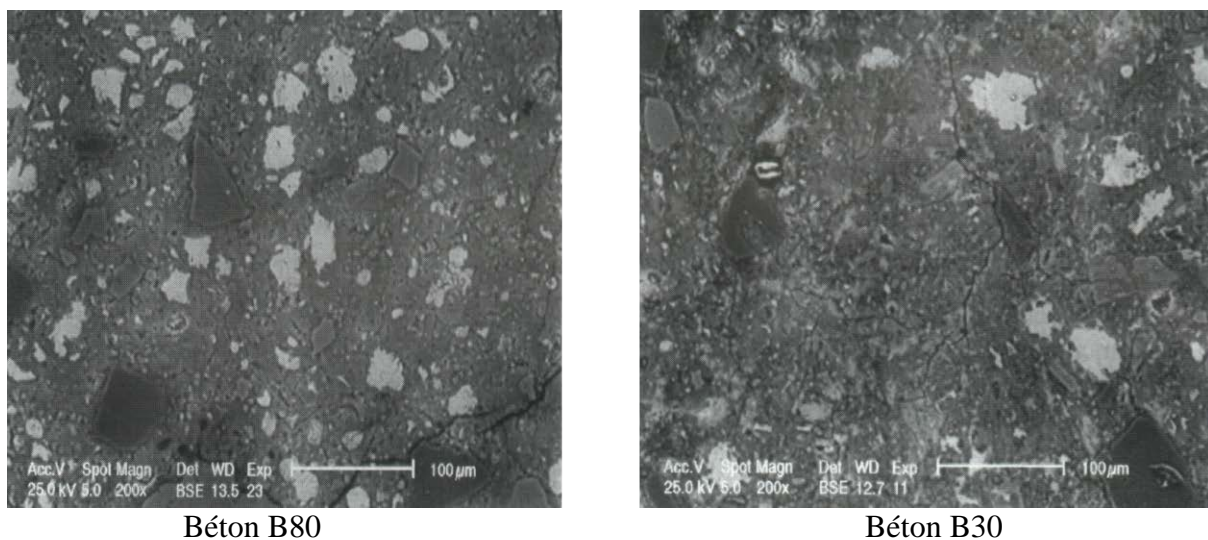


Fig 1-32: Images obtenues au microscope électronique à balayage (grossissement 200) sur la section polie d'échantillons de bétons âgés de 90 jours [23].
(les particules blanches représentent les grains anhydres)

I-4-2 Caractéristiques mécaniques des bétons à hautes performances :

I-4-2-1 Résistance en compression :

C'est la plus importante des propriétés d'usage du matériau ; Des bétons de 280 MPa de résistance mécanique en compression ont été réalisés aux laboratoires danois.

La cinétique de montée en résistance est notablement plus rapide que celle des bétons classiques (voir tableau 1-3). Dès le premier jour la résistance en compression a atteint

27.2 MPa; alors que cette valeur n'est possible qu'au delà du 7^{ème} jour dans le cas des bétons ordinaires.

Age	1 j	3 j	7 j	14 j	28 j	90 j	1 an
Résistance moyenne en compression (MPa)	27.2	72.2	85.6	92.6	101.0	109.6	114.1
Résistance au fendage (MPa)	2.2	5.4	6.4	6.1	6.5	-	-
Module d'Young (6 MPa)	34.9	48.7	51.2	52.4	53.4	53.6	56.8
ft/fc	0.081	0.075	0.075	0.066	0.064	-	-

Tableau 1-3 : Evolution des caractéristiques mécaniques du béton THP[24].

Une extension de la loi de FERËT à été proposé par F.De LARRARD et collaborateurs pour expliquer l'effet de la fumée de silice sur la résistance [25] :

$$f_{c28} = \frac{Kg \cdot R_{c28}}{\left[1 + \frac{3.1 e/c}{1.4 - 0.4 \exp(-11s/c)}\right]^2} \quad (1-19)$$

Où :

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

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

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

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

Dans le domaine des BHP de rapport e/c inférieur à 0.40, la précision de cette formule est de l'ordre de 5 MPa. Cette expression a l'intérêt de séparer l'effet de remplissage de la fumée de silice (illustré par la baisse du rapport e/c) et l'effet pouzzolanique (exprimé par la contribution à la résistance du terme en s/c).

D'autres chercheurs ont lié la variation de la résistance aux modes de conservation : la résistance d'un béton conservé dans l'eau est plus grande que celle d'un béton conservé à l'air libre [7 ; 25].

I-4-2-2 Résistance à la traction :

Celle –ci croit sensiblement, quoique plus modeste que la résistance à la compression. Le rapport (f_t/f_c) peu atteindre la valeur 1/20 pour les bétons les plus résistants. Les résultats expérimentaux suivent bien l'expression réglementaire suivante (pour des résistances <60Mpa):

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 f_{cj}. \quad (1-20)$$

Où f_{tj} et f_{cj} représente respectivement la résistance moyenne au fendage et la résistance caractéristique à la compression à l'âge de j jours (en Mpa).

D'après le tableau 1-4-1 le développement des résistance en traction est plus rapide que celui des résistances en compression .La densification de la matrice et de l'interface pâte –granulat sont à l'origine de l'amélioration de la résistance en traction .Lors des essais de fendage le faciès de rupture est systématiquement transgranulaire (même avec des granulats siliceux), ce qui montre l'homogénéité mécanique du matériau.

I-4-2-3 Module élastique :

Hashin [in [21]] à proposé des expressions mathématiques issues des théories de l'homogénéisation et qui montrent le rôle des trois paramètres essentiels : volume de granulats (g) , module de la pâte (Ep) et module des granulats (Eg) sur le module de béton (E)

$$E = E_p [(1-g) E_p + (1+g) E_g] / [(1+g) E_p + (1-g) E_g]. \quad (1-21)$$

Le module de la pâte sera conditionné par sa compacité .Les termes g et E_g sont peu variables quand on passe d'un béton classique à un BTHP .D'où une croissance assez modérée du module, qui variera de 40 GPa (BTHP à squelette compact tel que celui présenté dans le tableau précédent).

Le développement du module d'Young en fonction du temps suit à peu près celui de la résistance en traction .La formule empirique réglementaire reliant le module et la résistance caractéristique en compression peut être étendue sans difficulté :

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3} \quad (1-22) [24]$$

Par contre Nilson et collaborateurs ont proposé une autre formule qui a été confirmé par les résultats expérimentaux de H.H.MARZOUK (1990) :

$$E_{c_j} = 3320 \sqrt{f_{c_j}} + 6900 \text{ Mpa.} \quad (1-23) [26]$$

I-4-2-4 Le retrait :

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

Il existe trois types de retrait :

- Retrait plastique (avant prise).
- Retrait endogène (pendant la prise et le durcissement).
- Retrait de séchage (à long terme).

A partir du décoffrage ,et lorsque l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne à l'intérieur du béton , des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure ; d'où un retrait d'ensemble (c'est le retrait de séchage).

La présence de la fumée de silice accroît le retrait endogène.

Pour un béton qui contient une grande partie de pâte du ciment et d'eau les pores capillaires sont nombreux et le séchage est accéléré. Dans le béton à haute résistance , la réaction chimique de la chaux avec la silice donne naissance à un silicate de calcium hydraté (CSH) qui remplit les pores capillaires et réduit leur volume libre , ce qui évite la migration de l'eau ;en conséquence le retrait de séchage est réduit .

Nombreux chercheurs [27; 28] ont confirmé que le retrait d'un BHP est plus faible que celui d'un béton ordinaire au delà du 28^{ème} jour.(voir fig. 1-33 et tableau 1-4).

	Béton témoin	Béton THP
Retrait total		
- en fin de l'essai	470	320
- à long terme	650	340
Retrait endogène		
- en fin de l'essai	120	200
- à long terme	120	220
Retrait de la dessiccation		
- en fin de l'essai	350	120
- à long terme		120

Tableau 1-4 : Valeurs numériques comparatives de retraits mesurées (en $\mu\text{m/m}$) sur un béton témoin et un BHP (en tenant compte des retraits initiaux d'hydratation d'avant moulage) [24].

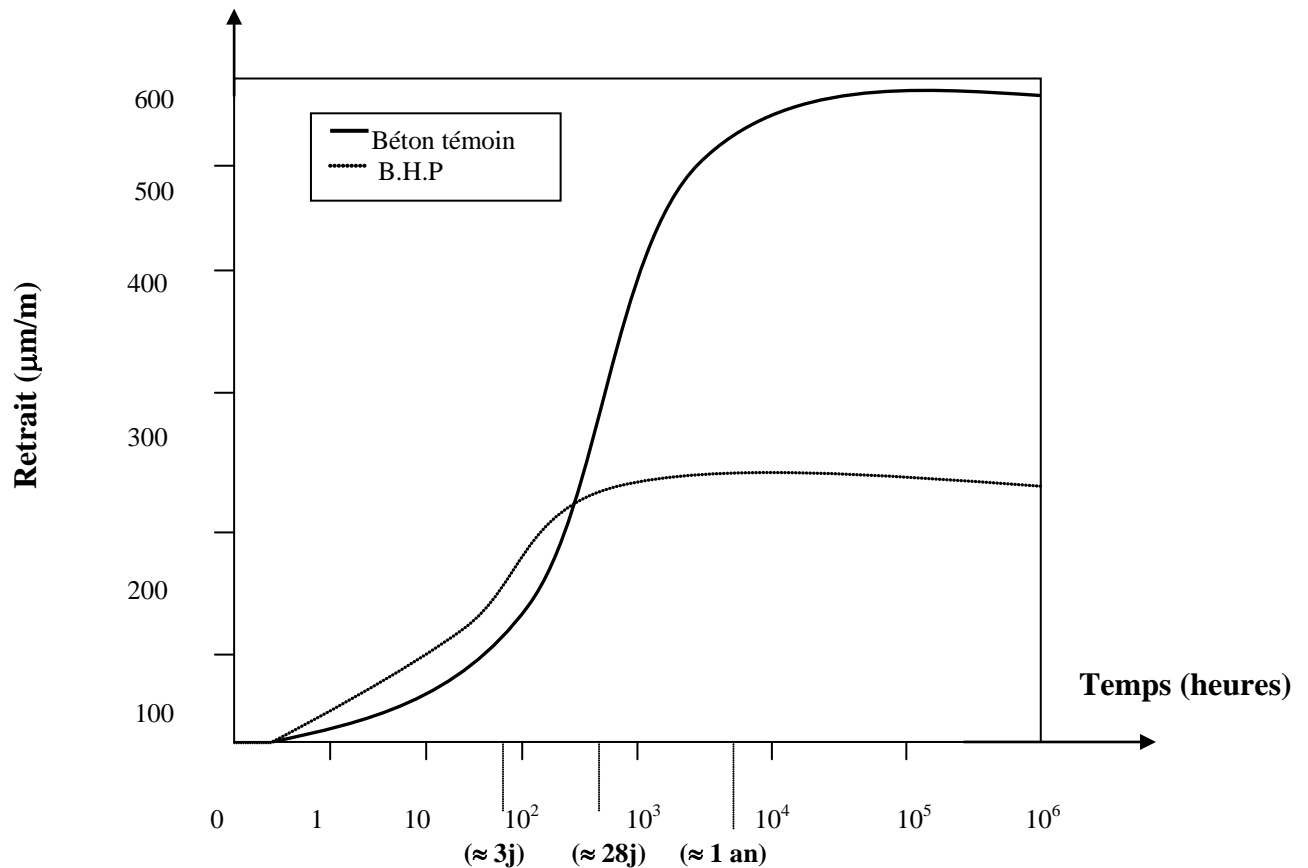


Fig 1-33 :Retrait des bétons à hautes performances [29].

I-4-2-5 Le fluage :

Par rapport au béton témoin de mêmes composants mais sans additifs, le fluage des BHP est réduit de moitié après un an (voir fig.1-34).

De LARRARD a remarqué que le fluage des BTHP se caractérise par une cinétique rapide (à 7 jours de chargement, une proportion de 67 % de la déformation à un an est déjà effectuée, contre seulement 41 % pour un béton témoin).

Le coefficient de fluage ϕ « rapport de déformation différée de fluage à la déformation instantanée $\phi = \zeta_{fl}/\zeta_i$ » décroît fortement. De l'ordre de 2 pour les bétons ordinaires, il est réduit à 1 pour des bétons de 60 Mpa et à 0.50 pour des bétons de 100 Mpa. Cette réduction est d'autant plus sensible que le béton inclut des ultrafines [30].

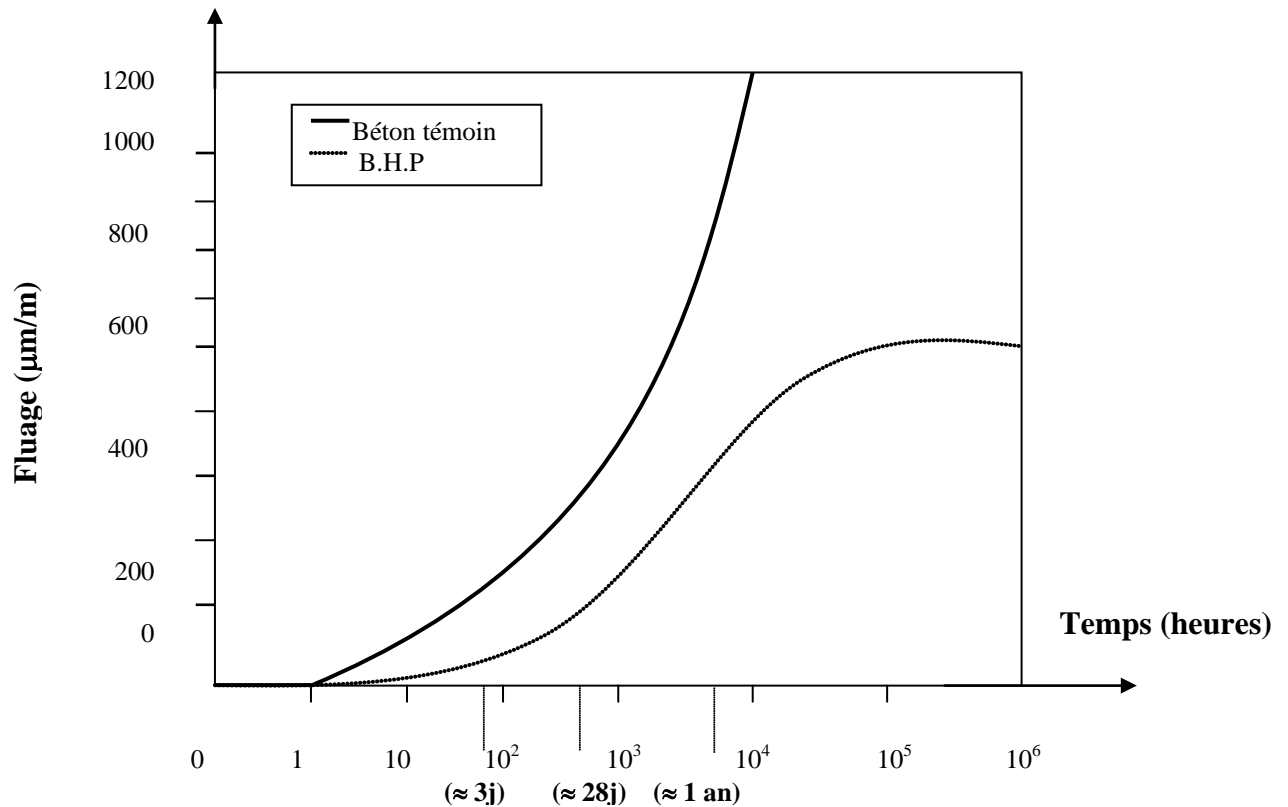


Fig 1-34: Fluage des bétons à hautes performances [29].

I-4-2-6 Adhérence avec les armatures passives :

Plusieurs chercheurs ont procédé à des essais d'arrachement sur les BHP dont on peut citer H.KHELAFI et M.LORRAIN (1992) qui ont fait des essais d'arrachement direct sur un béton à haute résistance et un béton ordinaire. (voir fig. 1-35).

Une comparaison entre la liaison armature –BHP et la liaison armature - béton ordinaire ,les résultats sont représentés sur les figures 1-36 et 1-37 :

D'après la figure 1-4-8 , il est constaté que la liaison acier –BHP est de meilleure qualité que celle associée acier et béton ordinaire pour :

- L'intensité de l'effort d'arrachement correspondant au premier glissement.
- La rigidité de la liaison dans la phase de glissement contrôlé (branche ascendante) .
- La valeur du maximum de la résistance de la liaison « pic ».

La figure 1-4-9 permet d'observer que l'amélioration de la qualité de la liaison acier –béton n'est pas seulement due à une meilleure résistance mécanique du BHP par rapport au béton ordinaire ; mais aussi due à la modification de la microstructure du béton d'enrobage conséquent de l'ajout de CSF et du fluidifiant . La meilleure compacité du BHP d'enrobage

constitue un frein à l'apparition et à la propagation de l'endommagement de la liaison avec l'armature .

En conclusion , la liaison acier –BHP est supérieur à celle mobilisée par le béton ordinaire en raison de sa plus grande résistance mécanique et de la microstructure interne du BHP.

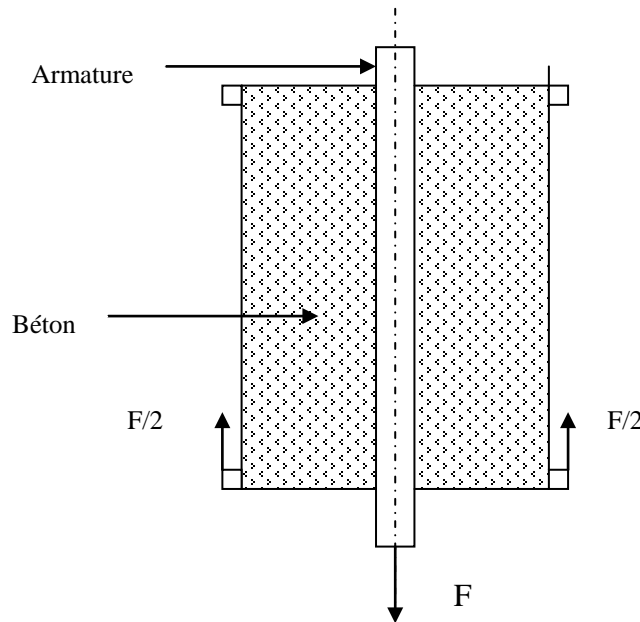


Fig 1-35 :Schéma de l'essai d'arrachement direct [31].

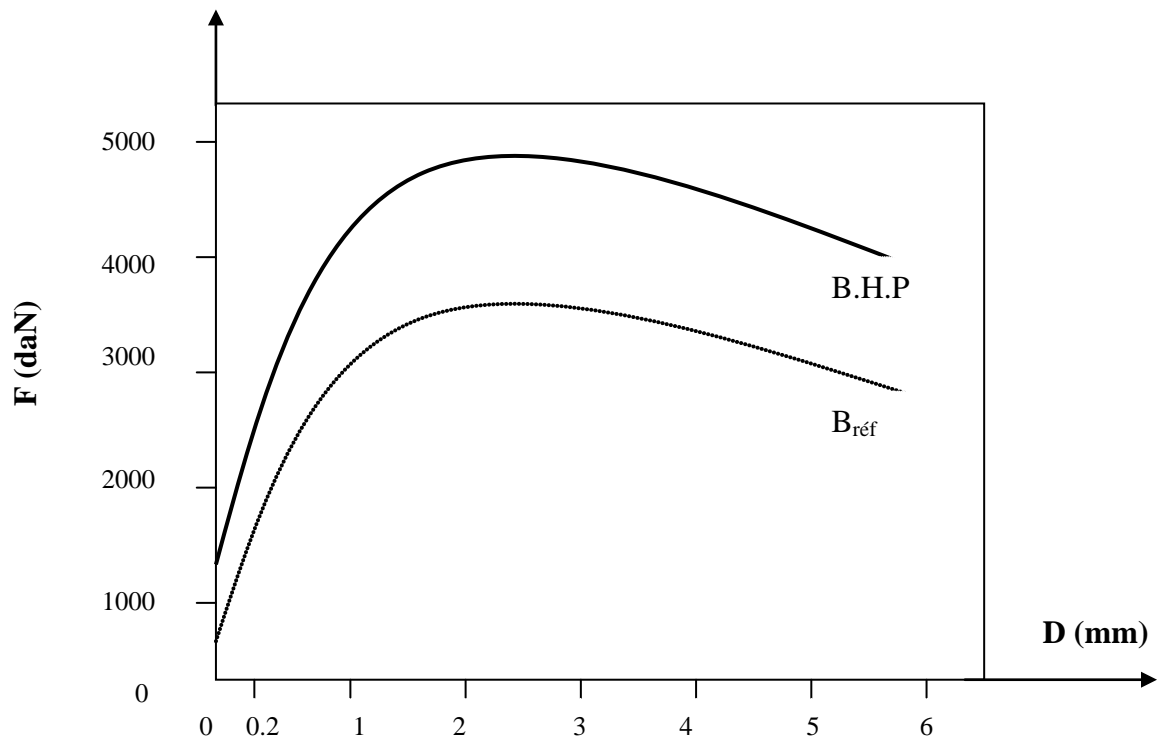


Fig 1-36 :Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de la force F [31].

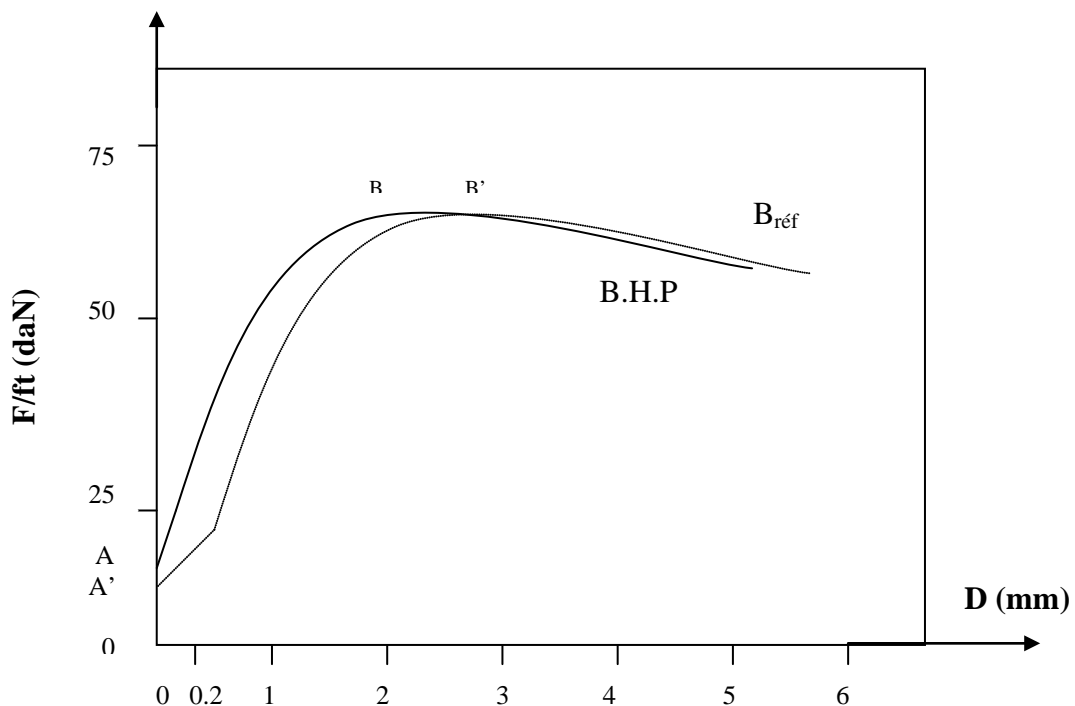


Fig 1-37 : Déplacement de l'extrémité libre de la barre en fonction de F/ft [31].

On remarque :- un retard pour le BHP à l'apparition du premier glissement (A au-dessus de A').

- une rigidification de la liaison dans le cas du BHP (« pente AB » supérieur à « pente A'B' »).

I-4-2-7 Ductilité :

Des essais de compression des BHP font apparaître leur caractère fragile ,et ceci d'autant plus que croît leur résistance [30 ;32].Il faut souligner que ces essais sont effectués sur du béton non armé, mais ce caractère « fragile » est amélioré 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. Le rôle des armatures transversales est donc d'autant plus important que le pourcentage d'armatures longitudinales soit élevé.

I-4-2-8 Durabilité :

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

Le béton ,matériau poreux, est caractérisé par la répartition de la taille des cavités et leur connectivité ,par les discontinuités de micro - texture comme les joints de grain et par la cristallinité des hydrates. A cette porosité est associée une perméabilité qui favorise les transports de fluides susceptibles de créer expansion, fissuration et corrosion des armatures.

Les BHP et les BTHP résistent mieux aux attaques chimiques que les bétons ordinaires.

La carbonatation peut détruire le film de passivation des aciers, et le taux de corrosion de l'armature dépend de la résistivité électrique du béton ; des travaux Norvégiens ont montré que les CSF augmentent la résistivité électrique du béton d'où limitation de la corrosion de l'acier.

D'autres essais effectués sur la résistance aux cycles de gel /dégel montrent que les BHP et BTHP ont des réseaux de pores tellement fins qui empêchent la formation de glace, même si le béton est saturé d'eau [21] (pour les pores capillaires ayant un diamètre inférieure à 0.05mm, l'eau gèle à partir de températures inférieures à -10°C).

Conclusion

La formulation des bétons à hautes performances passe obligatoirement par l'utilisation d'adjuvant appartenant à la famille des superplastifiants réducteurs d'eau . En effet ; c'est grâce à ces adjuvants que l'on arrive à fabriquer des bétons contenant une faible teneur en eau et possédant une maniabilité élevée.

De nombreux sous produits industriels tels que: les laitiers de hauts fourneaux et les fumées de silice peuvent s'ajouter au ciment portland . Ces résidus associés aux fluidifiants donnent en définitif des béton à hautes performances ayant des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques beaucoup plus performantes que celles des bétons ordinaires.

La fumée de silice qui est un sous produit de l'industrie électrométallurgique joue deux rôles :

- Rôle des remplissage : La grande surface spécifique des CSF lui permet de s'insérer entre les grains de ciment et diminuer ainsi le pourcentage et la dimension des pores.
- Rôle pouzzolanique : La nature chimique et l'état vitreux des CSF la rend capable de réagir avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment, ce qui conduit à la formation des hydrosilicates (CSH) compactes contribuant à l'augmentation de la résistance mécaniques, de plus la CSF diminue la chaleur d'hydratation et le retrait d'origine thermique.

Donc en définitif l'ajout de la CSF conduit à la réalisation des béton ayant de grandes résistances mécaniques et une bonne compacité d'où une bonne durabilité aux différents agents agressifs extérieurs , et aussi des bétons à faibles déformations et bonne adhérence avec l'acier.

Malgré les recommandations exigées pour pouvoir réaliser les BHP, plusieurs chercheurs algériens ont réussi à améliorer les résistances du béton et ceci en utilisant les matériaux locaux que ce soit avec ou sans ajouts (qui sont généralement les laitiers de hauts fourneaux ; les pouzzolanes et les tufs) [26 ;33 ;34 ;35].

Le but de notre recherche est d'améliorer les propriétés du béton en utilisant les matériaux locaux , pour ce thème les matériaux utilisés sont :

- Un ciment (CPJ 45) provenant de la cimenterie de RAIS-HAMIDOU d'Alger.
- Des granulats provenant de la carrière Jobert d'Alger.
- Un fluidifiant produit de GRANITEX de Oued Smar .

Le coût élevé des CSF et leurs non-disponibilité en Algérie nous a conduit à utiliser un autre ajout filler siliceux et comparer les résultats avec celles d'un béton à base de CSF ; notre choix a été porté sur le sable de dune finement broyé avec l'interrogation suivante :

« Le broyage poussé d'un sable de dune siliceux cristallisé conduit –il à la formation de CSH en présence de chaux » ? En d'autres termes : « La réaction pouzzolanique est-elle possible à base d'un sable siliceux cristallisé mais broyé finement » ?

Le programme d'essai est établi en deux phases :

- La première phase d'essais est consacrée à l'étude des caractéristiques fondamentales des matériaux utilisés dans ce travail tant à l'état anhydre qu'hydraté.
- La deuxième phase englobe les résultats obtenus des différents essais réalisés.

Techniques Expérimentales

II-1-1 Introduction :

Cette étude est consacrée à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton tout en utilisant les matériaux locaux et en introduisant le sable de dune finement broyé comme ajout.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Un ciment (CPJ 45) provenant de la cimenterie de RAIS-HAMIDOU d'Alger.
- Des granulats provenant de la carrière Jobert d'Alger.
- Un fluidifiant produit de GRANITEX de Oued Smar .
- Un sable de dune de BOUSAADA finement broyé.
- Et à titre comparatif une quantité de CSF d'origine française.

Dans cette partie on présentera les essais effectués à savoir :

- Les essais d'identification physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés à l'état anhydre.
- Les essais sur les pâtes de ciment à différents pourcentages de sable de dune ; et pour répondre à la question suivante : « **La réaction pouzzolanique est-elle possible à base d'un sable siliceux cristallisé mais broyé finement** » ? ; une analyse par diffraction des rayons X a été effectuée à cet effet.
- Après la détermination de la composition du béton par la méthode de DREUX-GORISSE ; une série d'essais mécaniques a été effectuée sur les différentes compositions de bétons à différentes proportions d'ajouts à l'état frais et durci.

II-1-2 Identification physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés :

II-1-2-1 Essais sur les liants :

a) Analyses chimiques :

Le Ciment :

Le ciment utilisé est un CPJ 45 provenant de la cimenterie de **RAIS-HAMIDOU** (Alger) de SSB 3204 cm²/g et de densité 3.15.

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de RAIS-HAMIDOU.

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 2-1 suivant :

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CaO (libre)	SO ₃	P.F	Insolubles
% pondéral	19.48	5.06	3.72	61.95	0.85	1.63	1.1	3.44	1.26

Tableau 2-1 : Composition chimique du ciment de RAIS HAMIDOU

Les Ajouts minéraux :

Deux ajouts ont été utilisés : le sable de dune de Bousaada de masse volumique réelle 2.41g/cm³ et la fumée de silice d'origine française (Dunkerque). Le tableau suivant résume l'analyse chimique des deux ajouts.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	P.F
Sable de dune	86.04	1.35	6.63	0.86	0.08	5.00
Fumée de silice	94.76	-	1.01	1.6	1.3	1.12

Tableau 2-2 : Composition chimique des ajouts utilisés.

L'analyse chimique des deux ajouts montre que leur nature est siliceuse 86.04 % de silice pour le sable de dune et 94.76 % pour la fumée de silice.

b) Diffraction aux rayons X :

La diffraction aux rayons X est un procédé de diagnose qui présente de nombreux avantages :

- ❖ Rapidité d'exécution.
- ❖ Possibilité ; dans certains cas, de dosages quantitatifs.
- ❖ Identification de minéraux et pas seulement, comme le fait l'analyse chimique, d'éléments. C'est en effet une erreur, malheureusement, répandue en Génie civil que de vouloir résoudre de nombreux problèmes par analyse chimique. Or la plupart des propriétés des matériaux sont liées aux minéraux et non aux éléments chimiques et c'est bien l'analyse diffractométrique qu'il faut choisir.

Principe d'essai :

Les cristaux constituent des réseaux naturels dont les intervalles caractéristiques (intervalles entre plans réticulaires) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. En conséquence, les rayons X sont diffractés par les cristaux comme la lumière par les réseaux et donnent des phénomènes d'interférences identiques [36].

La figure ci- après montre que, pour des plans d'équidistance «d» frappés sous un angle θ par un rayonnement de longueur λ , la différence de marche d'un plan au voisin sur la direction de réflexion est :

$$\delta = MB + BN = 2.d.\sin\theta. \quad (2-1)$$

La condition pour qu'il y ait accord de phase donc diffraction est :

$$2.d.\sin\theta = k \lambda \quad (2-2)$$

C'est la condition de réflexion sélective, due à Bragg.

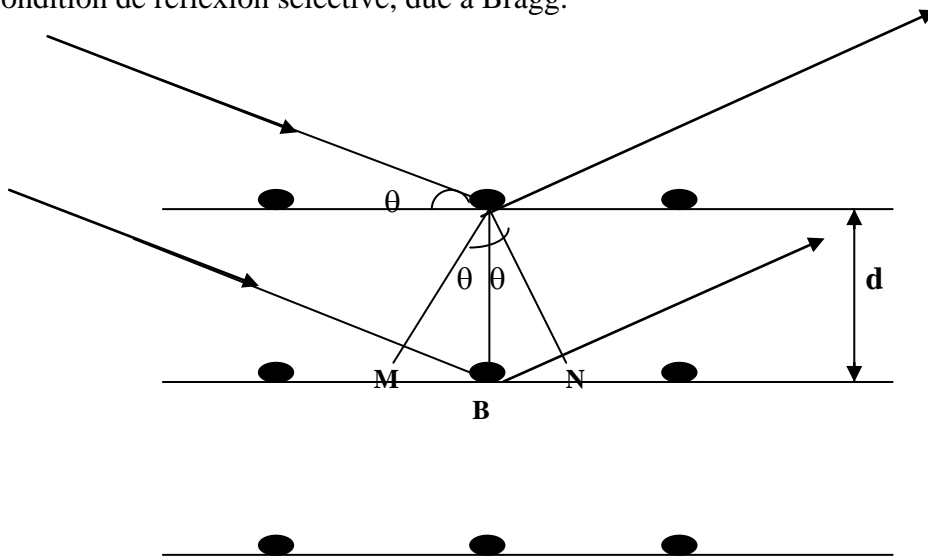


Fig 2-1 : Démonstration de la loi de Bragg .

Méthode d'analyse diffractométrique :

Parmi les diverses méthodes possibles, la méthode la plus couramment utilisée est celle de Debye- Scherrer, dite *méthode des poudres*.

Le montage est schématisé sur la figure suivante ; le matériau, broyé en poudre est placé dans un porte échantillon, offrant ainsi une face plane au rayonnement. Il tourne à une vitesse de θ°/min Un compteur, fixé sur un goniomètre et animé d'une vitesse de rotation de $2\theta^\circ/\text{min}$ mesure le rayonnement diffracté (Ou bien on peut avoir l'échantillon fixe et le compteur tournant). On peut obtenir, en définitif, un diagramme caractéristique du matériau, comportant des raies d'intensité bien définie pour des valeurs angulaires elles même définies. Le dépouillement du diagramme conduit à identifier le (ou les) minéral(aux) renfermé(s) dans le matériau.

L'analyse diffractométrique utilisée sur nos matériaux a été effectuée au niveau de laboratoire « minéralogie » de la faculté de sciences de la terre (USTHB) .

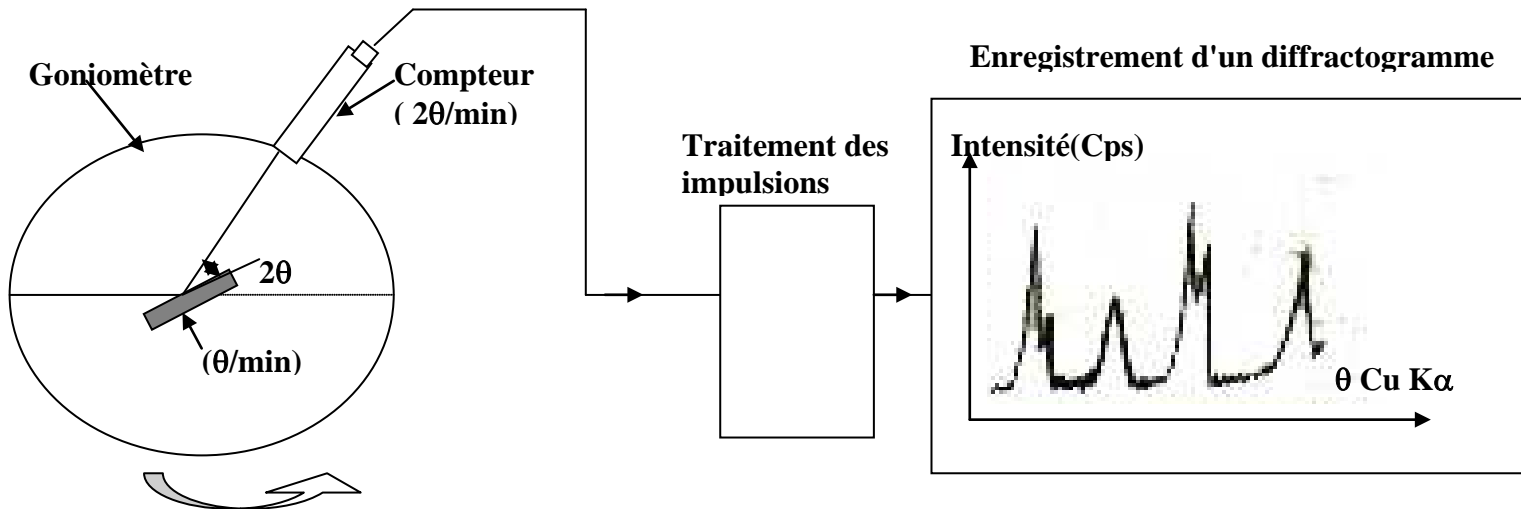


Fig 2-2 : Schéma de principe d'un diffractomètre X

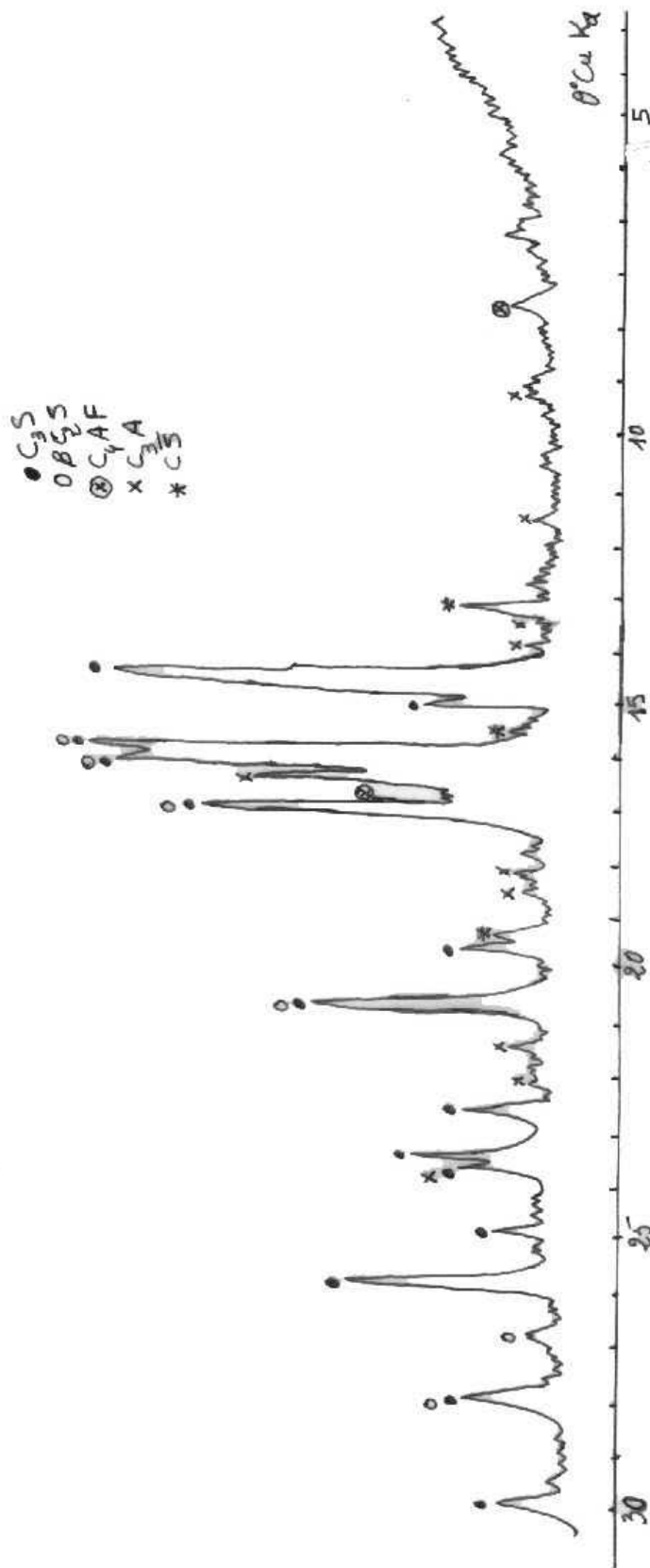
Les diffractogrammes X des trois liants sont représentés ci-après (voir fig. 2-3).

A partir de l'analyse chimique et de diffractogramme X du ciment, nous avons procédé à la détermination du potentiel de BOGUE :

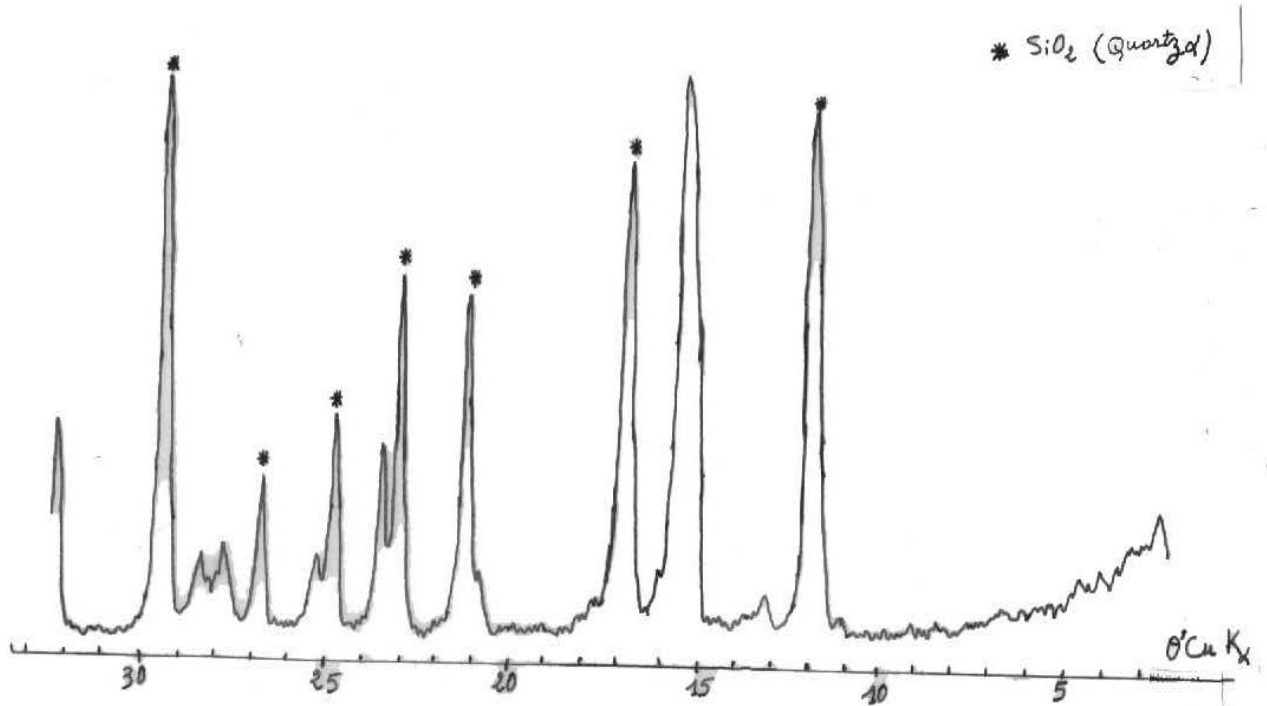
Elément	C ₄ AF	C \bar{S} H ₂	C ₃ A	C ₃ S	βC ₂ S	C (libre)
%	11.31	2.37	7.12	55.03	14.64	1.63

Tableau 2-3 : Composition minéralogique du ciment utilisé

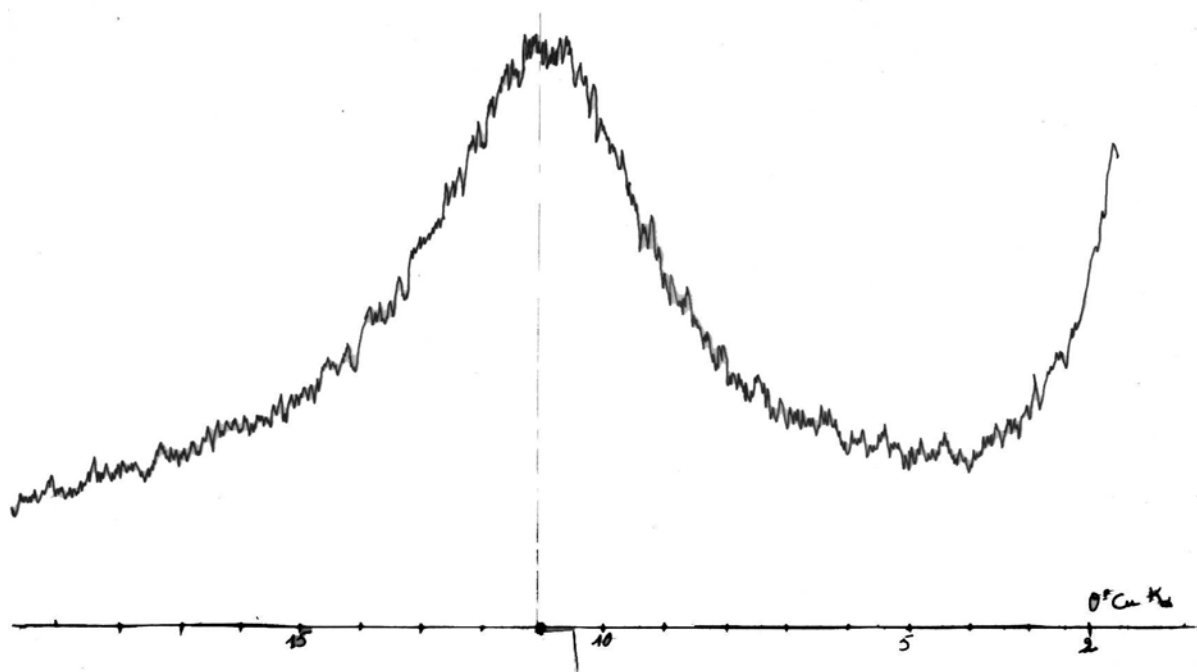
L'analyse chimique des deux ajouts montre que leur nature est siliceuse (86.04 % de silice pour le sable de dune et 94.76 % pour la fumée de silice), et ceci a été confirmé par la DRX qui montre que le sable de dune est constitué de SiO₂ de type quartz α qui est cristallisé contrairement au CSF qui est amorphe, ce qui est traduit par un halo centré à 4.26 et 4.08 Å° correspondant aux pics principaux de la «cristobalite» et de la «trydimite» et en majorité la cristobalite vu que la CSF a été obtenue à très hautes températures.



a) Ciment CPJ45 anhydre.



b) sable de dune.



c) CSF

Fig 2-3 : Diffractogrammes de rayons X des matériaux utilisés.

c) Mesure de la surface spécifique Blaine (SSB) : (Norme NF P 15-442)

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

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

Avec : - K : Constante de l'appareil (K =23.65).

- e : Porosité (en général e =0.5).

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

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

La surface spécifique des matériaux utilisés est :

3204 cm² /g pour le ciment.

5280 cm²/g pour le sable de dune broyé.

Tandis que pour la fumée de silice elle est supérieur à 10000 cm²/g , elle ne peut pas être mesurée par cet appareil (elle doit être mesurée par la méthode BET).

II-1-2-2 Essais sur granulats :

Le sable :

Le sable utilisé est un sable de rivière dont l'analyse granulométrique est donnée au tableau 1 ; son module de finesse est égale à 3.62. Cette valeur correspond à un sable grossier.

Les graviers :

Les graviers utilisés sont issus de la carrière JOBERT d'ALGER ; ce sont des graviers concassés de bonne qualité, et de classe 3/8 et 8/15.

a)Caractérisation des granulats :

Les granulats (sable et graviers) ont une influence directe sur les caractéristiques physiques et mécaniques du béton frais et durci. Pour avoir donc un béton maniable, résistant et durable, il faut caractériser et optimiser au maximum les matériaux utilisés.

La caractérisation des granulats fait l'objet d'une série d'essais qui sont effectués au laboratoire de MDC (département Génie Civil) conformément aux normes françaises AFNOR.

♦ **Analyse granulométrique :** (NF P18-560)

Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

La courbe granulométrique de chaque famille de granulats est représentée en figure 2-4.

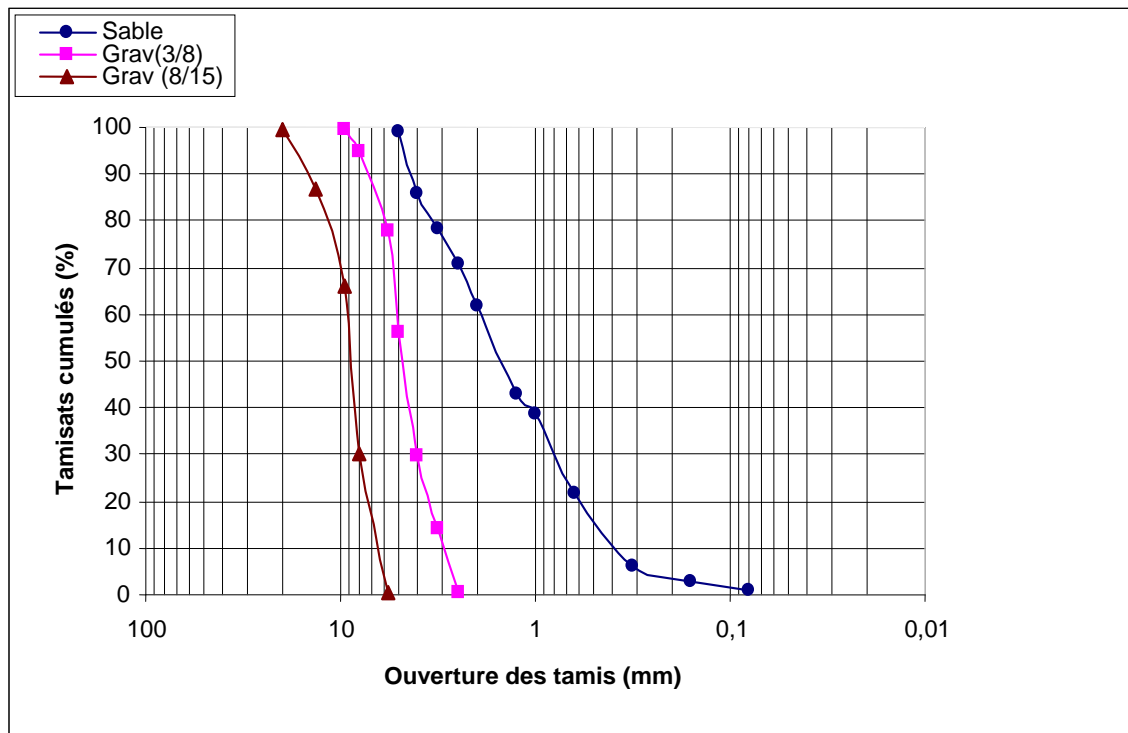


Fig 2-4 : Courbe granulométrique des différentes classes de granulats.

♦ **Essai d'équivalent de sable :** (NF P18-598)

Cet essai est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il consiste à séparer les particules fines des éléments sableux plus grossiers ; l'échantillon est lavé selon un processus normalisé puis on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (voir figure2-5).

Avec : H_1 : la hauteur du sable propre +éléments fins.

et H_2 : la hauteur du sable propre.

L'équivalent de sable est donné par :

$$Es = 100 \times H_2 / H_1 \quad (2-4)$$

Le sable utilisé dans ce travail a un équivalent

de sable $Es = 84.22 \%$.

C'est un sable propre et convient aux bétons de qualité à hautes résistances.

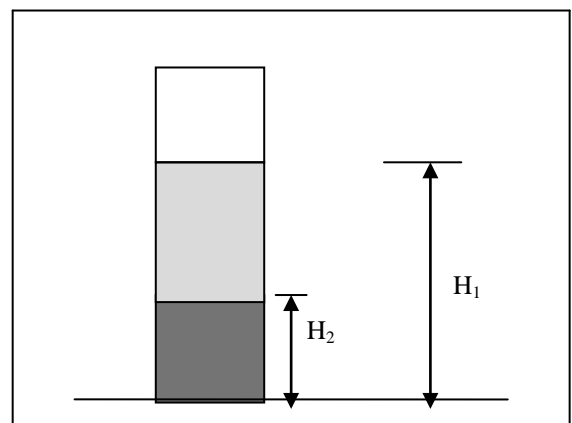


Fig 2-5 : Essai d'équivalent de sable.

♦ **Module de finesse :** (NF p18-304)

Le module de finesse d'un sable est égal à $1/100^{\text{ème}}$ de la somme des refus exprimés en pourcentage sue différents tamis de la série suivante : 0.16 -0.315-0.63 -1.2 -2.5 -5 -10 -20 -40 -80. Pour notre sable le module de finesse est $Mf = 3.62$ [37].

Cette valeur correspond à un sable grossier, et selon DREUX c'est un sable à utiliser pour les bétons à haute résistance, mais il aura une moins bonne ouvrabilité et un risque de ségrégation.

♦ **Essai de propreté** : (NF P18-591)

L'essai consiste à laver un échantillon de gravier sur le tamis 50µm ; la teneur en impuretés fines est le pourcentage de passant à ce tamis. Selon la norme (NF P18-301) cette valeur ne doit pas excéder 5% (pour les bétons à haute résistance mécanique), mais pour certains auteurs (comme G. DREUX) cette valeur est trop élevée, il propose qu'on ne doit pas dépasser 1.5% [37].

Pour les deux classes de graviers on a trouvé :

- Gravier (3/8) : 3.1%

- Gravier (8/15) : 1.09%

♦ **Masses volumiques** :

Pour étudier la formulation d'un béton, il est indispensable de connaître la masse volumique des granulats.

Il s'agit de déterminer le volume occupé (en vrac, apparent ou réel) par une masse sèche M du matériau à tester.

Pour nos granulats on est arrivé aux résultats suivants :

Masse volumique (g/cm ³)	Classe		
	Sable	3/8	8/15
En vrac (ρ ₃)	1.71	1.34	1.42
Apparente (ρ ₂)	-	2.37	2.37
Réelle (ρ ₁)	2.6	2.4	2.4

Tableau 2-4 : Masses volumiques des granulats.

♦ **Essai de porosité** :

Toutes les roches présentent, dans une proportion plus ou moins grande, des fissures ou des petits vides, qui renferment souvent de l'eau. Certaines cavités communiquent (directement ou non) avec l'extérieur : elles constituent la « porosité ouverte » ; les autres composent « porosité fermée ».

C'est la porosité intragranulaire qui est la plus importante en construction, car l'eau peut pénétrer dans ces pores, et geler en faisant éclater la roche.

la porosité ouverte d'un granulat est le rapport entre le volume des vides au volume apparent de la matière :

$$P \% = \frac{V_2 - V_1}{V_2} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \times 100 \quad (2-5)$$

Avec : ρ_2 masse volumique apparente et ρ_1 masse volumique réelle.

En général on détermine la porosité ouverte et non la porosité intragranulaire. A cet effet on assimile la porosité ouverte à la capacité d'absorption massique donnée par la formule suivante :

$$P \% = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad (2-6)$$

Avec : M_1 est la masse du matériau à l'état saturé d'eau.

M_0 est la masse du matériau à l'état sec.

Selon la norme NF p18-301 : la porosité des agrégats doit être inférieure à 5% pour les bétons des résistances élevées.

Les résultats trouvés sont représentés dans le tableau (2-5) :

Classe	Porosité (P %)
3/8	2.46
8/15	0.1

Tableau 2-5 : Porosité des granulats

On remarque que c'est un gravier très compact et convient aux bétons de hautes résistances.

b)Récapitulatif des résultats :

Le tableau ci-après récapitule les résultats :

Essai	Résultat	Remarques et observations
Equivalent de sable NFp18-598	ES =84.22%	Sables propre qui convient au béton de qualité à haute résistance, et béton exceptionnels.
Module de finesse NFp18-304	Mf =3.62	Sable grossier à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais il y aura risque de ségrégation et une moins bonne ouvrabilité.
Essai de propreté NFp18-591	Classe3/8 : 3.1% Classe8/15 : 1.09%	Gravier propre
Essai de porosité	Classe3/8 : 2.46% Classe8/15 : 0.1%	Gravier compact à utiliser pour viser résistances élevées et compacité maximum.

Tableau 2-6 : Tableau récapitulatif.

II-1-2-3 Confection du béton :**a) Formulation d'une composition optimale :**

Les performances requises pour un béton impliquent :

- ◆ Une consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'affaissement au cône d'Abrams « A ».
- ◆ Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours « f_{c28} ».
- ◆ Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment C_{\min} et un rapport $(E/C)_{\max}$.

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût (elle consiste presque toujours à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité). Or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre, mais elles varient en sens inverse.

La recherche de ces deux qualités simultanément conduit souvent à rechercher d'autres qualités agissant surtout sur la durabilité telles que : l'étanchéité et la résistance à l'usure, c'est pour cela, il est difficile d'élaborer une théorie permettant de prendre en compte ces nombreux paramètres et d'aboutir à la meilleure composition donnant un béton qui présente toutes les qualités souhaitées.

La méthode de DREUX - GORISSE :

C'est une méthode simple, elle représente une synthèse de plusieurs méthodes basées sur la connaissance préalable d'une courbe granulométrique de référence telles que les méthodes d'Abrams, de Bolomy, de Caquot, de Joisel et Faury.

On aura comme résultat définitif :

	% des matériaux	Masse des matériaux (Kg/m³)
Gravier 3/8	6.4%	103.79
Gravier 8/15	63.6%	1007.13
Sable S	30%	521.26
Ciment C	-	450
Eau E	-	189

Tableau 2-7 : Récapitulatif du dosage des matériaux

b) Malaxage du béton :

Le malaxage du béton est effectué selon la norme NF P 18-404 .

Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

- ✓ Placer les gros graviers, liant (ciment + ajout) et le sable .
- ✓ Malaxer à sec pendant 1 mn.

- ✓ Ajouter l'eau d'une façon uniforme et malaxer pendant 2 mn (pour les bétons avec adjuvant le superplastifiant est introduit dans la deuxième partie d'eau de gâchage et malaxé pendant 30 secondes –voir la fiche technique-).
- ✓ Directement après le malaxage on remplit les moules à raison de deux couches , la vibration du béton a été effectué à l'aide de l'aiguille vibrante de 30mm de diamètre.
- ✓ Enfin araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- ✓ Les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le moule pendant 24 heures.
- ✓ Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et conservées dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à la date d'essai.

c) Programme des essais :

Nos essais portent sur :

- Six éprouvettes cubiques de 14 cm de côté pour chaque variante, pour mesurer la résistance à la compression et le module d'élasticité à 7 et 28 jours.
- Six éprouvettes prismatiques (7x7x28) pour chaque variante, pour mesurer la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours.
- Trois éprouvettes prismatiques (7x7x28) pour chaque variante, pour mesurer le retrait, la capillarité et la capacité d'absorption massique.
- Pour les variantes de béton sans ajouts des éprouvettes cylindriques (16/32) ont été confectionnées pour mesurer la résistance à la compression à 90 jours.

II-1-3 Essais physico-mécaniques :

II-1-3-1 Essais sur pâte de ciment :

a) Essais de prise et de consistance :

Des essais de consistance et de prise ont été effectués sur les pâtes de ciment avec et sans ajouts pour voir l'effet de ces dernier sur le temps de prise de ciment.

b) Essai de diffraction aux rayons X :

Pour mieux interpréter les résultats sur béton des essais de diffraction aux rayons X ont été effectués sur les différents mélanges de (ciment + ajout) à différents dosages.

II-1-3-2 Essais sur béton frais :

a) Mesure de la consistance :

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué grâce à l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test –NF p 18-451-). Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide (voir tableau 2-8).

Cet essai consiste à remplir le cône en trois couches tassées avec une tige d'acier pointue de 16mm de diamètre à raison de 25 coups par couche, puis soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement (A) en cm.

Affaissement	$1\text{ cm} \leq A \leq 4\text{ cm}$	$5\text{ cm} \leq A \leq 9\text{ cm}$	$10\text{ cm} \leq A \leq 15\text{ cm}$	$A \geq 16\text{ cm}$
Classe de consistance	Ferme (F)	Plastique (P)	Très plastique (TP)	Fluide (FL)

Tableau 2-8 : Classes de consistance mesurée au cône d'Abrams [5].

b) Masse volumique du béton frais :

Cet essai consiste à :

- ✓ Remplir un récipient, de volume V et de masse Mr, d'un échantillon de béton frais.
- ✓ Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- ✓ Peser le récipient rempli ; soit de masse totale Mt.
- ✓ La masse volumique du béton frais sera alors :

$$\rho_{bf} = (Mt - Mr) / V \tag{2-7}$$

II-1-3-3 Essais sur béton durci :

a) Masse volumique du béton durci :

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

- On pèse l'éprouvette après nettoyage, soit M(Kg) sa masse.
- Puis on détermine son volume V en (m³) à partir de ses dimensions géométriques.

La masse volumique sera alors :

$$\rho_{bd} = (M) / V \text{ (Kg/m}^3\text{)} \tag{2-8}$$

8)

b) Rectification et surfacage :

Après le démoulage des éprouvettes, les surfaces libres sont rarement planes ; la rectification et le surfacage consistent donc à rendre ces surfaces planes et perpendiculaires aux génératrices de l'éprouvette et permettent d'empêcher les phénomènes de frottement « réduction des contraintes tangentielles intervenant au contact plateau de la presse – éprouvette » et de réduire l'excentricité accidentelle lors de l'essai de compression.

c) Essai de résistance mécanique à la compression :

L'essai de compression simple a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32) et cubiques (14cm de côté). La presse utilisée est une machine du type TONI TECH, à vitesse de chargement réglable.

La résistance à la compression (exprimée en Mpa) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma_c = F/S \tag{2-9}$$

Avec F : est la charge de rupture (MN).

S : est la section orthogonale de l'éprouvette (m²).

Il est à noter que la relation entre la résistance des cubes de 14 et celle des cylindres de 16/32 est:

$$\sigma_{cyl} = \sigma_{cube}/K \tag{2-10}$$

[38]

Avec K=1.25 pour les résistances sur cubes inférieures ou égales à 25 MPa ,
et K=1.2 pour les résistances sur cubes supérieures à 25 MPa .

d) Essai de résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction a été déterminée par l'essai de traction par flexion ; cet essai est réalisé sur des éprouvettes (7x7x28) .

L'essai est effectué sur une machine TONI TECH, avec une vitesse de chargement 0.1MPa par seconde.

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

$$\sigma = 1.8 F/a^2 \tag{2-11}$$

Avec : F est la charge appliquée.

a est le coté de l'éprouvette prismatique (a x a x 4a).

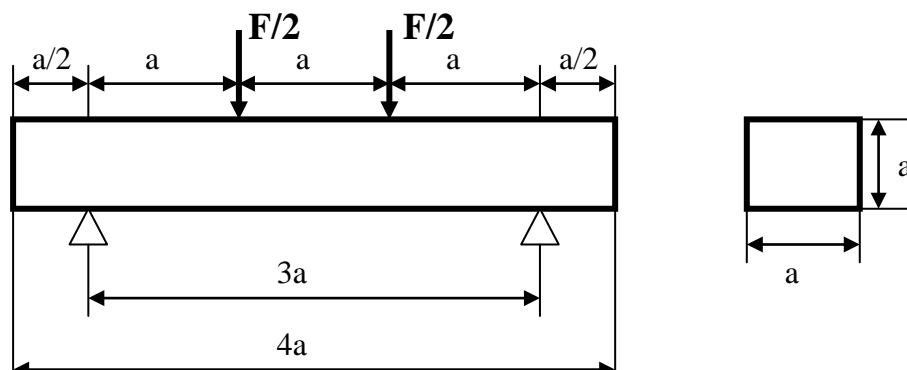


Fig 2-6 : Schéma statique de l'essai de traction par flexion [38].**e) Essai de retrait :**

L'essai a été effectué sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28), conservées à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire.

f) Module d'élasticité :

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

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

g) Mesure de l'absorption capillaire :

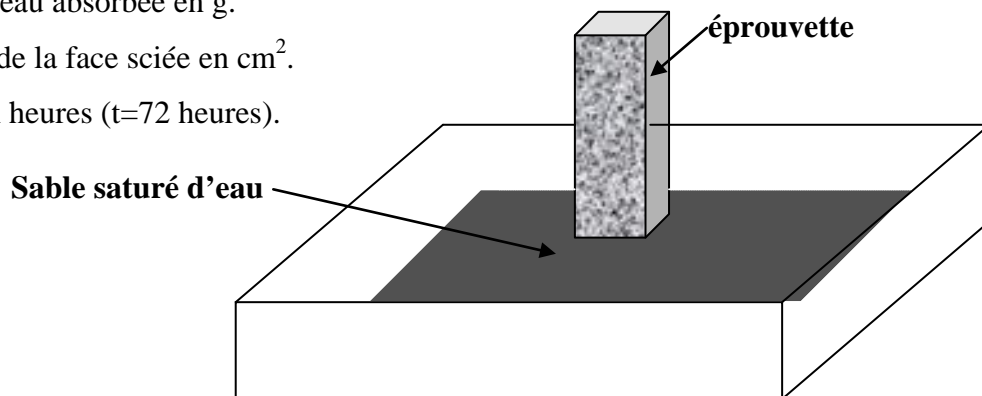
La mesure de l'absorption capillaire se déroule comme suit :

- Scier une face de l'éprouvette et imperméabiliser les autres faces à l'aide de résine d'époxy ou de paraffine.
- Poser l'éprouvette dans un bac du sable saturé sur sa face sciée (voir figure 2-7).
- Mesurer ensuite, en fonction du temps, l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire
- L'absorption d'eau est exprimée à 72 heures par l'expression suivante :

$$A.C = \frac{100P}{S\sqrt{t}} \quad (2-12)$$

Où :

- P : poids d'eau absorbée en g.
- S : surface de la face sciée en cm².
- t : temps en heures (t=72 heures).

**Fig 2-7** : Mesure de l'absorption capillaire [14].**h) Mesure de capacité d'absorption massique (A_m):**

La capacité d'absorption est le pouvoir d'adsorber et de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé dans l'eau et s'exprime en pourcentage de masse.

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

L'essai consiste à :

- ❖ Poser dans un bac le corps d'épreuve.
- ❖ Ajouter de l'eau jusqu'à l'immersion complète ; le niveau d'eau est augmenté au fur et à mesure de manière à ce que l'air puisse s'échapper des pores (voir figure 2-8).
- ❖ Mesurer ensuite l'accroissement du poids de l'éprouvette jusqu'à la saturation en eau de la matière.

La capacité d'absorption massique A_m est donnée par l'expression suivante :

$$A_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100 \quad (2-13)$$

Avec : M_2 est la masse du matériau saturé.

M_1 est la masse du matériau à l'état sec.

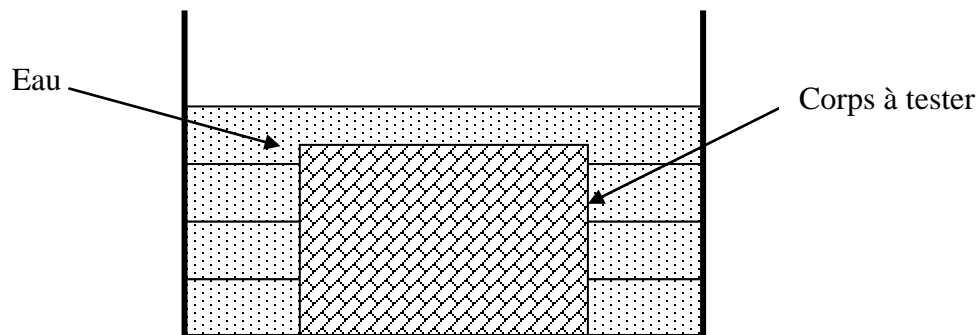


Fig 2-8: Mode de mesure de la capacité d'absorption d'eau.

II-1-4 Conclusion :

L'analyse chimique des ajouts utilisés montrent qu'ils sont riches en silice ; mais l'analyse par DRX nous a bien montré que le sable de dune est cristallisé tandis que la fumée de silice est amorphe, vu que le broyage poussé du sable de dune n'a pas conduit à une finesse de même ordre de grandeur que celle de CSF, de plus cette dernière (CSF) est obtenue à une température voisine de 1600°C alors que le sable de dune n'a pas subi d'effet thermique.

Les caractéristiques des granulats sont proches de celles requises pour l'élaboration des bétons à résistances élevées. En effet le gravier est compact et propre. De par sa grossièreté le

sable permettra d'améliorer la résistance du béton mais d'affaiblir éventuellement la maniabilité du béton à l'état frais.

Résultats et Interprétations

II-2-1 Introduction :

Nous allons exposer dans ce chapitre les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur les pâtes de ciment et sur le bétons frais et durcis, suivis par des discussions et des interprétations basées sur la littérature.

Le travail expérimental est scindé en deux parties :

- ♦ La première partie concerne les essais effectués sur les pâtes de ciment à différents pourcentage d'ajout ; et on s'intéresse en particulier à l'analyse par diffraction aux rayons X ; qui permet de mieux expliquer les résultats des essais mécaniques effectués sur le béton, et ceci en étudiant l'effet pouzzolanique du sable de dune finement broyé qui est utilisé comme ajout filler.
- ♦ Tandis que la deuxième partie concerne les essais physico-mécaniques des pâtes de ciment et du béton frais et durci .

II-2-2 Résultats des essais sur pâtes de ciment:

II-2-2-1 Essais de prise et de consistance :

a) Détermination de la pâte normale :

La pâte normalisée est déterminée à 20°C en variant le rapport E/C puis mesurer la consistance de la pâte ; les résultats sont représentés par la courbe suivante :

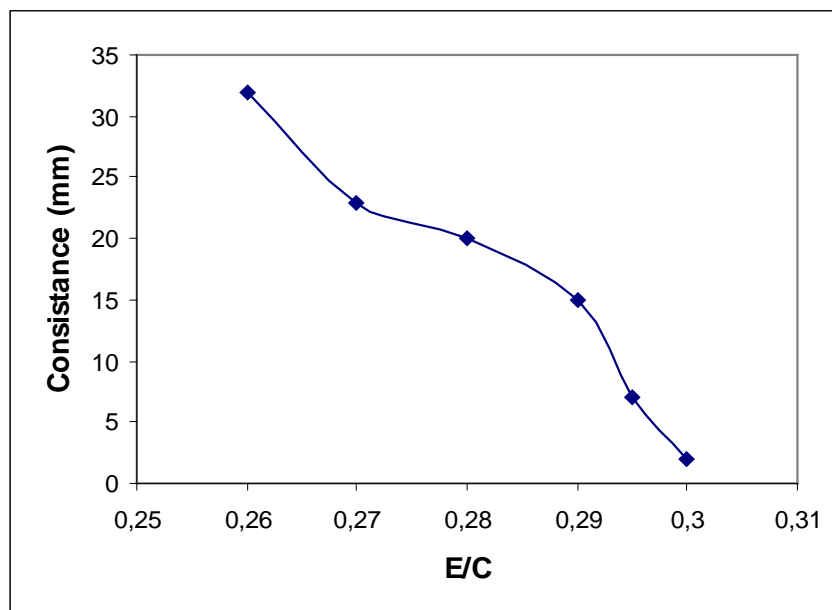


Fig 2-9 : Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C.

D'après cette courbe on remarque que la consistance normale ($d = 6 \pm 1 \text{ mm}$) est obtenue pour un rapport E/C égal à 0.295. Pour cette consistance le temps du début de prise est de 5h 15min et le temps de fin de prise est de 6h 10 min (généralement le rapport E/C nécessaire pour obtenir la pâte normalisée est de l'ordre de 0.25 et le temps du début de prise est aux environs de 3h 00 pour les CPA).

b) Effet du rapport E/C sur le temps de prise :

En faisant varier le rapport E/C, et en gardant la même température on a trouvé les résultats suivants :

E/C	0.26	0.27	0.28	0.29	0.295	0.3
Temps du début de prise	4h10	4h20	4h38	5h00	5h15	5h20
Temps de fin de prise	5h20	5h30	5h39	6h00	6h20	6h20

Tableau 2-9 : Variation du temps de prise en fonction du rapport E/C.

A partir de ce tableau on remarque bien que plus le rapport E/C augmente et plus le temps du début et de fin de prise seront retardés (parce que l'eau joue le rôle d'un retardateur de prise).

A partir de ces résultats on a trouvé que la variation du temps de fin de prise en fonction du début de prise est une relation linéaire de forme : $y = ax + b$

Avec : y est le temps de fin de prise (en heure) ; et x est le temps du début de prise (en heure)

Donc $y = 0.8098x + 1.955$. (voir figure suivante)

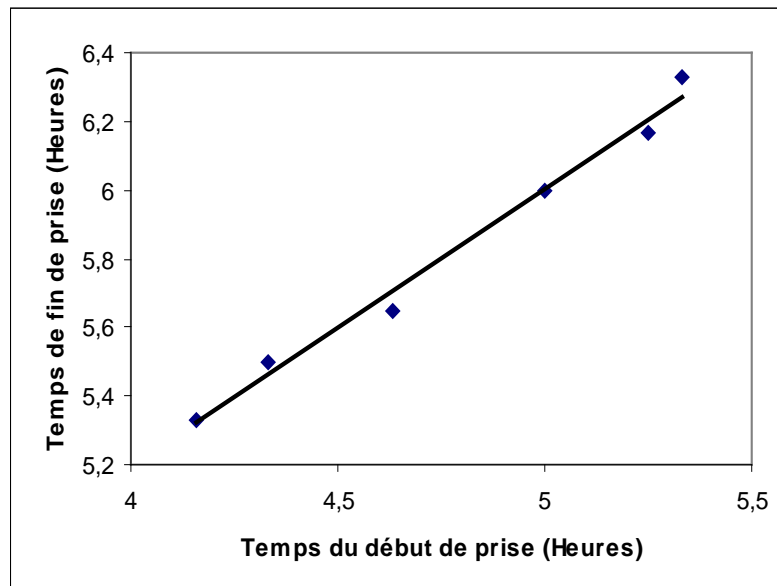


Fig 2-10 : Variation du temps de fin de prise en fonction du temps du début de prise.

c) Effet de l'ajout sur la prise :

Cet essai a pour but de connaître l'influence de l'ajout du sable de dune et de la fumée de silice sur la prise et ceci pour un même rapport $E/C = 0.295$, les résultats trouvés sont représentés dans le tableau suivant :

% du sable de dune	0	5	10	15
D (mm)	7	0.5	0	0
Temps du début de prise	5h15	5h15	5h20	5h30
Temps de fin de prise	6h10	6h00	6h00	6h15

Tableau 2-10 : Influence du sable de dune sur le temps de prise.

A partir de ce tableau, on remarque que l'ajout du sable de dune broyé n'a pas engendré une modification assez importante sur le temps de prise, mais concernant la consistance on remarque qu'elle diminue avec l'introduction du sable de dune donc la pâte sera plus fluide ; ceci est dû à l'effet lubrifiant des fines de l'ajout vu que leur finesse est supérieure à celle du ciment.

Concernant la fumée de silice il a été remarqué qu'elle a provoqué un raidissement de la pâte ; donc il a fallu introduire le fluidifiant et ce dernier a comme effet secondaire *retardateur de prise* (voir § suivant).

d) Evolution de la réaction d'hydratation en fonction du temps :

A partir de l'essai de prise on a évalué le cisaillement τ (Kpa) à partir de la formule présentée dans la première partie (§ III-3-2) ; les résultats trouvés sont représentés par la courbe suivante :

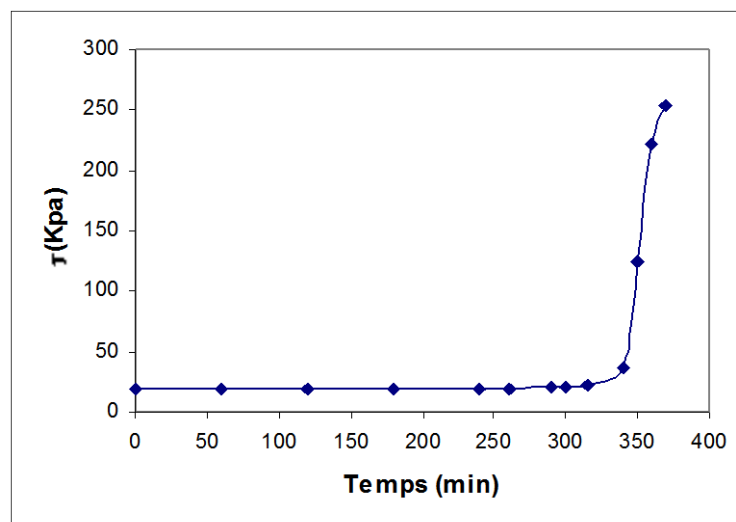
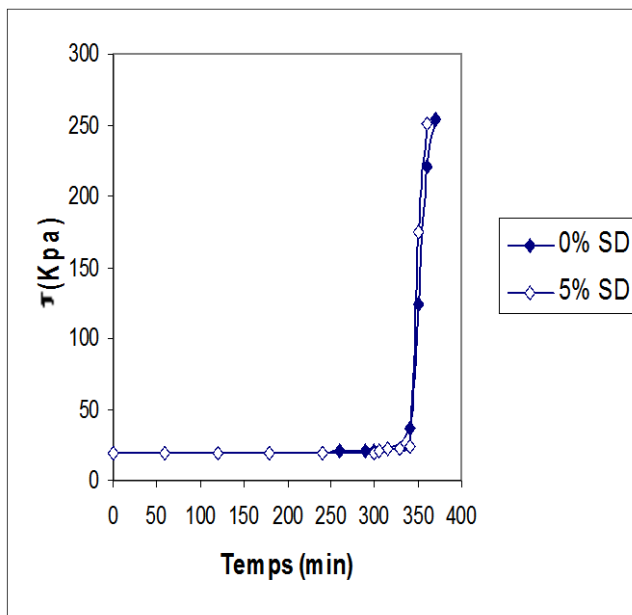


Fig 2-11: Evolution du cisaillement de la pâte en fonction du temps pour (0% d'ajout).

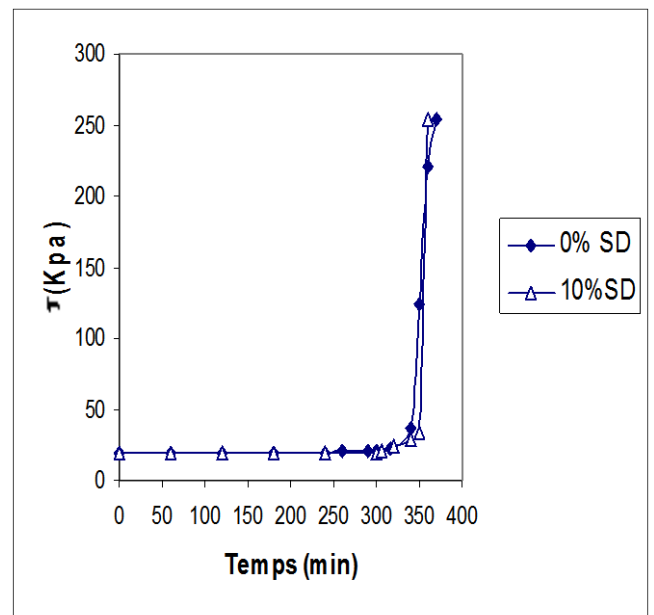
A partir de cette courbe on constate que le cisaillement susceptible d'être repris par la pâte demeure faible et reste constant pendant 4h 40min. Au-delà de cette période ; le cisaillement augmente plus rapidement pour s'accélérer brutalement vers 5h 15min ; c'est le temps du

début de prise et la période qui le précède est *la période dormante* ; après cette période le cisaillement augmente très rapidement et atteint la valeur maximale vers 6h10min qui correspond au temps de fin de prise, au delà de cette période de prise commence le *durcissement*.

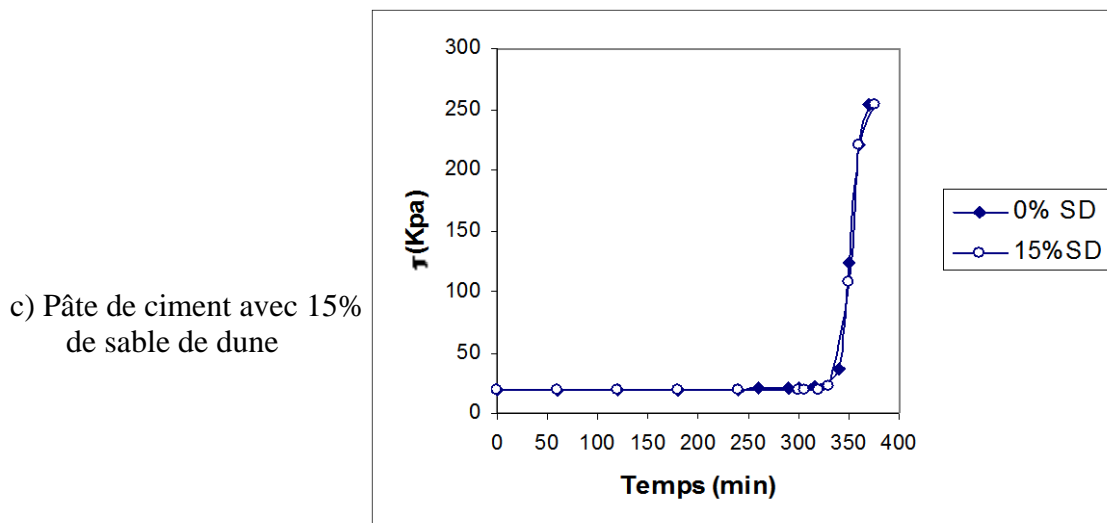
Les figures ci-après représentent l'évolution du cisaillement des pâtes de ciment en présence du sable de dune ; on remarque que l'ajout du sable de dune broyé n'a pas modifier cette évolution ,mais seulement il faut signaler qu'avec 10% de sable de dune et dans la période de *prise* l'évolution du cisaillement est plus rapide, ce qui a expliqué que cette période est moins longue que celle de pâte de ciment seul.



a) Pâte de ciment avec 5% de sable de dune



b) Pâte de ciment avec 10% de sable de dune



c) Pâte de ciment avec 15% de sable de dune

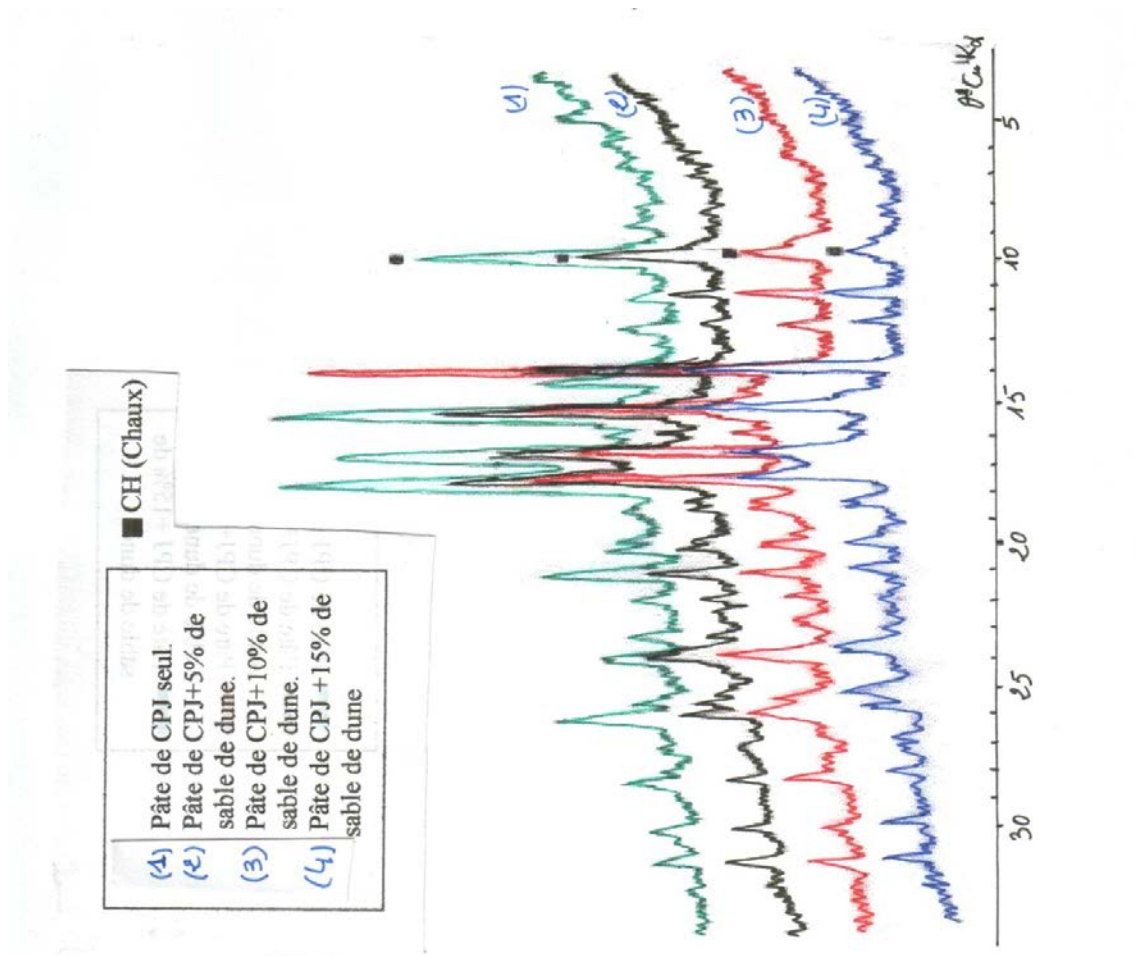
Fig 2-12 : Evolution du cisaillement de différentes pâtes en fonction du temps.

e) Choix du type de fluidifiant :

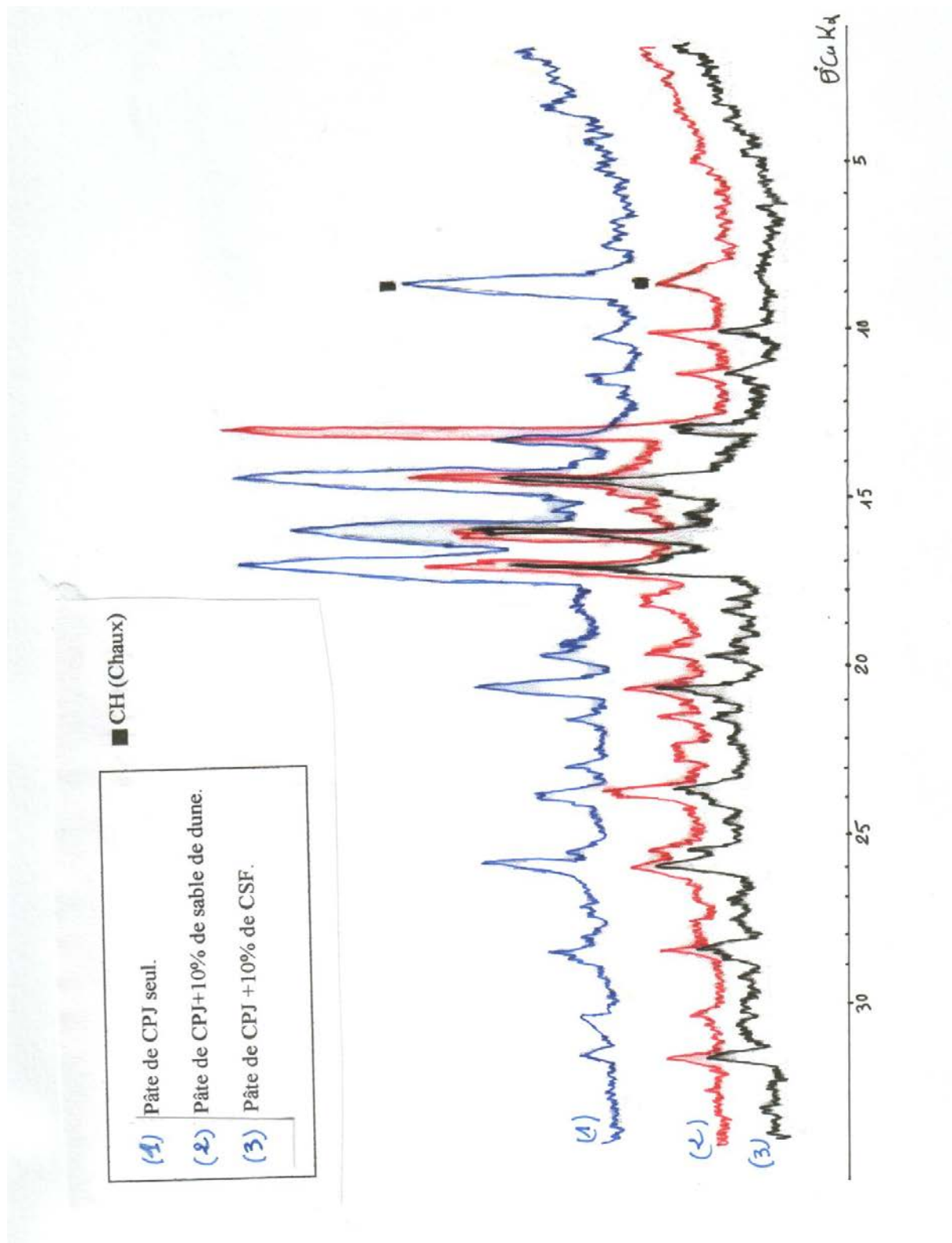
Deux types de fluidifiants ont été utilisés le *SP* et le *SF* (produits GRANITEX).
 L'essai de prise a été réalisé sur une pâte de ciment seul qui a comme temps de début de prise 2h.45min et de fin de prise 4h.00.
 Pour un dosage de fluidifiant *SF* égal à 0.8% du poids de ciment , le temps du début de prise est de 5h.00 ; et pour un dosage en superplastifiant *SP* égal à 0.4% du poids de ciment la temps du début de prise est supérieur à 7h.35min.
 D'après ces résultats on constate que les deux types d'adjuvants ont comme effet secondaire de retarder la prise mais l'effet du *SP* est plus important, ce qui nous a conduit à utiliser le fluidifiant *SF* lors de la confection du béton.

II-2-2-2 Etude des pâtes par diffractométrie des rayons X :

L'analyse par diffractométrie des rayons X a été réalisée sur cinq pâtes de ciment : pâte de ciment seul, pâte de ciment avec sable de dune (5% ;10% et 15%) et pâte de ciment avec fumée de silice (10%), cet essai a été réalisé au 17^{ème} jour.



a) effet du pourcentage du sable de dune sur la réaction pouzzolanique



b) Effet de la nature de l'ajout sur la réaction pouzzolanique.

Fig 2-13 : Diffractogrammes aux Rayons X des différentes pâtes.

Les diffractogrammes de rayons X des différentes pâtes dans la figure précédente nous permet d'expliquer et de conclure sur la réaction pouzzolanique des ajouts ; et pour cela on s'ait intéressé seulement à la raie de la chaux qui a comme distance réticulaire $d= 4.9\text{\AA}$ et $\theta=9^\circ$ (puisque'elle ne se confond pas avec celles des autres minéraux).

◆ Effet de l'introduction de l'ajout :

A partir de ces diagrammes on remarque que l'ajout du sable de dune finement broyé a provoqué une réaction pouzzolanique partielle; ceci est expliqué par la faible quantité de portlandite contenue dans la pâte de ciment + 10% de sable de dune comparativement à celle contenue dans le témoin; tandis qu'en présence de 10% de CSF on remarque une absence totale de la chaux ce qui explique que la chaux a été totalement fixée par les grains de silice de CSF d'où la forte réactivité pouzzolanique du CSF.

◆ Effet du % du sable de dune :

On remarque que plus le pourcentage de sable de dune augmente l'intensité de la raie correspondante à 4.9\AA diminue.

On conclusion ; on peut dire que :

- Le sable de dune finement broyé fixe la chaux libérée par l'hydratation du ciment d'où formation d'une quantité d'hydrates (2 ème génération) qui contribuent à la résistance mécanique et qui améliorent la compacité de la pâte ; d'où l'existence de la réaction pouzzolanique mais partielle (si on la compare à celle de CSF) vu que le sable de dune est cristallisé.

- On ne peut ajouter au-delà de 10% de sable de dune parce que le ciment utilisé est un CPJ qui comporte déjà 15% d'ajouts ce qui conduit à diminuer les performances du ciment de par la faible quantité d'hydrates .

II-2-3 Résultats des essais sur bétons:

Avant d'entamer les essais sur béton on va exposer les différentes compositions de bétons avec et sans ajouts dans le tableau suivant :

	Composition	Ciment (Kg/m ³)	Sable de dune (%)	CSF (%)	E/C	SF (%)
Bétons sans ajouts	B1	450	-	-	0.43	-
	B2	450	-	-	0.37	-
	B3	450	-	-	0.37	1.2
	B4	450	-	-	0.32	1.2
	B5	450	-	-	0.27	1.4
	B6	450	-	-	0.27	1.8
	B7	450	-	-	0.3	1.8
Bétons avec ajouts	B8	405	10	-	0.27	1.8
	B9	405	10	-	0.3	1.8
	B10	352.5	15	-	0.3	1.8
	B11	427.5	5	-	0.3	1.8
	B12	427.5	5	-	0.27	1.8
	B13	405	-	10	0.3	1.8

Tableau 2-11 : Différentes compositions étudiées

II-2-3-1 Essais sur bétons frais :

Mesure de la consistance et de la masse volumique du béton frais :

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Composition		L'affaissement (cm)	Masse volumique (Kg/m ³)
Bétons sans ajouts	B1	4	2410
	B2	2	2430
	B3	19.2	2456
	B4	11.5	2457
	B5	2.5	2627
	B6	3.5	2600
	B7	6	2527
Bétons avec ajouts	B8	3	2556
	B9	10	2556
	B10	8	2560
	B11	3	2510
	B12	4	2510
	B13	7	2600

Tableau 2-12 : Affaissement et masse volumique des différentes compositions testées.

❖ Bétons sans ajouts :

On remarque bien que pour un béton sans adjuvant (B1 et B2) plus le rapport E/C diminue et plus la maniabilité diminue et ceci a été toujours confirmé dans plusieurs études « puisque l'eau joue le rôle d'un fluidifiant » mais la consistance de ces bétons est ferme, donc on a ajouté le fluidifiant à différents pourcentages et en même temps diminuer le rapport E/C au plus faible possible tout en améliorant la maniabilité ; les compositions B3 et B4 présentent un affaissement assez élevé (19.2 et 11cm respectivement) mais cet affaissement provoque une ségrégation d'où faible résistance mécanique.

A partir de ce tableau on peut tirer la composition optimale c'est celle qui a une ouvrabilité acceptable avec un rapport E/C plus faible : c'est B7 (E/C=0.3 ; % de SF =1.8 ; Affai=6 cm) ; la quantité d'eau introduite est nécessaire seulement à l'hydratation des grains de ciment.

La diminution du rapport E/C jusqu'à 0.27 ne donne pas de bons résultats vis-à-vis de la maniabilité vu que l'adjuvant lui-même n'est pas tellement efficace.

❖ Bétons avec ajouts :

Dans cette série de compositions on a gardé deux rapports E/C =0.27 et 0.3, le pourcentage de l'ajout par substitution (sable de dune finement broyé) varie de 5 à 15 %, et à titre comparatif une composition à 10% de fumée de silice a été réalisée.

- Pour un même rapport E/C =0.27 : l'ajout du sable de dune n'a pas amélioré la maniabilité du béton ; ceci est dû au fait que la quantité d'eau introduite est faible pour enrober tous les grains.
- Par contre pour un rapport E/C =0.3 : l'ajout de sable de dune à 5% du poids de ciment n'a pas amélioré la maniabilité du béton mais en augmentant ce pourcentage à 10% la maniabilité augmente, ceci s'explique par l'effet lubrifiant des fines de l'ajout vu que sa finesse est supérieure à celle du ciment et ceci en présence de l'adjuvant (ces fillers provoquent une fluidification supplémentaire) [39 ;40]. Mais si on augmente le pourcentage du sable de dune à 15% la maniabilité diminue un peu ce qui explique qu'on ne peut pas augmenter le pourcentage de l'ajout au-delà de 15% et ce qui a conduit à réaliser une composition avec 10% de fumée de silice (B13) ; il reste à noter que le phénomène de ressuage a été observé lors de la confection des bétons avec le sable de dune ; par contre en présence de la fumée de silice ce phénomène n'a pas été observé.

Concernant la masse volumique du béton frais ; pour E/C constant elle augmente et lorsque le pourcentage d'ajout augmente; ceci est expliqué par le rôle de remplissage que joue les fillers.

II-2-3-2 Essais sur béton durci :**a) Masse volumique du béton durci :**

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Com positi on	Bétons sans ajouts							Bétons avec ajouts					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
ρ_{bd}	2430	2430	2456	2457	2627	2600	2487	2550	2481	2486	2500	2476	2500

Tableau 2-13 : Masse volumique du béton durci pour différentes compositions testées.

❖ Bétons sans ajouts :

On remarque que la masse volumique du béton durci pour les bétons avec adjuvant est plus élevée que celle du béton ordinaire ; ceci est dû à la réduction d'eau par introduction du fluidifiant (plus la quantité d'eau augmente et plus le volume des pores augmente ce qui rend la structure moins compacte d'où diminution de la masse volumique).

❖ Bétons avec ajouts :

On remarque que la masse volumique du béton durci augmente avec l'introduction de l'ajout ; ceci est expliqué par le double rôle que joue les ajouts «rôle de remplissage et rôle pouzzolanique » malgré que cette dernière soit partielle pour le sable de dune (voir chapitre précédent).

b) Essai de résistance mécanique à la compression :❖ Bétons sans ajouts :

Les résultats trouvés sont représentés par le tableau (2-14) et la figure (2-14) :

Composition		B1	B3	B4	B5	B6	B7
Résistance à la compression (Mpa)	7j	31.89	30.19	37.25	42.2	45.07	38.78
	28j	40.43	41.33	43.45	53.57	56.12	42.35
	90j	43.97	45.92	61.18	63.5	-	-

Tableau 2-14 : Résistances à la compression des bétons sans ajouts.

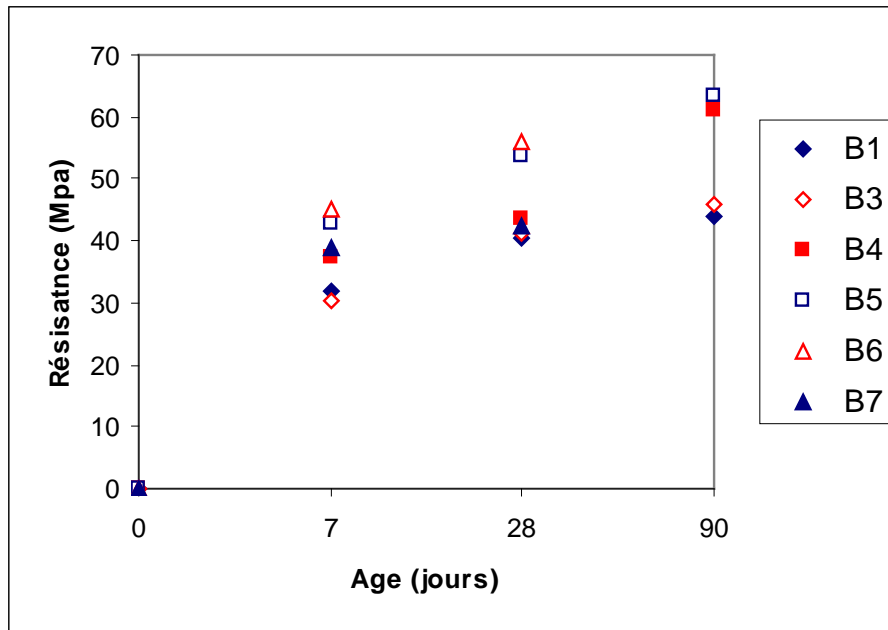


Fig 2-14 : Evolution de la résistance en compression en fonction de l'âge des bétons sans ajouts.

La figure précédente ainsi que la tableau (2-14) montrent que la résistance mécanique à la compression évolue en fonction de l'âge et augmente avec la diminution du rapport E/C, ce qui traduit l'augmentation de la compacité due à la diminution de la quantité d'eau et donc augmentation de la résistance mécanique.

On remarque aussi qu'on peut obtenir un béton à haute résistance (supérieure à 50 Mpa) avec les matériaux locaux mais il y a problème de maniabilité ceci est dû au fait que le sable utilisé est un sable grossier (et selon Dreux « le sable grossier est utilisé pour la recherche des résistances élevées mais il y a problème de maniabilité ») et aussi à l'efficacité du fluidifiant utilisé donc il faut améliorer la qualité de ce fluidifiant.

La composition qui a une ouvrabilité acceptable et qui nous permet de gagner quelques Mpa est celle de B7 qui a comme affaissement au cône d'Abrams 6 cm (avec un rapport E/C =0.3) et une résistance à la compression à 28 jours voisine à celle du béton ordinaire à 90 jours.

❖ Bétons avec ajouts :

Les résultats sont représentés dans le tableau (2-15) et sur les figures (2-15 et 2-16) :

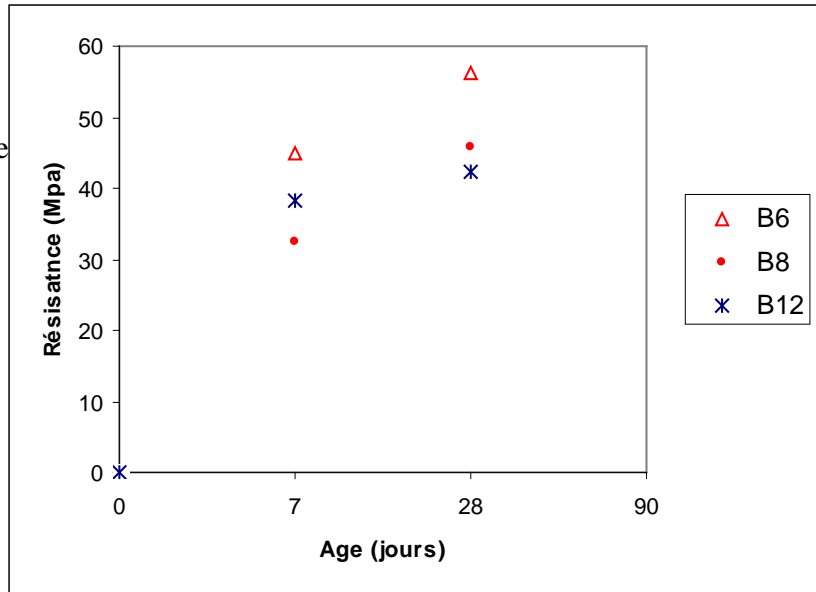
Composition		B8	B9	B10	B11	B12	B13
Résistance à la compression (Mpa)	7 j	32.58	30.19	20.41	38.23	31.35	37.13
	28 j	45.92	42.35	40.81	42.35	40.43	58

Tableau 2-15 : Résistances à la compression des bétons avec ajouts.

Fig 2-15 :

Effet du % de sable de dune sur la résistance à la compression des bétons

a) E/C=0.27



b) E/C=0.3

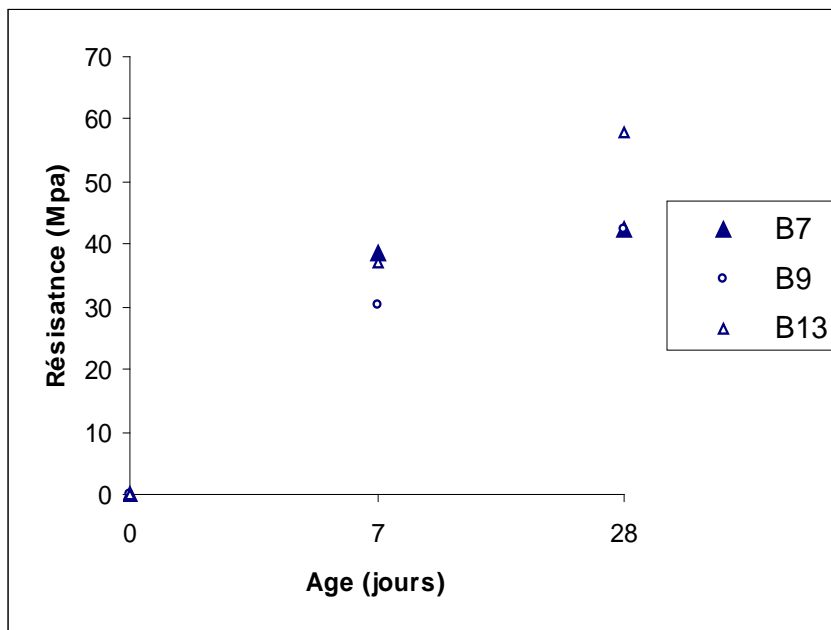
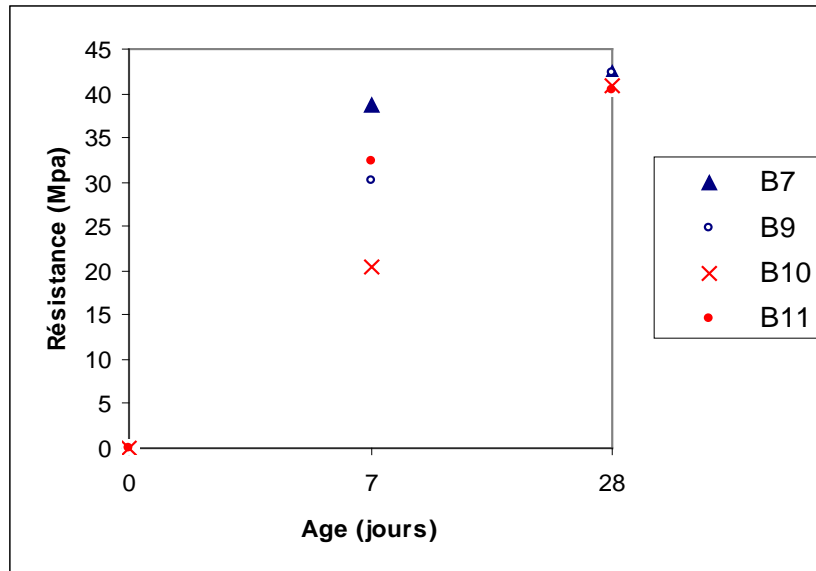


Fig 2-16 : Effet de la nature de l'ajout sur la résistance à la compression.

Les figures précédentes montrent que la résistance à la compression des bétons contenant le sable de dune augmente d'une façon continue avec l'âge. Elle est comparable à celle du béton ordinaire au jeune âge, et elle diminue en fonction du pourcentage du sable de dune ; ceci est dû au fait que la réaction pouzzolanique n'a pas eu lieu à cet âge, donc l'ajout du sable de dune (par substitution) a engendré une diminution de la partie active.

Mais à long terme et pour un rapport E/C = 0.3 la résistance à la compression atteint celle du béton témoin avec un dosage du sable de dune 10% ; ceci est expliqué par la fixation de la chaux d'où formation des CSH qui améliorent la résistance; par contre pour 15 % elle est inférieure à celle du témoin, cela est expliqué par la forte teneur en produits inertes (15% de tuf) qui renferme initialement le ciment utilisé (CPJ).

Pour un rapport E/C=0.27 les résistances à la compression sont supérieures à celles des bétons ayant un rapport E/C=0.3, mais elle reste inférieure à celle du témoin et aussi leur consistance est ferme ; ceci est dû au fait que la quantité d'eau est trop faible pour mouiller tous les grains de ciment et du sable de dune ajouté.

On a donc opté pour la composition qui comporte 10% du sable de dune avec un rapport E/C=0.3 parce qu'elle permet de diminuer la quantité de ciment tout en se rapprochant de la résistance du témoin avec une maniabilité acceptable.

Concernant le béton avec fumées de silice, on remarque bien que la résistance à la compression à 7 jours se rapproche de celle du témoin mais à long terme elle devient supérieure à celle-ci. De plus elle reste supérieure à celle du béton à base du sable de dune finement broyé ; ce qui explique que la fixation de la chaux en présence des CSF (réaction pouzzolanique) se déroule aux jeunes âges (avant 7 jours) contrairement à celle du sable de dune broyé.

c) Essai de résistance à la traction par flexion :

D'après les résultats présentés dans les figures (2-17 ; 2-18 et 2-19) et le tableau (3-2-6) on remarque que la résistance à la traction par flexion augmente d'une façon continue avec l'âge du béton et en fonction du rapport E/C ainsi que le pourcentage du sable de dune, elle suit la même variation de la résistance à la compression :

- Pour les bétons sans ajouts la résistance à la traction par flexion augmente avec la diminution du rapport E/C.
- Pour un dosage de 10% du sable de dune ; la résistance à la traction par flexion au jeune âge est inférieure à celle du témoin mais à long terme elle se rapproche de celle du témoin.

- La résistance à la traction par flexion du béton aux CSF, à long terme, est supérieure à celle du témoin.

Compositions		Bétons sans ajouts						Bétons avec ajouts					
		B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
Résistance à la traction par flexion (Mpa)	7 j	2.39	3.67	4.11	4.57	4.61	4.41	3.89	3.69	3.38	3.61	3.82	4.04
	28 j	3.94	3.93	5.38	6.02	6.54	5.58	5.31	5.44	5.34	5.21	5.49	5.87

Tableau 2-16 : Résistance à la traction par flexion des différentes variantes de bétons

Fig 2-17 :

Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons sans ajouts.

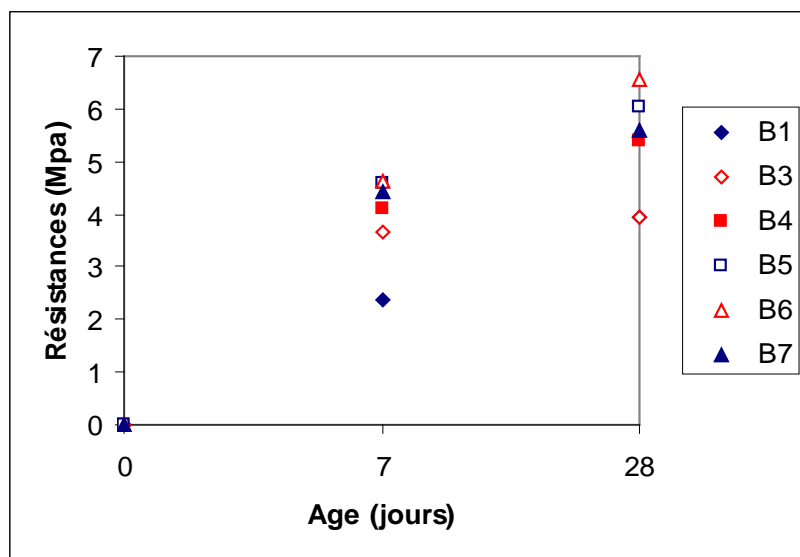
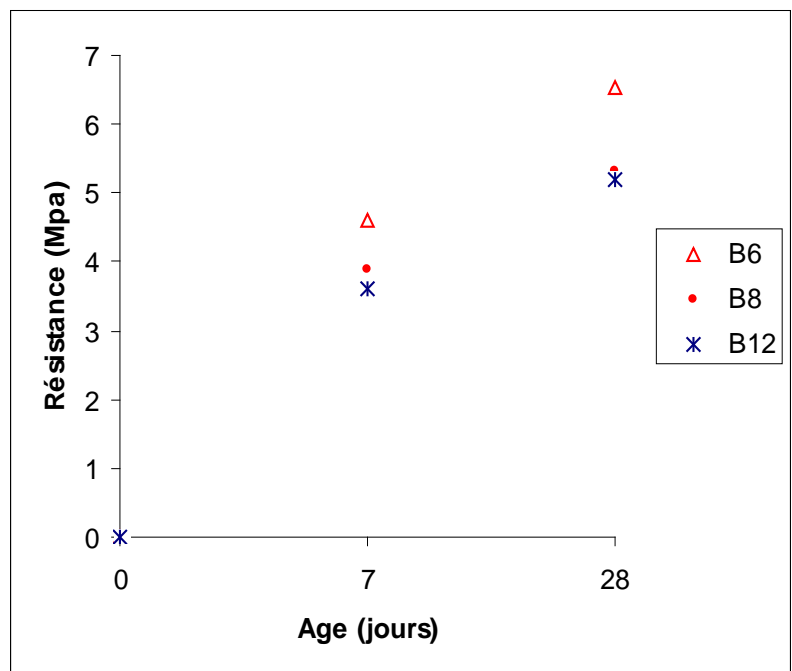


Fig 2-18:

Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons avec ajouts

b) E/C=0.27



b) E/C=0.3

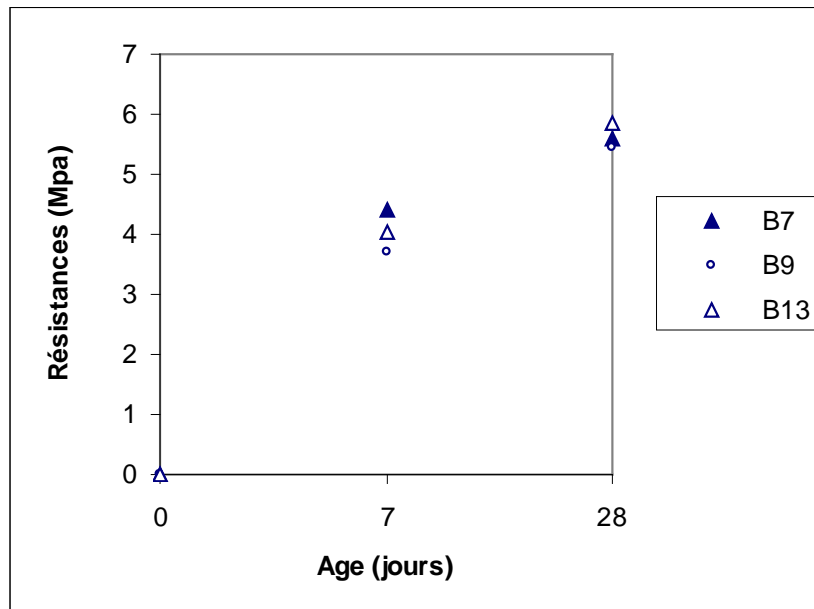
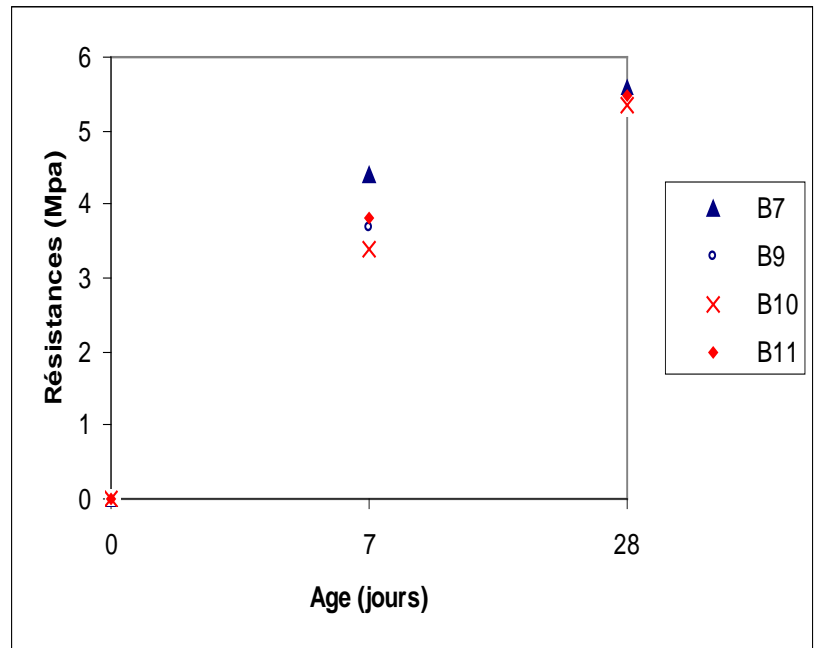


Fig 2-19 : Effet de la nature de l'ajout sur la résistance à la traction par flexion.

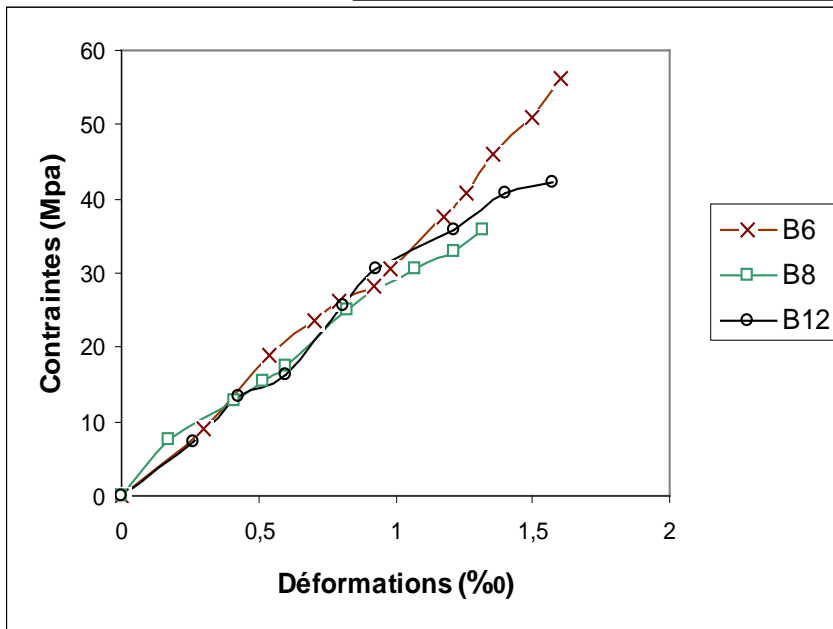
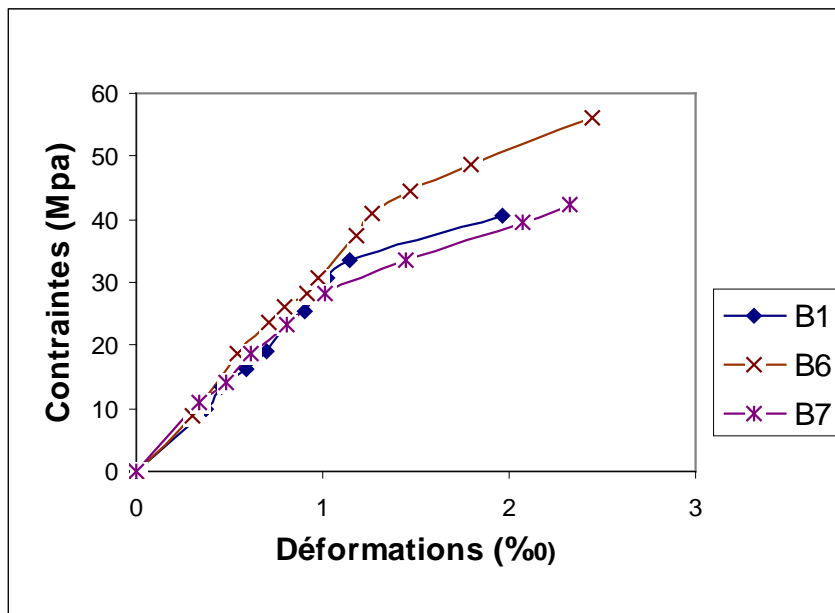
d) Module d'élasticité statique:

Le module d'élasticité statique est déterminé à partir de courbe *contraintes-déformations* ; les essais sont réalisés à l'âge de 7 et 28 jours. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau (2-17) et les figures (2-20 a-d) :

Composition		Bétons sans ajouts						Bétons avec ajouts					
		B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
E (GPa)	7 j	24.3	20.39	26.68	30.21	30.4	27.40	24.56	20.46	14.44	27.04	23.96	26.41
	28 j	28.12	28.86	30.9	32.21	33.74	30.47	31.14	30.46	28.21	30.39	28.52	34.13

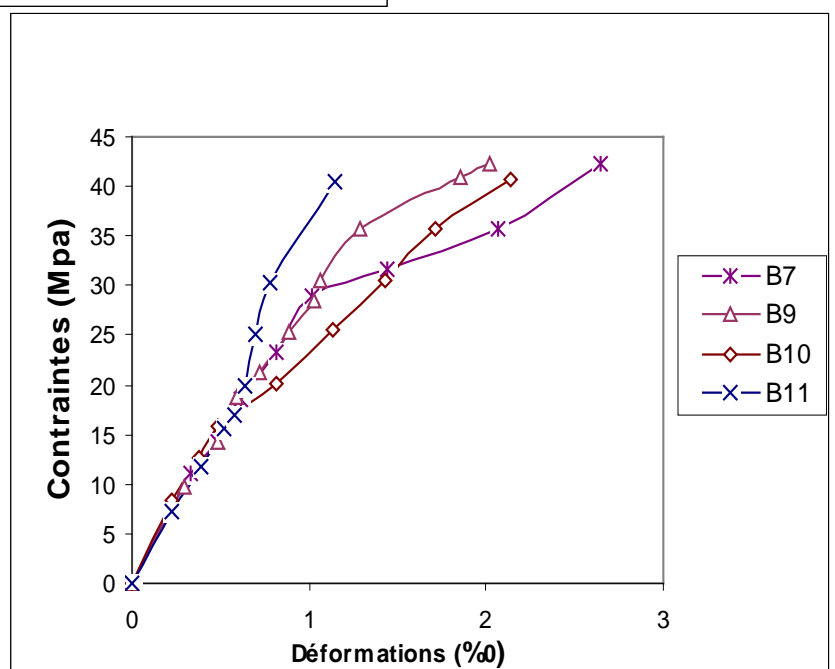
Tableau 2-17 : Modules d'élasticité des bétons avec et sans ajouts.

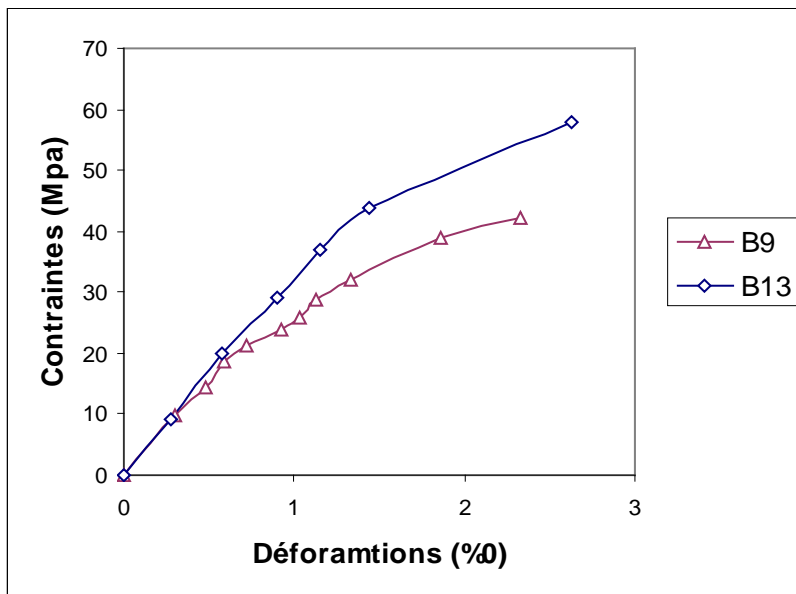
a) Bétons sans ajouts



b) Bétons avec ajouts (E/C = 0.27)

c) Bétons avec ajouts (E/C = 0.3)





d) Effet de la nature de l'ajout

Fig 2-20 : Courbes contraintes-déformations à 28 jours.

D'après les résultats présentés précédemment, on remarque que le module d'élasticité statique varie de la même manière que la résistance mécanique ; il varie de 28.12 Gpa pour un béton ordinaire à 30.46 Gpa pour un béton à 10% de sable de dune; et il atteint une valeur maximale de 34.13 Gpa par l'introduction de 10% de CSF.

Parmi les formules de corrélations entre le module d'élasticité statique et la résistance à la compression proposées par plusieurs chercheurs la formule suivante paraît la plus convenable pour nos résultats expérimentaux :

$$E_{ij} = 3320\sqrt{Rc_j} + 6900 \text{ (Mpa)}.$$

A partir des courbes précédentes on remarque que plus la résistance augmente et plus le comportement soit plus linéaire ; le comportement du béton à base de 10% de sable de dune est plus linéaire que les autres bétons à différents % de sable de dune, et le comportement du béton au CSF est encore et plus linéaire et sa déformation à la rupture est plus grande.

e) Le retrait :

Les essais de retrait sont réalisés sur des éprouvettes 7x7x28 cm, ces éprouvettes sont conservées à l'air libre.

Dans ce qui suit on va examiner l'effet du rapport E/C et l'effet de l'ajout sur le retrait.

Les résultats trouvés sont représentés par les courbes suivantes :

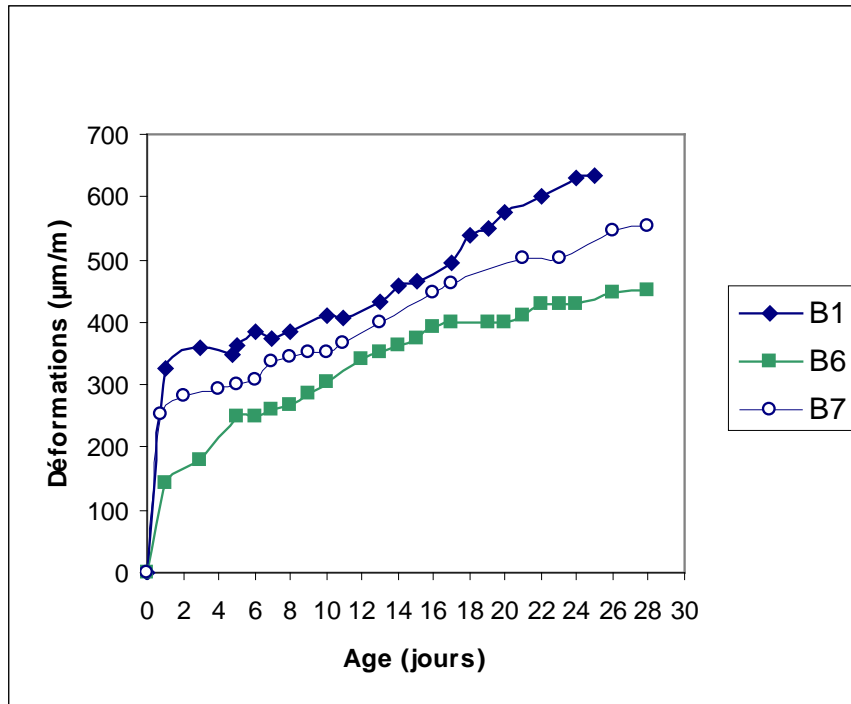


Fig 2-21 : Effet du rapport E/C sur le retrait des bétons sans ajouts.

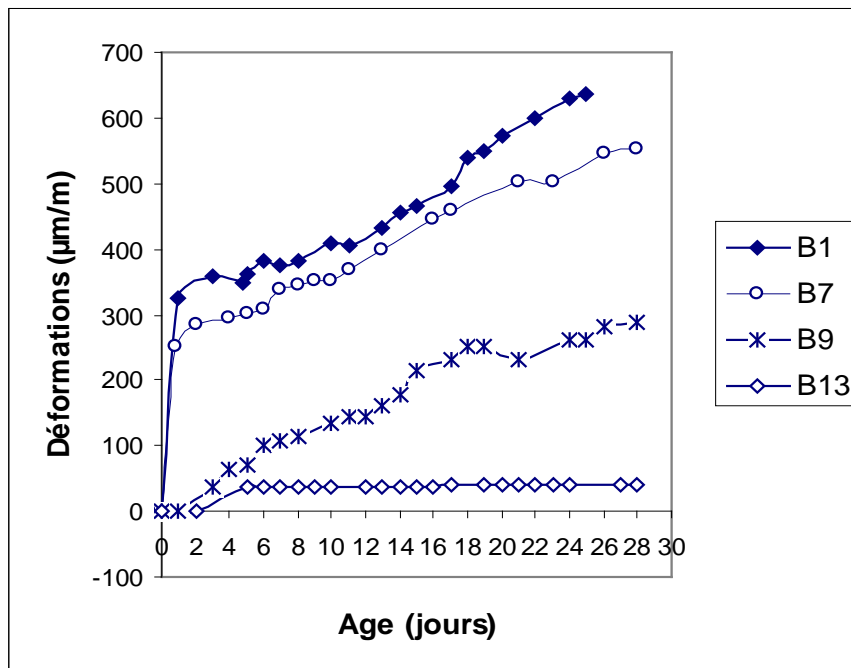


Fig 2-22 : Effet du sable de dune et de CSF sur le retrait des bétons.

◆ Effet du rapport E/C :

La figure (2-21) indique clairement que le retrait du béton est influencé par la variation du rapport E/C. Lorsque le rapport E/C diminue la déformation due au retrait diminue ; ceci est

expliqué par le fait que le béton qui contient une grande quantité d'eau, les pores sont nombreux et le séchage est ainsi accéléré.

♦ Effet de l'ajout :

On remarque sur la figure (2-22) que l'introduction de 10% du sable de dune (B9) engendre une diminution de la déformation au retrait ; et cette dernière diminue encore plus avec l'introduction de CSF ; ceci est dû à la formation des CSH supplémentaires qui sont issus de la réaction pouzzolanique : la structure de ces bétons sera donc plus dense, les dimensions et le pourcentage des pores diminuent ce qui empêche la migration de l'eau [29].

f) Mesure de l'absorption capillaire :

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes de béton selon le mode opératoire décrit dans le chapitre précédent, et à partir de l'expression suivante :

$$A.C = \frac{100P}{S\sqrt{t}}$$

Les résultats des mesures sont donnés au tableau suivant :

Compositions	Bétons sans ajouts						Bétons avec ajouts					
	B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13
Absorption capillaire AC (g/cm ²)	9.75	5.78	4.69	3.39	3.25	3.61	2.12	2.93	2.41	2.89	3.41	1.56

Tableau 2-18 : valeurs de l'absorption capillaire des différentes compositions (%).

❖ Bétons sans ajouts :

A partir de ces résultats on remarque bien que plus le rapport E/C diminue et plus l'absorption capillaire (AC) diminue ; une diminution de la quantité d'eau de 13% (B1 et B7) nous a permis de diminuer AC de 63% ; ceci est dû au rôle que joue l'eau (voir première partie chapitre).

❖ Bétons avec ajouts :

Pour cette série de bétons, on remarque que plus le pourcentage du sable de dune augmente et plus AC diminue, ce qui confirme que malgré que le rôle pouzzolanique du sable de dune finement broyé soit partiel il a un rôle physique qui est le rôle de remplissage vu que sa finesse est supérieure à celle du ciment ce qui lui permet de s'insérer entre les grains de ciment donc une diminution des dimensions et du pourcentage des pores capillaires (l'ajout de 10% de sable de dune a permis de diminuer l'absorption d'eau de 3.61g/cm² à 2.93g/cm²

c.-à-d. 19% et pour 15% de sable de dune on est arrivé jusqu'à 2.41g/cm^2 donc une diminution de 33% comparativement à celle du témoin.

En présence de CSF le rôle filler et pouzzolanique apparaît bien (l'ajout de 10% de CSF permet de diminuer encore AC de 46% à celle de béton à base de 10% du sable de dune et 56% à celle du témoin), ce qui confirme que l'introduction de CSF donne une pâte très dense vu que la silice des CSF fixe la chaux d'où formation du CSH qui contribuent à l'augmentation de la résistance et de la compacité (rôle chimique ou pouzzolanique), de plus la très grande finesse de cet ajout lui permet de s'insérer entre les grains de ciment (rôle physique de remplissage).

g) Mesure de la capacité d'absorption massique (A_m) :

La mesure de la capacité d'absorption massique nous permet de mesurer la porosité ouverte du béton. Cet essai consiste à mesurer la masse des éprouvettes de bétons après immersion dans l'eau et ceci en fonction du temps ; cet essai a été réalisé seulement sur deux compositions de bétons sans ajouts ($E/C=0.27$ et 0.3) et sur les bétons avec sable de dune. Les résultats trouvés sont représentés par les courbes suivantes :

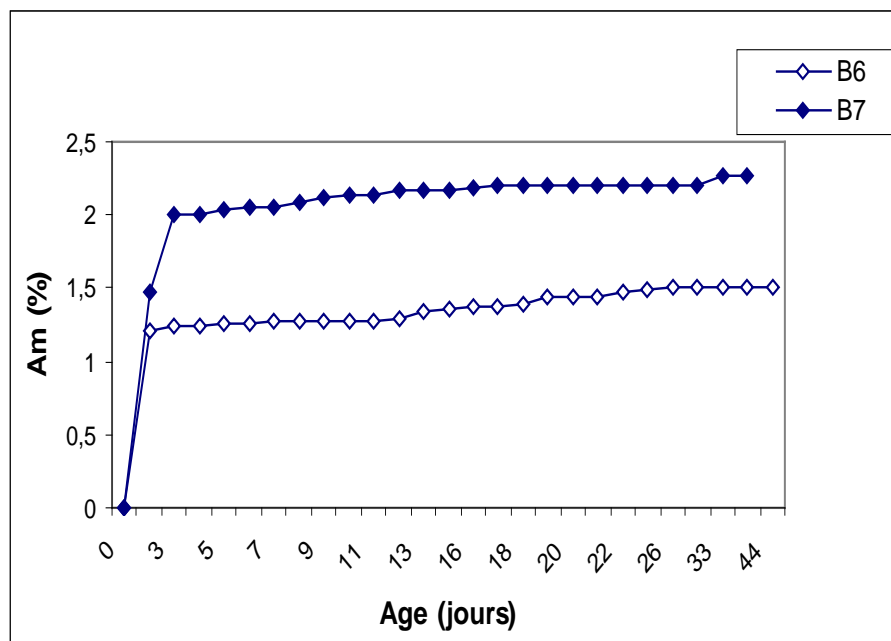


Fig 2-23 : Evolution de l'absorption massique en fonction du temps et du rapport E/C

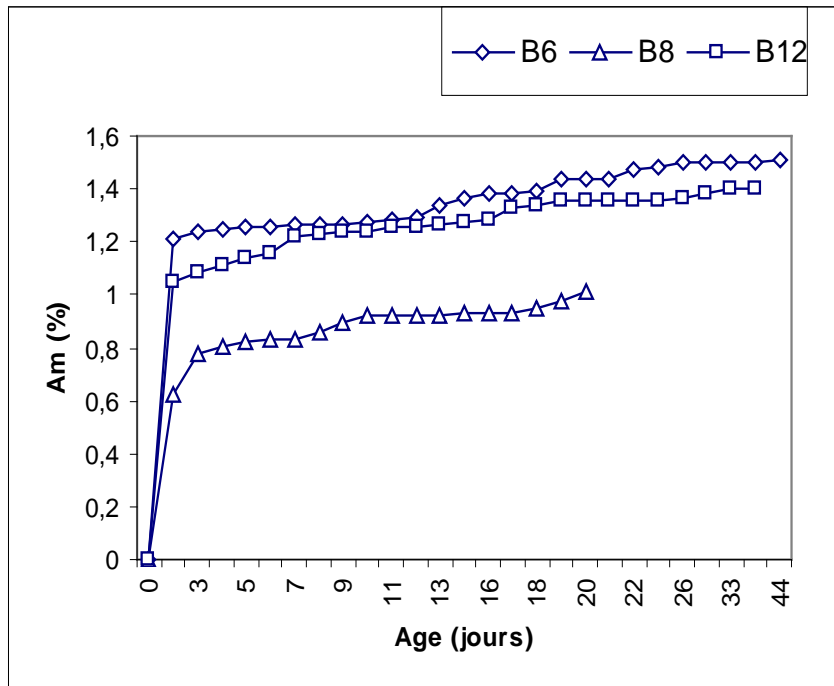


Fig 2-24 : Effet du pourcentage du sable de dune sur Am (E/C=0.27).

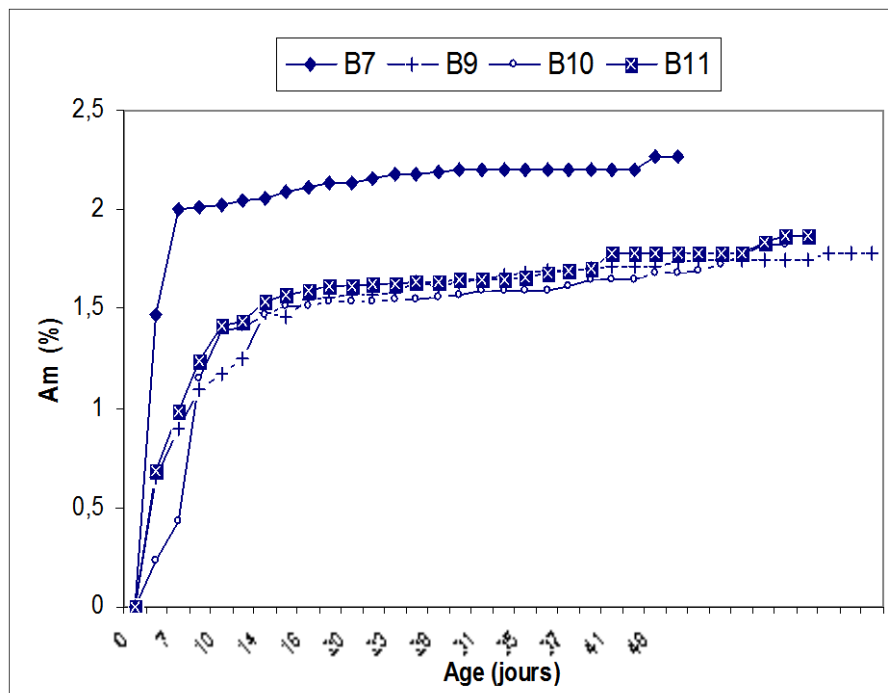


Fig 2-25 : Effet du pourcentage du sable de dune sur Am (E/C=0.3).

Tout d'abord on remarque que l'absorption massique évolue très rapidement en jeunes âges puis elle commence à se stabiliser.

La figure (2-23) confirme bien que la diminution de la quantité d'eau conduit à la diminution de la porosité et ceci a été confirmé par plusieurs chercheurs (voir première partie 1 § II-2).

Tandis que les deux autres figures (2-24 et 2-25) montrent bien que l'ajout du sable de dune conduit à une diminution de l'absorption massique d'où une diminution de la porosité ; ce qui confirme toujours que le sable de dune finement broyé joue le rôle d'un filler vu sa finesse qui est supérieure à celle du ciment ; d'après la figure (2-25) on remarque qu'au jeunes âges l'absorption massique diminue en fonction du pourcentage du sable de dune , mais après une dizaine de jours elle se rapproche et elle reste toujours inférieure à celle du témoin.

II-2-4 Conclusion :

D'après les résultats trouvés dans ce travail ; on peut tirer les conclusions suivantes :

- ◆ L'analyse diffractométrique des rayons X des pâtes de ciment à différentes proportions de sable de dune finement broyé, montre bien que ce dernier (en plus de rôle de remplissage) joue un rôle pouzzolanique mais partiel « fixation partielle de la chaux comparativement à celle du CSF » puis qu'il est siliceux et cristallisé (Quartz α); cette analyse nous a bien guidé à expliquer les résultats des essais sur bétons avec ajouts.
- ◆ A base de ces matériaux locaux , il est difficile d'atteindre une résistance voisine de 60Mpa avec un rapport E/C =0.27 ; vu que le sable utilisé est grossier ce qui induit des problèmes de maniabilité et aussi vu que l'efficacité du fluidifiant utilisé est limitée. Donc la composition optimale du béton sans ajouts est celle de (B7), qui assure une maniabilité acceptable avec un rapport E/C le plus faible possible (E/C=0.3) ; cette composition nous permet de gagner quelques MPa du point de vu résistance et d'améliorer les autres caractéristiques physico-chimiques.
- ◆ La composition optimale du béton à base de sable de dune est celle qui contient 10% de ce dernier et un rapport E/C =0.3 (B9), elle nous a permis d'atteindre la même résistance que celle du témoin avec des déformations de retrait moins importantes et une pâte plus compacte ; donc c'est une composition économique puisque on est arrivé à diminuer le dosage en ciment CPJ45 de 10% (soit 25% de CPA) toute en améliorant les caractéristiques mécaniques.
- ◆ Une simple étude comparative de l'effet du sable de dune et celui des CSF nous permet de dire que les caractéristiques des bétons avec CSF sont meilleures que celles des bétons avec sable de dune ,vu que ce dernier est cristallisé tandis que la CSF est amorphe et aussi la finesse du sable de dune n'est pas aussi grande que celle des CSF.

Conclusion Générale et Recommandations

Conclusion :

L'objectif de cette étude est d'améliorer les propriétés du béton en utilisant les matériaux locaux.

L'introduction des fillers siliceux (tels que les CSF) dans le béton permet d'améliorer leurs performances ; mais le coût élevé des CSF et leur non-disponibilité en Algérie nous a conduit à utiliser un autre ajout filler siliceux qui est le sable de dune finement broyé très abondant au sud Algérien, et comparer les résultats trouvés avec ceux d'un béton à base de CSF.

Le broyage poussé du sable de dune nous a permis d'obtenir un ajout très fin par rapport au ciment qui a comme surface spécifique ($SSB=5280 \text{ cm}^2/\text{g}$) ; mais elle reste toutefois très inférieure à celle des CSF dont la surface spécifique est de l'ordre de $20\text{m}^2/\text{g}$ au BET.

L'analyse par DRX du sable de dune broyé a montré que ce dernier est cristallisé (Quartz α), par contre les CSF sont amorphes. Afin de tester la réactivité pouzzolanique d'un sable de dune finement broyé et cristallisé, l'évolution des réactions d'hydratation a été suivie par DRX sur des pâtes de ciment à base de différentes proportions de sable de dune. Cette analyse a montré que ce matériau malgré qu'il soit cristallisé joue un rôle pouzzolanique mais partiel.

Les essais effectués sur le béton nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ◆ Il est difficile d'atteindre une résistance à la compression voisine de 60MPa avec un rapport $E/C=0.27$, vu que le sable utilisé est un sable grossier qui affaiblit la maniabilité et que le ciment utilisé s'est avéré moins efficace.
- ◆ La composition optimale du béton sans ajout assurant une bonne maniabilité est celle dont le rapport $E/C=0.3$, elle nous a permis de gagner quelques MPa de point de vue résistance mécanique (42.35MPa contre 40MPa pour un béton ordinaire) et d'améliorer les autres propriétés physiques à savoir les déformations de retrait et la densité.
- ◆ L'introduction du sable de dune broyé à raison de 10% améliore les caractéristiques du béton, mais on ne doit pas dépasser cette proportion (10% de sable de dune) vu que le ciment utilisé contient déjà 15 % de tuf (CPJ45).

- ◆ La composition optimale du béton avec sable de dune est celle qui comporte 10% de ce dernier, avec un rapport E/C=0.3 ; cette composition nous a permis d'atteindre une résistance à la compression comparable à celle du témoin tout en diminuant les déformations de retrait avec de plus une densification de la matrice.
- ◆ L'étude comparative de l'effet de sable de dune et celui des CSF a montré que les bétons avec CSF sont plus performants que ceux avec le sable de dune vu la grande finesse des CSF et leur forte réactivité pouzzolanique.

Donc en définitif cette étude nous a permis d'obtenir un modèle de composition de béton, à base de matériaux locaux, répondant aux exigences économiques tout en garantissant de meilleures performances en terme de résistance et de durabilité.

Recommandations :

Il serait très intéressant de compléter ultérieurement cette étude par des travaux prenant en considérations les axes suivants :

- ◆ Etude des réactions pouzzolaniques à long terme en présence de sable de dune.
- ◆ Etude de la morphologie des CSH à l'aide de MEB à très fort grossissement (>100000 fois).
- ◆ Etude des déformations différées à savoir le retrait et le fluage.
- ◆ Etude de la durabilité des bétons à savoir la résistance aux agents agressifs et la corrosion des aciers.
- ◆ Etude de la ductilité des bétons.

Annexe 1 : Les Adjuvants

I- Définition :

L'adjuvant est un produit d'addition destiné à améliorer certaines propriétés d'un béton de ciment ou bien à faciliter la préparation et la mise en œuvre du béton.

Un adjuvant n'est pas un simple produit, mais à la fois un produit et un procédé, parfois c'est un procédé seul avec un matériel approprié [4].

Il ne faut pas confondre un adjuvant avec un *dope*, car le mot *dope* signifie «*activant*» comme, par exemple, le chlorure de sodium qui est employé pour donner au ciment des résistances initiales plus élevées que celles des ciments de même catégorie non traitée, donc le chlorure de sodium constitue un simple *dope* qui n'améliore pas les résistances finales et donne par ailleurs des retraits plus accentués.

Mais il peut arriver qu'un produit qui se trouve être un simple *dope* pour certaines applications devient un adjuvant dans d'autres cas comme, par exemple, le chlorure de calcium qui devient un adjuvant lorsqu'on l'utilise pour pouvoir décoffrer rapidement (il devient un accélérateur de prise), et aussi pouvoir bétonner en période de gel, ou bien pour activer d'autres adjuvants.

Un adjuvant n'est pas un palliatif : il n'est pas destiné à donner au béton les qualités qui lui manquent par suite d'une granulométrie incorrecte ou d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse.

La quantité d'adjuvant utilisée pour n'importe quel mélange doit être soigneusement contrôlée.

II- Cas d'utilisation des adjuvants :

Les adjuvants ne peuvent corriger les imperfections dans le mélange, la manipulation et la mise en place du béton. Mais ils peuvent améliorer la maniabilité, réduire le risque des dommages dus au gel.

Les adjuvants sont employés pour les objectifs suivants :

- Accroissement de la compacité du béton, pour un dosage en ciment fixé et pour une granulométrie bien définie.
- Augmentation de la maniabilité, sans accroissement de quantité d'eau de gâchage.
- Diminution de l'hygroscopicité du béton.
- Accroissement des résistances mécaniques.
- Résistance au gel du béton durci.
- Durcissement par temps froid ou en période de gel intense.
- Résistance au bleeding (ségrégation de l'eau).
- Durcissement par temps de grande chaleur.
- Retarder la prise pour éviter les lits de reprise entre deux couches.
- Résistance aux eaux agressives.
- Résistance à la dessiccation du béton frais ou durci.
- Aptitude du béton à être coulé sous l'eau.
- Possibilité de démoulage rapide.
- Confection du béton léger ; béton clouable et non fissurable.
- Accélération de la vitesse de prise et de durcissement.

II- Différents types d'adjuvants :

Il existe plusieurs types d'adjuvants suivant leurs fonctions pour lesquels ils sont destinés :

II- 1 Adjuvants modifiants la rhéologie des matériaux :

Un certain nombre d'adjuvants peuvent modifier le comportement rhéologique des coulis, mortiers et bétons à l'état frais, avant le début de prise.

Les bétons sont formés d'un mélange de constituants très différents des uns des autres (Leurs dimensions, leurs densités et leurs proportions); Donc il est difficile de réaliser un mélange homogène qui conserve son homogénéité lors du transport et de la mise en place qui peut être très énergétique (vibration puissante).

La ségrégation et le ressuage guettent les bétons mal confectionnés.

L'eau joue divers rôles car elle permet l'hydratation du ciment et le mouillage des granulats.

La quantité d'eau varie en fonction de la qualité du béton et l'ouvrabilité recherchée.

L'excès d'eau peut conduire à l'hétérogénéité, le ressuage et la ségrégation, et il fait baisser la résistance mécanique et augmenter la porosité ; mais un manque d'eau peut être néfaste quant à la durabilité du béton en augmentant le pourcentage de vide [8].

La quantité d'eau peut être réduite grâce à certains adjuvants :

Réducteurs d'eau et fluidifiants.

II-1-1 Plastifiants - réducteurs d'eau :

Ce sont des adjuvants qui ont comme fonction principale, selon la norme française NF P 18-336 décembre 1986 :

- Réduction d'eau de gâchage d'un mortier ou d'un béton tout en gardant la même ouvrabilité (la valeur minimale de réduction d'eau est égale à 6.5 %).
- Augmentation des résistances mécaniques (l'augmentation à 3,7,28 et 90 jours ne doit pas être inférieure à 10 % en compression).

Certains utilisateurs s'en servent pour augmenter l'ouvrabilité à teneur en eau égale ou bien les deux effets, (c.-à-d. légère diminution de la teneur en eau associée à une amélioration d'ouvrabilité), c'est pour cela que cette catégorie d'adjuvant est appelée : *plastifiant –réducteurs d'eau*.

Les réducteurs d'eau peuvent provoquer des effets secondaires comme :

- Retarder la prise et parfois le durcissement (surtout dans le cas de surdosage).
- Entraîner un peu d'air (pour les produits tensio actifs).
- Plastifier les mortiers et bétons.

Il existe 2 types de plastifiants [4] :

- **Plastifiants classiques :** ce sont des produits d'addition pulvérulents très fins, ajoutés aux mortiers ou bétons à faible dose (2 à 3 % du poids de ciment), ils permettent la réduction d'eau tout en maintenant la plasticité désirée ou encore ils permettent d'augmenter la maniabilité sans augmenter la teneur en eau.

Parmi les plastifiants de cette nature on peut citer : la chaux grasse, bentonite, pouzzolanes très fines et cendres volantes rebroyées.

La finesse de ces poudres et leur affinité physique permettent de réaliser avec le ciment des mortiers plus gras et plus liants.

- **Plastifiants par adsorption :** ce sont des produits très différents chimiquement des précédents, ils sont souvent des tensio –actifs dont la molécule comprend une partie tensio

active, par exemple : les tensio actifs anioniques, les savons de résines, lignosulfonate sodique ou calcique, sels d'hydrocarbonés sulfoné et les d'acide hydroxycarboxylique.

II-1-1-a Mode d'action :

Il est différent suivant la nature des produits de base ; pour les tensioactifs ; la molécule tensioactive (voir fig1) comporte deux parties : [4,8]

- Une partie hydrophobe : a une chaîne carbonée suffisamment longue. la partie insoluble est rejetée à l'extérieur de la surface de l'eau et s'oriente de façon à être le plus loins possibles perpendiculairement à la surface de séparation eau - air.
- Une partie hydrophile : elle est généralement ionisable formée de groupes du type carboxylates ou des types sulfonate, elle facilite le mouillage concurremment avec la première qui abaisse la tension interfaciale au contact grain de ciment - eau.

Les bulles d'air comprises dans les grumeaux se dispersent d'où la défloculation capillaire qui est facilitée par abaissement de la tension interfaciale (voir fig. 3 § I.2.4 première partie).

Il existe un second rôle plus important des plastifiants par adsorption c'est le rôle de lubrification entre les grains de ciment grâce à l'orientation de molécules longues adsorbées, d'où une réduction de l'eau interposée entre les grains de ciment sans diminuer la maniabilité (voir fig. 4 § I.2.4 première partie).

❖ Effet du plastifiant sur le béton frais :

Pour une même teneur en eau, l'ouvrabilité est améliorée, et pour une même ouvrabilité la réduction d'eau varie souvent de 5 à 15% ; elle est d'autant plus élevée que l'ouvrabilité recherchée est plus grande.

Cette réduction d'eau a comme conséquences : [3,8]

- Moins de ressuage et de ségrégation (surtout si l'adjuvant est aussi un entraîneur d'air).
- Mise en place facilitée.
- Meilleure homogénéité (par dispersion des éléments fins et grâce à une meilleure répartition de l'eau interne).
- Facilité de malaxage.
- Meilleur enrobage des armatures d'aciers, et reprise de bétonnage facilitée.

Les lignosulfonates sont d'excellents réducteurs d'eau mais ils sont entraîneurs d'air et retardateurs de prise.

Un excès de lignosulfonate freine les réactions initiales entre le gypse et l'aluminate tricalcique C_3A de sorte que tout se passerait comme si le ciment contenait moins de gypse d'où une prise rapide (surtout dans le cas de ciment à forte teneur en aluminate tricalcique C_3A).

❖ Effet du plastifiant sur le béton durci : selon Venuat [3] :

- Une réduction de 1% du dosage en eau augmente les résistances mécaniques de 1% (les résistances mécaniques sont d'autant plus élevée que l'action réductrice d'eau des produits est prépondérante par rapport à leur effet entraîneur d'air).
- L'adhérence pâte de ciment - granulats est souvent augmentée.

- La diminution de la teneur en eau a comme conséquences une diminution de l'adsorption capillaire donc une augmentation de la pérennité des bétons.

Les doses à prendre des plastifiants varient de 0.2 à 0.5% du poids de ciment, on les utilise principalement :

- Pour les BHP.
- Pour les bétons à forte densité d'armature.
- Dans les centrales de béton prêt à l'emploi.
- Pour les grands travaux de bâtiment et travaux publics et pour le béton manufacturé.

Remarque : Il existe un autre type de plastifiant : c'est les rétenteurs d'eau qui servent à diminuer le ressuage, augmenter la rétention d'eau et améliorer l'homogénéité.

Ils sont utilisés dans le cas de :

- Mise en place du béton dans des pièces minces fortement ferrillées.
- Bétonnage en grande masse.
- Béton coulé sous l'eau (pour éviter le délavage).
- Béton transporté sur une longue distance (pour réduire la ségrégation).

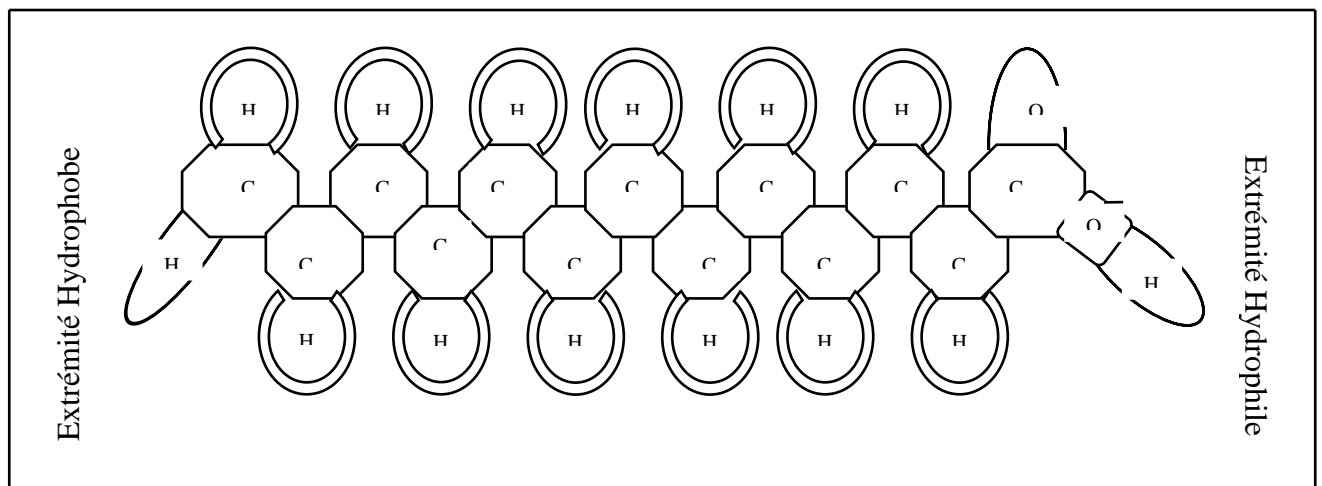


FIG 1 : Schéma d'une structure de molécule tensio - active (Joisel 1970)[8].

II-1-2 Les fluidifiants :

Un fluidifiant (appelé aussi *superplastifiant*) est un adjuvant, introduit dans un béton, coulis ou mortiers en général, peu avant sa mise en œuvre, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange (selon la norme NF P 18-333).

Certains fluidifiants peuvent avoir pour effet secondaire :

- Retarder la prise et /ou durcissement.
- Provoquer des phénomènes de ségrégation

L'écart minimal entre l'affaissement du béton fluidifié et celui du béton témoin est égal à 8cm.

Trente minutes après l'introduction du fluidifiant l'affaissement du béton adjuvanté doit être supérieur ou égal à 6cm.

Certains fluidifiants peuvent être utilisés pour obtenir deux effets simultanément :

- Celui de réducteur d'eau.
- Celui de fluidifiant.

II-1-2-a Produits de base :

Les fluidifiants sont souvent des résines synthétiques obtenues par réaction et traitement de

plusieurs corps organiques de structures très complexes.
Il existe des fluidifiants élaborés à partir de sous produits de l'industrie.

Les fluidifiants sont classés d'après leur composition en 4 catégories : (selon Venuat [8])

➤ Première catégorie : « Condensate mélamine sulfoné et de formaldéhyde »

Il résulte de la réaction entre une résine de mélamine de formaldéhyde suivi d'une sulfonation avec une solution bisulfite de sodium. Il est souvent sous forme liquide, ne modifie pas la tension superficielle de l'eau et il n'est pas entraîneur d'air.

➤ Deuxième catégorie : « Condensate de naphthalènesulfoné et de formaldéhyde »

Dès 1932 il fut commercialisé aux USA comme réducteur d'eau, mais récemment il fut commercialisé comme fluidifiant. Il résulte de la réaction entre le naphthalène et de la formaldéhyde suivi d'une sulfonation et d'une neutralisation par la sonde caustique.

➤ Troisième catégorie : « Lignosulfonate de calcium ou de sodium modifié »

Ce sont des produits tensio - actifs, ils sont retardateurs de prise (contenant des sucres de 1 à 30 %) et fortement entraîneurs d'air.

On peut les utiliser comme fluidifiant à condition d'opérer une solution (faible teneur en sucre et poids moléculaire élevé) et leur faire subir un certain nombre de traitement.

➤ Quatrième catégorie : « les autres produits »

Ils sont relativement peu utilisés, il s'agit de saccharoses, carbohydrates, gluconate de sodium et esters.

II-1-2-b Mode d'action : [41,42]

Le mode d'action des différents types de fluidifiants est très complexe. Les molécules de fluidifiant viennent se fixer par adsorption à la surface des grains, elles peuvent suivant le type du fluidifiant agir :

- Par formation d'une couche lubrifiante, séparant les grains les uns des autres (première catégorie). Les particules de ciment se déplacent plus facilement les unes par rapport aux autres sans avoir à vaincre des forces de cisaillement élevées, comme c'est le cas d'une agglomération des grains (la résistance d'écoulement est diminuée)
- En créant des forces de répulsion suffisantes pour empêcher le contact entre les grains de s'opérer et amener une défloculation de ces grains (deuxième catégorie)
- En réduisant la tension superficielle de l'eau par rapport au ciment et aux éléments les plus fins (seulement troisième et quatrième catégorie).

Donc dans tous les cas ; les grains de ciment se dispersent et présentent une plus grande surface d'attaque à l'eau : le mouillage est facilité, ce qui favorise l'hydratation.

Le potentiel Zêta (accroissement des charges négatives) est augmenté, et le dégagement de chaleur aux premiers instants est modifié.

L'adsorption s'opère différemment suivant la nature des constituants des ciments : la teneur en C₃A, en gypse ainsi qu'en alcalis et en C₄AF ; joue un rôle très important.

Des essais effectués montrent que ces fluidifiants ne sont pas aussi fortement adsorbés que certains réducteurs d'eau classique, ce qui explique qu'à dosage égal ils retardent beaucoup moins la prise

❖ Influence des fluidifiants sur les propriétés du béton frais :

L'ajout d'un fluidifiant permet d'augmenter considérablement l'ouvrabilité tout en conservant la

même teneur en eau ; il ne provoque pas de ségrégation ni de ressuage, et le matériau possède une bonne cohésion.

L'ajout de fluidifiant doit s'effectuer après un premier temps de mouillage et de malaxage (de l'ordre de 30 à 60 secondes).

Le C₃A joue un grand rôle pour l'augmentation de l'ouvrabilité et influe aussi sur la composition du béton (ce dernier doit contenir suffisamment des particules fines).

L'action du fluidifiant s'explique du fait qu'il agit sur les propriétés rhéologiques (il réduit la viscosité plastique et diminue le seuil de cisaillement). Il suffit donc d'exercer sur ce béton fluidifié une faible force d'écoulement pour s'écouler à une vitesse plus grande.

La plupart des fluidifiants ne modifient pas la tension superficielle, ils ne sont pas des entraîneurs d'air ; du fait de la fluidité du béton et du fait la défloculation des grains ne retenant plus l'eau, l'air accidentel s'échappe facilement et rend le béton plus dense et plus compact.

Certains fluidifiants augmentent le temps de prise.

La perte d'efficacité dans le temps est une caractéristique très importante des fluidifiants ; mais la combinaison du fluidifiant à un retardateur de prise (comme le gluconate de sodium) permet de limiter cette caractéristique (la combinaison est en général utilisée pour le bétonnage par temps chaud).

❖ Influence des fluidifiants sur les propriétés du béton durci :

lorsque le fluidifiant est utilisé pour augmenter l'ouvrabilité, les résistances mécaniques ne sont

pratiquement pas modifiées pour un même rapport E/C, par contre lorsqu'il est utilisé comme réducteur d'eau, les résistances peuvent être augmentées.

A plasticité égale l'augmentation des résistances mécaniques est très importante dans les premières heures (résistances multipliées par 2 ou 3 après 8 et 12 heures).

A un rapport E/C égal les retraits et fluages ne sont pratiquement pas modifiés (le fluage et le retrait devraient être diminués lorsque l'adjuvant est utilisé comme réducteur d'eau).

II-1-2-c Emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances :

Le fluidifiant est un produit important pour fabriquer des BHP en fait on peut dire «il n'y a pas un BHP sans fluidifiant» selon P C Aïtcin (1992) [43] qui a remarqué que :

- Dans certains cas, si le ciment est moyennement réactif ou le fluidifiant est moins efficace, l'emploi d'un retardateur s'impose - sans retarder indûment la prise du ciment- (il est préférable d'utiliser un retardateur à base de gluconate de sodium plutôt qu'à base de lignosulfonate pour y avoir moins d'air piégé dans le béton) ; l'incorporation du retardateur est de l'ordre de 10% du volume total du fluidifiant.

- Pour des raisons économiques certains producteurs de BHP utilisent simultanément un réducteur d'eau à base de lignosulfonate avec un fluidifiant.

L'effet des fluidifiants diffère d'un ciment à l'autre lors de la confection d'un BHP : certains ciments en présence d'un certain type de fluidifiant présentent des phénomènes d'incompatibilité «ciment –fluidifiant» (irrégularité des affaissements initiaux au cône d'Abrams, et des temps de prise et surtout perte rapide de maniabilité après fabrication)[20] donc il faut tenir compte dans la formulation des BHP du comportement du couple ciment-fluidifiant qui met en cause la

réactivité du ciment et l'efficacité du fluidifiant.

II-2 Adjuvants modifiant la prise du ciment :

Sur chantier, le bétonnage des ouvrages est tributaire des conditions climatiques. Il faut souvent pour satisfaire les délais fixés, pouvoir travailler en temps froid ou chaud, donc il sera nécessaire de modifier les temps de prise du ciment de façon à mettre en place le béton dans des meilleures conditions.

Dans le cas des centrales à béton, il faut s'assurer que la gâchée de béton ne commencera pas sa prise dans la bétonnière porteuse.

Donc on est amené soit à retarder, soit à accélérer la prise du ciment. Les adjuvants correspondant appelés : retardateurs ou accélérateurs de prise.

II-2-1 Les accélérateurs de prise et de durcissement :

Ce sont des adjuvants destinés à accélérer la prise ou le durcissement du béton ou bien les deux à la fois ; ils permettent le bétonnage par temps froid.

L'accélération de durcissement concerne les résistances à court terme (24 et 48 heures) sans aucune modification du temps de prise du ciment.

Les accélérateurs peuvent être :

- Des «acides » qui conduisent à une dissolution rapide de la chaux de base qui favorise, d'une part l'augmentation du PH >9, et d'autre part la dissolution de la silice.
- Des «alumine » ou bien des sels accélérateurs qui proviennent de ces acides ou de ces sels.

Parmi les adjuvants accélérateurs on peut citer «le chlorure de calcium » [44] qui est connu depuis longtemps, il provoque l'accélération du durcissement (à faible dose) et de prise (à forte dose) et aussi le dégagement de la chaleur d'hydratation dans un temps réduit.

Malgré que ce soit un produit classé parmi les plus efficaces, il peut entraîner une corrosion des aciers, une diminution d'adhérence acier/béton et un accroissement du retrait de prise et de durcissement ; c'est pour cela que l'utilisation du chlorure de calcium est réglementée (les teneurs maximales admissibles susceptibles être apportées par l'adjuvant sont calculées suivant la

destination du béton en fonction de la teneur en ions chlore et des autres constituants du béton : Ciment, granulats, eau...).

Il existe d'autres adjuvants qu'on peut classer en deux types :

- Les adjuvants chlorés : - chlorure de sodium.
 - chlorure d'aluminium, de fer, d'ammonium.
 - mélange de chlorure.
- Les adjuvants non chlorés :
 - bases alcalines : soude, potasse, ammoniacque.
 - sels de bases alcalines : aluminat de soude et de potasse, carbonate de soude et de potasse, silicate de soude et potasse.

On trouve également : - les sulfates de sodium et de potassium.

- les carbonates de sodium et de potassium.
- les nitrates et les borates.

II-2-1-a Mode d'action : [8]

On sait que les liants hydrauliques comportent des constituants basiques (à forte teneur en chaux) et des constituants acides (silice et alumine) : les constituants basiques sont accélérés par les anions les plus forts (chlorure, nitrates.) Et les constituants acides sont accélérés par les cations les plus forts (soude, potasse et ammoniac).

Les ciments portland (forte teneur en clinker) renferment beaucoup de silicates de chaux dont la dissolution sera accélérée par les acides et leurs sels. Les ciments à forte teneur en laitier ou en cendres volantes ou bien en pouzzolanes, qui renferment beaucoup de constituants silico-alumineux seront accélérés principalement par les bases et leurs sels.

II-2-1-b Effets principaux :❖ Effet du chlorure de calcium :

Le chlorure de calcium accélère la prise et augmente les résistances mécaniques surtout aux jeunes âges ; il est très efficace à basse température.

Les doses habituellement utilisées varient de 1 à 2% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ du poids du ciment.

Mais comme on a déjà signalé, il est redouté dans les bétons armés.

❖ Effet de la soude et de la potasse :

Les bases solubles accélèrent la dissolution de la silice et de l'alumine. Les hydroxydes de sodium (NaOH) et de potassium (KOH) accélèrent la prise et le durcissement aux premiers âges des ciments portlands ; il serait de même des hydroxydes d'ammonium.

Mais la soude et la potasse font diminuer les résistances mécaniques, surtout dans le cas de dosages élevés : la résistance peut être réduite de moitié avec 10% de soude ou de potasse après 28 jours.

Les chaleurs d'hydratation augmentent aux premières heures, car il y a une accélération du début de prise, mais à 7 jours les chaleurs dégagées diminuent.

L'ajout de ces bases augmente le retrait après durcissement au bout de plusieurs semaines, parce que la concentration en alcalis de la phase liquide augmente avec le temps du fait de l'évaporation d'une partie de l'eau libre dans l'atmosphère sèche.

Remarque :

Le gypse régulateur de prise :

- Retarde l'hydratation des ciments portland ; car il agit sur l'aluminate tricalcique (C_3A) ; en formant les aiguilles d'ettringite.
- accélère l'hydratation des ciments à forte teneur en laitier, car il agit sur les silicates et aluminates peu calciques.

Un adjuvant plus rapide que le gypse ou retardant son action en le mobilisant aura un effet sur la prise, le gypse complique la compréhension des phénomènes, car il y aura une interaction entre les adjuvants ajoutés et le gypse.

Donc on voit qu'il n'y a pas d'adjuvant accélérateur universel des liants ; certains adjuvants sont plus efficaces avec les ciments portland ; d'autres avec les ciments à forte teneur en constituants secondaires. Alors les adjuvants accélérateurs vont agir différemment en fonction de :

- Constituants chimiques et minéralogiques des liants.
- L'instant où sera ajouté l'adjuvant.
- La teneur en eau et de la température.

II-2-1-d Domaine d'utilisation des accélérateurs :

Les accélérateurs se présentent sous forme de liquide ou de poudre préalablement diluée. Ils s'utilisent à doses comprises entre 1 et 5 % du poids de ciment (dans le cas des travaux particuliers – scellement et projection- les doses varient de 4 à 10 %).

Les accélérateurs sont utilisés dans les cas suivants :

- bétonnage par temps froid.
- décoffrage rapide.
- réduction nécessaire des pressions sur le coffrage.
- Bétonnage sous l'eau.
- Etanchement et bouchage des fissures.
- Béton projeté.
- Scellement divers.

Remarque :

Généralement une accélération vigoureuse de la prise entraîne une chute ultérieure de résistance ; en outre les accélérateurs de durcissement entraînent une augmentation du retrait de prise et de durcissement et les risques de fissuration.

II-2-2 Les retardateurs de prise et de durcissement :

Ce sont des produits destinés à retarder la prise et le durcissement en permettant le bétonnage par temps chaud et en empêchant le risque de la fissuration par dessiccation excessive.

Selon la norme française NF p 18-103 : « un retardateur est un adjuvant dont la fonction principale est d'augmenter le temps de prise et de fin de prise du ciment dans le béton, mortier ou coulis. »

Souvent le retard de prise entraîne une diminution des résistances initiales (environ 20% à 7 jours)
mais, au-delà, on trouve progressivement les résistances du témoin [44].

Il existe d'autres moyens de retarder la prise comme, par exemple :

- Baisser la température (à 5 °C prise aura lieu par exemple à 8 heures au lieu 3 heures à 20°C).
- Un malaxage très prolongé (des essais de laboratoire ont montré qu'un malaxage continu sur la pâte pure empêche la prise de se produire).

D'une façon générale : [8]

- L'eau est un retardateur de prise
- Comme dans le cas des accélérateurs, le comportement des retardateurs de prise est très différent suivant la nature du ciment et le rapport E/C.
- Les résistances sont souvent augmentées (alors que les résistances aux premières heures sont diminuées).

Ces produits doivent être utilisés avec précaution, car des défauts d'homogénéité des mélanges ou des risques de surdosage peuvent conduire à des retards anormalement élevés, donc à des différences de degrés de durcissement entre gâchées (par exemple dans le cas du béton précontraint, on risque une rupture de béton lors de la mise en tension des câbles).

II-2-2-a Mode d'action :

Comme pour les accélérateurs, le mode d'action des retardateurs est complexe, mais on peut résumer leur action dans le cas des ciments courants de la façon suivante :

- Les retardateurs peuvent agir :
 - Dans la phase aqueuse en diminuant la solubilité et la vitesse de dissolution de certains constituants anhydres des ciments.
 - En se précipitant autour des grains de ciment (ou en formant avec la chaux des précipités enrobant certaines parties des grains anhydres) ; il y a formation d'un voile ou enveloppe (le retard dépend de l'efficacité du voile donc de sa perméabilité, son épaisseur, sa compacité, la présence ou non d'hétérogénéité et du PH du milieu).
 - En agissant à la fois comme réducteur de solubilité et comme colmateur.
- L'action du retardateur dépend de :
 - La quantité de C_3A , de C_3S , des alcalis et des sulfates contenus dans le ciment.
 - La nature et du dosage en adjuvant.
 - La composition et de finesse du ciment.
 - L'instant où l'on ajoute le retardateur.
 - La teneur en eau du béton et de la température.
- Certains adjuvants agissent surtout sur le $C_3A^{(*)}$, et d'autres surtout sur le $C_3S^{(*)}$ et peuvent ainsi être de retardateurs de prise ou de durcissement ou bien les deux à la fois.
Lorsque la totalité de l'adjuvant est consommée, l'hydratation se poursuit normalement.

II-2-2-b Produit de base :

Parmi les substances chimiques qui ont une action retardatrice on peut citer :

- Les sucres : notamment le saccharose.
- Les lignosulfonates de calcium, de sodium et d'ammonium : dont les teneurs en sucre sont Variées ; parfois 20% ; il s renferment beaucoup de xylose (mais très peu de saccharose)dont l'action retardatrice est moins élevée que celle de saccharose.
- Les acides et sels d'acides hydrocarboxyliques : ils renferment le groupe active du carboxyle (dans les sels l'hydrogène du groupe acide est remplacé par du sodium, ou du potassium ou
- Les acides : qui sont beaucoup plus actifs que le glucose, ils agissent à des doses faibles en formant une pellicule autour de C_3A .
- Les gluconates de sodium et de calcium.
- L'acide citrique et d'autres substances chimiques.

Remarque : L'argile serait un retardateur (non chimique mais physique) qui agirait par enrobage des grains de ciment et formerait une pellicule mince, véritable barrière à la diffusion des ions, empêchant ainsi la cristallisation régulière et homogène.

II-2-2-c Effets principaux :

❖ Action du sucre :

- D'après des essais effectués au LCPC sur l'effet du sucre [MOUTON 1972], il est constaté que :
- Les retards de prise croissent à peu près linéairement en fonction du pourcentage du sucre.
 - Les doses à utiliser pour provoquer un retard sont de l'ordre de 0.1 à 0.5 pour mille.
 - Le saccharose est plus actif que les autres sucres.

(*) : ces deux minéraux ont des cinétiques d'hydratation plus élevées que celles des autres minéraux du CPA (βC_2S et C_4AF) (voir § III-1-4 de la synthèse bibliographique).

Et d'après des essais effectués au CERILH sur le saccharose, il est constaté que :

- Le saccharose a un effet fluidifiant, il augmente l'étalement à la table à secousses.
- Les temps de prise sont très augmentés.
- Le voile formé autour des grains de C₃A bloque la poursuite de l'hydratation pendant un certain temps.
- Les chaleurs dégagées sont à 1 jour d'autant plus faible que le retard de prise est plus important, cependant à 7 jours avec 0.5 et 1 pour mille de saccharose, la chaleur dégagée est supérieure au témoin sans addition.
- Les résistances sont diminuées à 1 et 2 jours d'autant plus que le retard est plus important, et après 7 jours les résistances sont augmentées.

❖ Action des gluconates de soude et de calcium :

Ils ont souvent un effet fluidifiant ; ils agissent comme le saccharose à très faibles doses et retardent la prise des ciments courants ainsi que celle des ciments fondus alumineux.

De façon générale, il est constaté que pour les produits commerciaux :

- Les retards de prise sont à peu près proportionnels aux dosages employés ; à fortes doses ils peuvent être des accélérateurs.
- Ils sont efficaces aussi bien à 20°C qu'à 5°C ou à 40°C (sauf exception).
- Ils sont réducteurs d'eau.
- Ils diminuent aux premiers les chaleurs dégagées.
- Certains retardateurs peuvent diminuer la teneur en air occlus.
- Ils diminuent les résistances à 1 jour, mais ils augmentent les résistances finales
- Ils modifient peu le retrait hydraulique après prise.

Remarque :

Les produits commerciaux sont des mélanges dilués dans l'eau, il s'agit souvent de carbone, lignosulfonates, gluconates et d'acides organiques.

II-2-2-c domaines d'utilisation :

Les utilisations des retardateurs sont très nombreuses, on peut citer :

- Bétonnage par temps chaud (la prise étant accélérée par temps chaud, donc il est intéressant d'utiliser un retardateur).
- Bétonnage en grande masse.
- Bétonnage sur une longue distance.
- Béton prêt à l'emploi.
- Coulis et travaux d'injection des gaines de béton précontraint, les coulis pour sceller des câbles ou des tirants dans des trous de forage.

II-3 Adjuvants améliorant la résistance au gel des bétons durcis

« les entraîneurs d'air » :

Ce sont des produits qui ont pour but de réaliser un béton ou un mortier comprend un pourcentage d'air de 3 à 5 % de micro bulle d'air de 10 à 1000 microns de diamètre ; dont la répartition est homogène dans la masse du béton [3].

Ces bulles d'air agissent principalement sur la cohésion, l'ouvrabilité, la densité, les résistances et la durabilité ; elles sont différentes des vides.

II-3-1 Produit de base :

Les produits de base utilisés sont des substances tensio-actives analogue à celles des plastifiants réducteurs d'eau [8], il s'agit surtout de :

- Lignosulfonates.
- Abritâtes de sodium (résine Vinsol alcaline).
- Sel d'éthanolamine.
- Sulfonates d'alcools gras.
- Savons alcalins d'acide gras.

II-3-2 Mode d'action :

Dans le cas d'un béton sans adjuvant ; en plus du ciment hydraté et des granulats ; le béton durci contient aussi des vides aux formes et dimensions variées qui ont pour origine :

- Air naturellement entraîné lors du malaxage.
- Air provenant d'une évaporation de l'eau du béton.

Ces vides diminuent les résistances du béton, par contre l'air occlus du à des adjuvants a des propriétés très différentes : il s'agit de bulles de forme arrondie dont le diamètre varie de 10 à 1000 microns, la plus grande partie étant généralement comprise entre 10 et 300 microns.

La courbe granulométrique des grosses bulles d'air est continue, elle s'étend sur un domaine qui recouvre celui des ciments et des sables les plus fins des mortiers et bétons. Ces bulles peuvent être séparées les unes des autres (réparties dans la pâte ou collées aux granulats)ou bien collées les unes aux autres.

Selon M^{me} PAILLERE : l'idéal c'est d'avoir un adjuvant qui n'entraîne que des bulles d'air dont le diamètre compris entre 10 et 100 microns, car les grosses bulle peuvent présenter dans le matériau durci des microfissures (dont l'ouverture est de l'ordre de 1 micron) qui permettent parfois aux produits d'hydratation de ciment de pénétrer à l'intérieur même de ces bulles.

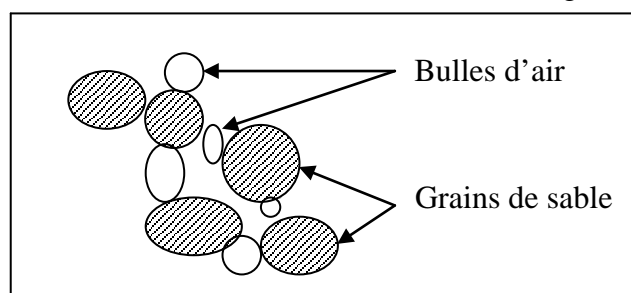
❖ *Influence sur les propriétés du béton frais :* [4]

Les bulles d'air jouent le rôle d'un fluide et d'un inerte :

- D'un fluide : en remplaçant une partie de l'eau de gâchage, par exemple pour un béton 0/20 mm dosé à 300 Kg de ciment /m³, un certain pourcentage d'air occlus a% a le même effet que a/2 % d'eau, donc l'entraîneur d'air peut être considéré comme réducteur d'eau. Plus le pourcentage d'air occlus est élevé plus l'ouvrabilité est améliorée.

- D'un inerte : en remplaçant par leur granulométrie une partie de sable fin (inférieur à 1mm) Mais elles ont un coefficient de forme meilleur que celui du sable et elles sont plus déformables, plus élastiques et peuvent glisser sans frottement.

Donc les adjuvants entraîneurs d'air améliorent la rhéologie des mortiers et bétons à l'état frais.



Il y a d'autres conséquences de l'introduction des entraîneurs d'air :

- Plus grande homogénéité du béton, diminution de ségrégation.
- Mise en place facilité.
- Plus grande cohésion et diminution de ressuage.
- Retrait avant prise diminué.

❖ *Influence sur les propriétés du béton durci :*

Les bulles d'air changent la structure, jouent le rôle de réservoirs d'expansion (en cas de gel et pour l'eau non encore congelée), elles jouent aussi le rôle de couper la pression capillaire, de réduire la perméabilité des bétons par le rassemblement de l'air dispersé dans les capillaires de diverses grossures en des bulles sphériques fines régulièrement dispersées dans la masse, ce qui réduit le diamètre du réseau de capillaires [3 ;4].

Selon FERET [8] les résistances mécaniques varient en fonction du rapport $C / (E+v)$.

Avec : C : dosage en ciment, E : quantité d'eau et v : % des vides /m³ de béton.

A plasticité égale l'ajout d'air permet de réduire la quantité d'eau.

Pour un faible pourcentage d'air occlus ; la somme (E+v) peut rester constante, les résistances mécaniques sont alors inchangées.

Mais plus le pourcentage d'air occlus augmente, plus les résistances diminuent (environs 4% de chute de résistance pour chaque 1% d'air entraîné), ce que l'on peut compenser en totalité ou partiellement par la réduction du dosage en eau ou bien par l'augmentation du dosage en ciment.

II-3-3 Domaine d'utilisation :

Les entraîneurs d'air agissent à très faible dose (0.05 à 0.5 pour mille du poids de ciment).

Ils peuvent être ajoutés :

- A certains matériaux livrés prêt à l'emploi.
- Au moment de fabrication de certains liants (liants à maçonner et chaux hydraulique artificielle).
- Au moment de la fabrication de certains mortiers industriels secs.

Les entraîneurs d'air sont utilisés pour la confection des bétons classiques (armés ou non), et aussi pour certains bétons spéciaux (ils sont particulièrement recommandés avec les granulats légers).

Il sont aussi utilisés dans les centrales à béton et pour les bétons projetés.

Quelques remarques :

1. Il faut signaler que les entraîneurs d'air ne peuvent être utilisés qu'après étude sur le béton prévu pour l'ouvrage. La quantité d'air occlus varie (pour un adjuvant donné et à une dose déterminée) avec le diamètre maximal des granulats et avec la granulométrie du sable fin.
2. D'après une étude faite par M^{me} PAILLÈRE et al (1977)[44] le rapport $S/(S+g)$ (avec S : quantité du sable fin 0/1mm et g : quantité du sable moyen 1/4mm) est très important pour le pourcentage d'air entraîné quel que soit le produit utilisé. (pour une valeur du rapport de 0.94 la teneur en air occlus est peu différente de celle du témoin -1.2 à 1.8 fois la valeur du témoin - et pour une valeur du rapport comprise entre 0.1 et 0.3 le pourcentage d'air occlus passe par un maximum pour tous les produits testés sauf le produit à base de résine).
3. La teneur en air varie avec la teneur du ciment, la finesse et le dosage. Il faut d'autant plus d'adjuvant pour obtenir le même pourcentage d'air global que :
 - Le ciment contient moins de sulfates et moins d'alcalis solubles.

- Le ciment contient plus de cendres volantes et de fillers.
 - Le ciment est plus fin.
4. Des essais fait par VENUAT ont montré que la teneur en air total augmente avec l'addition du chlorure de calcium et JOISEL a expliqué ça par la diminution de la solubilité de certains adjuvants tensioactifs due présence des ions calcium du chlorure.
 5. Les bétons contenant des entraîneurs d'air simples doivent être vibrés légèrement et avec précaution.

II-4 Adjuvants modifiant la perméabilité du béton (hydrofuges de masse) :

Ce sont des produits destinés à diminuer :

- L'absorption capillaire de l'eau qui est un phénomène lent, dont la stabilité peut demander de nombreuses semaines.
- Le débit d'écoulement de l'eau sous pression à travers un béton saturé (perméabilité) qui est un phénomène rapide.

Selon la norme NF P 18-103 (juin 1981) «c'est un adjuvant dont la fonction principale est de conduire à une diminution à la fois de l'absorption capillaire du béton, mortier et coulis durci, et du débit d'écoulement en eau à travers le béton, mortier ou coulis durci, saturé mis sous gradient hydraulique ».

Il arrive parfois qu'un béton soit trop perméable, donc pour certains ouvrages ont est amené à exiger une hydrofugation élevée du béton, on a recours à des hydrofuges qui s'opposent à la pénétration de l'eau provenant de l'humidité du sol ou des parois ou des intempéries.

Il existe des hydrofuges de surface qui agissent en empêchant l'eau de pénétrer, ce sont généralement des enduits superficiels.

II-4-1 Produit de base :

Les hydrofuges sont des substances insolubles dans l'eau [44], qui ont pour rôle essentiel d'obturer les capillaires et limiter la pénétration ou la circulation d'eau dans le béton. Ils sont généralement à base de savons naphthétique (obtenus lors du raffinage des huiles minérales ou à partir de lignosulfites)ou encore de silicones.

Le plus souvent les hydrofuges sont des sous produits industriels.

II-4-2 Mode d'action : [8]

Les hydrofuges de masse sont des produits capables de réduire la dimension des capillaires et des vides de toutes sortes.

Ils agissent physiquement voire chimiquement grâce à la présence de leurs composants :

- de corps capable de réagir avec certains constituants des ciments pour donner naissance à de fins cristaux venant tapisser l'intérieur des pores et canicules.
- de particules très fines à surface spécifique élevée pouvant former avec l'eau de gâchage de véritables gels colmatants.
- de produits modifiants les réseaux capillaires (réducteurs d'eau) ou formant de fines bulles d'air venant couper les capillaires et s'opposant à la pénétration de l'eau.

Mais les hydrofuges ne peuvent pas boucher les pores que si ceux-ci sont relativement petits ; ils

ne peuvent pas rendre étanche un béton mal composé qui présente des vides importants ou une hétérogénéité.

Certains hydrofuges peuvent entraîner un ralentissement de la prise et du durcissement, et une augmentation du retrait, voire une réduction des résistances mécaniques finales ; c'est pour cela qu'en France il a été fixé les seuils d'acceptation suivantes :

- La durée de fin de prise ne doit pas dépasser de plus de 3 heures de celle du témoin.
- Le retrait à 20 °C et à 50 % d'hygrométrie ne doit pas être supérieure à celui du témoin de plus de 10 %.
- Les résistances mécaniques à partir de 3 jours ne doivent pas être inférieures à celles du témoin de plus de 15 %.

Annexe 2 : Fiches Techniques

édition 04/99

Fiche Technique

MEDAPLAST SP

Superplastifiant pour béton

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP** est un superplastifiant réducteur d'eau pour béton, compatible avec tous les types de ciment et se diluant parfaitement dans l'eau de gâchage.

CARACTERISTIQUES

Forme liquide
Couleur marron
Densité 1,18 (\pm 0.01)
pH 7/8
Teneur en chlore < 1g/l

PROPRIETES ET EFFETS

Sur le béton frais :

- Amélioration de l'ouvrabilité à rapport E/C constant pour un béton témoin ayant un slump de 3 à 8 cm **MEDAPLAST SP** permet d'obtenir un slump de 12 à 20cm.
- Conservation de l'ouvrabilité par temps chaud
- Réduction du rapport E/C de 10 à 15 %
- Réduction du dosage en ciment de 5 à 10 %

Sur le béton durci :

- Améliore les résistances mécaniques
- Diminue la porosité
- Permet d'obtenir un beau béton brut de décoffrage
- Augmente la durabilité du béton
- Améliore l'adhérence granulats - ciment
- Diminue l'absorption capillaire
- Diminue la teneur en eau

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances mécaniques
- Pièces à ferrailage dense
- Emploi de coffrage, tunnel, tables et banches, glissants
- Béton brut de décoffrage
- Bétonnage par temps chaud
- Bétonnage par temps froid
- Béton pompé
- Coulis d'injection
- Béton en grande masse
- Béton prêt à l'emploi

DOSAGE

Le dosage varie selon le type du béton :

- Béton ordinaire :
0,5% à 1% du poids du ciment
- Béton pompé :
1,5 % à 2 % du poids du ciment
- Béton à hautes performances (B.H.P) :
3% à 4% du poids du ciment

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP** est mélangé dans la 2^{ème} partie de l'eau de gâchage ou versé directement dans la bétonnière.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Bidon de 12 kg
Fûts de 65 et 265 kg
Conteneur de 1200 kg et vrac.

Durée de conservation : une année à l'abri de la chaleur et du gel dans l'emballage d'origine.

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



GRANITEX NOUVEAUX PRODUITS

Zone Industrielle - 16270 OUED-SMAR (Algérie) Boite Postale 85
Tél. (02) 51.65.23 / 51.65.55 - Fax (02) 51.64.22
Usine : ROUMANA 28303 - Route de Biskra - B.P. 225 BOU-SAADA
Tél. (05) 52.26.01 / 02 - Fax (05) 52.26.00
site web : www.granitex-np.com
e-mail : granitex@ist.cerist.dz

édition 04/00

Fiche Technique

MEDAFLUID SF

Superplastifiant - Fluidifiant

PRESENTATION

Le **MEDAFLUID SF** est un fluidifiant sans chlore, compatible avec tous les types de ciment. Il est aussi un réducteur d'eau (effet secondaire).

CARACTERISTIQUES

Forme.....Liquide
Couleur.....Marron
pH.....7,5 - 8,0
Densité.....1,18
Teneur en chlore< 1g/l

EFFET SUR LES BETONS

Par ses actions fluidifiantes le **MEDAFLUID SF** améliore considérablement l'affaissement au cône d'Abrams ; augmente le délai de maniabilité ; augmente les résistances.

En plus de son action fluidifiante, **MEDAFLUID SF** diminue la friction interne et externe du béton et augmente la cohésion.

MEDAFLUID SF assure une meilleure homogénéité et évite la formation de nids de gravier. La résistance du béton n'est pas altérée par la fluidification supplémentaire.

Evolution des résistances mécaniques

	Affaissement au cône d'Abrams (en cm)	Air occlus %	Résist. à la compression (bars)		
			1 J	7 J	28 J
Béton témoin	5	5,6	16	270	380
Béton dosé à 1% de SF	14	2,9	65	290	420

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenue pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

DOMAINE D'APPLICATION

L'utilisation de **MEDAFLUID SF** est très appréciée pour :

- Pièces minces à ferrailage dense
- Béton pompé sans forme de ségrégation
- Injection de voile et gaine de précontrainte
- Fabrication de dalles et prédalles
- Emploi coffrage tunnel et banche
- Galeries de barrage

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,8 à 1,8 % du poids du ciment

MODE D'EMPLOI

La température d'emploi se situe entre 5°C et 35°C.

- Dans la bétonnière, il s'ajoute dans la deuxième partie d'eau de gâchage, et doit être suivi d'un malaxage d'environ de 30 secondes.
- Dans le camion malaxeur, le **MEDAFLUID SF** doit être ajouté dans la toupie et malaxé à grande vitesse pendant environ 1 minute par m³ de béton.

Traitement de cure

Comme pour les bétons de qualité, les surfaces doivent être maintenues humides pour assurer une hydratation correcte du ciment.

Avant tout décoffrage frontal s'assurer que le béton a une résistance suffisante, particulièrement par temps frais.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLUID SF** est conditionné en bidons de 12 kg et en fûts de 65 kg et 265 kg.

La température de stockage doit être supérieure à 5°C et inférieure à 35°C.

Si le produit a gelé, le dégeler à + 20°C et agiter jusqu'à ce qu'il retrouve ses propriétés physiques initiales.

Durée de conservation : 1 année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.



GRANITEX NOUVEAUX PRODUITS

Zone Industrielle - 16270 OUED-SMAR (Algérie) Boite Postale 85
Tél. (02) 51.65.23 / 51.65.55 - Fax (02) 51.64.22
Usine : ROUMANA 28303 - Route de Biskra - B.P. 225 BOU-SAADA
Tél. (05) 52.26.01 / 02 - Fax (05) 52.26.00
site web : www.granitex-np.com
e-mail : granitex@ist.cerist.dz

Annexe 3 :
Photographie



Fig 1 : Augmentation de la maniabilité en présence du fluidifiant



Fig 2 : Mesure de l'absorption capillaire.



Fig 3 : Phénomène de ressuage en absence des CSF



Fig 4 : Absence du phénomène de ressuage en présence des CSF

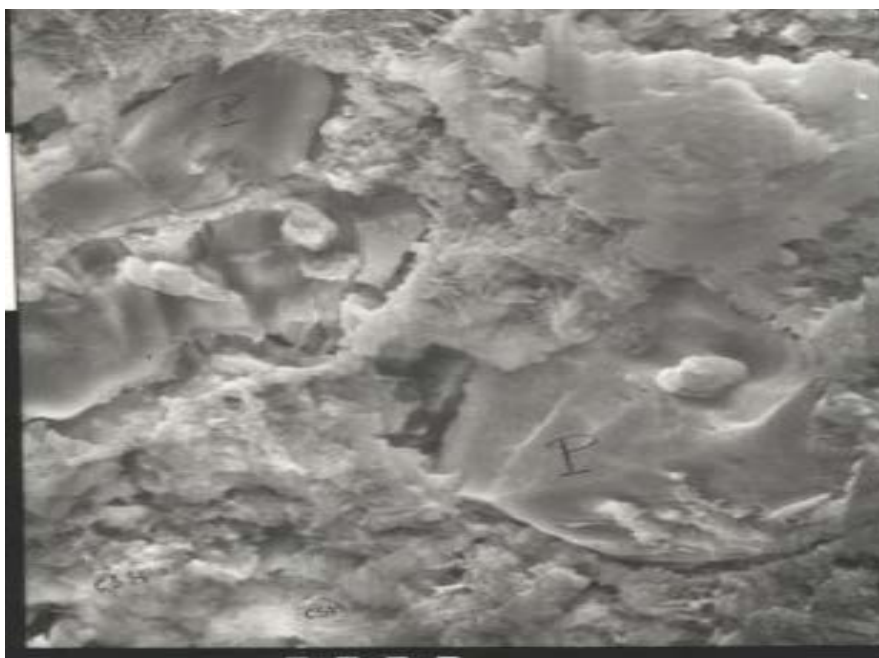


Fig 5 : Vue par MEB montrant la portlandite (P)

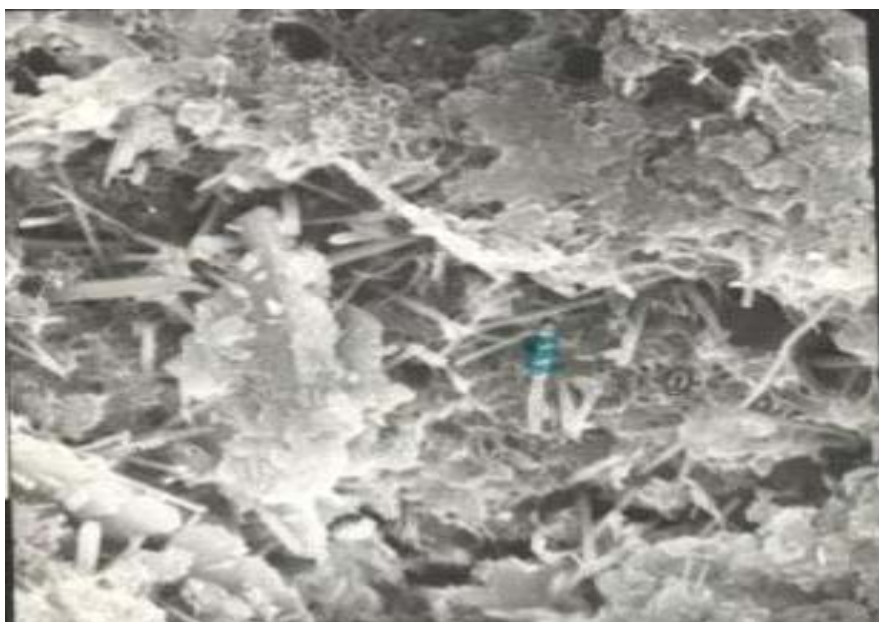


Fig 6 : Vue par MEB montrant les aiguilles d'ettringite.

Références Bibliographiques

- [1] : **A.NABILA et AL FADHLI** : « Contribution à l'étude du comportement des ciments actuels –Application sur chantier : maniabilité ; temps de prise et durcissement ».Annales de ITBTP .N°469. pp 7-27. Décembre 1988.
- [2] : **M.VENUAT** : « La pratique des ciments mortiers et bétons ».. Edition Moniteur. Tome I 2^{ème} édition. Paris .
- [3] : **M.VENUAT** : « La pratique des ciments et des bétons » Edition Moniteur. Paris 1976.
- [4] : **M.DURIEZ et J.ARRAMBIDE** : « Nouveau traité de matériaux de construction » Edition DUNOD. Paris 1961.
- [5] : **R.DUPAIN ;R.LANCHON et J-C .Saint –ARROMAN** : « Granulats ,Sols ,Ciments et bétons ». Edition CASTEILLA. Paris 1995.
- [6] : **R.LESAGE** : « Les granulats » dans « Le béton hydraulique ». Presse de l'E.N.P.C. Paris 1982.
- [7] : **P.C.AITCIN** : « La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord » Materials and structures . N°20. pp 180-189.1987.
- [8] : **M.VENUAT** : « Adjuvants et traitements (techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton) ». Edition Moniteur. 1^{ère} édition. Paris.1984.
- [9] : **V.S.RAMACHANDRAN et ZHANG Chun-Mei** : « Hydratation kinetics and microstructural development in the 'C₃A – CaCO₃ – gypsum – H₂O' systems » . Materials and structures .Vol 19 N°114 . pp 437-444. Edition RILEM 1986.
- [10] : **M. BUIL** : « Comportement physico-chimique du système ciment- fumée de silice » Annales de ITBTP N°485. pp19-29–1990.
- [11] : **I .SOROKA** : « Concrete in Hot Environments ». Edition Modern Concrete Technology Series London 1993.
- [12] : **R.SIERRA** : « L'hydratation des ciments portland » . Bulletin des LCPC Spécial 0. pp48-57 Paris. Juin 1970.
- [13] : **M.REGOURD** : « L'hydratation des ciments portland » dans «Le béton hydraulique ».Presse de l'E.N.P.C .pp193-221.Paris 1982.
- [14] : **M.N.OUDJIT** : « Matériaux de construction ». Cours destinés aux ingénieurs en Génie Civil /USTHB.
- [15]**J.SKALNY et J.YOUNG** : « Mécanisme d'hydratation du ciment portland » . 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments . Vol I . Paris 1980.

- [16] : **M.N.OUDJIT** : « Influence des ajouts naturels et artificiels sur la prise et le durcissement des bétons et mortiers » Thèse de DEA. INSA de Toulouse 1981.
- [17] : **M.N.OUDJIT** : « Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment portland » .Thèse docteur -ingénieur INSA de Toulouse .Janvier 1986.
- [18] : **M.N.OUDJIT** : « Influence du Carbone imbrûlé sur la réactivité des fumées de silice condensées en présence du ciment portland »in « Conférence Internationale sur la sismicité ,le Génie –parasismique et la gestion des catastrophe naturelles en Algérie » IGC / USTHB Alger 1999.
- [19] : **V.YOUGENDRAN, B.W.LANGAN et M.AWARD** : « Hydratation of cement and silica fume paste » in « Cement and Concrete Research » Volume 19 N°4 Juillet Toronto.1989
- [20] : **F. DE LARRARD** :« Compatibilité ciment- superplastifiant dans les BHP (synthèse bibliographique) » Bulletin des LCPC .N° 206.pp63-73.Paris Novembre-Décembre 1996.
- [21] : **Y.MALIER** :« L'utilisation du BHP dans une approche 'système' de la construction » dans « Les BHP (caractérisation ,durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C pp3-21.Paris 1992.
- [22] : **M.MORANVILLE –REGOURD** :« Microstructure des BHP » dans « Les BHP (caractérisation ,durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C .pp 25-44. Paris 1992.
- [23] : **V.BAROGEHEL-BOUNY ; P.ROUGEAU ; S.CARE et J.GAWSEWITCH** :
 « Etude comparative de la durabilité des bétons B30 et B80 des ouvrages jumeaux de Bourges. I – Microstructure, propriétés de durabilité et retrait ».Bulletin des LCPC N°217. pp 61-73.Paris Septembre - Octobre 1998.
- [24] : **F. DE LARRARD et Y. MALIER** : « Propriétés constructives des bétons à hautes performances de la micro – à la macrostructure » dans « Les BHP (caractérisation, durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C. pp129-155. Paris 1992.
- [25] : **F. DE LARRARD et C.PUCH** : « Formulation des bétons à hautes performances ; la méthode des coulis » dans « Les BHP (caractérisation ,durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C.pp79-93. Paris 1992.
- [26] : **L.BOUBAKIR** : « Elaboration et étude des BHP » Thèse de Magister ENP Alger 1999.
- [27] : **H.M.MARZOUK et P.K.MEHTA** : « Effect of coarse- agregate characteristics on mechanical properties of high srength concrete » in ACI materials journals, N°89,March-April 1990.

- [28] : **F. DE LARRARD** : « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances » ; Thèse Docteur-ingénieur ;ENPC Paris 1988.
- [29] : **M.AUPERIN, F.RICHARD et al** : « Retrait et fluage de béton à hautes performances » Annales I.T.B.T.P N°474 Mai 1989.
- [30] : **L.PLINSKIN** : « BHP Aspects réglementaires » dans « Les BHP (caractérisation, durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C.pp243-252. Paris 1992.
- [31] : **M.LORRAIN** : « Adhérence Acier - Béton de haute résistance » dans « Les BHP (caractérisation, durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C.pp177-196. Paris 1992.
- [32] : **F.DE.LARRARD et C.BOULAY** : « Comportement post - rupture du béton à hautes ou très hautes performances soumis en compression .Bulletin LCPC,179 Mai - Juin 1992.
- [33] : **A.BOZIDI ; M.GHRICI et A. BRAHMA** : « Elaboration d'un BHP à partir de matériaux locaux » in « Algérie Equipement » Revue Technique de l'ENTP, Alger N°16 Novembre 1994 ,PP 7-11.
- [34] : **A.LOGBI** : « Effet de l'incorporation des ajouts sur les propriétés mécaniques des bétons » .Thèse de Magister ENP, Alger 1999.
- [35] : **H.KHELAFI, D.KERDAL et C.BENIREMOUR** : « Influence chimique et physique de la pouzzolane sur la résistance en compression des mortiers » in « Algérie Equipement » Revue Technique de l'ENTP, Alger N°14 Juillet 1994 ,PP 2-5.
- [36] : **R.OUAHES et B.DEVALLEZ** : « Chimie générale » .OPU. 2^{ème} édition . Alger 1981.
- [37] : **G.DREUX** : « Nouveau guide du bétons ». Edition EYROLLES. Paris 1995.
- [38] : **F.GORISSE** : « Essais et Contrôle des bétons ». Edition EYROLLES. Paris 1978.
- [39] : **P.C.AÏTCIN ; A.CARLES-GIBERGUES ; M.N.OUDJIT et A.VAQUIER** : « Influence des éléments autres que Si sur la réactivité des fumées de silice » .8 Congresso International de Quimica do cimento. Thème 3 Volume IV. Rio de Janeiro .Brésil.1986
- [40] : **R.DUVAL et ELHadj KADRI** : « La fumée de silice et la maniabilité des bétons à hautes performances ».Annales de ITBTP .Novembre 1997.
- [41] : **P.C.AÏTCIN ; C.JOLICOEUR et Mc. GREGOR** : « Superplastizers, How they work and why they occasionally Don't » in « Selected papers on superplastizers ». Vol II pp9-46. Edition HANDY Chemicals LTD. Quebec 1994.
- [42] : **S.Y.N.Chan et N.Q.Feng et M.K.C.Tsang** : « Workability retention of high strength /Superplasticised concrete » .Magazine of Concrete Research .Vol48.N°177.1996.
- [43] : **P.C. AITCIN** : « L'emploi des fluidifiants dans les BHP » dans « Les BHP (caractérisation ,durabilité et applications) ».Presse de l'E.N.P.C Paris 1992.

[44] : **A.M. PAILLÈRE** : « Les adjuvants » dans « Le béton hydraulique ». Presse de l'E.N.P.C. Paris 1982.

✕ Résumé

La prise et le durcissement des bétons sont régis essentiellement par l'hydratation du ciment. Cette hydratation peut être modifiée par l'incorporation d'ajout minéral d'origine naturelle ou artificielle qui se traduira soit par un changement de la nature et de la structure des hydrates formés ou encore par la cinétique d'hydratation.

L'un des meilleurs ajouts utilisés pour améliorer les caractéristiques des bétons est la *fumée de silice condensée* qui a double rôle : rôle de remplissage vu sa grande finesse, et rôle pouzzolanique qui conduit à densifier la pâte de ciment en fixant la chaux libérée par le ciment lors de l'hydratation.

La non disponibilité de ce matériau en Algérie nous a conduit à remplacer cet ajout par un autre matériau siliceux qui est «le *sable de dune* » finement broyé.

Notre recherche consiste à valoriser les matériaux locaux utilisés dans les constructions en introduisant *le sable de dune* broyé et étudier son effet sur les caractéristiques des bétons.

C'est pour cette raison et pour répondre à la question suivante «la réaction pouzzolanique est-elle possible en présence du *sable de dune* broyé malgré qu'il soit cristallisé ? » ; une analyse par diffractométrie des rayons X a été étudiée sur des pâtes de ciment à différentes proportions du *sable de dune broyé*, et comparer ces résultats avec ceux trouvés en présence de *fumée de silice condensée* (CSF).

Mots clés : Hydratation des ciments ; Sable de dune broyé ; Réaction pouzzolanique ; Résistance à la compression ; Retrait ; Déformation ; Porosité.