

REPUBLIQUE ALGERIENNE **DEMOCRATIQUE** ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS

THESE DE MAGISTER

Spécialité : **Matériaux et structures**



Mr Abdenmour BOUCHOUKA
Ingénieur d'état en génie civil

AMELIORATION DES PROPRIETES **PHYSICO-CHIMIQUE** ET MECANIQUE DES **BETONS**
USUELS A BASE DE SABLE DE DUNE **SILICEUX**
FINEMENT BROYE

Soutenue publiquement le 13/05/2002 devant le jury composé de :

Mlle Z.DERRICHE	Maître de conférence à l'ENTP	Présidente
Mr M.N.OUDJIT	Chargé de cours à l'USTHB	Dteur de thèse
Mr Y.KEHILA	Maître de conférence à l'EPAU	Examineur
Mr M.AMIEUR	Maître de conférence à l'ENTP	Examineur
Mr B.GUETTACHE	Chargé de cours à l'ENTP	Examineur
Mme K.HEDROUG	Chargée de cours à l'USTHB	Exriminatrice
Mme Ait.MESBAH	Directrice au Ministère de l'habitat	Invitée

ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS
Rue **Sidi-Garidi**, Vieux Kouba, ALGER-ALGEIIIIE

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le BON DIEU, clément et miséricordieux qui sans lui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de thèse Mr M.N.OUDJIT Docteur Ingénieur, chargé de cours à l'U.S.T.H.B de nous avoir orienté par des conseils et des encouragements tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont à Melle DERRICHE qui nous a fait le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Nos remerciements vont à Mr Y.KEHILA Maître de conférence à l'EPAU, Mr M.AMIEUR Maître de conférence à l'ENTP, Mlle K.HEDROUG chargée de cours à l'USTHB, Mr B.GHETTACHE chargé de cours à l'ENTP et Mme AIT.MESBAH Directrice au ministère de l'habitat, qui ont bien voulu enrichir ce travail par leurs précieuses contributions en ayant accepté de faire partie de ce jury.

Il nous est agréable d'exprimer notre profonde gratitude à Mr F.KAOUA, Doyen de la faculté de génie civil, qui nous a permis de réaliser nos essais dans les laboratoires de l'FGC.

Nos remerciements s'adressent également à Mr M.ADEM chef du département recherche et post-graduation de l'ENTP pour son aide précieuse.

Nous remercions vivement Monsieur le Directeur de la cinienterie Rais Hamidou d'Alger pour nous avoir autorisé à réaliser un ciment CPA en collaboration avec Monsieur M.BERKANI, chef du laboratoire contrôle de qualité, ainsi que les ingénieurs et techniciens de ce laboratoire en particulier LILA, YOUNES, ABDENNOUR,etc.

Nous tenons aussi à adresser nos sincères remerciements à Mr DJAADOUNE, enseignant à la F.S.T/U.S.T.H.B, Mlle K.ARROUDJ et Mlle D.CHIHAB chercheurs de l'FGC/U.S.T.H.B, à Mr Z.GABA architecte de l'EPAU ainsi qu'aux techniciens des laboratoires de l'FGC/U.S.T.H.B et en particulier Mr R.NECIR.

Nous remercions toute l'équipe du laboratoire centrale des travaux publics (L.C.T.P) d'Alger et en particulier Mr M.BOUHEDDA, chef de département des matériaux et tous les techniciens du laboratoire béton.

Enfin, que toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.

ملخص :

الدراسة المقدمة هنا تدخل في إطار إعادة اعتبار المواد المحلية. إن إدخال رمل الصحراء مرحي بدقة وغني بالسيليوم في الإسمنت يمكن من الحصول على نوع جديد من إسمنت CPJ ذات فعالية فيزيائية – كيميائية و ميكانيكية، في الحالة الرطبة أو الصلبة أحسن من تلك المحصلة من إسمنت CPJ الأول. من جراء التفاعلية البوزولانية (المثبة بانتشار أشعة X) و دور ملء الفراغ الناتج عن دقة حبيبات رمل الصحراء فإن الشد و الخرسانة المنجزة بواسطة هذه الإضافة هم أكثر تراص و منه فإنها تصبح أدوم. إن المساحة الخاصة الكبيرة جدا ($20 \leq m^2/g$ [B E T]) لدخان السيليس (C S F) وحالتها الزجاجية سمحت بالحصول على فعاليات جد عالية بالنسبة لتلك المحصل عليها باستعمال رمل الصحراء. لكن هذا النوع من الإضافة غالي بالإضافة إلى أنه غير متوفر في الجزائر. إن أفق استعمال رمل الصحراء مرحي بدقة في صناعة الإسمنت من جراء خاصية تفاعلها مع الجير تعد بالكثير في المستقبل.

كلمات مفتاحية :

التفاعلية البوزولانية – تميز – نقلص – الإمتصاص الشعري – مقاومة ميكانيكية – المسامية – رمل الصحراء – CSF - الكالسيت.

Résumé :

L'étude effectuée s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux. L'incorporation du sable de la dune finement broyé (SD) et siliceux, sous forme de substitution, aux ciments Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de CPJ ayant des performances **physico-chimiques et** mécaniques, tant à l'état frais que durci, supérieures à celles du ciment Portland initial. De part , leur réactivité pouzzolaiique (mise en évidence par DRX) et leur rôle de remplissage dû aux fines particules du SD, les mortiers et bétons à base de cet ajout soit plus compacts et du coup leur durabilité sera améliorée. La surface spécifique très grande ($> 20m^2/g$ [BET]) de la fumée de la silice et de son état vitreux ont permis d'atteindre des performances nettement supérieures à celles engendrées par le SD. Néanmoins, ce type d'ajout est coûteux et de plus non **disponible** en Algérie. La perspective d'utilisation du sable de dune finement broyé dans l'industrie cimentière par leur propriété de fixer la chaux semble promettre beaucoup.

Mots clés : réactivité pouzzolaiique - liydratntion – retrait - absorptioii capillaire – résistances mécaniques - porosité - sable de la dune – CSF - calcite.

Abstract :

The study **realized** here is in the **aim** of valorisation of local materials.

The incorporation of sand of dune (SD) **finely** ground (**contening high** quantity of silicium), in substitution to Portland cements **allows** to obtain a new kind of CPJ having physico-chemical and **mecanical** performances in the **fresh** or hardened state **better than** initial Portland **cement**.

Either their **pouzzolanic** reactivity (prooved by X rays diffraction **XRD**) and their role of **filling** due to the fuie particules of SD, the **mortars** and concretes using **this** additif are more compact and so will aproove their **durability**.

The high **specific** surface (**>20m²/g** [BET]) of condensed **silica fume** (CSF) and its **vitrious** state have allowed to reach performances **higher than** obtained by SD. However, this kind of additif is expensive and not available in Algeria.

The perspective of use of sand of dune **finely** ground in cementery industry by their property to **fixe** the **lime** seems very interesting.

Key words :

Pouzzolanic reactivity – hydration – **shrinkage** - **capillary** absorption – mecanical resistance – porosity – sand of **dune** – CSF – calcite.

SOMMAIRE

INTRODUCTION1

PREMIER CHAPITRE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 - Composants des pâtes hydrauliques3

1.1.1 Les fluidifiants3

1.1.1.1 Classification des adjuvants3

1.1.1.2 Effet et mode d'action4

1.1.2 Les fumées de silice6

1.1.2.1 Fabrication des fumées de silice6

1.1.2.2 Caractéristiques minéralogiques et physiques8

1.1.2.3 Caractéristiques chimiques10

1.1.2.4 Rôle de la fumée de silice11

1.1.2.5 Réactivité des de silice condensées11

a) Dissolution des fumées de silice dans l'eau pure11

b) Fixation de la chaux par les CSF12

c) Influence des proportions Chaux/CSF12

d) Rôle des impuretés13

1.1.2.5 Autres ultrafines13

1.1.3. Le ciment portland13

1.1.3.1 Présentation13

1.1.3.2 Les constituants anhydres du clinker14

a) La chaux CaO14

b) Les silicates de calcium14

c) Les aluminates de calcium14

d) Les Silico- Aluminates de calcium15

e) Les Alumino-Ferrites de calcium15

1.1.3.3 Hydratation des composants du Clinker à température ambiante15

a) Hydraulicité15

b) Hydratation des silicates de calcium16

c) Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A21

d) Hydratation de C_4AF23

e) Cinétique d'hydratation des différents composants23

1.1.3.4 Prise et durcissement du ciment portland24

a) Représentation schématique de la prise24

b) Les liaisons dans la pâte de ciment26

c) Élévation de la température au cours de la prise et du durcissement27

d) L'eau dans la pâte de ciment durcie28

1.2	Le retrait	30
1.3	Facteurs chimiques affectant la prise du ciment Portland	32
1.3.1	Influence de la nature et teneurs en sulfates	32
1.3.2	Influence de la nature des adjuvants	33
1.3.2.1	Adjuvants accélérateurs	33
1.3.2.2	Adjuvants retardateurs	33
1.3.2.3	Adjuvants réducteurs d'eau	33
1.4	Altérations du béton	34
1.4.1	Nomenclature des attaques chimiques du béton	34
1.4.2	Classification des attaques chimiques	34
1.4.3	Carbonatation	37
1.4.4	Attaques par les sulfates	37
1.4.5	Attaque par l'eau de mer	38
1.4.6	Réactions aux interfaces pâte de ciment – granulats	38
1.4.6.1	Réactions conduisant à une détérioration du béton.....	38
i)	Réaction alcali-carbonate.....	38
ii)	Alcali réaction	39
1.4.6.2	Réactions conduisant à une amélioration des propriétés du béton.....	39
i)	Réactions entre les granulats de marbre et les aluminates hydratés	39
ii)	Réaction entre la pâte de ciment portland et le quartz	41
1.5	Etude des bétons à hautes et très hautes performances	41
1.5.1	Bétons à hautes performances à l'état frais	41
1.5.2	Microstructure des BTHP	42
1.5.3	Propriétés mécaniques instantanées	44
1.5.4	Retrait	45
1.5.5	Fluage	46
1.5.6	Perméabilité	46
1.5.7	Résistance au gel	46
1.5.8	Résistance au feu	47
1.5.9	Risques de ségrégation d'origine chimique	47
1.5.10	Résistance en compression des BHP	49
●	Influence du volume de la matrice sur les résistances mécaniques des RHP.....	50
1.5.11.	Ouvrages réalisés à base des BHP et BTHP	50
1.6	Conclusion	53

DEUXIEME CHAPITRE

MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

II-1	Introduction.....	55
II-2	Les granulats.....	55
11-2-1	Le sable 0/5.....	55
II-2-2	Graviers 8/15 et 3/8.....	56

11-3	Les ciments	56
11.3.1	Le ciment CPJ45.....	56
11.3.2	Le ciment CPA45.....	57
114	Le fluidifiant	59
115	Les ajouts	50
11.5.1	Fumée de silice.....	50
11.5.2	Le sable de dunes broyé.....	59
11.5.3	La calcite.....	60
11.6	Essais de prise	60
11.6.1	Essai de prise sur CPA45	60
a)	Essai de prise sans adjuvant	60
ii)	Essai de prise avec adjuvant	62
11.6.2	Essai de prise sur CPJ45	65
a)	Essai de prise sans substitution	65
ii)	Essai de prise avec substitution	66
117	Composition du béton	67
11.8	Préparation des éprouvettes	68
11.8.1	Malaxage	68
11.8.2	Vibration	68
11.8.3	Conservation	68
11.9	Essais sur bétons frais	68
11.10	Essais sur béton durci	68
11.10.1	Rectification et surfacage.....	68
11.10.2	Essais de résistances mécaniques	69
11.10.3	Module d'élasticité.....	69
11.10.4	Absorption capillaire	69
11.11	Analyse par diffractométrie aux rayons X	70
11.11.1	La diffraction aux rayons X par les cristaux	70
11.11.2	Application : Diagramme de rayons X d'un solide	73
11.11.3	Méthode d'analyse diffractométrique	73
11-12	Conclusion	74

TROISIEME CHAPITRE

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

111.1	Introduction	75
111.2	Optimisation du dosage en fluidifiant	75

III.3 Influence du type de ciment sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons.....	76
III-3-1 Bétons à base de CPJ45 sans ajouts.....	76
III-3-2 Bétons à base de CPA45 sans ajouts.....	77
III.4 Bétons avec ajouts.....	79
III-4-1 Bétons avec fumée de silice.....	79
a) Bétons à base de CPJ45.....	79
b) Bétons à base CPA45.....	81
III.4.2 Bétons avec sable de dunes.....	83
a) Bétons à base de CPJ45.....	83
b) Bétons à base de CPA45.....	85
III.4.3 Bétons avec calcite.....	87
a) Bétons a base de CPJ45.....	87
b) Bétons à base de CPJ45 avec ajout de 8% de SD + 2 % de calcite.....	89
c) Bétons au CPA45 avec ajout de 10 % de calcite.....	91
d) Bétons à base de CPA45 avec ajout de 8% de SD + 2% de calcite.....	93
III.5 Module d'élasticité statique des bétons avec et sans ajouts à 7 et 28 jours.....	95
111.6 Retrait de bétons à base de CPA45.....	96
a) Effet du rapport E/C.....	96
b) Effet des ajouts.....	97
III.7 Analyse par diffraction aux rayons X des pâtes de ciment avec différents Ajouts	98
III.8 Conclusion.....	99
CONCLUSION ET RECOMMANDATION.....	101

Liste des Figures

Premier chapitre : Synthèse bibliographique

Fig I-1 : Effect of dispersants on the particle size distribution in cement [4].....	5
Fig I-2 : Evolution du potentiel Zêta en fonction de la concentration en superplastifiant [2]..	6
Fig I-3 : Fonctionnement d'une usine productrice de Fumée de Silice [11].....	7
Fig I-4 : Spectres de diffraction aux rayons X de diverses fumées de silice [13].....	9
Fig I-5 : Variation de la solubilité des silices dans l'eau en fonction du PH [13].....	12
Fig I-6 : Représentation schématique de la prise du ciment.....	16
Fig I-7 : Solubilité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en fonction de la température [20].....	17
Fig I-8 : Expériences de GRUDEMO sur les pâtes de ciment Portland.....	17
Fig I-9 : Diagramme de RANKINE.....	18
Fig I-10 : Cinétique de l'hydratation du C_3S	19
Fig I-11 : Vitesse d'hydratation des principaux constituants du ciment Portland (d'après F..M.LEA).....	24
Fig I-12 : Représentation schématique de la prise.....	24
Fig I-13 : Variation du flux de chaleur au cours de la prise et du durcissement.....	27
Fig I-14 : Modèle de structure du gel d'après FELDMAN.....	28
Fig I-15 : Quantité d'eau restant dans les hydrates en fonction de la température.....	29
Fig I-16 : Variation du rapport E/C en fonction de la pression de vapeur.....	31
Fig I-17 : Variation du retrait en fonction de l'humidité relative (HR).....	31
Fig I-18 : Variation de la longueur en fonction de la perte d'eau.....	31
Fig I-19 : Variation du temps du début de prise en fonction de la teneur et nature du sulfate de calcium.....	33
Fig I-20 : Hydratation d'un ciment Portland avec et sans présence de CSF [13].....	43
Fig I-21 : Montée en résistance d'un BTHP [34].....	44

Liste des photos

Photo [I.1] : observation au MEB (grossissement 50000) d'un CSF [13].....	9
Photo [I.2] : Formation d'aiguilles d'Ettringite autour d'un grain de C_3A	23
Photo [I.3] : Contact entre le quartz et la pâte de ciment [26].....	40
Photo [I.4] : Contact entre la calcite et la pâte de ciment hydraté [26].....	40

Deuxième chapitre : Matériaux et méthodes d'essais

Fig II-1 : Courbe granulométrique du sable 0/5.....	55
Fig II-2 : Courbes granulométriques des graviers.....	56
Fig II-3 : Evolution du taux de cisaillement en fonction du temps.....	61
Fig II-4 : Evolution du cisaillement de pâte CPA + 0.8% SP + 10% CSF en fonction du temps.....	63
Fig II-5 : Influence du rapport E/C sur le cisaillement des pâtes de CPA + 0.8% SF.....	64
Fig II-6 : Evolution du cisaillement pour pâte de CPA + 0.8% SF+ 10%CSF.....	65
Fig II-7 : Evolution du cisaillement de pâte de CPJ45 à E/C = 0.295.....	66
Fig II-8 : Variation du cisaillement des pâtes de CPJ45 en fonction du % de substitution.....	67

Fig II-9 : Maille et paramètres réseau à trois dimensions.....	70
Fig II-10 : Familles de droites réticulaires.....	71
Fig II-11 : Diffusion des rayons X.....	71
Fig II-12 : La réflexion des rayons X par les plans réticulaires.....	71
Fig II-13 : Représentation schématique de la loi de BRAGG.....	72
Fig II-14 : Principe de la mesure de l'angle de diffraction.....	72
Fig II-15 Schéma de principe d'un diffractomètre X.....	73

Troisième chapitre : Résultats et interprétations

Fig III-1 : Diagrammes Contraintes-Déformations des bétons B _{ji} à base de CPJ45 à 7 j....	76
Fig III-2 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B _{ji} à base de CPJ45 à 28 j....	77
Fig III-3 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B _{ai} à base de CPA45 à 7j....	78
Fig III-4 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B _{ai} avec CPA45 à 28j.....	78
Fig III-5 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du % CSF à 7j (E/C=0.28).....	80
Fig III-6 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du %CSF à 28 j (E/C=0.28).....	80
Fig III-7 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % CSF à 7j (E/C=0.28).....	82
Fig III-8 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % CSF à 28j (E/C=0.28).....	82
Fig III-10 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du % SD à 7j (E/C=0.28).....	84
Fig III-11 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du % SD à 28j (E/C=0.28).....	84
Fig III-12 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % SD à 7j (E/C=0.28).....	86
Fig III-13 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % SD à 28j (E/C=0.28).....	86
Fig III-14 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite à 7j (E/C=0.28).....	88
Fig III-15 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite à 28 j (E/C=0.28).....	88
Fig III-16 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajouts de 8% SD + 2% Calcite à 7 j (E/C=0.28).....	90
Fig III-17 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajouts de 8% SD + 2% Calcite à 28 j (E/C=0.28).....	90
Fig III-18 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 à 7j avec et sans ajout de 10 % Calcite (E/C=0.28).....	92
Fig III-19 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite 28j (E/C=0.28).....	92
Fig III-20 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 8%SD+2%Calcite à 7j (E/C=0.28).....	94
Fig III-21 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 8%SD+2%Calcite à 28j (E/C=0.28).....	94
Fig III-22 : Influence du rapport E/C sur le retrait des bétons à base de CPA45.....	97

Fig III-23 : Influence des ajouts sur le retrait à E/C=0.28.....	97
Fig III-24 : Diffractogramme aux rayons X des pâtes de CPJ45 avec et sans SD (t=17j)..	98
Fig III-25 : Diffractogrammes X des pâtes CPJ45 en présence des ajouts utilisés (t=7j)...	99

Liste des tableaux

Première chapitre : Synthèse bibliographique

Tableau I-1 : Classification des adjuvants fluidifiants [8].....	2
Tableau I.2 : Valeurs des surfaces spécifiques B.E.T et des diamètres moyens de diverses fumées de silice d'origine française [13].....	10
Tableau I-3 : Compositions chimiques de diverses silices [17].....	11
Tableau I.4 : Composés du système CaO-SiO ₂ -H ₂ O.....	19
Tableau I-5 : Expériences de LOCHER.....	25
Tableau I-6 : Proportions des hydrates dans une pâte de ciment Portland.....	29
Tableau I-7 : Quantités d'eau retenue dans la pâte en fonction du traitement utilisé [21]..	30
Tableau I-8 : Classification des attaques chimiques.....	35
Tableau I-9 : Influence du type de granulats sur la résistance en compression d'un béton en [MPa].....	41
Tableau I-10 : Compilation de résultats trouvés par plusieurs chercheurs.....	49
Tableau I-11 : Influence du pourcentage de la pâte liante sur la résistance des bétons et mortier.....	50
Tableau I-12 : Ouvrages d'art coulés avec un BHP [52].....	51
Tableau I-13 : Ouvrages off-shore en BHP [52].....	52
Tableau I-14 : Immeubles construits avec du BHP [52].....	52

Deuxième chapitre : Matériaux et méthodes d'essais

Tableau II-1 : Caractéristiques du sable 0/5.....	55
Tableau II-2 : Caractéristiques physiques des graviers.....	56
Tableau II-3 : Analyse chimique du Clinker.....	57
Tableau II.4 : Composition minéralogique du CPJ45.....	57
Tableau II-5 : Analyse chimique du Clinker et du Gypse.....	58
Tableau II.6 : Composition de BOGUE du CPA.....	58
Tableau II-7 : Teneur en extrait sec dans le SF et le SP.....	59
Tableau II-8 : Composition chimique de la fumée de silice.....	59
Tableau II-9 : Analyse chimique du sable de dune broyé.....	60
Tableau II-10 : Composition chimique de la Calcite.....	60
Tableau II-11 : Consistance des pâtes en fonction du rapport E/C.....	60
Tableau II-12 : Mesure du temps de prise sur pâte de CPA45.....	61
Tableau II-13 : Temps de début et fin de prise de pâte CPA.....	61

Tableau II-14 : Consistance de pâte de CPA + 0,4% SP en fonction des rapports E/C.....	62
Tableau II-15 : Mesure du temps de prise sur pâte de CPA + 0.4%SP en fonction du rapport E/C.....	62
Tableau II-16 : Consistance de pâte CPA + 0.8% SP+ 10%CSF.....	63
Tableau II-17 : Temps de prise de pâte de CPA + 0.8% SP+ 10%CSF.....	63
Tableau II-18 : Consistance de pâte de CPA + 0.8%SF en fonction de E/C.....	64
Tableau II-19 : Temps de prise des pâtes de CPA +0,8% SF en fonction de E/C.....	64
Tableau II-20 : Consistance de pâte CPA + 0.8% SF + 10%CSF.....	65
Tableau II-21 : Temps de prise des pâtes de CPA +0.8%SF + 10%CSF.....	65
Tableau II-22 : Prise de la pâte normale de CPJ45 (E/C=0,295).....	66
Tableau II-23 : Consistance des pâtes de CPJ45 en fonction des % de substitution.....	66
Tableau II-24 : Prise des pâtes de CPJ45 en fonction des % de substitution.....	67
Tableau II-25 : Composition du béton ordinaire.....	68
Tableau II-26 : Différents types de mailles dans un réseau cristallin.....	70

Troisième chapitre : Résultats et interprétations

Tableau III-1 : Influence des dosages en fluidifiants sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons.....	75
Tableau III-2 : Influence de E/C et du fluidifiant sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de CPJ45.....	76
Tableau III-3 : Influence de E/C et l'adjuvant sur les propriétés des bétons à base de CPA45.....	77
Tableau III-4 : Influence des CSF sur les propriétés physico-mécaniques des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0.28).....	79
Tableau III-5 : Influence des CSF sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).....	81
Tableau III-6 : Influence des SD sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0.28).....	83
Tableau III-7 : Influence des SD sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).....	85
Tableau III-8 : Influence de la calcite sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0.28).....	87
Tableau III-9 : Résultats obtenus avec différents pourcentages d'ajouts de SD et de Calcite sur bétons à base de CPJ45 avec E/C=0.28.....	89
Tableau III-10 : Influence de la calcite sur les propriétés physico-mécaniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).....	91
Tableau III-11 : Résultats obtenus sur bétons à base de CPA45 avec et sans ajouts de 10%SD, 10%Calcite et 8%SD+2%Calcite.....	93
Tableau III-12 : Récapitulatif des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques des bétons à base de CPJ45.....	95
Tableau III-13 : Récapitulatif des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques des bétons à base de CPA45.....	96

L'amélioration des caractéristiques des matériaux permet d'envisager, dans la construction, des transformations beaucoup plus radicales que celles résultant des progrès, pourtant considérables, que vont faire, dans l'avenir, les méthodes de calcul.

Albert CAQUOT (1952)

INTRODUCTION

Les bétons à hautes performances (BHP) sont une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires.

Les BHP sont spécifiquement composés d'ultrafines particules et d'adjuvants fluidifiants.

Les ultrafines particules utilisées sont généralement des fumées de silice condensées (CSF) et comme adjuvants fluidifiants des résines mélamines et des naphthalènes sulfonates.

Les fumées de silice ont des dimensions suffisamment faibles pour pouvoir se loger dans les espaces laissés libres entre les grains de ciment en suspension dans l'eau.

L'adjonction de telles particules permet de diminuer la porosité puisqu'elles prennent la place de l'eau entre les grains de ciment.

Suivant les points de vue les plus récents, deux éléments doivent être pris en compte pour expliquer les actions des fluidifiants et des CSF sur les bétons à haute résistance.

Le premier, de nature physique, consiste au remplissage physique des vides intergranulaires par les ultrafines.

L'autre élément de nature chimique, action pouzzolanique, provoquée par la fixation de la chaux par les CSF. Bien entendu, la réduction du rapport Eau/Ciment n'est possible qu'en présence de fluidifiants.

La notion de hautes résistances est un terme trop limitatif d'où l'appellation «bétons à hautes performances», car ces types de bétons sont généralement très compacts et donc très peu perméables d'où l'amélioration des caractéristiques de durabilité.

Les perspectives d'utilisation d'ajout siliceux dans l'industrie cimentière par leur propriété de réaction à la chaux semblent promettre beaucoup.

Cependant, les actions chimiques, physico-chimiques et même mécaniques, internes ou externes, sont si étroitement et indissolublement liées, au moins en pratique, qu'il n'a pas toujours été possible ou correct de les dissocier et de ne tenir compte que de l'une d'entre elles, en négligeant les autres. Malheureusement, dans la réalité, aucune action «pure», qu'elle que soit sa nature, n'intervient, et aucun effet n'est dû à une cause unique, si ce n'est exceptionnellement. Dans la réalité, la nature chimique, minéralogique et physique de l'ajout soulève des problèmes d'une énorme complexité, et l'on éprouve de très grandes difficultés à les résoudre, pour autant que l'on recherche des solutions générales.

De nombreux travaux ont été entrepris et de nombreuses publications faites concernant l'étude des BHP, néanmoins leur aspect physico-chimique a été peu abordé. Il est donc impératif de connaître la nature et structure des hydrates et surtout leur morphologie pour pouvoir projeter leur application dans certains domaines de construction.

Etant donné que les fumées de silice peuvent modifier les propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons traditionnels au bénéfice d'une meilleure durabilité, la question se pose : est-il possible d'atteindre un tel objectif, à partir d'un ajout siliceux finement broyé ?

A défaut de fumées de silice (non disponible en ALGERIE), peut-on les remplacer par des sables de dunes, riches en silice, finement broyés et obtenir ainsi des BHP ?

La réaction pouzzolanique est – elle possible ?

L'étude bibliographique, tenant compte des nouvelles connaissances acquises, combinée aux essais expérimentaux sur les constituants du béton à l'état anhydre, frais et durci, nous permettront de répondre.

Dans ce travail nous envisageons d'étudier les aspects physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux.

Nous avons scindé notre travail en trois parties :

Dans la première partie, nous avons effectué une recherche bibliographique afin de cerner l'état actuel des connaissances sur les caractéristiques et propriétés physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des constituants des BHP.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressé aux choix des matériaux et les méthodes d'essais qui permettraient d'améliorer les performances des bétons traditionnels.

Dans la troisième et dernière partie, nous avons étudié l'influence de la concentration et de la nature des ajouts choisis sur l'hydratation des principaux constituants du ciment Portland et leurs conséquences sur les propriétés physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des pâtes et bétons auxquels ils sont incorporés.

Et en fin nous avons terminé ce travail en faisant une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Composants des pâtes hydrauliques :

1.1 1 Les fluidifiants :

Dans les bétons courants, la maniabilité du **béton** frais est essentiellement gouvernée par le dosage en **eau**[1][2][3][4][5]. Malheureusement, l'eau que l'on est tenté d'ajouter dans un béton «**trop raide**» a des conséquences néfastes sur plusieurs propriétés du **béton** aussi bien à court terme qu'à long terme. A court terme, cela se manifeste par une ségrégation accrue et une perte d'homogénéité du **béton** tandis qu'à long terme cela se traduit par une chute des résistances mécaniques du fait de l'augmentation de la porosité du béton et donc de la diminution de sa durabilité. C'est pourquoi les utilisateurs ont eu recours à l'introduction d'agents chimiques depuis longtemps pour rendre le **béton** plus maniable sans diminuer sa compacité.

En effet, les auteurs romains rapportaient que cent ans avant Jésus Christ., du lait, du sang ou des œufs étaient utilisés pour améliorer les propriétés du béton [6].

Le sang de bœuf (due à l'hémoglobine) est un agent entraîneur d'air efficace. Cette pratique était utilisée au moyen âge. Villard de HONNECOURT, un constructeur de cathédrales avait recommandé en 1230 de mouiller du ciment avec une huile lubrifiante pour réaliser un réservoir capable de retenir l'eau [7].

Ce n'est qu'avant la seconde guerre mondiale que l'utilisation **bénéfique** d'adjuvants chimiques était redécouverte aux U.S.A.

Un utilisateur a testé du carbone noir comme agent dispersif pour **différencier** la couleur du béton de la voie centrale d'une autoroute. Ce ci a conduit à rendre le béton plus facile à placer et plus résistant au phénomène gel-dégel. Cette découverte a donné naissance à la commercialisation des adjuvants.

I.1.1.1 Classification des adjuvants :

Les ((plastifiants réducteurs **d'eau**» ont tout d'abord été utilisés [8][9]. A dose normale, ceux ci permettent une diminution de l'ordre de 10 à 15% du dosage en eau à même consistance. Un surdosage augmente **l'efficacité** mais présente des effets secondaires:: tels qu'air entraîné, ségrégation, ressuage et diminution des résistances mécaniques.

Chimiquement différents, les fluidifiants ou superplastifiants sont **beaucoup** plus efficaces puisqu'ils **permettent** des réductions du dosage en eau d'environ 30%.

Les Japonais ont commencé à les utiliser au début des années soixante, suivis par les Allemands, les Américains, les Anglais et enfin les Français.

Les fluidifiants du commerce sont élaborés à partir des résines de synthèse à masses moléculaires élevées (plusieurs milliers).

Ces derniers rentrent dans les catégories suivantes :

- Condensat de mélamine **sulfonée** et de formaldéhyde.
- Condensat de naphthalène sulfoné et de **formaldéhyde**.

- Lignosulfonates de calcium ou de sodium modifié.
- Autres (carbonates, esters, d'acides sulfoniques) (voir tableau I-1) :

Désignation	Fabrication	Nom et forme commerciale	PH	Particularité
Mélatamine sulfonée formaldéhyde	Réaction résine de mélatamine/formaldéhyde + sulfonation par solution de bisulfite de sodium + polymérisation	Solution acqueuse à 20% d'extrait sec couleur : laiteuse marque : melment-L10 melment-F10 CHRYSO GT	8-9	- non entraîneur d'air - non tensioactif
Naphtalène sulfoné formaldéhyde	Réaction naphtalène / formaldéhyde + sulfonation + neutralisation à la soude caustique + polymérisation	Solution acqueuse entre 20 et 45% couleur : brune marques : Protex-PSP-R PSP-N SIKAFLUID MIGHTY 150	9	
Lignosulfone de sodium (ou calcium)	Traitement du bois par voie chimique	Liquide couleur brun foncé Marques : Plastiment BV 40	7.5	- tensio-actif - entraîneur d'air - retardateur
Autres produits Saccharates, carboxylates, esters, acides Sulfoniques, ...etc.		ICI		

Tableau I-1 : Classification des adjuvants fluidifiants [8].

Parmi les classifications existantes, DODSON [9] propose de **grouper** les adjuvants du béton en quatre catégories différentes :

- Dispersion du ciment dans la phase liquide du béton.
- Altération du taux normal d'hydratation du ciment, en particulier la phase silicate tricalcique.
- Réaction avec les sous produits d'hydratation du ciment, tels que les alcalins et l'**hydroxyde** de calcium.
- Non réactif avec le ciment ou ses sous produits.

1.1.1.2. Effet et mode d'action :

Les données **examinées** dans plusieurs recherches[1][2][3][4][5][9] **confirment** les effets (physiques) non spécifiques suivants :

- ❖ Adsorption interfaciale à travers les forces électrostatiques et les **forces** de Van Der Waals.

- ❖ Chargement de surface et projection électrostatique des forces attractives interparticules et induction des forces répulsives.

Les données montraient aussi une évidence directe d'un effet (chimique) spécifique :

- ❖ Liaison de surface aux sites réactifs, empêchant les premières réactions d'hydratation. L'information déduite de l'étude des pâtes de minéraux et des pâtes de ciment permet de déduire d'autres effets non spécifiques :
- ❖ Effet stérique conduisant à la dispersion des particules de ciment et la fluidification des pâtes de ciment, un superplastifiant permet d'améliorer chacune de ces quatre fonctions.

On peut citer parmi les méthodes utilisées :

- ♦ L'observation au microscope de suspension de ciment avec et sans fluidifiant qui montre que les grains de ciment les plus fins (visibles sur la poudre sèche) s'agglomèrent lors du gâchage mais sont de nouveau dispersés sous l'action de l'adjuvant (sans toute fois retrouver la distribution ou la répartition initiale) [2]

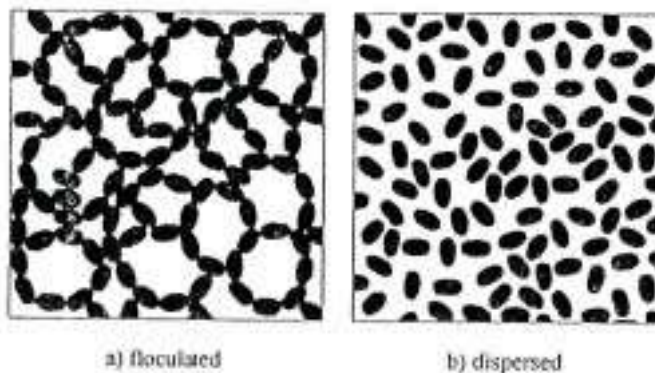


Fig I-1 : Effect of dispersants on the particle size distribution in cement [4].

- ♦ La mesure de la proportion d'adjuvant adsorbé à la surface des grains, en filtrant une suspension de ciment avec fluidifiant et mesurant la concentration restante (recherche de ((l'isotherme d'adsorption »)).
- ♦ La mesure du potentiel électrique ((potentiel Zêta » existant entre la surface des grains et la solution, potentiel induisant des forces répulsives entre ces grains, et donc une défloculation du mélange.

On constate alors que le potentiel Zêta et la quantité d'adjuvant adsorbé croissent de manière concomitante (voir fig I-2) avec le dosage en adjuvant, ce qui suggère le mécanisme d'action suivant : Adsorption de fluidifiant sur des sites préférentiels de grains de ciment, créant autour des grains une couche «lubrifiante».

Pour certains adjuvants (lignosulfonates) la tension superficielle de l'eau est diminuée ; et donc le mouillage des grains facilité.

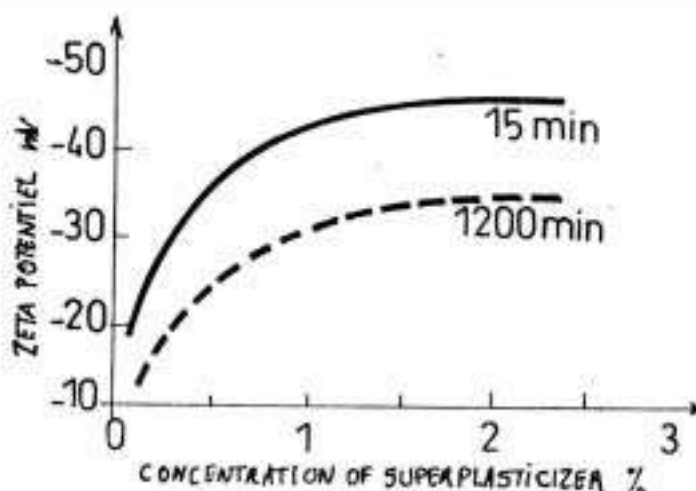


Fig 1-2 : Evolution du potentiel Zêta en fonction de la concentration en superplastifiant [2].

- ♦ La mesure de la chaleur d'hydratation : l'augmentation de température était mesurée à partir de 15 g de ciment gâché avec 250 ml d'eau contenant Na⁺PNS de différentes concentrations, ou d'autres additives dans un calorimètre à grande sensibilité [10].

1.1.2. Les fumées de silice :

1.1.2.1. Fabrication des fumées de silice :

Les fumées de silice ou «**fumées** de silice condensées») (CSF en anglais) sont des sous produits de l'industrie du silicium et de ses alliages (**FeSi, CaSi,...**etc.).

Pour fabriquer du silicium on chauffe dans un four chargé de quartz de la houille et parfois de copeaux de bois à très haute température (1 500 à 2000 °C) par des arcs **électriques**.

On obtient d'une part le silicium liquide et d'autre part du gaz chargé de poussières dont certaines s'oxydent pour donner la fumée de silice.

Suivant que l'usine est équipée ou non d'un système de récupération de la chaleur, la température des gazes est plus ou moins haute **lors de** leur contact avec l'air **d'où** l'absence ou non de carbone dans le résidu final. Cette figure montre le **procédé** de production de silicium avec et sans système de récupération de chaleur.

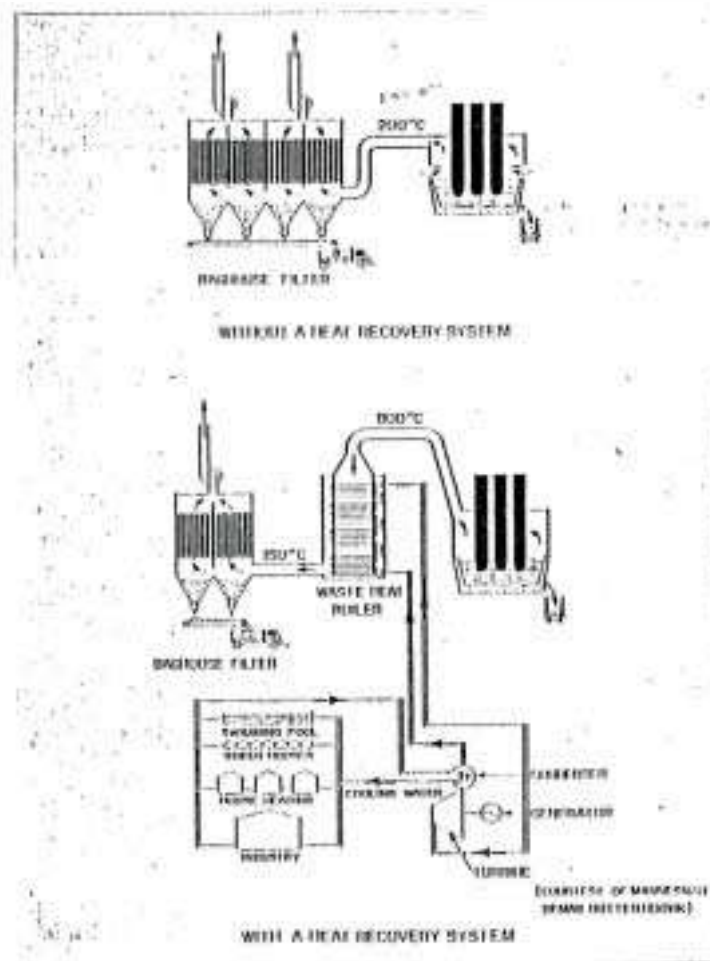
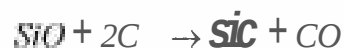
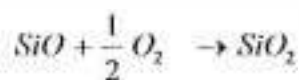


Fig. I-3 : Fonctionnement d'une usine productrice de Fumée de Silice [11].

La **thermodynamique** du processus de **formation** est relativement bien **comprise** et maîtrisée, il n'en est pas de même des mécanismes réactionnels élémentaires ; G.RATH [12] propose le **schéma** suivant en distinguant 5 zones dans un four **industriel**, en allant du **haut** vers le **bas** :

1- Zone de décomposition du **SiO** (monoxyde de silicium). Le **SiO** issu de la **partie** inférieure du four peut se transformer selon 3 types de réaction (il est de toute **façon** instable aux températures atteintes – environ 1100°C-)

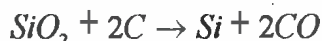


2- **Zone** de formation de Carborundum (**SiC**) (température coinprise entre 1100 et 1800°C)





(réaction favorisée par la présence de fer, dans le cas de la fabrication du ferro-silicium)



4- Zone de décomposition du Carborundum



5- Zone d'évaporation du monoxyde



On voit que le rôle central joué par la monoxyde de silicium, tout d'abord sous forme gazeuse puis sous forme d'un **condensat** finement dispersé. La fumée de silice est récoltée au moyen de sacs filtres, à raison d'environ **300Kg** par tonne d'alliage produit.

I.1.2.2 Caractéristiques minéralogiques et physiques :

Rappelons tout d'abord que la **fumée** de silice étant un sous produit industriel, sa nature ne fait donc l'objet d'aucun contrôle à sa fabrication. Leurs caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques peuvent être assez dispersées, non seulement d'une usine à l'autre, mais encore à l'intérieur même d'une unité de fabrication [8][13][14][15][16]. Il faut donc se résigner à travailler avec un matériau pas forcément régulier, mais cependant très intéressant pour ses applications dans les bétons.

La couleur des CSF varie d'une couleur foncée presque noir à une couleur grise claire. La couleur claire des CSF est due à l'existence d'un **récupérateur** de chaleur dans le circuit de fabrication des **fumées** ($\theta \cong 800^\circ\text{C}$) qui réduit considérablement le **taux** de carbone.

La fumée de silice est une poudre dont les grains sont des sphères quasi-parfaites, de taille accusant une grande dispersion. Certains de ces grains forment des **agrégats**, ce qui a pu amener à distinguer des particules primaires, des particules secondaire (amas de particules primaires) comme on peut le constater sur la photo [I. 1].

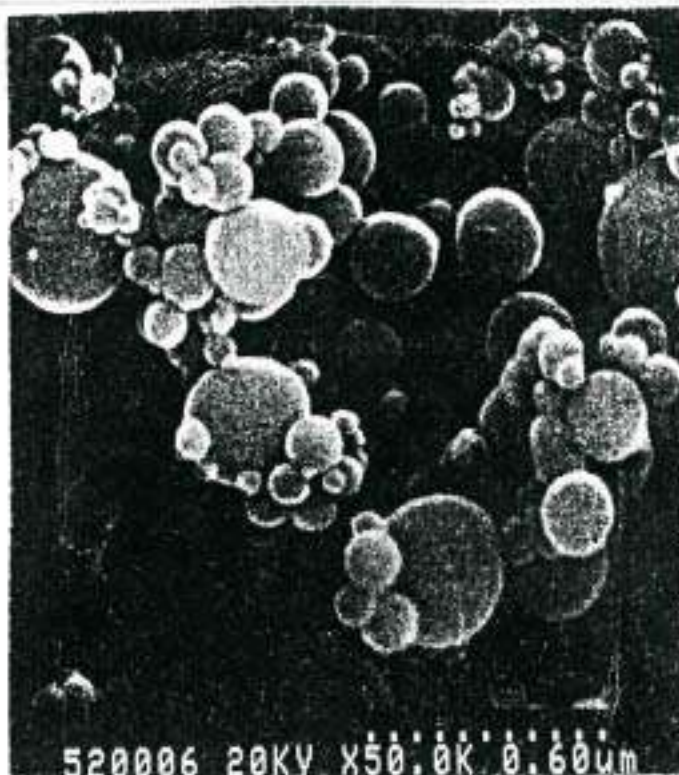


Photo [I.1] : observation au MEB (grossissement 50000) d'un CSF [13].

La structure des grains est amorphe comme on peut le voir sur le schéma de la fig 1-4 représentant le spectre de diffraction aux rayons X de fumées de silice issues de différentes fabrications [13].

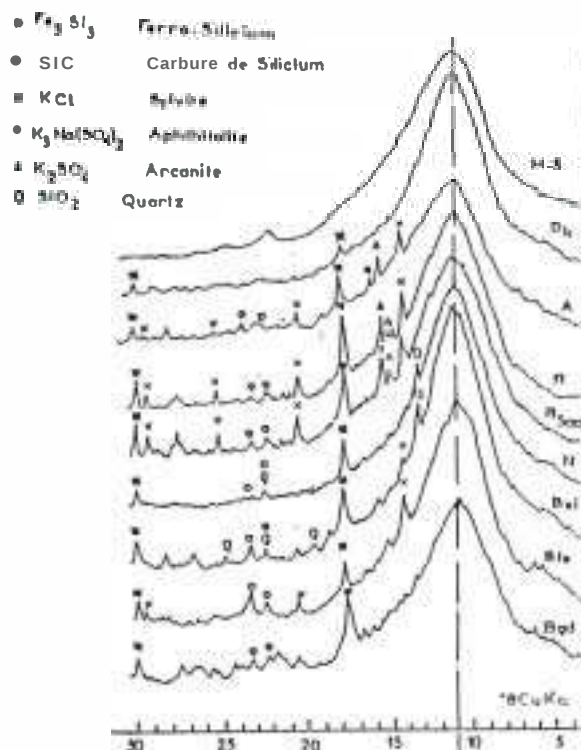


Fig I-4 : Spectres de diffraction aux rayons X de diverses fumées de silice [13]

La répartition granulaire de la fumée de silice s'étend du 1/100 de micron jusqu'à quelques microns, avec taille inoyeiine d'environ 0.2 μm . Elle dépend notamment du type d'alliage fabriqué (voir fig 1-3), mais aussi pour un même produit, du moyen de mesure adopté.

d'alliage fabriqué (voir fig I-3), mais aussi pour un même produit, du moyen de mesure adopté.

Les mesures effectuées par comptage optique donnent en **général** des finesses plus grandes que par sédimentométrie (car la silice est en suspension dans un liquide et a tendance à s'agglomérer) ; c'est pourquoi les surfaces spécifiques mesurées par la méthode **B.E.T (BRUNAU, EMMETT, TELLER)** qui varient généralement entre 15 et 25 m²/g, ne sont probablement pas représentatives du matériau en tant qu'ajout dans un béton.

Les surfaces spécifiques mesurées suivant la méthode **B.E.T (BRUNAU, EMMETT, TELLER)** par adsorption d'azote, ainsi que les diamètres moyens des particules des divers CSF sont représentés dans le tableau 1.3.

Les valeurs des diamètres moyens sont obtenues par application de la formule suivante :

$$d_m = \frac{6}{S_s \cdot \rho}$$

Avec :

d_m : diamètre moyen des particules de CSF exprimé en μm .

S_s : la surface spécifique **B.E.T** exprimée en m²/g.

ρ : densité des CSF égale en général 2.2 (mesurée à l'aide du densimètre LE CHATELIER)

Désignation	Cab.O* Sil.M-5	DK	A	R	N	B _{Si}	B _{Fe}	B _{FeSi}
Surface spécifique B.E.T (m²/g)	200	19	23	13	18	21	18	23
Diamètre moyen d_m (μm)	0.01	0.14	0.12	0.23	0.15	0.13	0.15	0.12

Tableau 12 : Valeurs des surfaces spécifiques B.E.T et des diamètres moyens de diverses fumées de silice d'origine française. [13]

* **Cab.O.Sil.M-5** : silice pure obtenue en laboratoire.

** La nature des produits élaborés est Si pour **B_{Si}** et **FeSi** pour les autres.

Les surfaces spécifiques du tableau 1.2 varient entre 13 et 23 m²/g. les fumées de silice ont donc de très grandes surfaces spécifiques contrairement à celles des cendres volantes et des ciments portland.

De par leurs très grandes finesses, les masses volumiques apparentes des CSF industriels sont très faibles et varient généralement entre 125 et 470 Kg/m³.

I.1.2.3. Caractéristiques chimiques :

La fumée de silice comprend de la silice **SiO₂**, en pourcentage qui dépend de la richesse en **silicium** de l'alliage fabriqué, pouvant aller **jusqu'à 98%** dans le cas des siliciums pur ; ensuite quelques oxydes métalliques dérivant des composés secondaires de l'alliage viennent, quelques alcalins et des déchets de carbone. La perte au feu totalise la teneur en eau (adsorbée sur les grains) et en carbone (voir tableau I-3) :

Référence												
	71-1	71-2	81-3	81-3	81-5	81-5	81-6	81-8	81-8	81-13	82-2	81-13
SiO ₂	85.3	90.8	89	90	90	94.96	94.1	93.7	87.3	82.1	90-96	96
Fe ₂ O ₃	-	0.1	0.4	1.0	1.0	0.1	0.1	0.3	4.4	3.0	0.3-2.0	0.6
Al ₂ O ₃	0.4	0.5	0.2	-	0.6	0.4	0.7	0.8	1.0	2.3	0.2-2.5	0.1
CaO	0.5	0.02	0.1	0.4	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.2	0.35-2.6	0.1
MgO	1.3	0.3	1.8	1.9	1.9	0.1	0.5	0.2	0.3	2.0	0.2-0.4	0.2
Na ₂ O	0.8	0.4	0.4	1.5	1.5	0.6	0.2	0.2	0.2	1.1	0.1-0.5	0.4
K ₂ O	0.9	0.5	2.8	1.4	1.4	-	0.4	0.5	0.6	6.9	0.1-0.5	0.1
C	1.5	-	1.4	1.3	1.3	-	-	2.6	4.3	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	-	0.4	-	0.2	0.2	2.3	0.1-0.3	-
LOI	-	3.3	3.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.9	4.6	7.8	-	1.7

Tableau I-3 : Compositions chimiques de diverses silices [17].

I.1.2.4 Rôle de la fumée de silice :

La structure amorphe de la fumée de silice la rend capable de s'associer à la chaux libérée par le ciment : c'est le rôle **pouzzolanique**. Des hydrates sont ainsi formés, qui contribuent à augmenter la résistance mécanique. Par ailleurs, de par sa grande finesse, le produit peut, lors du malaxage, s'insérer entre les grains de ciment et diminuer ainsi le dosage en eau [18][19]. Cependant, ce rôle granulométrique n'est rempli qu'en présence d'adjuvants, sans lesquels la demande en eau est au contraire accrue par rapport au mélange sans fumée de silice (sauf pour les bétons très maigres, qui ne peuvent appartenir aux BTHP).

I.1.2.5 Réactivité des fumées de silices condensées :

En solution aqueuse les fumées de silice (CSF) réagissent essentiellement avec les ions Ca^{2+} pour former des CSH («**hydrosilicates** de calcium»). Cette réactivité se caractérise par la vitesse de passage en solution de silice et la vitesse de fixation des ions Ca^{2+} [13].

- ♦ Pour déterminer la vitesse de passage en solution de la silice on dissout la fumée de silice dans l'eau pure.
- ♦ Pour avoir la vitesse de fixation des ions Ca^{2+} on dissout la fumée de silice dans l'eau saturée en chaux.

Ceux-ci peuvent nous renseigner sur l'évolution de l'hydratation du ciment en présence de fumée de silice et la formation des CSH et l'évolution des résistances des bétons utilisant des CSF.

a) Dissolution des fumées de silice dans l'eau pure :

D'après les travaux de M.N. OUDJIT [13] et plusieurs publications dans la littérature [8][15][16] : la solubilité de la fumée de silice dépend du PH :

$1 \leq \text{PH} \leq 7$: solubilité décroissante

$7 \leq \text{PH} \leq 8.5$: solubilité pratiquement constante

$\text{PH} > 9$: solubilité croissante.

Il a été aussi constaté que cette solubilité dépend du pourcentage d'impuretés qui composent la fumée de silice et principalement le carbone [13].

La solubilité des CSF décroît lorsque la teneur en carbone augmente pour les $\text{PH} < 9$ (limite au-delà de laquelle, la dissolution de la silice en absence de sels est favorisée).

Il a été remarqué aussi que la fumée de silice contenant le plus de carbone dont la solubilité est la plus basse, cette solubilité augmente lorsque nous éliminons son carbone par chauffage à 500°C (noté R_{500} dans la figure 1.5).

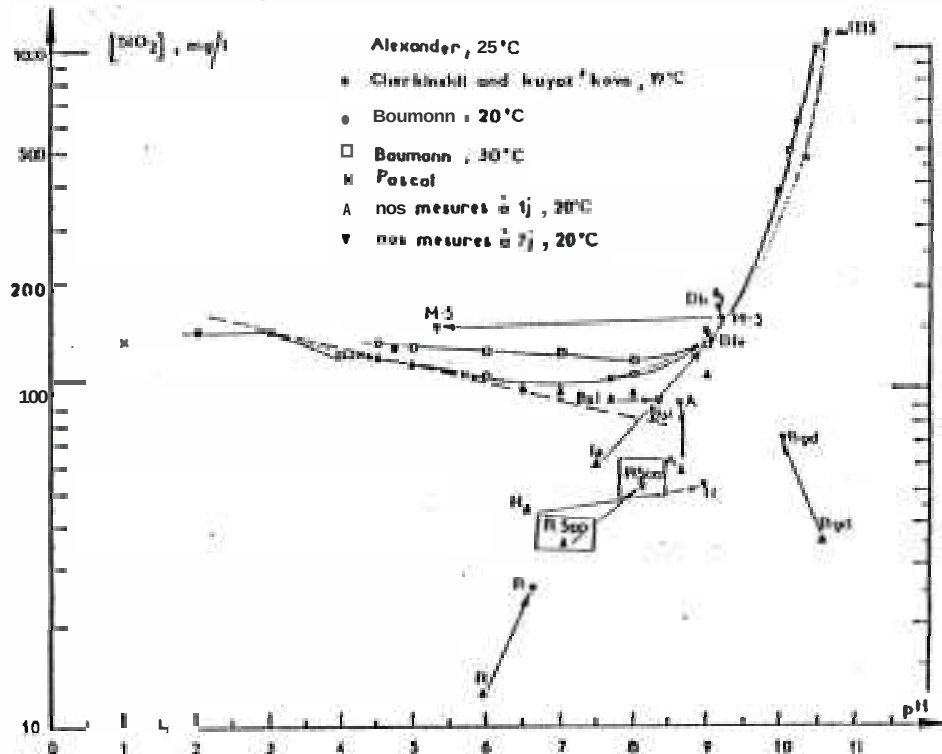


Fig 1-5 : Variation de la solubilité des silices dans l'eau en fonction du pH [13]

b) Fixation de la chaux par les CSF :

Les résultats expérimentaux de [13] montrent que la fixation de la chaux par les CSF est freinée par l'existence du carbone inbrûlé ; en conclusion d'après [13] [8] la fixation de la chaux par les CSF et le pouvoir de solubilité des CSF dépendent non seulement de leur surface spécifique, mais aussi de leur proportion en impureté, en particulier le carbone.

c) Influence des proportions chaux/CSF :

Plusieurs résultats concernant le dosage en CSF [5][11] montrent que pour un rapport $\text{CH/CSF}=1$ la quantité des CSH formés est la plus importante après hydratation.

Il a été aussi constaté qu'après la fixation totale de la chaux par les CSF, des CSH supplémentaires se forment et ce indépendamment du rapport chaux/CSF [13], ces taux supplémentaires de CSH sont probablement dus à la cristallisation des CSH initialement amorphes.

d) Rôle des impuretés :

La dissolution de la silice est favorisée par l'action du potassium qui augmente le PH du mélange et donc accélère l'hydratation des CPA. Par contre la **présence** de carbone dans les fumées de silice diminue considérablement leur passage en solution [13][20][21].

I.1.2.6 Autres ultrafines :

Les fillers (calcaires, siliceux ou silico-calcaires) sont fabriqués soit par broyage, soit par pulvérisation ; leur coût est inversement proportionnel à leur taille moyenne. Dans l'état actuel les fillers ultrafins (taille moyenne de l'ordre de micron) sont chers, et de ce fait ils sont souvent réservés à des usages autres que le génie civil. Cependant à la différence des fumées de silice, ils demeurent des produits moins coûteux car ils s'obtiennent à partir des roches naturelles finement broyées. Le jour où l'industrie du BTP comprendra l'intérêt des BTHP, il sera possible d'abaisser les coûts en organisant la production sur une grande échelle, sans se heurter à des limites de production potentielle, comme c'est le cas pour les fumées de silice (à moins qu'on envisage pour ce produit un procédé spécifique de fabrication par condensation de monoxyde gazeux)[8].

Le broyage d'une roche produit pour des raisons statistiques des distributions «**log-normal**» ; d'où on peut extraire, par «**coupage**», la tranche la plus **fine**. On obtient ainsi des poudres dont la surface spécifique peut atteindre quelques mètres carrés par gramme ; il est pour le moment ~~hors~~ de question d'atteindre les **20m²/g** de la fumée ~~de~~ silice. Cependant à ces finesses, on sait qu'aucun filler connu n'était inerte. Les **quartzs** broyés, malgré leur état initialement cristallin, sont probablement amorphisés en surface, et sont partiellement consommés par la chaux libérée par le ciment, selon une réaction **pouzzolanique**. Quant aux calcaires, ils sont également réactifs, et forment notamment des carbo-aluminates de chaux hydratés avec l'aluminate tricalcique du ciment.

Un nouveau type d'ultrafines est apparu **récemment**[22] ; il s'agit d'une kaolinite cuite à **550°C**, dont l'activité **pouzzolanique** serait comparable à celle de la fumée de silice. Les grains de l'argile originelle étant de l'ordre du nanomètre, on doit pouvoir atteindre avec ce produit la finesse optimale vis à vis de son incorporation dans le béton.

I.1.3 Le ciment portland [23]I.1.3.1 Présentation :

Le ciment ~~est~~ un mélange de clinker et d'un sulfate de calcium (**généralement** le gypse) destiné à contrôler certaines réactions d'hydratation des minéraux de clinker. Le clinker ~~est~~ préparé dans des fours ; constitué essentiellement de silicates et **d'aluminates** de calcium, il est obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire CaCO_3 et d'argile à une température de 1400 à 1450°C.

A la sortie du four, le clinker est **refroidi** puis après ajout de gypse, **broyé** en une poudre fine ($D < 100\mu\text{m}$).

Le ciment portland mélangé à l'eau forme une pâte qui durcit. Fréquemment il est associé à des granulats afin de constituer des mortiers ou des bétons.

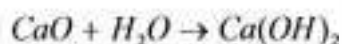
C'est un liant hydraulique car son durcissement et sa conservation peuvent se faire dans l'eau. Cette propriété est due à la faible solubilité des constituants hydratés.

1.1.3.2 Les constituants anhydres du clinker :

a) La chaux CaO :

Cristallise dans le système cubique ; sa densité est $d = 3.18$.

Sa présence dans le ciment portland est proscrite ; notons cependant les problèmes posés par son hydratation :

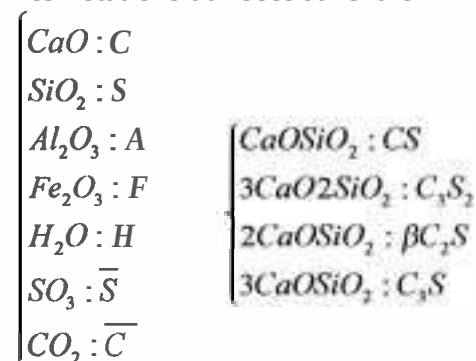


Volume molaire : $5613.18 = 17.6 \text{ cm}^3$ $7412.34 = 31.6 \text{ cm}^3$; $100 \times \Delta V/V = 80\%$

- Extinction de la chaux gonflement **important** $\Rightarrow$ **désordre** si hydratation tardive de CaO .

b) Les silicates de calcium :

Les notations utilisées dans la chimie des ciments :



Seuls les silicates bicalcique et tricalcique peuvent avoir des propriétés hydrauliques et sont présents dans le ciment portland.

• Le silicate bicalcique C_2S :

Il existe plusieurs formes allotropiques et dans les ciments portlands on trouve la forme β qui a des propriétés hydrauliques et qui se forme vers $1200-1300^\circ\text{C}$; sa densité $d \sim 3.28$.

En fait $\beta\text{C}_2\text{S}$ 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).

• Le silicate tricalcique C_3S :

Il se forme vers 1400 à 1450°C sa densité $d \cong 3.15$; c'est le constituant majeur d'un composé que l'on appelle *alite* et qui contient, en solution solide, des impuretés de type MgO ; Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Les réactions d'hydratation du C_3S sont beaucoup plus rapides que celles du $\beta\text{C}_2\text{S}$ ce qui explique que ce composé sera le constituant majeur des ciments portland (noter le coût énergétique de la fabrication et les recherches sur les ciments béliques liés à l'énergie de broyage).

iii) Les aluminates de calcium :

Il existe plusieurs aluminates parmi lesquels on peut citer 3 composés présentant des propriétés hydrauliques :

- CA et $C_{12}A_{17}$ que l'on trouve dans les ciments alumineux.
- C_3A que l'on trouve dans le ciment portland de densité 3.04.

L'hydratation du C_3A est très rapide (l'ajout du gypse au clinker a pour effet de contrôler sa cinétique d'hydratation).

Inconvénient d'une hydratation trop rapide = raidissement précoce de la pâte = problèmes de mise en place du béton.

Dans le ciment portland l'aluminate tricalcique contient des impuretés (Na_2O) et se présente sous plusieurs formes allotropiques dont les réactivités vis à vis de l'eau sont variables.

iv) Les Silico- Aluminates de calcium :

En chimie des ciments on rencontre C_2AS (géhénite). Ce composé se trouve dans certains ciments alumineux et dans les laitiers de hauts fourneaux que l'on utilise comme ajout au ciment portland.

v) Les Alumino-Ferrites de calcium :

Dans le ciment portland on rencontre, en fait, une solution solide allant de C_4AF à C_4A_2F . . Leurs réactions d'hydratation sont voisines de celles du C_3A .

❖ Composition moyenne des principaux minéraux du clinker [3] :

C_3S	55%	(50 à 75).
βC_2S	23%	(7 à 30).
C_3A	10%	(0 à 18).
C_4AF	12%	(4 à 20).

1.1.3.3 Hydratation des composés du clinker à température ambiante :

a) Hydraulicité :

Le ciment portland est un liant hydraulique car il fait prise et **durcit** dans l'eau, il est par ailleurs peu soluble à son contact (en fait la solubilité est très faible).

Il existe deux théories (extrêmes) sur l'hydraulicité du ciment :

❖ La théorie de LE CHATELIER : (mécanisme par passage en **solution** ou mécanisme de dissolution - germination - croissance)

La théorie de Le Chatelier nous indique que le mécanisme d'hydratation est dû au **fait** que les composants anhydres solubles donnent rapidement une solution saturée au voisinage des grains ; l'hydratation qui s'opère alors conduit à la sursaturation par **suite** de la plus faible solubilité des produits hydratés ;

d'où précipitation de microcristaux au sein de cette solution, ce qui diminue la concentration de cette dernière et la rend apte à la répétition du phénomène



$y < x$ solution saturée à x (g/l) $\Rightarrow$ **précipitation** de B (germination des cristaux de B).

La concentration de la solution diminue et la réaction d'hydratation de la phase A peut se poursuivre ce qui se traduit par la croissance des germes de B.

En réalité, il ne s'agit, dans cette explication d'ordre général, que d'un schéma, qui ne peut évidemment tenir compte des interactions des multiples corps en présence, aptes à modifier le processus d'une façon souvent irréversible.

Deux objections peuvent alors être faites à cette théorie :

- Certains composés hydratés ont une structure dont le caractère cristallin n'est pas évident.
- Le mécanisme dissolution – germination- croissance est lent et explique mal la vitesse d'hydratation élevée.

❖ **La théorie de MICHAËLIS :** (théorie colloïdale ou mécanisme sans passage en solution)

Les réactions d'hydratation se produisent sans passage en solution par réaction **topochimique** à l'état solide (il existe une relation entre les structures et les orientations des composés anhydres et hydratés).

Le durcissement serait dû à la formation et au développement d'un gel autour des grains de ciment. L'hydratation se poursuit par transfert de l'eau vers le grain anhydre à travers la membrane de gel qui durcit.

Cette théorie n'explique pas la formation des hydrates cristallisés mais leur rôle dans le durcissement de la pâte de ciment est considéré comme négligeable.

En fait, on admet maintenant que les deux modes d'hydratation coexistent :

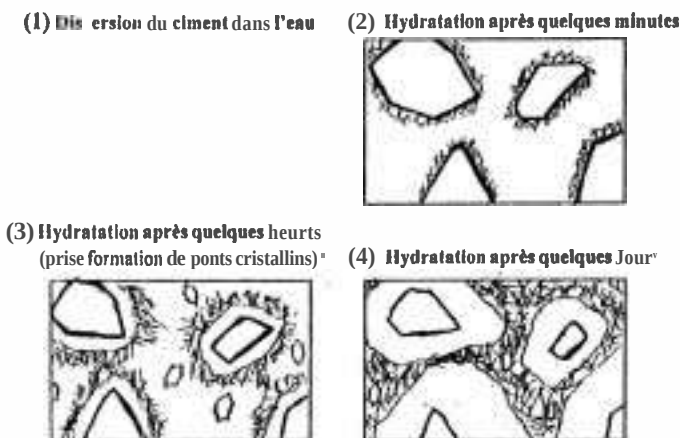


Fig I-6 : Représentation schématique de la prise du ciment.

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

ii) Hydratation des silicates de calcium :

Durant la réaction de C3S et β C2S avec l'eau ; il se forme l'hydroxyde de calcium « Ca(OH)_2 » appelé **portlandite** et un gel de silicate de calcium hydraté (CSH).

- La portlandite

Elle cristallise dans le système hexagonal sous formes de plaquettes ou de petits cristaux hexagonaux formant des amas ; ces cristaux sont facilement clivables selon leur plan de croissance privilégié (001).

- Sa densité est égale à 2.34.
- Sa solubilité dans l'eau diminue lorsque la température augmente (conséquence sur la cure) voir figure 1.7.

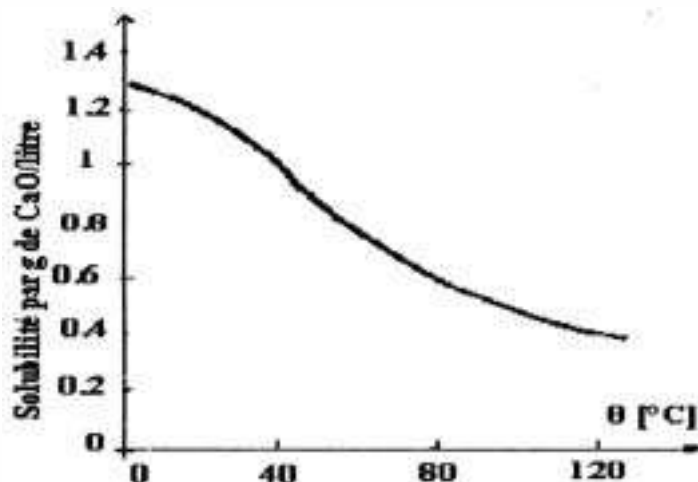


Fig I-7 : Solubilité de Ca(OH)_2 en fonction de la température [23]

- Aspects mécaniques de la croissance de la portlandite :

Les expériences de **GRUDEM** sur les pâtes de ciment Portland sont résumées dans la Fig 1-8 :

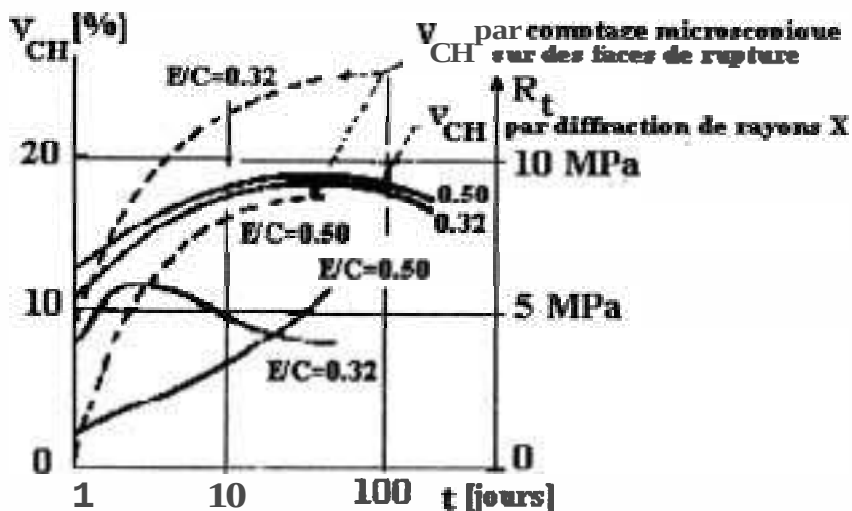


Fig I-8 : Expériences de GRUDEM sur les pâtes de ciment Portland.

- Le gel de silicate de calcium hydraté :

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

Le produit de la réaction est noté CSH sans préciser la composition. Les formes les plus fréquentes sont :

- Le CSH(I) de type fibreux (feuillets enrobés).
- Le CSH(II) fibres jointives formant une structure en nid d'abeille.
- Le CSH(III) très fréquent mais peu décrit car il possède une structure irrégulière (parties irrégulières aplaties).
- Le CSH(IV) produit interne de l'hydratation des silicates, il est difficile à observer.

Toutes les formes sont presque amorphes.

La composition des silicates hydratés varie beaucoup selon les auteurs et selon les méthodes de détermination (méthode globale par dosage de Ca(OH)_2 ou méthode d'analyses microscopiques plus localisées). Le rapport molaire C/S varie entre 1,5 et 2 sauf dans le cas du CSH(IV) où il est voisin de 3 (pour l'hydratation du C_3S).

Des formes cristallisées et bien définies de silicates de calcium hydratés existent et se forment au cours de l'hydratation des ciments portland à hautes températures.

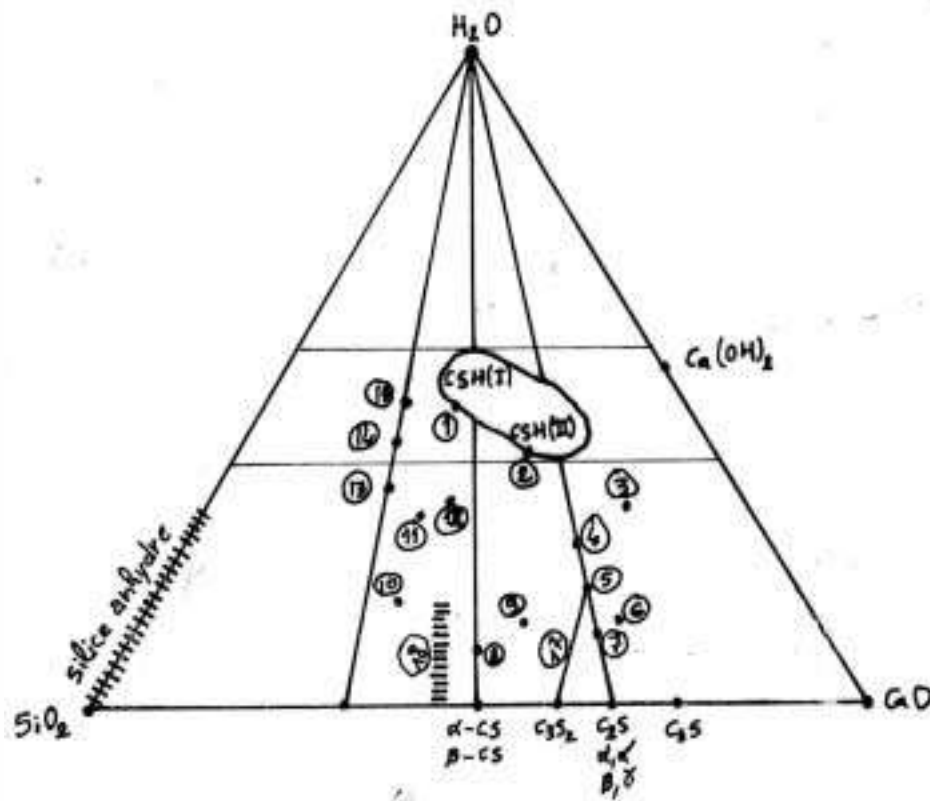


Fig 1-9 : Diagramme de RANKINE.

Ce tableau montre les différents composés du système $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ avec les notations suivantes :

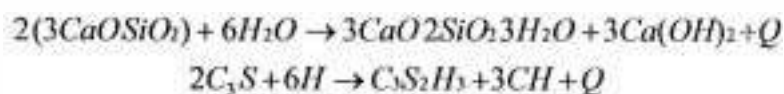
C : Cao ; S : SiO_2 et H : H_2O

C/S	H/C	Désignation	Formule chimique
0.85	1.82	(1) 14A° Tobermite	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_9$
1.5	1	(2) Afwilite	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
3	0.5	(3) Tricalcium silicate hydrate	$\text{C}_6\text{S}_2\text{H}_3$
2	0.5	(4) Hillebrandite	C_2SH
2	0.33	(5) $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ hydrate	$\text{C}_6\text{S}_3\text{H}_2$
2.5	0.2	(6) Culcio chondrodite	$\text{C}_4\text{S}_2\text{H}$
2	0.17	(7) Phase Y	$\text{C}_6\text{S}_3\text{H}$
1	0.17	(8) Xonutlite	$\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$
1.33	0.25	(9) Foshagite	$\text{C}_4\text{S}_3\text{H}$
0.6	0.5	(10) Truscottite	$\text{C}_6\text{S}_{10}\text{H}_{13}$
0.67	1	(11) Gyrolite	$\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$
0.83	1	(12) 11A° Tobermorite	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_3$
0.5	1.5	(13) Z Phase	$\text{C}_3\text{S}_4\text{H}_3$
0.5	2	(14) Okanite	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_6$
0.5	2.67	(15) Nekoite	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_8$
0.83	0-0.4	(16) 9A° Tobermorite	$\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_{0.2}$
		(17) Possible solid solution	

Tableau 1.4 : Composés du système $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$

- **Hydratation du C_3S :**

L'hydratation complète du C_3S peut s'écrire :



Cette équation chimique simple ne rend pas compte de la complexité de la réaction.

- **Cinétique de la réaction (voir fig1-10)**

Profondeur de pénétration de la réaction 1j

0.5 μm

3j

2 μm

7j

3 à 4 μm

28j

6 à 8 μm

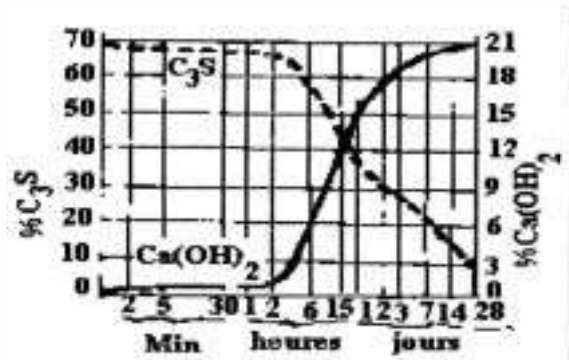


Fig 1-10 : Cinétique de l'hydratation du C_3S .

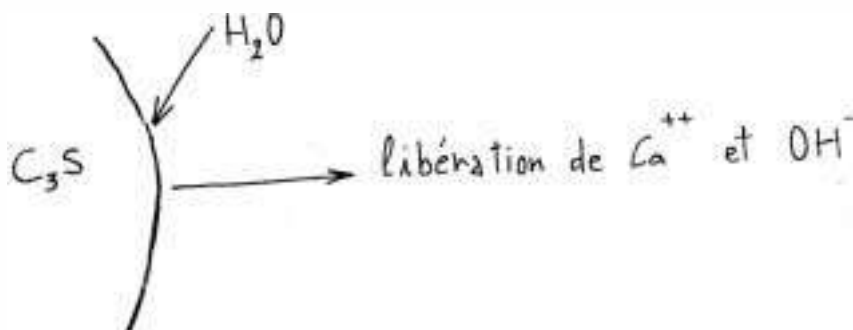
Les grains de $30\mu\text{m}$ de diamètre sont ainsi hydratés à 87.5 % à 28 jours alors que les grains inférieurs à $3\mu\text{m}$ sont complètement hydratés peu de temps après le gâchage ; ces derniers grains contribuent à donner au ciment des résistances initiales élevées, du point de vue économique il faut prendre en compte l'énergie de broyage.

- Mécanisme d'hydratation du C_3S :

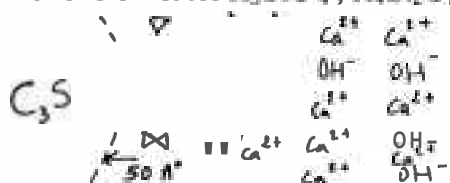
L'hydratation du C_3S passe par quatre périodes :

❖ Première période de pré-induction :

Elle est de courte durée, le C_3S réagit rapidement avec l'eau de manière exothermique (chaleur de mouillage et de dissolution).



Un produit de réaction superficielle se forme. Il est composé essentiellement de groupement d'ions silicates H_3SiO_4^- ; $\text{H}_4\text{Si}_2\text{O}_7^{2-}$.



Une double couche **électrique** se forme :

*Ions Ca^{2+} **relativement** mobiles

*Ions silicates peu mobiles

❖ Deuxième période d'induction ou période dormante :

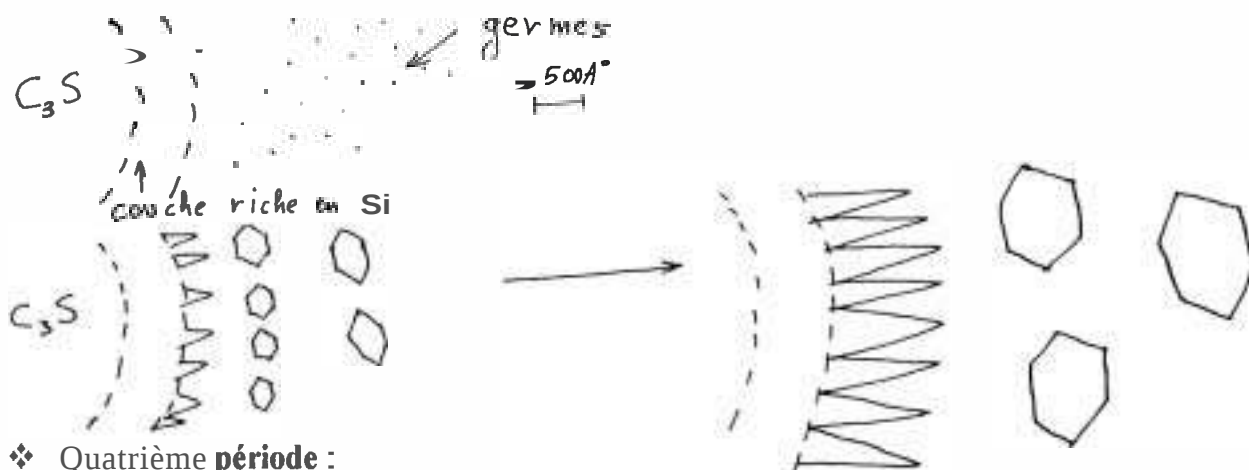
Le processus de passage en solution des ions Ca^{2+} et OH^- se poursuit **plus** lentement car les ions doivent traverser la double couche électrique. Des atomes en **solution** s'assemblent et forment des germes. Ces germes **contiennent** Ca^{2+} , OH^- et des ions silicates. Ils pourront ainsi former de la **portlandite** et des CSH lorsqu'ils pourront croître.

❖ Troisième période de post-induction :

Lorsque la concentration des ions en solution est **suffisante** les germes **peuvent** croître pour former des cristaux. Cette croissance s'observe lorsque la solution devient sursaturée en hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle se produit d'abord à la surface du grain. D'autres

cristaux se forment à distance du C_3S lorsque la concentration de la solution le permet, leur développement est facilité par l'absence de contrainte spatiale.

La croissance du CSH est limitée à la surface des grains anhydres car les ions silicates sont peu mobiles.

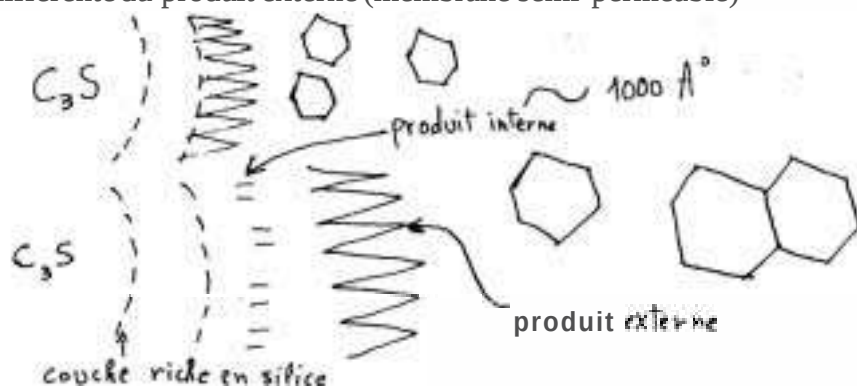


❖ Quatrième période :

La croissance rapide au début de la portlandite et de CSH se ralentit quand la sursaturation de la solution diminue.

La croissance ultérieure du CSH se fait à l'intérieur du volume initial des grains de C_3S :

Le CSH ainsi formé est souvent appelé **produit interne CSH(IV)** et sa morphologie est différente du produit externe (membrane semi-perméable)



Hydratation des silicates bicalciques :

Réaction complète peut s'écrire :



Comme dans le cas du silicate tricalcique cette écriture de la réaction d'hydratation ne rend pas compte de la complexité du mécanisme. Ce dernier est approximativement le même que celui du C_3S mais le silicate bicalcique s'hydrate plus lentement.

Profondeur d'hydratation en microns :

- 7j : 0.6 μm .
- 28j : 0.8 μm .
- 5 mois : 3.5 μm .

iii) **Hydratation** de l'aluminate tricalcique C_3A :

Les hydrates formés sont des aluminates de calcium hydratés qui existent sous de nombreuses compositions.

Les plus **fréquentes** sont :

- Aluminate bicalcique C_2AH_8 .
- Aluminate tétracalcique C_4AH_{13} ; C_4AH_{13} (C_4AH_x).
- Aluminate tricalcique C_3AH_6 (c'est la forme stable des aluminates de calcium hydratés).

Les premiers cristallisent dans le système hexagonal et forment des plaquettes désordonnées. Les derniers C_3AH_6 cristallisent dans le système cubique. Les aluminates hexagonaux perdent régulièrement des molécules d'eau en atmosphère sèche ou lors d'une élévation de température (C_4AH_x).

La réaction d'hydratation peut s'écrire :



Le C_3A réagit très rapidement avec l'eau et forme tout d'abord un gel (aluminate hydraté) et des aluminates C_2AH_8 et C_4AH_{13} (profondeur d'hydratation $4.5\mu m$ à 3 heures). La réaction étant très exothermique, la conversion des aluminates hexagonaux est rapide :



Cette conversion est d'autant plus rapide que la température est élevée. La vitesse de **réaction** très élevée du C_3A entraînerait une **rigidification** précoce des pâtes de ciment portland (d'où problème de mise en place des mélanges à base de CPA). Dans la pratique la réaction est contrôlée par l'ajout de sulfate sous forme de **gypse** ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), d'hémihydrate ($CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$) ou d'**anhydrite** ($CaSO_4$).

Le mécanisme du contrôle de l'hydratation du C_3A par les sulfates est très controversé. Les ions sulfates passent très vite en solution et plusieurs hypothèses existent pour expliquer la suite du mécanisme du contrôle :

- Fixation des ions SO_4^{2-} par C_3A due à la création d'une couche chargée positivement (pellicule riche en alumine adsorbant les ions Ca^{2+}) ; la barrière ainsi créée s'opposerait à la **diffusion** de l'eau par le C_3A .
- Formation d'une couche d'hydrates hexagonaux C_4AH_x .
- Fixation des ions SO_4^{2-} par les défauts de surface du C_3A d'où ralentissement de la mise en solution.
- Formation d'une coquille d'ettringite autour des grains de C_3A qui isole le grain anhydre.

Cette dernière hypothèse est plus vraisemblable ; de toute façon quelque soit le mécanisme réel il y a toujours formation d'ettringite (trisulfoaluminate de calcium hydraté) au début de l'hydratation du C_3A en présence du gypse :



L'**Ettringite** se forme en aiguilles de sections hexagonales autour des grains de C_3A :

Si le réseau formé est dense ces grains sont isolés de l'eau de gâchage ce qui retarde la formation de C_4AH_{13} .

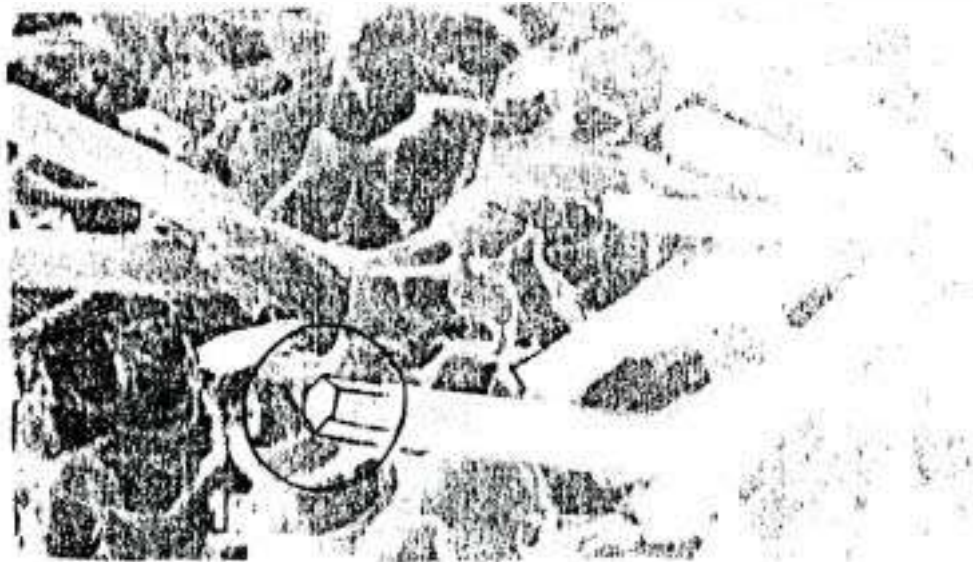


Photo 11.21 : Formation d'aiguilles d'Ettringite autour d'un grain de C_3A .

Lorsque la teneur en gypse diminue, il se forme par réaction du C_3A restant du :

- monosulfoaluminate du calcium hydraté $C_4A\bar{S}H_{12}$ (cristaux plats hexagonaux).
- C_4AH_{13} .

La formation des aiguilles d'ettringite au début des réactions d'hydratation n'est pas gênante au contraire 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 :



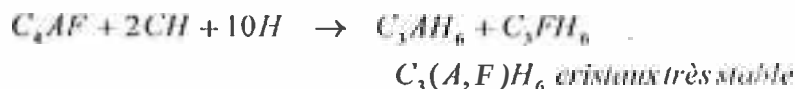
Cette réaction se fait avec un fort accroissement de volume (pression de cristallisation). Ceci peut avoir lieu dans le :

- Cas des eaux contenant des sulfates.
- Cas des sulfates libérés tardivement.

N.B. : Le C_3A se présente sous plusieurs formes allotropiques qui n'ont pas toute la même réactivité vis à vis de l'eau.

iv) Hydratation de C_4AF :

L'alumino-ferrite réagit de façon analogue au C_3A mais sa vitesse d'hydratation est plus faible. Il se forme du $C_4(A,F)H_{13}$ et du $C_3(A,F)H_6$ par conversion. En présence de gypse il se forme d'abord de l'ettringite puis du monosulfoaluminate lorsque le gypse est épuisé.



e) Cinétique d'hydratation des différents composés :

La cinétique d'hydratation des principaux constituants du ciment portland détermine la vitesse de leur durcissement ; plus l'hydratation du minéral est rapide plus vite s'accroît sa résistance. La présence dans le ciment portland à côté du clinker, du gypse et des adjuvants hydrauliques changent sensiblement le processus de durcissement de la pâte de ciment ainsi que la composition du produit final (« pierre de ciment »).

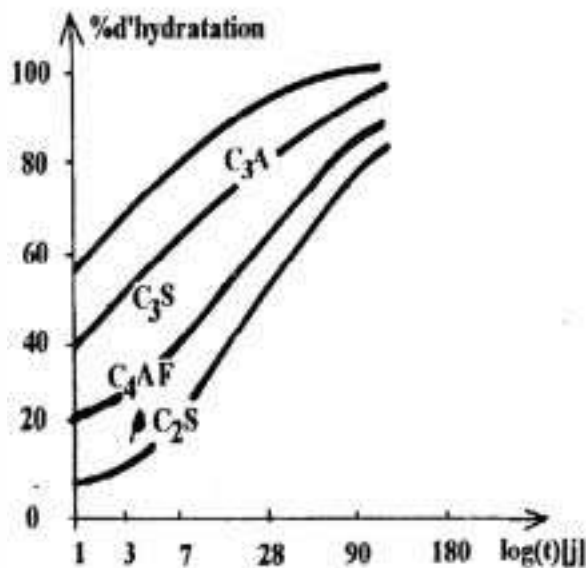
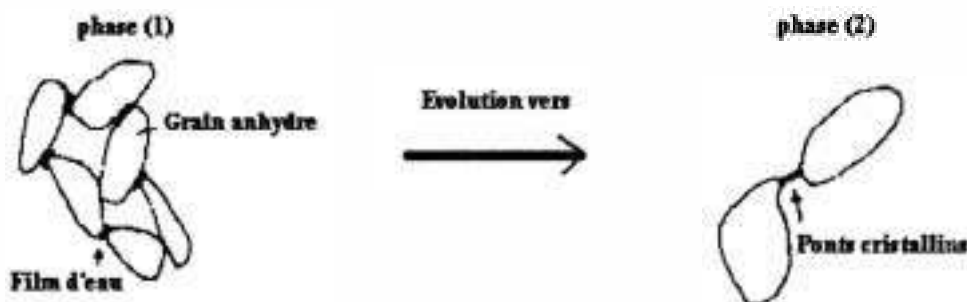


Fig 1-11 : Vitesse d'hydratation des principaux constituants du ciment Portland (d'après F.M.LEA)

I.1.3.4 Prise et durcissement des ciments portlands :

a) Représentation schématisée de la prise



Fie 1-12 : Représentation schématique de la prise.

Phase 1 : Réseau coagulé :

- Forces de Van Der Waals.
- Plasticité due au nombre de contacts entre grains.
- **Thixotropie** : réseau **fréquent** rompu mais qui peut se refermer.
- Résistance faible.

Phase 2 : Réseau cristallin (condensation - cristallisation)

- Point de jonction directe sans intervention de film liquide .
- Ponts cristallins : les forces de liaison (de nature chimique) sont intenses; la résistance de l'édifice est plus élevée.
- Les ruptures sont irréversibles sauf si la solution est toujours sursaturée.

La première étape de cette évolution de la phase 1 vers la phase 2 est due à la cristallisation des aluminates ; l'hydratation du **C₃A** conditionne en grande partie les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment. La prise de la pâte, correspond à une valeur conventionnelle du seuil de cisaillement lorsque le nombre de ponts cristallins augmente.

Pendant la période de prise il se forme un réseau de nature intermédiaire entre le réseau coagulé et le réseau cristallin, il est constitué de sulfoaluminates (**Ettringite**) qui ne contribue pas à la résistance **finale** mais forme une charpente dans laquelle viendra prendre place ultérieurement la structure condensée- cristallisée des CSH – portlandite.

Ces produits d'hydratation des silicates de calcium sont **responsables** du durcissement ultérieur de la pâte de ciment.

La formation de la première structure rigide de la pâte de ciment dépend des réactions d'hydratation du C_3A c.-à-d. de la réactivité de ce composé vis à vis de l'eau ainsi de la quantité de **sulfate** ajouté pour contrôler cette réaction. Ceci a été étudié par LOCHER et Al et les résultats peuvent être résumé à l'aide du tableau suivant :

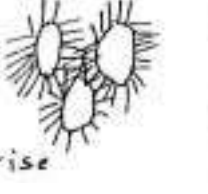
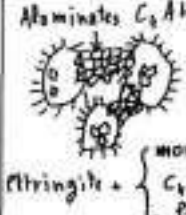
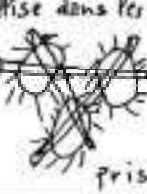
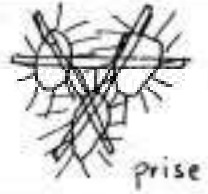
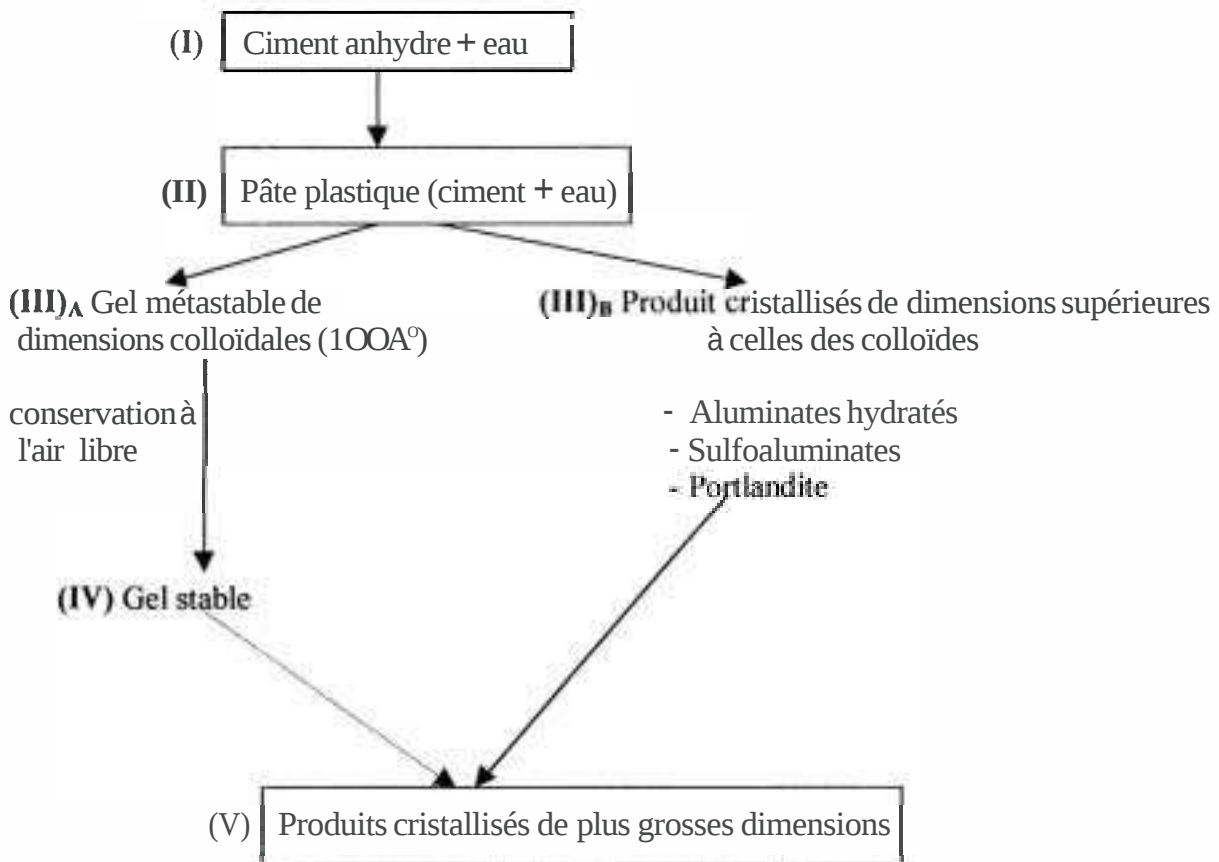
Réactivité du C_3A	Ajout de sulfate	Hydratation		
		10 mn	1 h	3 h
		Re cristallisation de l'Ettringite		
Faible	Faible	 ettringite pâte plastique	 plastique	 prise formation de petits cristallins
Forte	Forte	 ettringite pâte plastique	 raidissement et prise	 prise
Forte	Faible	 Aluminates C_3AH_6 ettringite + monosulfate C_4AH_13 prise	 prise	 prise
Faible	Forte	 ettringite gypse recristallisé dans les pores prise	 prise	 prise

Tableau I-5 : Expériences de LOCHER.

Schéma de la prise et du durcissement :



Le durcissement de la pâte est attribué à la formation de quantités croissantes des cristaux et de gel dans l'état (III)_A et (III)_B. Les hydrates supplémentaires formés augmentent l'imperméabilité de la masse car ils ont un volume plus important que celui des constituants anhydres.

ii) Les liaisons dans la pâte de ciment :

La nature des liaisons dans la pâte de ciment fait l'objet de nombreuses divergences.

Le développement de la consolidation fait intervenir des interactions complexes entre la solubilité, la sursaturation, la formation et le développement des cristaux (pressions de cristallisation), la très grande surface spécifique des produits hydratés (2 à 300 m²/g) et l'établissement de contacts (mécaniques ou chimiques) dans le réseau des cristaux enchevêtrés.

Dans le gel de CSH coexistent des liaisons de types physiques (forces d'attraction de Van Der Waals) et de nature chimique (existence polymérisation des groupements SiO₄). Les premières sont beaucoup moins intenses que les secondes **ce qui expliquerait le facteur 10 existant entre les résistances en traction et en compression des pâtes de ciment.**

La rupture en traction faisant alors intervenir les liaisons de Van Der Waals alors qu'en compression se seraient les liaisons de nature chimique entre cristaux qui interviendraient :

- Dans une autre théorie les particules seraient soudées par des contacts solides- solide ne faisant pas intervenir de relation d'ordre entre les atomes des deux particules soudées. Elles seraient donc différentes des liaisons chimiques. Il ne s'agit pas non plus de forces de Van Der Waals, ces dernières se faisant habituellement au travers d'un film d'eau adsorbé par les particules.
- La théorie de LE CHATELIER attribue la résistance de la pâte de ciment à l'enchevêtrement des cristaux. On peut représenter la pâte durcie comme un fin réseau de «cristaux» de CSH composé de particules aciculaires ou de feuillets se repliant sur eux même pour donner des fibres. Lorsque ces cristaux croissent, on peut supposer qu'ils forment une **structure** enchevêtrée devenant plus résistante par des liaisons de surface au niveau des contacts.

Il existe encore beaucoup d'incertitudes au sujet de la taille des cristaux ainsi lorsque la sursaturation augmente les cristaux formés sont plus petits (**ce qui** est favorable car le nombre de contacts augmente) et les pressions de cristallisation croissent (ce qui peut être défavorable) car **cela** peut entraîner des ruptures partielles du cristallin rigide préformé.

c) **Élévation de la température au cours de la prise et du durcissement :**

Les réactions d'hydratation des constituants du ciment portland sont exothermiques. Le dégagement de chaleur qui accompagne les réactions est **généralement** de la forme suivant :

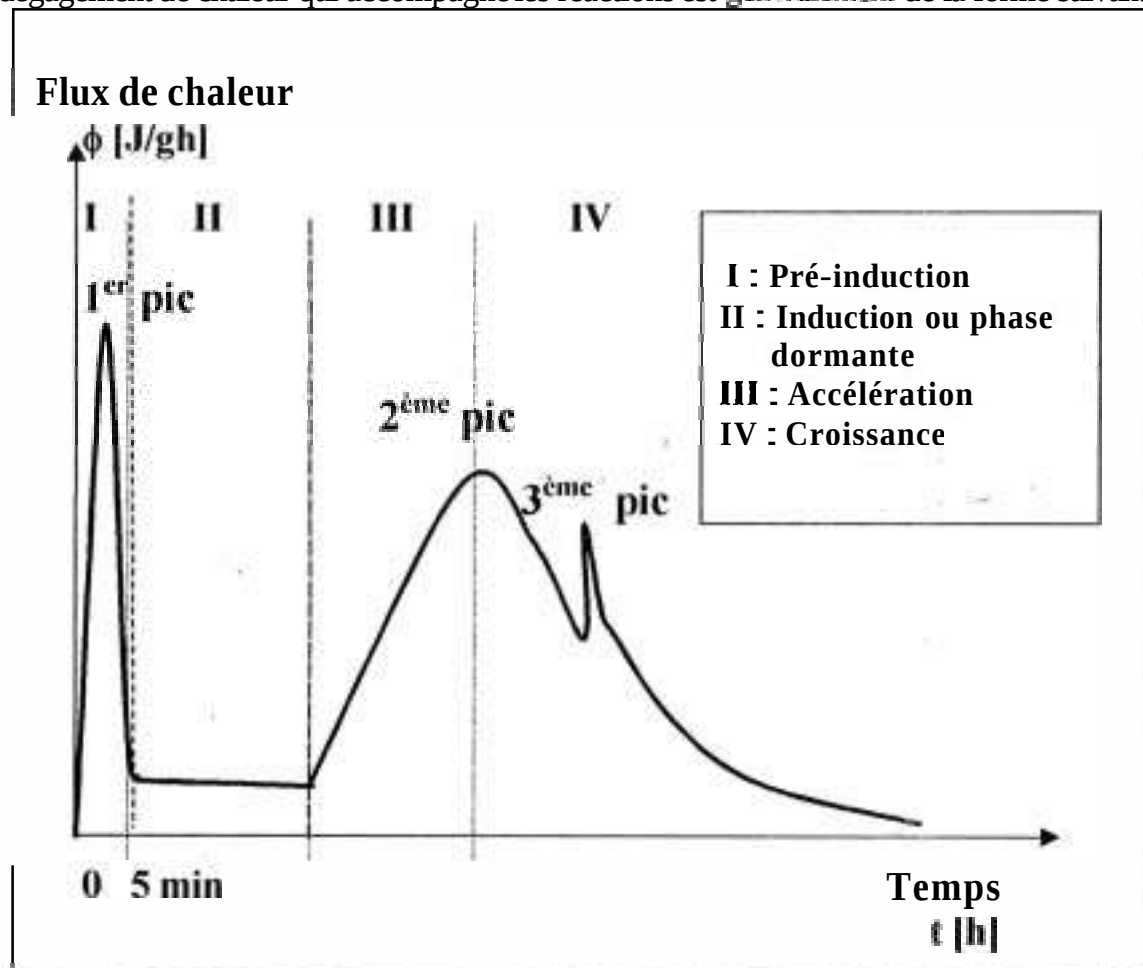


Fig I-13 : Variation du flux de chaleur au cours de la prise et du durcissement [6].

- Le premier pic : dégagement de chaleur ; dissolution rupture des **liaisons** chimiques suivie d'une période relativement athermique («**période dormante**»)(mouillage, **nucléation**).
- Le deuxième pic correspond à un dégagement de chaleur beaucoup **plus** important que le premier : hydratation du C_3S .
- Le troisième pic est peu intense et correspond à la fin de la **consommation** du **gypse** ; recristallisation de **l'Ettringite**, reprise de l'hydratation du C_3A , formation de monosulfoaluminate.

L'élévation de température qui accompagne les réactions **d'hydratation** peut être importante dans le cas d'ouvrages massifs (poteaux, barrages) : problèmes de fissuration, autoactivation de l'hydratation.

Mesures : Calorimètre DEWAR $Q = Mc \Delta\theta + \text{fuites}$.

Calorimètre adiabatique

Calorimètre à conduction

Chaleur = f (E/C, composition du **Clinker**, finesse).

C_3A	207 cal/g (pur : influence des sulfates).
C_3S	120 cal/g.
C_4AF	100 cal/g.
βC_2S	62 cal/g.

iv) l'eau dans la pâte de ciment durcie :

Dans la pâte de ciment portland la nature des liaisons entre **l'eau** et les composants du ciment est très variée. Cette diversité provient du phénomène d'hydratation mais aussi de la structure poreuse de la pâte et du caractère hydrauliphile de certains composants.

COPELAND et KANTRO déterminent trois types essentiels de **liaison** entre l'eau et les constituants du ciment :

- L'eau combinée chimiquement dans la formation des produits hydratés.
- L'eau **adsorbée** physiquement par les gels.
- L'eau interstitielle ou capillaire retenue dans les pores de la pâte par des forces capillaires.

Exemple : Modèle de structure du gel de CSH (d'après FELDMAN)

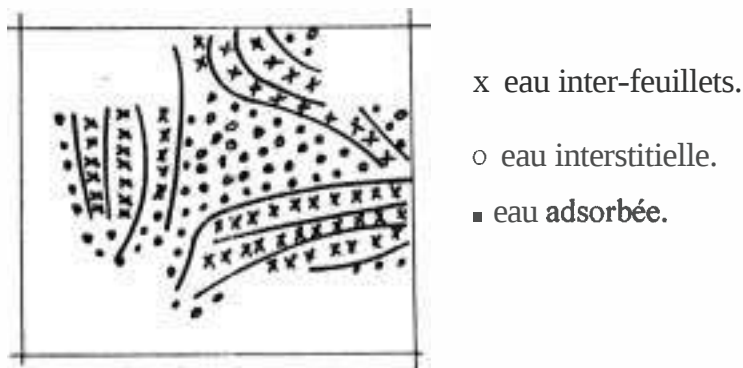


Fig 1-14 : Modèle de structure du gel d'après FELDMAN.

L'élévation de la température provoque un déséquilibre **thermodynamique** des liaisons qui aboutit à leur décomposition : l'eau libérée s'évapore.

Les limites entre les trois types de liaisons ne sont pas précises et on ne peut pas déterminer les quantités d'eau engagées dans chacune d'elles. Il existe toutefois des méthodes conventionnelles que nous verrons par la suite.

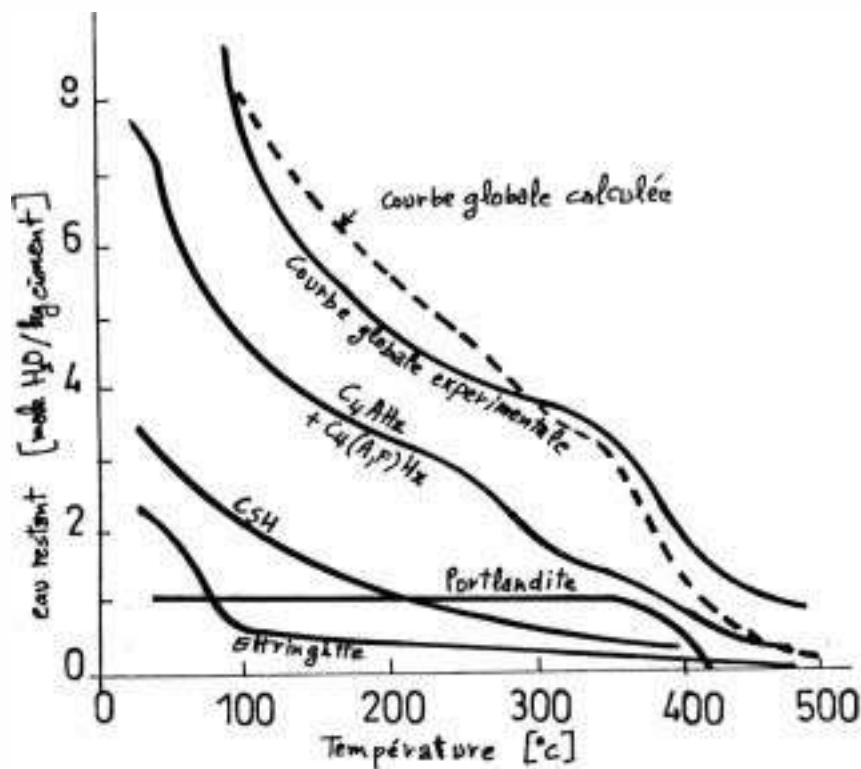


Fig 1-15 : Quantité d'eau restant dans les hydrates en fonction de la température.

Une analyse de l'apport de chacun des principaux constituants de la pâte de ciment à la perte en eau a été effectuée par TAYLOR. Le diagramme suivant indique les quantités d'eau restant dans ces hydrates en fonction de la température, chaque courbe prenant en compte la teneur en hydrate dans la pâte (cf tableau)

Produits d'hydratation d'une pâte de ciment Portland	%
Gel de CSH	70
Portlandite cristallisée	20
Aluminates de calcium hydratés	7
Sulfoaluminates de calcium hydratés	

Tableau I-6 : Proportions des hydrates dans une pâte de ciment Portland.

Les courbes thermogravimétriques correspondent à des pertes d'eau progressives sauf dans le cas de la portlandite. Cette particularité est due à la nature bien cristallisée de cet hydrate et à la présence d'une seule molécule d'eau dans sa structure. Par contre la déshydratation du gel de CSH est progressive : la destruction entre l'eau liée physiquement et celle liée chimiquement ne peut pas être faite à partir de ces courbes.

La distinction entre les diverses **catégories** d'eau est compliquée par le fait que la décomposition de certains hydrates (l'ettringite par exemple) commence à des températures bien inférieures à **100°C**, température à laquelle l'eau capillaire est évaporable.

Cependant l'étude de la quantité d'eau fixée par la pâte de ciment est souvent très utile : ceci conduit à fixer, aux moyens de diverses techniques expérimentales, des seuils conventionnels séparant l'eau contenue dans les pâtes en eau évaporable (celle extraite par la technique choisie) et en eau non évaporable (celle qui subsiste dans la pâte après traitement).

Les diverses méthodes consistent soit à :

- Mettre la pâte de ciment en présence d'agent desséchant ;
- La chauffer ;
- Analyser la diffusion des neutrons.

La teneur en eau retenue après traitement dépend de l'âge, de la vitesse d'hydratation du ciment, du rapport E/C et de la nature du traitement *.

Traitement	Pourcentage relatif d'eau retenue dans la pâte
$\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \text{ à } 4 \text{ H}_2\text{O}$	1.0 (référence)
P_2O_5	0.8
H_2SO_4 (concentré)	1.0
Glace à 79°C	0.9
Chauffage à 50°C	1.2
Chauffage à 105°C	0.9

***Tableau I-7 : Quantités** d'eau retenue dans la pâte en fonction du **traitement** utilisé [24]

1.2 Le retrait :

Un échantillon de pâte de ciment lorsqu'il est conservé dans l'air, subit une contraction de son volume au cours du durcissement : il y a retrait.

Une éprouvette de pâte de ciment conservée dans l'eau subit au contraire un léger gonflement en cours d'hydratation. Le séchage d'une telle pâte de ciment se traduit par une diminution de volume irréversible (au cours du premier séchage).

D'autres variations dimensionnelles peuvent se produire dans une pâte de ciment :

- ♦ Le retrait hydraulique avant la prise : Il **correspond** à un départ d'**importantes** quantités d'eau sous l'effet, par exemple, d'une ventilation forcée (vent) ou d'une absorption par un support poreux. Ce retrait est à empêcher car il contrarie l'hydratation au jeune âge.
- ♦ Le retrait thermique : Il accompagne le **refroidissement** des pièces massives (ex si $\Delta\theta=40^\circ\text{C}$; $\alpha=10^{-5}$; $r=400\mu\text{m}$ soit l'ordre de grandeur du retrait après prise).

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta\theta$$

- ♦ Le retrait hydraulique après prise : Il est dû à l'évaporation de l'excédent d'eau de gâchage non nécessaire à l'hydratation. Cette évaporation est d'autant plus grande que le matériau est conservé dans un milieu sec. Ce type de retrait se **mesure** sur des pâtes de ciment (ou bétons) déjà durcis. Il est aussi appelé retrait de dessiccation.

Variation de la **teneur** en eau au cours du séchage [JESSER].

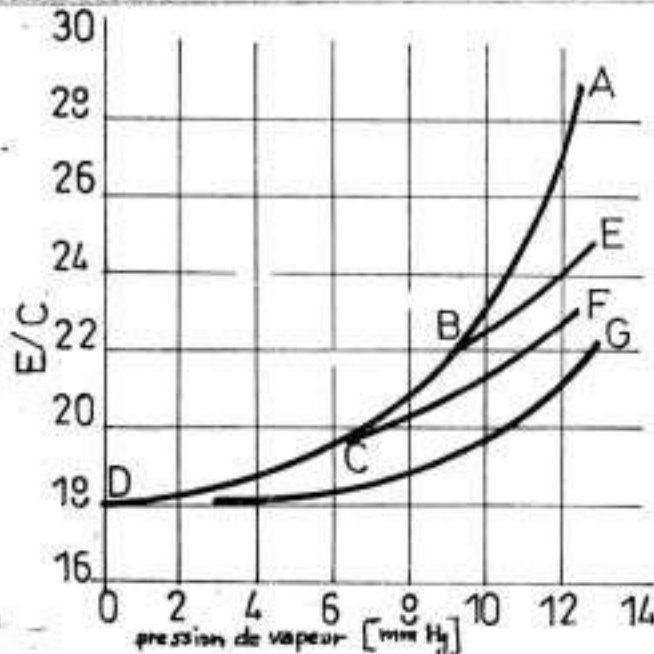


Fig 1-16 : Variation du rapport E/C en fonction de la pression de vapeur [23]

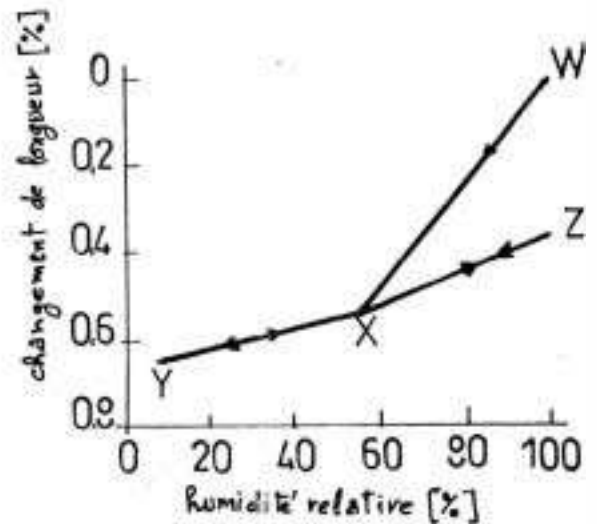


Fig 1-17 : Variation du retrait en fonction de l'humidité relative (HR) [23]

AD correspond au 1^{er} séchage

DG humidification de la pâte de ciment

AG perte de poids irréversible

BE humidification

AE perte de poids irréversible

CF humidification

AF perte de poids irréversible

Le 1^{er} séchage est irréversible (AB), par contre les trajets GD, EB et FC sont réversibles

Similitude des courbes pondérales et de retrait

Les courbes donnant les variations de longueur en fonction de perte d'eau présentent plusieurs parties de pente différente, ce qui indique qu'il y a plusieurs mécanismes de retrait.

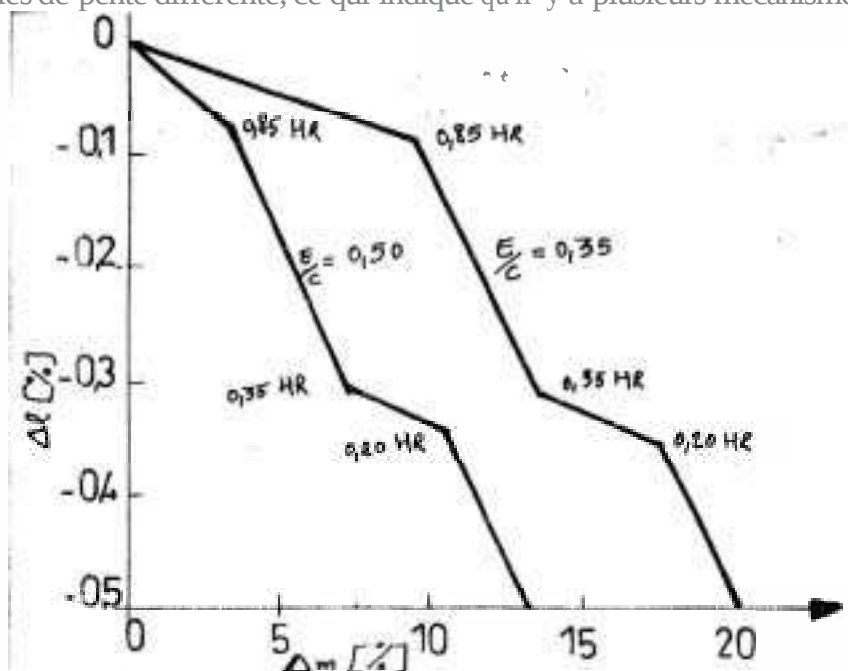


Fig 1-18 : Variation de la longueur en fonction de la perte d'eau [23]

Plusieurs théories proposent une explication des phénomènes de retrait :

- ♦ **Tension capillaire :** D'après la loi de LAPLACE, lorsque le rayon de courbure des ménisques décroît ; ce qui se produit lorsque l'eau s'évapore à partir des plus gros capillaires ; la tension dans l'eau restant augmente. Cette tension dans le liquide doit être équilibrée par une force de compression équivalente dans le solide, provoquant un retrait de déformation.
- ♦ **Eau interstitielle dans les cristaux :** La distance réticulaire des CSH cristallisés varie avec leur teneur en eau : il y a modification de la quantité d'eau inter-feuillets. De tels changements sont accompagnés d'un mouvement d'ensemble du solide.

Le premier séchage d'une pâte de ciment durcie a un retrait **irréversible**, ceci peut s'expliquer en supposant que la fermeture des lacunes entre surface **adjacentes** entraîne la formation de nouvelles liaisons chimiques qui ne peuvent plus être rompues lorsque l'eau est réabsorbée. D'une manière plus générale on peut dire **que** le premier séchage conduit à un état plus stable de la pâte de ciment par réduction de l'énergie de surface

Lorsque la **pâte de ciment** (ou le **béton**) perd de l'eau la variation de **volume** ne représente qu'une faible **part du** volume d'eau perdue. Cela doit être **attribué** aux contraintes développées par **les** éléments n'ayant pas de retrait, **comme les granulats et les grains anhydres et également** aux forces élastiques existant dans le gel.

Facteurs influençant le retrait :

Le retrait est influencé par la :

- Nature du **ciment**.
- Finesse du ciment.
- Teneur en ciment.
- Hygrométrie de **l'ambiance**.
- Porosité du béton.
- Forme de l'ouvrage.

1.3 Facteurs chimiques affectant la prise du ciment portland :

1.3.1 Influence de la nature et teneurs en sulfates :

Le temps de **prise** des **ciments** portland est **contrôlé** par ajout **de sulfate** au **Clinker** en cours de **broyage**. Le comportement à la prise dépend **de la nature et teneur** en sulfate.

Plusieurs théories **proposent** une explication des phénomènes de retrait :

- ♦ **Tension capillaire** : D'après la loi de LAPLACE, lorsque le **rayon** de courbure des ménisques décroît ; ce qui se produit lorsque l'eau s'évapore à partir des plus gros capillaires ; la tension dans l'eau restant augmente. Cette tension **dans** le liquide doit être équilibrée par une force de compression équivalente **dans** le solide, **provoquant** un retrait de déformation.
- ♦ **Eau interstitielle dans les cristaux** : La distance réticulaire des CSH cristallisés varie avec leur teneur en eau : il y a modification de la quantité d'eau **inter-feuillets**. De tels changements sont accompagnés d'un mouvement d'ensemble du solide.

Le premier séchage d'une pâte de ciment durcie a un retrait **irréversible**, ceci peut s'expliquer en supposant que la fermeture des lacunes entre surface **adjacentes** entraîne la formation de nouvelles liaisons chimiques qui ne peuvent plus être **rompues** lorsque l'eau est réabsorbée. D'une manière plus générale on peut dire **que** le premier séchage conduit à un état plus stable de la pâte de ciment par réduction de l'énergie de surface

Lorsque la **pâte de ciment** (ou le **béton**) perd de l'eau la variation de **volume** ne représente qu'une faible part du volume d'eau perdue. Cela doit **être attribué** aux contraintes développées par les éléments n'ayant pas de retrait, comme les gr. nuls et les grains anhydres et **également** aux forces **élastiques** existant dans le gel.

Facteurs influençant le retrait :

Le retrait est influencé **par** la :

- Nature du ciment.
- Finesse du ciment.
- Teneur en ciment.
- Hygrométrie de l'ambiance.
- Porosité du béton.
- Forme de l'ouvrage.

1.3 Facteurs chimiques affectant la prise du ciment portland :

1.3.1 Influence de la nature et teneurs en sulfates :

Le temps de **prise** des **ciments portland** est contrôlé par ajout **de sulfate** au **Clinker** en cours de **broyage**. Le **comportement** à la prise dépend de la nature et teneur en sulfate.

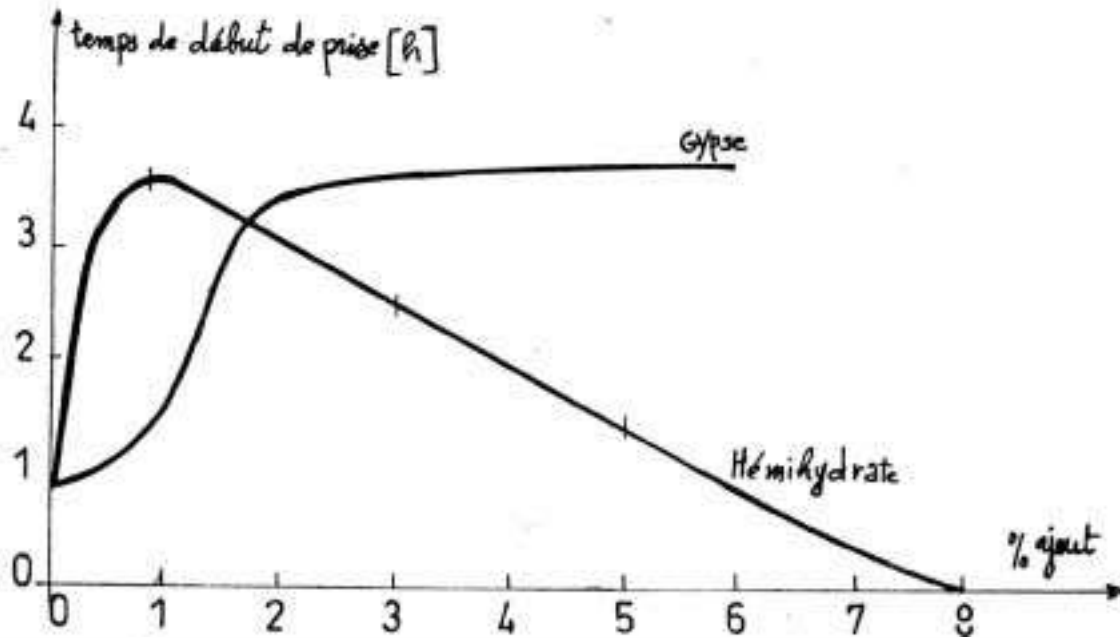


Fig 1-19 : Variation du temps du début de prise en fonction de la teneur et nature du **sulfate de calcium**.

Dans le cas de l'**hémihydrate** le raidissement dû à la **fausse** prise est attribué à la cristallisation du gypse, résultat que l'on retrouve dans le cas du ciment blanc [25].

I.3.2 Influence de la nature des adjuvants :

Ce sont des produits qui, ajoutés à la pâte de ciment en faible quantité modifient la prise ou le durcissement ou, également, les propriétés physiques de la pâte :

I.3.2.1 Adjuvants accélérateurs :

CaCl_2 accélère l'hydratation du C_3S ainsi que la formation d'étringite. Avec C_3A il se forme un sel complexe $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

CaCl_2 est très **soluble** (Ca^{2+}) modifie la cinétique de C_3S .

CaCl_2 doit être utilisé avec précaution à cause des risques de corrosion dus à la présence d'ions Cl^- dans la solution.

La triéthanolamine (TEA) retarde l'hydratation du C_3S mais accélère celle du C_3A comme les sucres, cet adjuvant accélère la prise mais retarde le durcissement.

1.3.2.2 Adjuvants retardateurs :

Ce sont souvent des corps organiques (glucose ; **lignosulfonate** de calcium) qui agissent sur les conditions de croissance de la portlandite. Certains sels minéraux ont également une action retardatrice. Ainsi que certains métaux tels que le zinc.

I.3.2.3 Adjuvants réducteurs d'eau :

Les superplastifiants permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage (donc d'augmenter les résistances mécaniques) grâce à une amélioration de la plasticité des bétons frais.

On pense qu'ils agissent par :

- Décroissance de la **tension** superficielle de l'eau.
- Modification de la **charge** électrique des particules solides.
Production d'un film lubrifiant à la surface des particules.

1.4 Altérations du béton :

1.4.1 Nomenclature des attaques chimiques du béton :

L'attaque chimique consiste en un échange de masse entre le béton et le milieu environnant ce qui a pour **conséquence** éventuelle d'affecter les propriétés du béton.

L'attaque chimique peut avoir lieu à la surface ou à l'intérieur du béton (**influence** de la texture du matériau **conditionnant** la pénétration des agents agressifs) [26][27] ; la détérioration par attaque chimique peut être caractérisée par la description détaillée des milieux agressifs (**substance** agressive, **concentration**, **température**,...), la qualité du béton (**composition** du ciment, type de **granulats**, caractéristiques **mécaniques**,...) et par la détérioration (érosion superficielle, finesse, extension du gel,...).

1.4.2 Classification des attaques chimiques [26][27]:

La classification suivante est relative aux ciments portland et aux ciments **composés** (ciments **pouzzolaniques** et ciments de hauts fourneaux).

❖ Processus d'altération :

- O Néant
- A Dissolution des constituants solides.
- B** Transformation de constituants solides (échange d'ions, transformations **polymorphiques**)
- C Formation de composés expansifs.
- D Réaction avec les granulats.
- E Corrosion des armatures.
- X Encore inconnu.

❖ Effet nocif résultant :

- | | |
|------------------------|--|
| O Aucun. | P Perte d'alcalinité. |
| K Déformation | R Affaiblissement des armatures. |
| L Fissuration. | S Changement de couleur. |
| M Perte de poids. | X Autres. |
| N Perte de résistance. | |

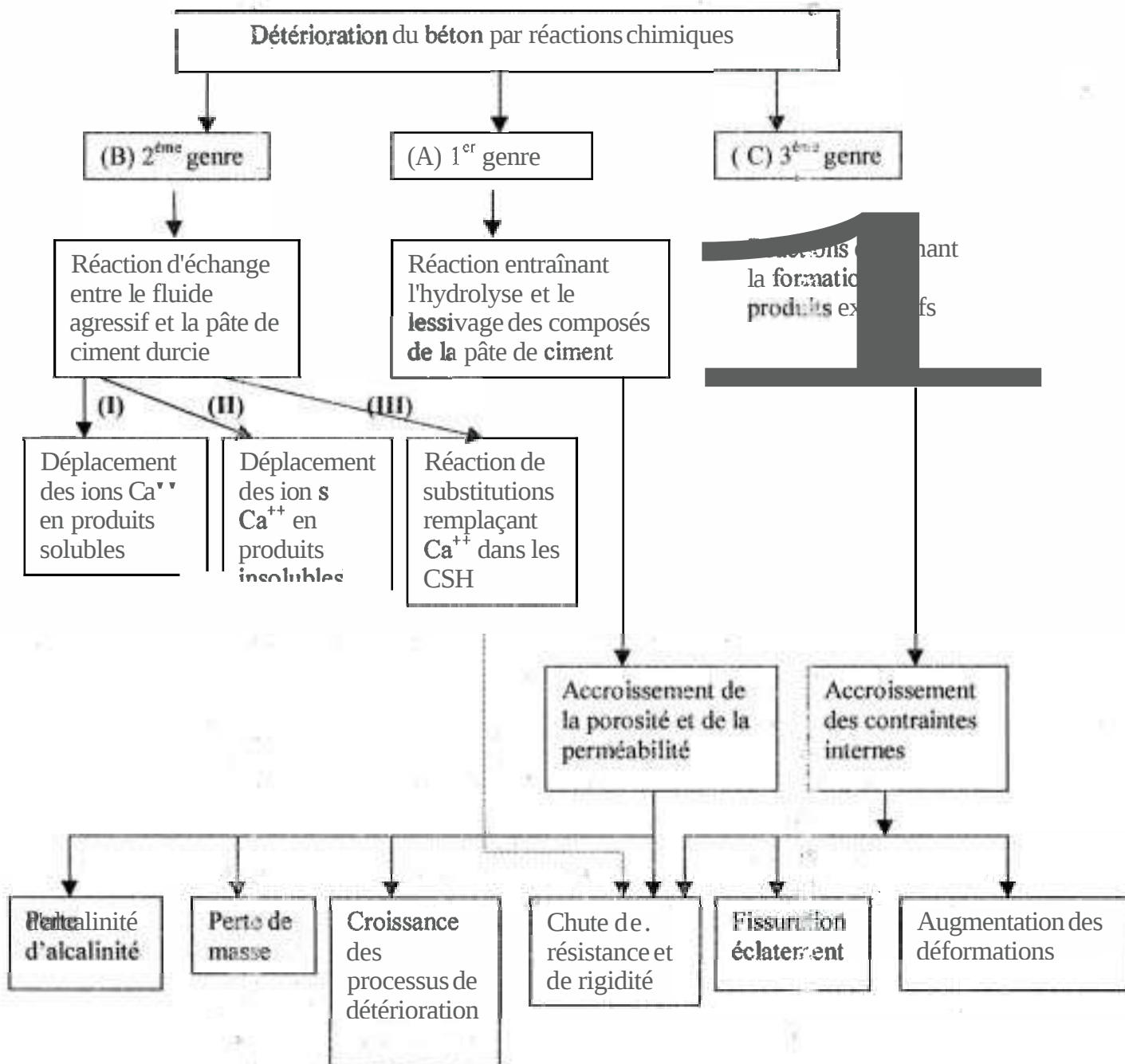
Agent chimique	Processus	Effet possible
Phosphate monosodique NaH_2PO_4	O*	O
Huile minérale	X	O n s
Chlorure de calcium Ca Cl_2 (solution diluée)	O e**	o l r s
Ca Cl_2 (solution concentrée)	C E	L R
Acide sulfurique H_2SO_4 dilué	A C	M k
Acide chlorhydrique HCl dilué	A E	M K
Anhydrite carbonique		
CO_2 dans l'eau	A	M p
CO_2 gaz	B	P
Graisse normale	B	N p
Chlorure d'ammonium NH_4Cl , solution	B E	N P R
Sulfate de calcium Ca SO_4 solution	C	L
Sulfate de magnésium Mg SO_4 solution	C B	L N
Hydroxyde de sodium Na OH solution	D b	k n
Chlorure de sodium Na Cl solution concentrée	E d	R k
Acide chlorique HCl , gaz (incendie PVC)	E	R

Tableau I-8 : Classification des attaques chimiques [26][27].

* Les lettres majuscules : processus et effets principaux

** Les lettres minuscules : processus et effets faibles, secondaires ou seulement possible.

Ceci est une **représentation** schématique de la détérioration du béton par réaction chimique :



Exemples :

B (I) : solutions acides, formant du chlorure de calcium, de l'acétate de calcium, ...etc.

B (II) : solution d'acide **oxalique** et de sels formant l'oxalate de calcium.

B (III) : l'attaque de l'eau de mer peut à long terme affaiblir CSH par substitution de Mg^{2+} à Ca^{2+} .

A : attaque de Ca(OH)_2 et de CSH par l'eau (la solubilité de Ca(OH)_2 est de 1.7 g/l à 20°C).

C : (i) attaque par le sulfate formant l'**étringite** et le gypse.

(ii) alcali-réaction.

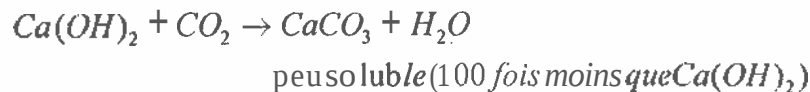
(iii) corrosion de l'acier dans le béton.

I.4.3 Carbonatation :

C'est l'action de CO_2 sur le ciment (produit anhydre ou hydraté).

Le dioxyde de carbone peut être celui contenu normalement dans l'atmosphère, il peut aussi s'agir de gaz concentré. La carbonatation neutralise la basicité calcique du ciment.

Tous les composés anhydres sont sensibles à la carbonatation, la portlandite réagit très facilement dans le cas du CO_2 gaz :



Dans le cas des eaux acides (CO_2 dissous)



Dans ce cas le béton est très sensible au lessivage.

Les produits ultimes de la carbonatation de la pâte de ciment sont carbonate de calcium – silice hydratée – alumine – oxyde ferrique.

Autre exemple : les aluminates $\text{C}_4\text{AH}_7 + \bar{\text{C}} \rightarrow \text{monocarboaluminate } \text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$; c'est une réaction de carbonatation ; c'est aussi le résultat de la dissolution des granulats de marbre.

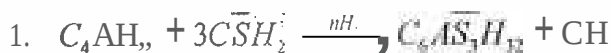
La compacité est un facteur essentiel dans la mesure où le CO_2 migre d'autant plus facilement dans un béton que les vides interstitiels sont plus grands (que la perméabilité est plus important) ce facteur est prépondérant pour tout ce qui concerne les problèmes d'altérabilité.

L'humidité relative de l'atmosphère influe beaucoup sur la vitesse de carbonatation des constituants hydratés : elle est maximum si H.R est comprise entre 50 et 75 %.

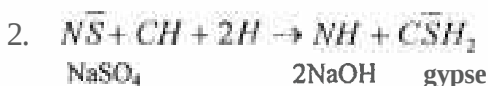
Dans certains cas la carbonatation peut avoir des effets favorables sur le béton : augmentation de leur résistance et/ou de leur durabilité (les produits formés sont plus résistants à l'attaque des acides que les composés initiaux) et empêche la conversion des aluminates.

I.4.4 Attaque par les sulfates :

Plusieurs mécanismes sont invoqués pour exprimer l'attaque par les sulfates :



Formation d'étringite expansif.



Formation de gypse secondaire. On observe un ramollissement des surfaces (sans gonflement).

3. Réaction avec les sulfates magnésiens (§ l'action de mer).

La vitesse d'attaque dépend de la teneur et de la forme allotropique du C_3A ainsi du rapport E/C de gâchage de la pâte de ciment.

La combinaison d'une forte teneur en C_3A et d'un rapport E/C élevé de la pâte est particulièrement néfaste.

I.4.5 Attaque par l'eau de mer :

- ❖ Attaque chimique.: $\left\{ \begin{array}{l} \text{chlorure de } \textit{sodium} \text{ et de magnésium} \\ \text{sulfate de magnésium (calcium)} \\ \text{bicarbonates} \end{array} \right.$ $MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4$
- ❖ Attaque physique (température).
- ❖ Action mécanique : érosion, courants, vagues, marées. Les zones les plus attaquées sont celles qui sont alternativement immergées ou découvertes.

L'attaque par l'eau de mer peut se traduire par :

- Elimination du calcium par mise en solution ou échange d'ions avec le magnésium : formation de **brucite** $Mg(OH)_2$ et de $C_3M_2H_7S_2$ non hydraulique.
- Formation d'étringite expansive après que la portlandite ait réagi avec les sulfates pour former du gypse secondaire.
Formation de Thaumassite $CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot SiO_2 \cdot 15H_2O$ (ou $C_1\overline{C}\overline{S}SH_{15}$) par transformation de l'étringite.
Cristallisation du gypse $MgSO_4 + CSH \rightarrow C_{1-x}(MgO)_xSH$
pas de propriétés liantes
Formation de $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$: chloroaluminat instable en présence de sulfate
→ **étringite**.

Pour mieux résister à l'eau de mer, le ciment doit être pauvre en C_3A et former peu de portlandite (ciment **riche** en C_2S). Ce dernier point est en fait généralisable aux attaques chimiques du ciment hydraté : la portlandite est très vulnérable. On recommande donc d'utiliser des ciments pouzzolaniques dans lesquels cette portlandite réagit avec la silice pour former des CSH plus résistants aux agressions.

1.4.6 Réactions aux interfaces pâte de ciment – granulats :

Les granulats les plus couramment utilisés pour la confection des bétons sont de nature calcaire ou siliceuse. De ce fait, la plupart des études de liaison ont été menées avec ces types de granulats.

PERRIN [28] a mis en évidence, autour des granulats, l'**existence** d'une **auréole** de transition.

Celle-ci n'a pas la même morphologie sur toute son épaisseur mais on **observe** toujours une zone de grande cohésion au contact même des granulats.

En définitive, les techniques utilisées par J.P. OLLIVIER [29] nous ont **permis** de montrer que les forces d'attraction de type Van Der Waals entre la pâte et les granulats de quartz et de calcite étaient intenses. Avec ce dernier granulat nous avons également **pu** mettre en évidence l'existence de forces de types chimique, la liaison étant assurée par une **solution** solide.

1.4.6.1 Réactions conduisant à une détérioration du béton :

a) Réaction alcali-carbonate :

Les alcalis (**hydroxydes** de métaux alcalins K ; Na) contenus dans le ciment hydraté peuvent réagir avec les granulats **dolomitiques** (carbonate double de calcium et de magnésium). La réaction est appelée **dédolomitisation** :



NaOH ou *KOH*

dolomite + alcali libre → calcite + brucite (expansion) + carbonate alcalin



carbonate

alcalin + portlandite → calcite + alcali



b) Alcali réaction :

La réaction entre les alcalis et la silice provoque une auto-destruction interne du béton :

alcali + silice → silicate alcalin hydraté + eau) expansion

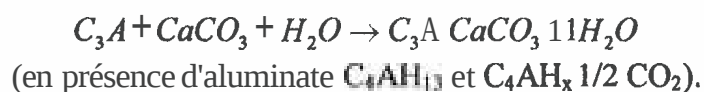
Cette réaction dépend de :

- ❖ La teneur en alcalis et de la **quantité** d'eau.
- ❖ La cristallisation de la partie active des granulats et sa nature. Les **matériaux** les plus réactifs sont ceux qui comportent des phases vitreuses amorphes.
- ❖ La proportion et la taille des grains.

1.4.6.2 Réactions conduisant à une amélioration des propriétés du béton :

i) Réactions entre les granulats de marbre et les aluminates hydratés :

La réaction entre les aluminates hydratés des CPA et le marbre conduit à la formation de carboaluminate selon la réaction :



- ❖ L'interaction entre le marbre et les aluminates hydratés dépend de la formation de C_4AH_{13} .
- ❖ L'orientation de la portlandite dépend de la nature du **granulat** dans la mesure où il peut être attaqué.
- ❖ La formation de carboaluminate augmente la résistance mécanique de l'auréole de transition (interface **pâte/granulat**) et diminue sa porosité. [30][31]

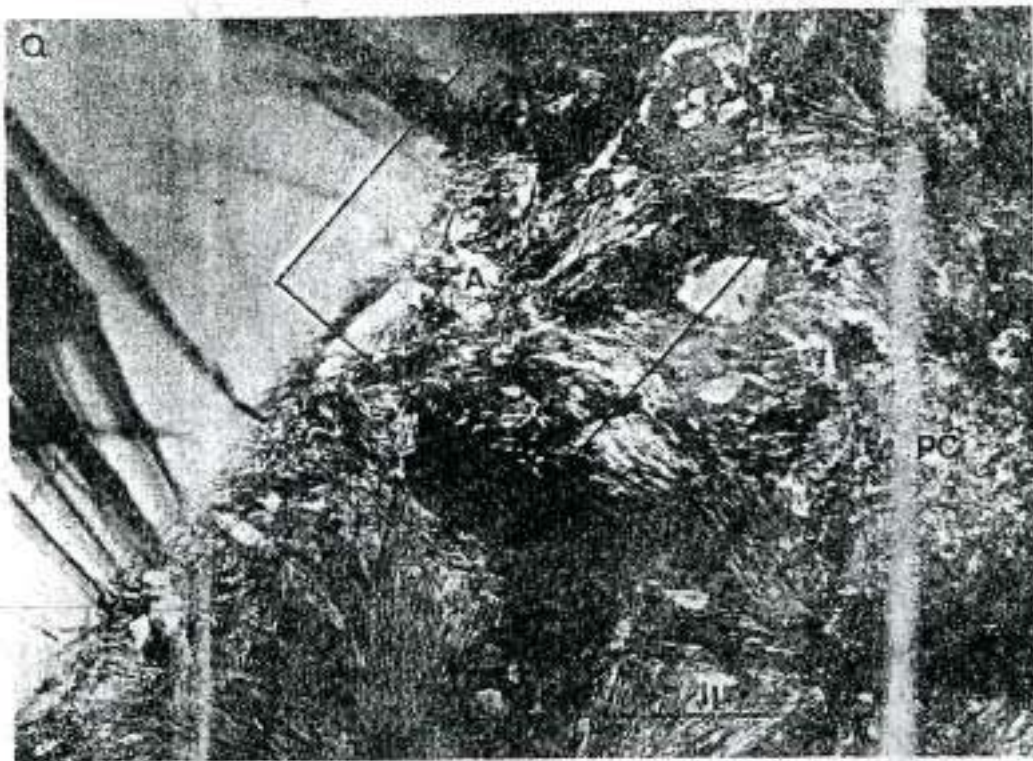


Photo [I.3] : Contact entre le quartz et la pâte de ciment [29].

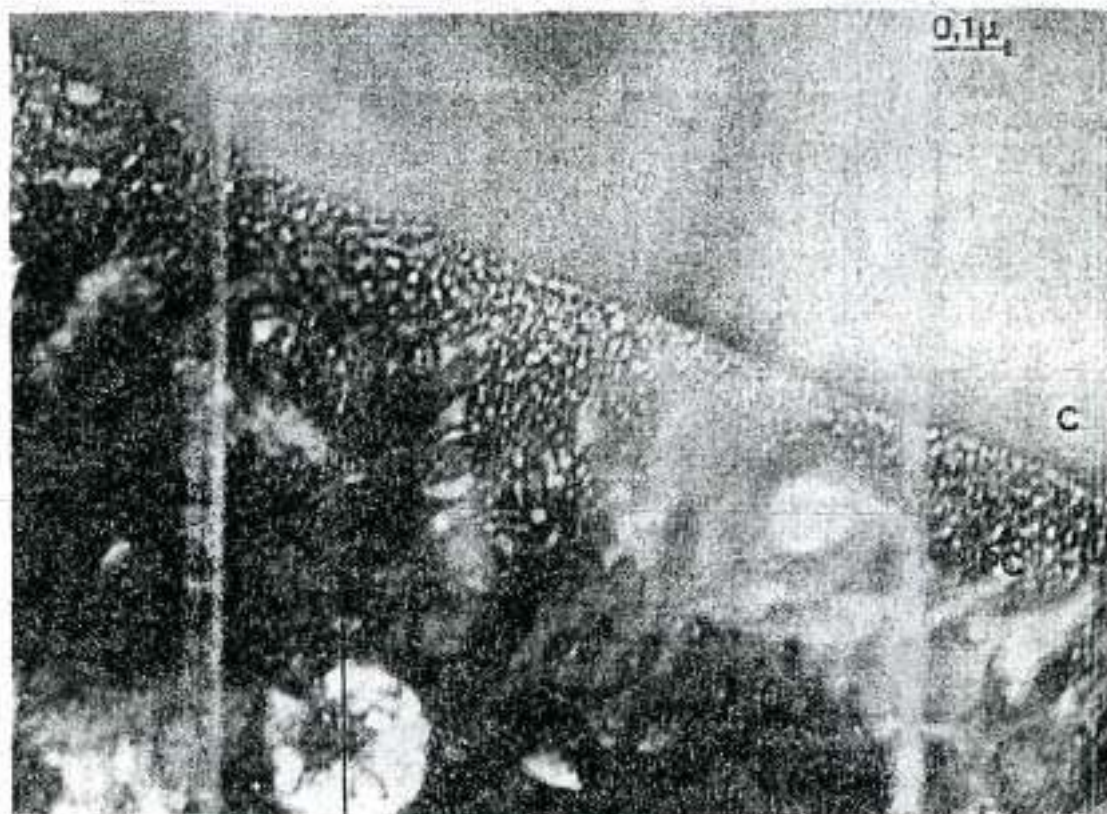


Photo [I.4] : Contact entre la calcite et la pâte de ciment hydraté [29].

b) Réaction entre la pâte de ciment portland et le quartz :

L'autoclavage est une opération permettant le durcissement accéléré des bétons.

Après une cure initiale de quelques heures dans les conditions normales, le béton est traité, à nouveau pendant quelques heures, sous haute température et haute pression de vapeur d'eau dans un autoclave d'acier (180°C).

Ce type de traitement permet d'obtenir des résistances initiales importantes car les réactions d'hydratation sont accélérées. Par ailleurs les granulats siliceux réagissent avec la pâte de ciment pour former des silicates de calcium hydratés cristallisés.

Ces liaisons chimiques ainsi créées contribuent à augmenter l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats.

Exemple :

Béton avec granulats de	Cure normale		Autoclavé
	28 j	60 j	
Basalte	28.5	91.5	117
Quartz	72.5	78	179

Tableau I-9 : influence du type de granulats sur la résistance en compression d'un béton [MPa]

La résistance à la rupture en compression est très notablement améliorée dans le cas des bétons confectionnés avec des granulats de quartz. On peut penser que la création de liaisons chimiques entre la pâte et le granulat est responsable de cette amélioration.

Les courbes "effort- déformation" sont fortement modifiées dans le cas du béton au quartz autoclavé : l'augmentation de résistance est accompagnée d'une fragilisation.

Le béton est moins déformable ce qui peut nuire à son utilisation car le matériau doit pouvoir s'adapter dans les ouvrages.

15. Les bétons à hautes et très hautes performances :

15.1 Bétons à hautes performances à l'état frais :

Les dosages en eau et en fluidifiant permettent de contrôler la maniabilité d'un BTHP au moment du malaxage. La différence essentielle, par rapport aux bétons courants, concerne le maintien de cette maniabilité dans le temps [8][30][15]. Dans un béton ordinaire, l'hydratation de certains composés du ciment est empêchée dans les premières heures par le gypse ajouté lors de sa confection. La teneur en eau non liée est donc à peu près constante (sauf évaporation) et la consistance se maintient. Par contre dans un béton fluidifié, cette consistance est fonction de la qualité de l'adjuvant adsorbée sur les grains, ce dernier est progressivement « consommé » par les premiers hydrates formés par le ciment dans le mécanisme physico-chimiques complexes. D'autre part, l'adsorption d'eau par les granulats diminue la quantité d'eau non liée aux grains solides. Il s'ensuit une perte de maniabilité ; ainsi ; un béton peut voir son affaissement passer de 22 à 3 cm en ½ heure. Ce phénomène peut être préjudiciable dans le cas d'un béton malaxé en centrale et mis en œuvre sur un chantier relativement éloigné. L'emploi de retardateur s'impose alors.

Si on compare un béton ordinaire et un BTHP de même affaissement au cône, ce dernier apparaît plus dense, plus difficile à manier et plus visqueux. L'effet de vibration est moins

spectaculaire (en effet la vibration **supprime** plus ou moins le seuil de cisaillement lequel est déjà **diminué** sur le BTHP par l'addition de **fluidifiant**). Par contre, le matériau s'écoule mieux sous contrainte soutenue.

il y a lieu de **constater** l'absence totale de ségrégation ou de ressuage (lorsque l'adjuvant n'est pas surdosé). Le squelette granulaire de ces bétons étant **généralement** bien **proportionné**, et la pâte assez visqueuse, l'**homogénéité** du matériau est excellente. D'autre part, les **éléments fins** présents dans la pâte **diminuent** sa **perméabilité** à l'état frais (comme d'ailleurs à l'état durci) ; d'où **une** exsudation **pratiquement supprimée**.

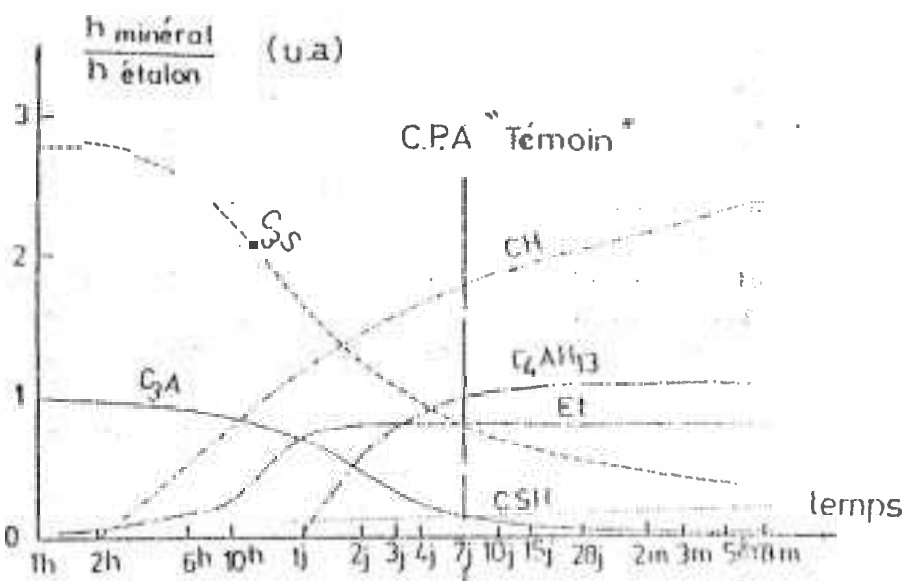
Du fait du dosage en fumées de silice, le BTHP revêt une coloration gris foncé à la mise en œuvre. Cependant cette **différence** de couleur **s'atténue** grandement avec le séchage. Une autre caractéristique est sa densité **un** peu plus élevée que pour un béton ordinaire (de **2.35** à **2.45** environ).

La prise est **légèrement** retardée par rapport aux bétons (le fluidifiant faisant écran entre l'eau et le ciment). Par contre, le **durcissement** est rapide. A des **températures** clémentes (de l'ordre de 20°C) il n'est pas rare d'obtenir, **24** heures après la confection du béton, le tiers, voir la **moitié**, de la résistance mécanique à 28 jours. On peut **même** utiliser des accélérateurs de durcissement (en **veillant** à leur compatibilité avec le **fluidifiant** et le **ciment** utilisé) avec les quels des **résistances en compression** de 80Mpa à 1 jour deviennent **envisageables** [33].

Il faut cependant **choisir** entre **un** béton **demeurant** maniable **un certain** temps (vitesse de durcissement modérée) et un **béton** accusant **une** forte montée en résistance (dont le ciment devra contenir du C₃A, et dont le **raidissement** sera par conséquent **rapide**).

1.5.2. Microstructure des BTHP :

La majorité des auteurs [15][34] considère la fumée de silice comme un super-pouzzolane, c'est à dire une poudre susceptible de se combiner **chimiquement** avec la chaux libérée par le ciment (à des vitesses plus grandes que dans le cas des **additifs** classiques tels que pouzzolanes naturelles ou cendres volantes). La réaction pouzzolanique se produit, dans des conditions normales de **température** (20°C), **principalement** entre le 7^{ème} et le 14^{ème} jour après le gâchage. On peut la suivre dans un mortier par diffraction aux rayons X.



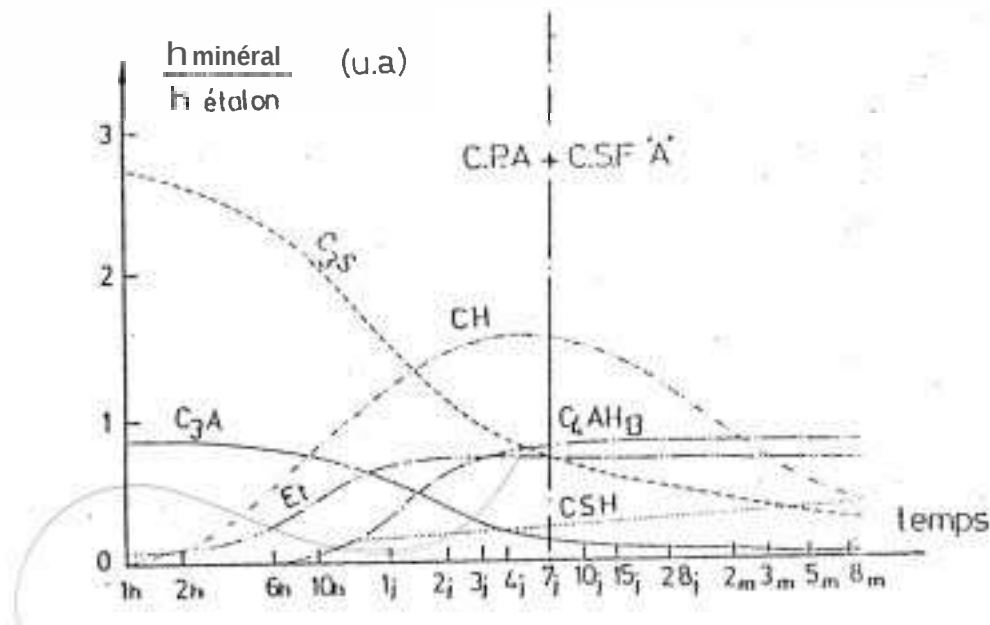


Fig 1-20 : Hydratation d'un ciment Portland avec et sans présence de CSF [13].

On constate alors que la quantité de cliaux libre décroît pendant la période précisée, puis se stabilise autour d'une valeur qui dépend linéairement du dosage initial en fumée de silice. Lorsque ce dosage atteint ou dépasse 24 % de la masse de ciment, la totalité de la cliaux est consommée. D'après GRUTZECK et al [35], la silice formerait dans les premières heures un gel par association des particules de silice sous l'action des alcalis du ciment. Ce gel constituerait progressivement une matrice entourant les grains de ciment et gênant la formation de cristaux de cliaux (qu'on observe dans la pâte de ciment ordinaire). Cette matrice se transformerait par la suite en CSH au contact des silicates anhydres, aboutissant à une imbrication des CSH de deux origines (silice d'une part et ciment d'autre part).

Hormis sa pouzzolanité, il semble que la silice, comme les autres fillers ultrafins accélère l'hydratation du ciment. D'autre part, la formation d'hydrates par combinaison avec la cliaux s'accompagne d'un retrait chimique, analogue à la «contraction de Le Chatelier» du ciment, mais inférieur de moitié en amplitude.

L'observation au microscope électronique d'un mortier avec fumées de silice montre une structure de CSH particulièrement dense et amorphe. Le rapport cliaux / silice moyen est d'autant plus faible que la quantité initiale de silice est importante (variant de 1.6 –pâte sans silice- à 0.9 –pâte à 28 % de fumée de silice-).

La pâte est microfissurée par endroits, mais plus faiblement qu'une pâte ordinaire. La liaison pâte-granulat est exempte de toute fissuration, même s'il s'agit de granulat siliceux (quartz).

On n'observe pas à proprement parler (l'auréole de transition, identifiable notamment par des cristaux de portlandite. C'est probablement ce qui explique l'excellente tenue mécanique de cette liaison : les fascies de rupture sont pratiquement totalement transgranulaire. Dans le cas des granulats calcaires, il y a même une réaction d'association entre la matrice et les grains.

On sait que la distribution des pores dans un béton s'échelonne sur trois ordres de grandeur : tout d'abord les bulles d'air, (quelques millimètres) ; ensuite la porosité capillaire, constituée des vestiges des interstices des grains de ciment (quelques microns) ; enfin la porosité interne

La porosité capillaire est fortement décalée vers les petites tailles, conséquence de la texture plus fine du mélange frais. De plus, cette porosité se ferme rapidement à mesure que la réaction **pouzzolanique** se développe, d'où comme on le verra une perméabilité du matériau très réduite. Par contre, la porosité interne des hydrates est accrue par rapport à un béton ordinaire. On voit finalement que les effets **pouzzolaniques** et granulométriques de la fumée de silice dans un béton aboutissent à la formation d'une structure dense amorphe et dont les défauts ont une taille très diminuée.

1.5.3 Propriétés mécaniques instantanées

La résistance à la compression à 28 jours des bétons peut se situer entre 80 et 150 Mpa suivant principalement le facteur prédominant dans ces matériaux le rapport eau / ciment et la nature des granulats, paramètre beaucoup plus influent que dans les bétons classiques. Des résistances encore supérieures jusqu'à 240 Mpa peuvent être atteintes par autoclavage, séchage et imprégnation aux résines organiques telles que polyméthyl-métacrylates [36].

La figure suivante donne un exemple de l'évolution de la résistance en compression en fonction du temps. On y voit l'effet **accélérateur** de durcissement de la fumée de silice bien que la réaction **pouzzolanique** ne se développe que dans la deuxième semaine qui suit le gâchage, le matériau résiste à plus de 60 Mpa à 24 heures.

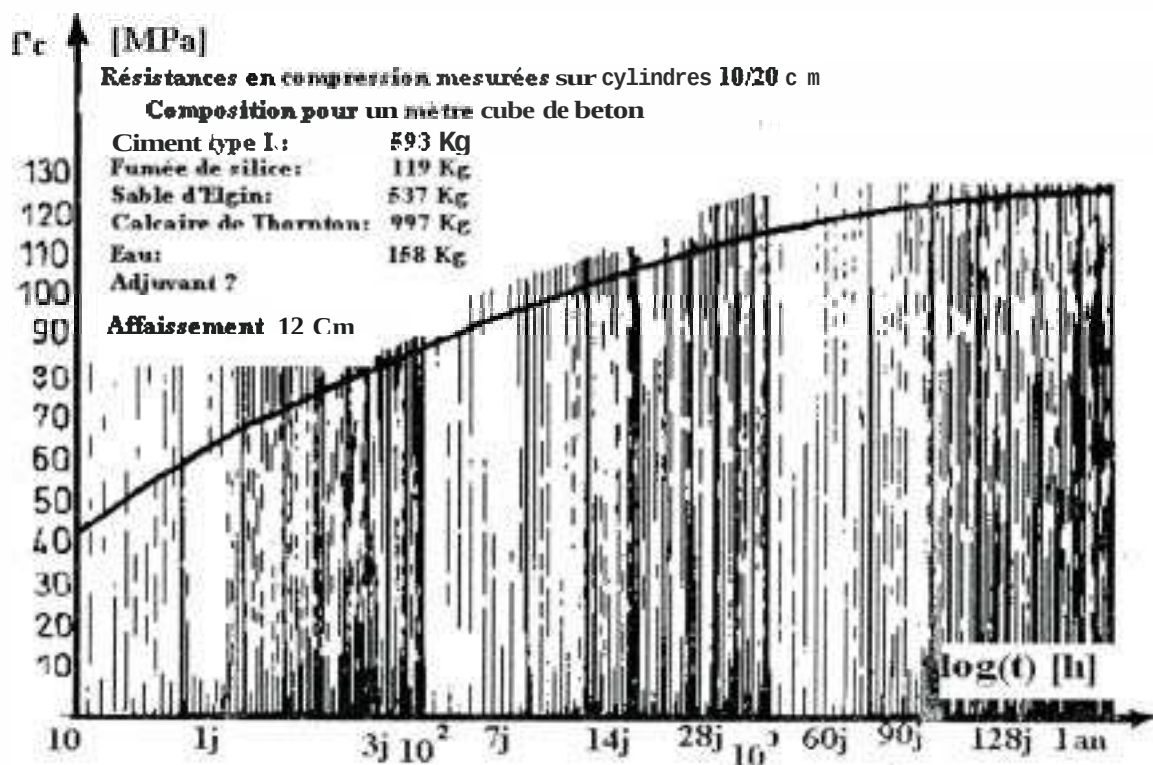


Fig 1-21 : Montée en résistance d'un BTHP [37].

Pour des raisons mal élucidées, la résistance en traction ne s'améliore pas dans les mêmes proportions. La résistance à la traction des bétons THP est **généralement** comprise entre 4 et 6.5 Mpa à 28 jours (soit 7 à 11 Mpa en flexion). Il est **remarquable** que cette résistance évolue très peu entre 7 et 28 jours. Si bien que le rapport résistance en traction/résistance en compression, de l'ordre de 1/12 pour les bétons ordinaires, diminue dans le temps pour atteindre 1/20.

Les caractéristiques élastiques évoluent elles aussi modérément par rapport à celles d'un béton ordinaire : le module d'YOUNG est, suivant la raideur des granulats, de l'ordre de 45 Gpa, alors que le **coefficient** de Poisson (pour le matériau **non** fissuré) avoisine 0.22.

Au pic des contraintes, le raccourcissement du matériau se situe entre 2 et 3 ‰. Jusqu'à ce point, la courbe effort-déplacement est réductible à **une** droite (alors que l'on constate pour les bétons ordinaires un assouplissement du matériau lorsqu'on dépasse la moitié du chargement maximal. Quand on pilote un essai de compression uniaxiale à déplacement imposé, il est pratiquement impossible d'obtenir une partie descendante en contraintes (absence de «**post-pic**» en compression). C'est ce qui a pu faire dire à certains auteurs que les BTHP étaient fragiles.

La ténacité (c'est à dire le facteur d'intensité de contraintes critiques, au sens de la **mécanique** linéaire de la rupture) augmenterait dans les mêmes proportions que la résistance à la traction du matériau [38]. Ceci laisse penser que la résistance à la fissuration est améliorée étant donnée une certaine fissure préexistante, le chargement nécessaire pour que cette fissure progresse serait **plus** important que dans le cas des bétons ordinaires, d'où un supplément de sécurité quant aux défauts dus à la mise en œuvre. Enfin, la résistance à l'**abrasion** [39] **semble** nettement **meilleure** pour les BTHP, cette caractéristique technologique étant conditionnée à la fois par la résistance des granulats à l'**attrition** et par l'adhérence granulats-matrice (l'**usure** par abrasion est fonction de la dureté du matériau).

1.5.4 Retrait :

On sait que le retrait du béton est provoqué par un **accroissement** de tension superficielle de l'eau libre adsorbée sur le squelette de la pâte de ciment, qui acquiert au fur et à mesure de l'hydratation une porosité due à la «**contraction** Le Chatelier») et / ou au séchage. Cet accroissement de tension est provoqué en fait par un départ de l'eau, lequel peut avoir deux causes : d'une part la consommation partielle d'eau dans le processus d'**hydratation** – on parle alors de retrait d'auto- **dessiccation**[40], d'autre part l'évaporation de l'eau lorsque la pression partielle de vapeur d'eau autour du matériau est trop faible – ce qu'on appelle retrait de séchage.

Entre béton ordinaire et BTHP, deux **différences** fondamentales peuvent influencer sur le retrait : dosage en eau et porosité. Les BTHP sont confectionnés à des rapports E/C très **faibles** (de l'ordre de 0.3) de sorte qu'au bout de quelques semaines, **une grande** partie de l'eau originellement présente est combinée **chimiquement**. Par contre, la **taille moyenne** des pores est plus faible, de sorte que les tensions exercées par le film d'eau adsorbé seront plus fortes. Enfin, la perméabilité est très réduite ce qui conduira à des amplitudes plus fortes de retrait pour le premier type [41] et plus faible pour le second (retrait de séchage). Ces cinétiques devraient aussi changer : **plus** rapide pour le retrait d'auto- dessiccation (durcissement accéléré par la présence de **fumée** de silice) et très ralenti pour le retrait de séchage.

Un autre facteur conditionne le retrait mesuré sur béton, à savoir le dosage en pâte interstitielle. Le retrait de la pâte de ciment est en effet d'autant plus **empêché** par les

granulats que ceux-ci sont, en dosage volumique, nombreux. C'est pourquoi les bétons maigres ont en général peu de retrait. Par contre, si on ajoute à une formulation classique de béton une certaine quantité de fumée de silice, même si l'on réduit le retrait de la pâte, l'augmentation éventuelle en volume peut introduire sur le béton un retrait plus fort.

Ces remarques avaient pour but d'expliquer le caractère contradictoire des résultats trouvés dans la littérature ([42],[43],[37] et [44]). Les auteurs s'étant affranchis du problème posé une augmentation du volume de pâte trouvent généralement des retraits moins importants sur les BTHP que sur les bétons ordinaires. Cependant étant donné la cinétique très ralentie du séchage, il arrive qu'à la fin des mesures le retrait du BTHP ne soit toujours pas stabilisé. Il y aurait donc lieu de faire des essais à plusieurs années d'échéances pour se faire une opinion.

1.5.4 Fluage :

Là aussi, les données disponibles sont parfois discordantes [37],[45],[46]. Les variations de composition d'une référence à d'autre, le fait d'avoir pris une charge constante entre témoin et BTHP (plus qu'un même pourcentage de la charge de rupture) fournissent un ensemble de résultats difficilement interprétables, d'autant plus que le phénomène physique du fluage du béton est mal connu. Il est cependant certain que l'eau joue un rôle primordial.

Ainsi plus le rapport E/C sera faible, plus la teneur en eau du matériau sera réduite au moment de sa mise en charge (béton exposé à une atmosphère sèche), moins il y aura de pâte par rapport aux granulats, plus faible sera le fluage. Ainsi sur un béton ayant un rapport E/C de 0.27 et une résistance mécanique de 111 Mpa à 28 jours, WOLSIEFER [37] a mesuré une déformation de fluage d'environ 0.05% pour un chargement de 17.2 Mpa (après un an, le chargement ayant débuté à 28 jours). Cette déformation équivaut à la déformation instantanée, alors que pour les bétons ordinaires le rapport ϵ_r/ϵ_i serait plutôt de l'ordre de 2.

Il semble donc que les BTHP fluent moins que les bétons ordinaires. Si cela est vérifié par des essais à long terme, elle constituerait un argument supplémentaire pour l'utilisation de ces matériaux en béton précontraint.

1.5.6 Perméabilité :

Du fait de la modification de la porométrie ou granulométrie des pores, on s'attend à trouver une perméabilité plus faible sur les BTHP [43][47]. Cependant il est clair que les paramètres dosage en eau et proportion volumique de la pâte vont jouer, là aussi, un rôle très important. La perméabilité mesurée sur des bétons à EIC relativement important (0.45) est significativement réduite, passant de 7.1 à $3.5 \cdot 10^{-15}$ m/s lors de l'incorporation de 20% de fumée de silice dans un béton dosé à 400 Kg/m^3 de ciment. La réduction relative de perméabilité est beaucoup plus spectaculaire dans le cas des bétons plus faiblement dosés, contenant une partie de fumée de silice en substitution au ciment.

1.5.7 Résistance au gel :

La résistance au gel des BTHP est un facteur important, notamment dans les pays nordiques qui ont les premiers utilisés la fumée de silice dans les bétons. Les caractéristiques structurelles laissent penser à une diminution de la sensibilité au gel [48][42]. En effet, il y a peu d'eau gelable dans ces matériaux (E/C et perméabilité faibles). De plus, les pores étant de dimensions réduites, la température de gel y est fortement abaissée. Par conséquent, pour des températures modérément basses, le gel n'apparaît pas sauf peut être dans les plus gros vides du matériau (bulles d'air). Ceci explique les durées de vie considérablement augmentées des

BTHP lors des cycles gel-dégel [41][42]. Cependant, ces cycles prescrits par les normes ASTM ne descendent pas en dessous de 20°C. Il serait intéressant de pratiquer des essais plus sévères, simulant l'action particulièrement brutale des sels de déverglaçage. Les auteurs concluent généralement à l'excellente tenue au gel de ces bétons.

1.5.8 Résistance au feu :

La résistance au feu a fait l'objet d'un premier article, assez alarmiste (Hertz [49]). Un BTHP à E/C très bas (0.19) a présenté un comportement explosif vers 300°C, après avoir été soumis à une élévation de température de 1°C/min, dans un four à micro ondes. Avant de comparer le matériau à une grenade à vapeur – comme le fait l'auteur qui relie l'explosion à une montée en pression de la vapeur d'eau, laquelle ne peut s'échapper vu l'imperméabilité du matériau – on peut faire les remarques suivantes :

- Le chauffage dans la masse n'est pas représentatif d'un incendie réel, dans lequel la chaleur arrive par les bords de la pièce en béton, dans ce cas, la mauvaise conductivité thermique entraîne une élévation lente de la température au cœur du matériau.
- Le rapport E/C et la résistance du béton étudié (environ 150 Mpa) le situent à la limite du champ d'étude.
- Enfin l'auteur ne relate pas le comportement d'un béton témoin dans le même essai d'autres auteurs, SHIRLY et al [50] ont pratiqué l'essai normalisé ASTM119, lequel consiste à mesurer la vitesse d'élévation de température d'une face de dalle, l'autre étant chauffée. L'auteur ne relate alors aucune différence de comportement entre BHP, BTHP et ordinaire. Il n'a cependant pas évalué les chutes de résistances éventuelles consécutives à l'éclatement du béton. On voit donc que cette question mérite, elle aussi, un supplément d'étude.

1.5.9 Risques d'altération d'origine chimique :

Trois caractéristiques «structurelles» expliquent les meilleures performances en durabilité des BTHP. La densité de la microstructure (qui ralentit les migrations de fluides et les transferts d'ions), la faible quantité de chaux libre (voire son absence, à des dosages important en fumée de silice) et enfin le moindre rapport chaux/ silice des hydrates, qui sont alors capables de «piéger» des ions étrangers. D'autre part, en cas de formation de produits gonflants, l'amélioration de la résistance en traction du matériau le rend moins fissurable. La résistance aux ions sulfate [42] est meilleure pour un BTHP. Un dosage de 15% en fumée de silice dispenserait du recours à un ciment spécial résistant aux sulfates.

D'une façon générale, la résistance du BTHP aux attaques acides (acides minéraux ou organiques : acétique, citrique, lactique et formique) est améliorée par rapport au béton témoin de même maniabilité [22].

Les ions ammonium réagissent avec la chaux libre du béton. Quand celle-ci se dissout, la résistance du matériau chute de manière spectaculaire. Ainsi une éprouvette de béton ordinaire plongée dans une solution saturée de nitrate d'ammonium perd les trois quarts de sa résistance à la compression au bout de 400 jours d'exposition, alors que le BTHP n'est aucunement affecté [37].

La quantité plus faible de chaux libre devrait également protéger le BTHP des phénomènes de carbonatation, bien que la phase CSH puisse également se carbonater.

Des mesures effectuées sur les bétons à 10 et 20% de fumée de silice [43] ont montré des diminutions de moitié de la profondeur de carbonatation par rapport à un béton témoin.

Un facteur important de durabilité pour les **bétons** armés est leur **perméabilité** aux ions chlorures, ceux-ci favorisent par leur présence l'oxydation des armatures. La diminution d'échelle de la porosité gêne considérablement la pénétration de ces ions. Ainsi un dosage des ions ayant pénétré dans une éprouvette plongée dans une eau saturée de chlorure de sodium a donné une quantité 10 fois moindre sur BTHP que sur béton ordinaire [37][42]. Ceci constitue un élément favorable pour la protection contre la corrosion des armatures. Pour que celle-ci se produise, deux phases sont nécessaires, initiation et poursuite du processus. On peut craindre à priori que la diminution du PH, dû à l'acidité de la silice, et à son association avec la chaux, ne dépassive le métal (les cristaux de portlandite, présents dans la pâte de ciment durcie, sont **en** effet des garants du PH alcalin).

Il ne semble pas que ce soit le cas [42], du moins lorsque le dosage en silice n'est pas trop important. De même, on a vu qu'une réduction du PH par carbonatation avait peu de chance de se produire dans les BTHP. L'initiation de la corrosion ne devrait donc pas être favorisée par l'ajout de fumée de silice. Quant à la poursuite du phénomène, elle serait très gênée à cause d'une part, de la faible **diffusion** de l'oxygène et d'autre part, de la grande résistivité du matériau.

Les essais norvégiens [43] montrent effectivement que les mécanismes élémentaires de la corrosion évoluent dans le sens prévu : vitesse de carbonatation diminuée, pénétration des ions chlorures réduite, résistivité fortement accrue (facteur compris entre 5 et 10).

Seule la **diffusion** de l'oxygène se maintient, peut être à cause des forts dosages en eau des bétons étudiés, par rapport à des formulations optimales.

On peut conclure que l'introduction de fumée de silice dans les bétons doit fortement diminuer les **risques** de corrosion des armatures, dans la mesure où cet ajout vise à obtenir de hautes performances mécaniques (rapport E/C faible obtenu par l'**emploi** de fluidifiants). C'est évidemment le cas des BTHP.

D'après les recherches sur la sensibilité des BTHP aux réactions alcalis-granulats, il semble que ces réactions soient imputables au PH basique de la solution interstitielle présente dans le béton, plutôt qu'à la présence d'ions alcalins (Na, K). D'autre part, **elles** ont besoin d'un rapport d'eau pour se développer. On en déduit **que** la perméabilité réduite des BTHP, leur faible dosage en eau de gâchage et leur **PH légèrement** moins basique **que** celui des bétons ordinaires sont autant des facteurs limitant l'**apparition** de ce type de **dégradation** [42].

Des expériences sur site ont eu lieu [51] avec une gamme de bétons confectionnés à partir de granulats particulièrement sensibles aux attaques du ciment, comportant divers dosages en fumée de silice. Le diagnostic se faisait par observation en microscope électronique à balayage (M.E.B) de gels de silicates aux interfaces pâte de ciment – ~~granulat~~. Au bout de 5 ans, l'examen des différents bétons a permis de vérifier l'hypothèse selon laquelle la présence de **fumée** de silice prévient les réactions alcalis-granulats. Le dosage clé **semble** se situer vers 20% de silice. A 15 %, la formation de ces composés reste limitée, et ne met pas en cause la résistance mécanique du matériau. La lutte contre les réactions **ciment-granulat** apparaît donc comme une application supplémentaire de la fumée de silice. En ce qui concerne les BTHP, il s'agit d'une propriété secondaire, mais non négligeable

On arrive donc à la conclusion suivante quant à la durabilité :

La totalité des tests classiques de laboratoires simulant certains mécanismes de dégradations – en dehors des sollicitations **thermiques** violentes – montrent une supériorité très nette des

BTHP. Seule l'expérience en vraie grandeur, et à très long terme permettra d'avoir une sécurité totale sur l'emploi de ces matériaux.

1.5.10. Résistance en compression des BHP :

La détermination de la résistance en compression des BHP a été étudiée par plusieurs chercheurs. Ces derniers se sont basés sur la composition du squelette granulaire et celle de la matrice. La Compilation des résultats trouvés par ces chercheurs est résumée dans le tableau suivant :

BHP	Nature et dosage en ciment (Kg/m ³)	Réducteur d'eau (l/m ³)	Fluidifiant (l/m ³)	Ajout	E/C	Sable (Kg/m ³)	Granulats fins (Kg/m ³)	Gros granulats (Kg/m ³)	Fc28 (Mpa)	Référence
B-1	Ciment type 20 517	2	6	*	0.28	643	5/10 1243	*	60	PT Seabrouk et CM Hansson
B-2	Ciment type 20 509	2	6	CSF 42	0.25	662	5/10 1198	*	80	Idem
B-3	Ciment type 20 506	1.3	*	C.V 60	0.387	617	*	2.5/12 1030	65	Edifice de Chicago River Plaza
B-4	Ciment type III ASTM 570	*	16.3	*	0.237	720	*	2.5114 1025	92.2	Yaya-Diatta Thèse U. Sherbrooke Canada
B-5	Ciment type ASTM 395	*	14.9	L :195 CSF 70	0.354	640	2.5110 1035	*	110.6	Idem
B-6	CEM I 400	*	*	*	0.44	1900 marbre	*	*	56.9	J.P. Olivier M.Pyssorche J.P.Bigas
B-7	CEM I 405	*	*	CSF 45	0.35	1960 diabase	*	*	84.8	Idem
B-8	CEM I 405	*	*	CSF 45	0.35	1860 marbre	*	*	87.8	Idem
B-9	CEM I 450	*	*	*	0.33	1860 marbre	*	*	88.1	Idem
B-10	CEM I 500	*	*	CSF 50	0.25	2000 diabase	*	*	104	Idem
B-11	CEM I 500	*	*	CSF 50	0.25	1830 marbre	*	*	116.5	Idem

B-12	Ciment type III 570	*	16.2	*	0.25	*	720	1030	92.1	P.C. Aïtcin
B-13	Ciment type I/II 513	*	15.7	CSF 43	0.23	*	685	1080	119	Idem
B-14	CPA 470	1.47	6.8 (napht sulf 47%)	*	E=130 0.29	870	D=10mm 990	*	70	Mimm-Tan Do I.Schaller F. De Larrard P.C.Aïtcin
B-15	CPA 560	0.76	13 (napht sulf 47%)	*	E=120 0.23	725	D=10mm 1120	*	95	Idem
B-16	CPA HP 398	0.76	19.3 (résine mel 31%)	CSF 39.8	E=118 0.30	669	*	D=25mm 1216	90	Idem

Tableau 1-10 : Compilation de résultats trouvés par plusieurs chercheurs.

• **Influence du volume de la matrice sur les résistances mécaniques des BHP :**

Les résultats présentés par F.De Larrard dans ce tableau 1.5 suivant, conduisent à recommander de limiter le dosage en pâte liante des BHP.

Mortier	Sable RILEM	CPA 55	CSF	Eau	E/C	CSF/C	% de la pâte liante	Fluidité	Résistance à 7 jours (Mpa)		Résistance à 28 jours (Mpa)	
									Flex	Comp	Flex	Comp
A	1350	436	174	91	0.209	0.4	38.3	12.2	14	96	18	115
B	1350	582	232	109	0.187	0.4	44.5	16.2	14	100	18	111

Tableau 1-11 : Influence du pourcentage de la pâte liante sur la résistance des bétons et mortier.

En effet d'après ce tableau on constate que les résistances obtenues sur deux mortiers (A et B) sont de même ordre de grandeur bien que le mortier B soit plus dosé en ciment et son rapport E/C est plus faible (problème de ségrégation).

I.5.11 Ouvrages réalisés à base des BHP et BTHP :

Dans les années 80 alors qu'en Norvège [52] les 65 Mpa étaient couverts par les règlements de béton armé et précontraint, les Français et les Américains ne préconisent que la confection de béton de résistance inférieure ou égale à 40Mpa.

AÏTCIN [53] a fait une rétrospective de l'emploi de la fumée de silice dans les bétons.

Voici quelques dates données par ce dernier et par RADJY et al [52] :

1950 : (Technical University of Norway) : Première étude de laboratoire sur la fumée de silice dans le béton.

1952 : Construction d'une partie de tunnel (Oslo Alumshale Reyon-Norvège) avec **unbéton** contenant de la **fumée** de silice en substitution au **ciment**.

1971 : (Fonderie de **Fiskaa**- Norvège) : Usage d'un béton aux **fumées** de silice.

1975 : (Gottaborg-Suède): Première usage industriel recensé de fumée de silice dans une centrale de BPE.

1978 : (Suède): Norme autorisant **l'emploi** de **fumée** de silice à concurrence de **8%** par rapport au ciment, suivie de la même initiative de la part des Norvégiens (qui autorisent jusqu'à 10%).

1980 : (Usine **SKW** de **Bécancour** -Québec -**Canada**) : Première expérimentation nord-américaine sur chantier. Il s'agissait de la confection de trottoir en **béton** utilisant des **fumées** de silice.

1982 : (**Kansus** city- USA) : Premier emploi de **béton** aux **fumées** de silice aux Etats Unies.

1983 : (**Kinzua- Peunsylvanie**- USA) : Mise en œuvre d'un béton de **86** Mpa aux **fumées** de silice, pour la réparation d'un bassin d'épanchement de barrage, soumis à une abrasion exercée par un courant d'eau chargé de débris divers.

1984 : (Japon): Plate forme off-shore «**CIDS**» réalisée en **béton** semi-léger à hautes performances(béton contenant des granulats légers, des adjuvants et de la fumée de silice).

1985 : (Canada) [**54**] : Développement de spécifications sur l'usage de la **fumée** de silice dans le béton, **limitant** les quantités à 10% de la masse de ciment.

Remarque :

Tous ces exemples sauf dans le poteau canadien, les fumées de silice n'étaient pas employées dans le but d'obtenir des résistances mécaniques supérieures. Ces applications sont cependant intéressantes dans la mesure où elle montre :

- La faisabilité industrielle de **béton** aux **fumées** de silice (on a pu résoudre les problèmes de transport, stockage et manutention).
- L'absence probable de problèmes à long terme dus à des **mécanismes** de dégradation spécifiques de ces bétons (comme ce fut le cas, notamment, pour les ciments **alumineux**).

PARISOT [**55**] a fait une rétrospective sur les applications de BHP et BTHP résumée dans ces tableaux :

O.A	Situation	Année	Portée max. (m)	Résistance de béton (Mpa)
WILLOWS BRIDGE	TORONTO	1967	48	42
HOUSTON SHIP CANAL	TEXAS	1981	228	42
SAN DIEGO TO CORONADO	CALIFORNIA	1969	43	42
LINN COVE VIADUC	NORTH CARLINA	1979	55	42
PASCO-KENNEWICK INTERCITY	WASHINGTON	1978	300	42
COWEMAN RIVER BRIDGES	WASHINGTON		45	50
HUNTINGTON TO PROCTORVILLE	W.VA.TO.OHIO	1984	275	56
NITTA HIGHWAY BRIDGE	JAPAN	1968	30	60
KAMINOSHIMA-HIGHWAY BRIDGE	JAPAN	1970	86	60
FUKAMITSU HIGH WAY BRIDGE	JAPAN	1974	26	70
OOTANABE RAILWAY BRIDGE	JAPAN	1973	24	80
ANKAGAWA RAILY BRIDGE	JAPAN	1976	46	80

Tableau 1-12 : Ouvrages d'art coulés avec un BHP [55].

	Constructeur	Site	Année	Type de béton
EKOFISH I	DORIS/SECMER	STAVANGER	1977	C50
BERYL A	NORW.CONTR	STAVANGER	1975	C55
BRENT B	NORW.CONTR	STAVANGER	1975	C50
FRIGG. CDR	HOWARD DORIS	ANDALSNES	1975	
BRENT B	NORW.CONTR	STAVANGER	1976	
FRIGG. MP2	HOWARD DORIS SKANSKA	STROMSTAD	1976	
FRIGG TP1	SEA TANK MC/ALPINE	ARDYNE POINT	1976	C50 (C63)
SRAT FJORD A	NORW.CONTR	STAVANGER	1977	C60
FRIGG TCP2	NORW.CONTR	ANDALSNES	1977	
DUNLIN A	ANDOC	ROTTERDAM	1977	
BRENT C	SEA TANK MC/ALPINE	ARDYNE POINT	1978	C50 (C63)
CORMOPANT A	SEA TANK MC/ALPINE	ARDYNE POINT	1978	C50 (C63)
NINIAN CENTER	HOWARD DORIS	LOCH KISHORN	1978	C60
STAT FJORD B	NORW.CONTR		1981	C70
FRIGG	SKANSKA SPIE BATIEN	GOTEBORG	1982	C50 (C65- C75)
NORTHEAST				
KARMOY	NORW.CONTR	STAVANGER	1983	C65
STAT FJORD	NORW.CONTR	STAVANGER	1984	C65
GULLFAKS	NORW.CONTR	STAVANGER	1986	C62

Tableau I-13 : Ouvrages off-shore en BHP [55].

Immeuble	Villes	Année	Nombre d'étage	Résistance du béton (Mpa)
PACIFIC PARC PLAZA	EMERVILLE CA	1983	30	45
S.E.FINANCIAL CENTER	MIAMI	1982	53	48
PETROCANADA BUILDING	GALGARY	1982	34	50
LAKE POINT TOWER	CHICAGO	1965	70	50
1130 S.MICHIGAN AVE	CHICAGO			50
TAXAS COMMERCE TOWER	HOUSTON	1981	75	50
HELMSLEY PALACE HOTEL	NEW YORK	1978	53	56
TRUMP TOWER	NEW YORK		68	56
CITY CENTER PKOJECT	MINNE APOLIS	1981	52	56
COLLINS PALACE	MELBOURNE		44	56
LARIMER PALACE	DENVER	1980	31	56
CONDOMINIUMS				
499 PARK AVENUE	NEW YORK		27	60
ROYAL BANK PLAZA	TORONTO	1975	43	62
RICHMOND-ADELAID CENTER	TORONTO	1978	33	62

MIDCONTINENTAL PLAZA	CHICAGO	1972	50	63
FRONTIER TOWERS	CHICAGO	1973	55	63
WATER TOWER PALACE	CHICAGO	1975	79	63
RIVER PLAZA	CHICAGO	1976	56	63
CHICAGO MERCANTILE EXCHANGE	CHICAGO	1982	48	63

Tableau 1-14 : Immeubles construits avec du BHP [55].

Signalons en outre la construction en BHP d'une couverture de stade en Arabie Saoudite [56], et d'un ((arc-porte))de grande portée dans un barrage en Chine populaire [57] et du tunnel de La Manche séparant la France et l'Angleterre avec un béton à base de **fumée** de silice.

1.6 Conclusion :

Les conclusions évidentes que l'on peut tirer à partir de cette synthèse bibliographique sont :

- Les ciments généralement utilisés pour la réalisation des **bétons** à hautes performances sont de classe 55 ou HP.
- Outre leur classe élevée, le choix du ciment n'est pas dissociable de celui du fluidifiant. Au point de vue composition chimique les ciments à faible teneur en C_3A **donnent** de meilleurs résultats.
- L'utilisation des fluidifiants ou superplastifiants puissants compatibles avec le ciment est nécessaire pour réduire de manière significative la quantité d'eau de gâchage des **bétons** au point d'atteindre des rapports $E/C \leq 0.30$.
- **Il** convient de choisir un fluidifiant permettant une réduction importante de l'eau de gâchage sans pour autant changer la nature des hydrates mais leur structure.
- Les granulats utilisés pour l'obtention des bétons à hautes **performances** doivent être les plus sphériques possibles et sont en général de nature calcaire ou **silico-calcaire**. **Il** est recommandé d'utiliser des granulats dont le **diamètre** maximum $D \leq 15$ mm car **l'adhérence/résistance** augmente quand D diminue.
- L'ajout **d'ultrafines** particules s'avère nécessaire pour l'obtention des BHP et BTHP. Les **ultrafines** les **plus utilisées** sont les **fumées** de silice condensées (CSF) **qui** de par leur grande surface spécifique (de l'ordre de $20 \text{ m}^2/\text{g}$ [BET]) et leur état vitreux ont une grande réactivité **pouzzolanique**. La fixation de la chaux, formée lors des réactions d'hydratation des ciments, crée des CSH supplémentaires qui rendent ces **bétons** plus denses et plus compacts par rapport aux **bétons** ordinaires. Cette compacité **conduit** à une durabilité plus élevée des BHP vue que la **meilleure** façon d'empêcher une agression extérieure d'un **béton** est de réduire sa porosité et sa perméabilité.
- Les BHP et BTHP sont très performants en compression mais ils **conservent** toutefois les **insuffisances** des **bétons** traditionnels à savoir une résistance à la traction médiocre et **une** très faible ductilité.
- Une structure à bétons ne peut être durable que si elle est construite avec un béton maniable à faible E/C .
- Un béton maniable à faible E/C n'est possible **qu'avec l'utilisation** appropriée d'un adjuvant dispersant efficace. Les **fumées** de silice de par leurs **dimensions** suffisamment faibles peuvent alors se loger dans les espaces laissées libres entre les grains de ciment suspension **dan** l'eau.

- Il est **usuellement** impossible de confectionner un béton avec un affaissement supérieur à 100 mm par un **simple** mélange de ciment et d'eau à un rapport E/C inférieur à 0.40.
- Il a été constaté que l'augmentation du dosage en ciment améliore la résistance mécanique mais **jusqu'à** un certain seuil au-delà duquel le surdosage en **ciment** conduit à la perte d'homogénéité causée par le problème de ségrégation. De plus, la quantité élevée de ciment conduit après durcissement aux problèmes de retrait plastique, retrait de séchage et à plus de fissures thermiques. Donc il serait illusoire de tenter d'ajouter plus de ciment, plutôt que d'utiliser des adjuvants appropriés pour faire un bon mélange.
- Dans le cas des BHP à base de CSF, la réaction **pouzzolanique** se produit **principalement** à partir du **7^{ème}** jour après le gâchage. A mesure que cette réaction se poursuit, la perméabilité du béton diminue. Cette diminution est due à la formation d'hydrosilicates de calcium ayant une structure dense et amorphe qui confère au béton de hautes performances.

Chapitre II

Matériaux et méthodes d'essais

II-1 Introduction :

Cette étude est consacrée à la détermination des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux entrant dans la confection de nos bétons :

- Les granulats
- Les ciments (**CPJ45** et **CPA45** préparés à la cimenterie de Rais Hamidou)
- Le fluidifiant
- Les ajouts (La fumée de silice, sable de dunes broyé et calcite).

11-2 Les granulats :

11-2-1 Le sable 0/5 :

Le sable que nous avons utilisé est un sable propre roulé de Kaddara dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Equivalent de sable	92.93 %
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.58
Masse volumique en vrac (g/cm^3)	1.69
Module de finesse du sable	3.4

Tableau II-1 : Caractéristiques du sable 0/5

L'essai d'équivalent de sable a été réalisé selon la norme NF **P18-598**, quant au module de finesse il a été calculé selon la norme NF **P18-304**.

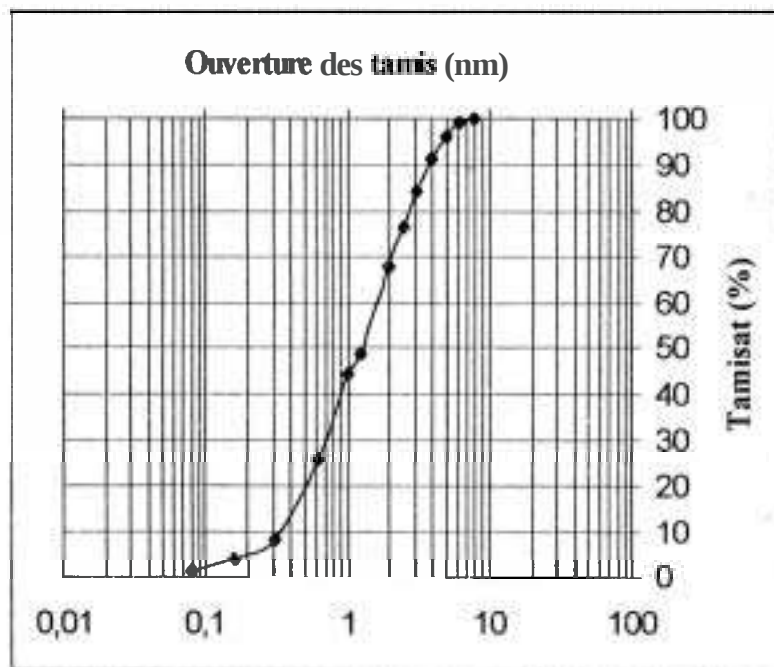


Fig II.1 : Courbe granulométrique du sable 0/5.

11.2.2 Graviers 8/15 et 3/8

Les graviers utilisés sont de nature **silico-calcaire** concassés provenant de la carrière ECAWA (ex JOBERT – Alger) dont les caractéristiques sont les suivantes :

	Graviers 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique en vrac (g/cm^3)	1.357	1.363
Masse volumique apparente (g/cm^3)	2.311	2.311
Masse volumique réelle (g/cm^3)	2.405	2.405
Porosité intragranulaire (%)	3.909	3.909
Porosité intergranulaire (%)	41.281	42.025
Porosité totale (%)	43.281	43.631
Propreté superficielle (%) *	2.59	1.58
Porosité ouverte (%)	0.154	0.154

Tableau 11-2 : Caractéristiques physiques des graviers.

* L'essai de propreté a été réalisé selon la norme NF P18-591.

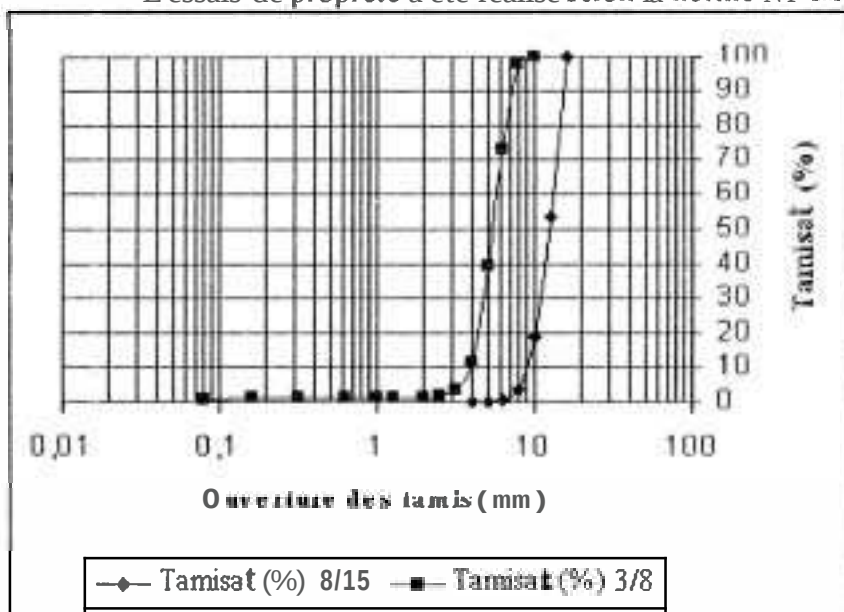


Fig 11-2 : Courbes granulométriques des graviers.

II-3 Les ciments :

On a utilisé deux types de ciments :

- CPJ45 fabriqué à la cimenterie de Rais Hamidou.
- CPA que nous avons confectionné au laboratoire de la cimenterie afin d'améliorer la qualité du ciment.

11.3.1 Le ciment CPJ45 :

Le ciment CPJ45 utilisé est celui de la cimenterie de Rais Hamidou dont la fiche technique figure en annexe.

L'analyse chimique de ce ciment a été faite à la cimenterie de Rais Hamidou. Les résultats sont exprimés dans le tableau suivant :

Eléments dosés	Clinker
SiO ₂ (%)	19.48
CaO totale (%)	61.95
CaO libre (%)	1.63
Al ₂ O ₃ (%)	5.06
Fe ₂ O ₃ (%)	3.72
PAF (%)	3.44
K ₂ O, Na ₂ O (%)	0.95
MgO (%)	0.85
SO ₃	0.01
Impuretés inertes	4.54

Tableau II-3 : Analyse chimique du Clinker.

L'ajout utilisé dans le CPJ45 est une poussière capturée par des électrodes et introduite dans les broyeurs à raison de 13% (en moyenne) par rapport au poids du ciment.

La valeur de la surface spécifique du CPJ45, mesurée à l'aide de la méthode Blaine, est de 3204 cm²/g.

La composition minéralogique du CPJ45 a été déterminée à l'aide de la méthode de Bogue. Les résultats de cette composition sont résumés dans le tableau 11.4.

Minéraux	C ₃ S	βC ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	C $\bar$ SH ₂
% Pondéraux	42.69	11.35	8.77	5.52	6.11

Tableau 11.4 : Composition minéralogique du CPJ45

11.3.2 Le ciment CPA45 :

Le ciment CPA a été préparé à la cimenterie de Rais Hamidou par nos soins. A cet effet on a utilisé :

- Du clinker de haut fourneau
- Du gypse
- Un broyeur à boulets de capacité maximale de 12 Kgs
- Un appareil BLAINE

Après broyage du clinker jusqu'à une SSB de 3290 cm²/g on a effectué son analyse chimique. Cette analyse permet de déduire la composition minéralogique du clinker.

Après broyage du gypse et analyse chimique, on obtient le taux de SO₃ contenu dans ce dernier. La composition minéralogique du clinker nous permet d'évaluer les différents pourcentages des composants tel que : C₃S, βC₂S, C₃A, C₄AF et ce en utilisant la composition de BOGUE.

Par application de la formule de LERCH [58] on obtient la valeur optimale du taux du gypse dans le ciment afin de contrôler une propriété importante qui est la grise. Cette formule se résume comme suit :

$$\% \text{SO}_3 = 0.0933 \text{ C}_3\text{A} + 1.7105 \text{ Na}_2\text{O} + 0.9406 \text{ K}_2\text{O} + 1.2288$$

$$\% \text{ gypsc} = 100 \times (\text{SO}_3 \text{ cim} - \text{SO}_3 \text{ clinker}) / \text{SO}_3 \text{ gypsc}$$

Ces deux relations ne tiennent pas compte de la surface spécifique du ciment.

La relation de JIRKO est une vérification tel que :

$$\% \text{SO}_3 \text{ ciment} = 6.7 \times 10^{-5} \times \text{SSB} \times \text{C}_3\text{A clinker}$$

Avec : SSB = surface spécifique BLAINE du ciment exprimée en cm^2/g

Les analyses chimiques du clinker et du gypse sont résumées dans le tableau suivant :

	Clinker	Gypse
SiO ₂ (%)	22.05	10.88
CaO totale (%)	65.46	32.01
CaO libre (%)	0.42	~
CaO combiné (%)	65.04	~
Al ₂ O ₃ (%)	5.71	4.35
Fe ₂ O ₃ (%)	3.61	2.73
PAF (%)	0.32	13.36
SO ₃	0.01	32.01
K ₂ O%	0.35	~
Na ₂ O (%)	0.60	~
MgO (%)	0.87	4.66
Impuretés inertes (%)	1.02	0

Tableau II-5 : Analyse chimique du Clinker et du Gypse.

En appliquant la formule de LERCH on obtient :

$$\% \text{SO}_3 = 3.23$$

$$\% \text{ gypse} = 10.06$$

Pour assurer une meilleure homogénéisation du mélange Clinker + Gypse on a utilisé un broyeur ainsi que quelques boules de gros diamètre afin d'assurer la reproductibilité des résultats qui se traduit par l'obtention de la même SSB.

La surface spécifique du CPA ainsi obtenu à l'aide de l'appareil BLAINE vaut : **3524 cm^2/g** .

La composition de BOGUE du ciment CPA est :

Minéraux	C ₃ S	βC ₂ S	C ₁ AF	C ₃ A	CSH ₂
% Pondéraux	44.14	23.81	9.87	8.12	6.94

Tableau II.6 : Composition de BOGUE du CPA

D'après la norme NF P 15-301 les CPA contiennent au moins 97 % de clinker, ce qui n'est pas le cas pour le ciment préparé[59], mais par abus de langage on l'appellera CPA45 et ce pour le différencier du ciment CPJ45 fabriqué en série dans la cimenterie.

11-4 Les fluidifiants :

On a utilisé un fluidifiant de fabrication locale produit par une société Algérienne afin d'améliorer la maniabilité du béton tout en réduisant le plus possible le rapport E/C. En général, la réduction de ce rapport conduit à augmenter les résistances mécaniques.

On avait le choix entre deux produits qui sont : SI; (stipe, fluidifiant) et SP (superplastifiant).

En effectuant le séchage à l'étuve de deux échantillons (SF et SI), on a pu déterminer le pourcentage d'extrait sec contenu dans les deux liquides.

Produits	Extrait sec (%)
SI;	41.3
SP	41.48

Tableau II-7 : Teneur en extrait sec dans le SF et le SP

Les fiches techniques des différents produits SF et SP sont présentées en annexe.

Les essais de prise sur pâte de ciment CPA45 avec ces deux produits (SF, SP) nous ont permis de conclure que le SP est un puissant retardateur de prise (début de prise supérieur à 7h30). On a donc préféré utiliser le SF qui est d'une part moins retardateur de prise que le SP et d'autre part assurera un décoffrage rapide sur chantier.

Les essais de prise effectués sont présentés au paragraphe 11-5.

11-5 Les ajouts :

Afin de voir l'influence d'ajouts ultrafins (en substitution du ciment) sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons, on a utilisé les ajouts suivants :

- Fumée de silice
- Sable de dunes finement broyé
- Calcite

11-5-1 Fumée de silice :

La fumée de silice qu'on a utilisé est de fabrication française.

La couleur de cette fumée de silice est grise. La surface spécifique Blaine est très supérieure à 1 m²/g (limite de l'appareil Blaine).

L'analyse chimique de la fumée de silice est exprimée dans le tableau suivant :

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
%	94.76	—	1.81	1.01	1.3	1.12

Tableau II-8 : Composition chimique de la fumée de silice

11-5-2 Le sable de dunes (S.D) broyé :

Le sable de dune utilisé est de **provenance** de **BOUSSAADA**. C'est un sable fin doré dont la dimension maximale des gros grains est de 0.5 mm.

Ce sable a été broyé au laboratoire jusqu'à une finesse de 5000 cm^2/g . On n'a pas pu augmenter la SSB au-delà de cette valeur en raison de l'agglomération des fines particules durant l'opération de broyage.

La composition chimique du **SD** est représentée dans le tableau suivant :

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
%	86.04	1.35	0.86	6.63	0.08	5.00

Tableau 11-9 : Analyse chimique du sable de dune broyé.

11-5-3 La Calcite :

La calcite (CaCO_3) utilisée est de fabrication française, son analyse chimique est présentée dans le tableau suivant :

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PAF
%	0.30	0.15	-	55.75	-	43.8

Tableau 11-10 : Composition chimique de la Calcite.

La calcite est de couleur blanche. Sa surface spécifique BLAINE est supérieure à $1 \text{ m}^2/\text{g}$. Elle est pure à 99,55%.

11.6 Essais de prise :

Les essais de prise et de consistance ont été effectués à l'aide de l'appareil Vicat conformément à la norme EN 196-3.

On a effectué des essais de prise sur pâtes de ciment avec différents ajouts pour déterminer leur influence sur la prise.

11-6-1 Essai de prise sur pâte de ciment CPA :

a) Essais de prise sans Adjuvants :

- Consistance normale :

La consistance normalisée est déterminée selon la norme EN 196-3, en faisant varier le rapport E/C.

E/C	consistance d (mm) '1
0,42	0
0,3	0
0,27	2
0,26	6
0,25	12

Tableau II-11 : Consistance des pâtes en fonction du rapport E/C.

* d : Distance **séparant** l'extrémité de la sonde du **fond** du moule de VICAT.

La consistance normale est obtenue pour $E/C' = 0.26$.

- Essais de prise :

Après avoir évalué le rapport E/C correspondant à une **consistance normale** des pâtes à base de CPA (soit $E/C = 0,26$), on a procédé à la détermination du **temps** de début de prise et de l'évolution du **taux** de cisaillement dans les pâtes de ciment.

Temps (h)	d (mm)*
0	0
0,75	1
1,33	1
2,25	2
2,75	4
3	12
3,25	15
3,67	37
3,92	39
4,08	40

Tableau II-12 : Mesure du temps de prise sur pâte de CPA45.

* d : distance **séparant** l'extrémité de l'**aiguille** du fond du moule.

D'où on obtient :

Début de prise (h)	Fin de prise (h)
2h45	4h05

Tableau 11-13 : Temps de début et fin de prise de pâte CPA.

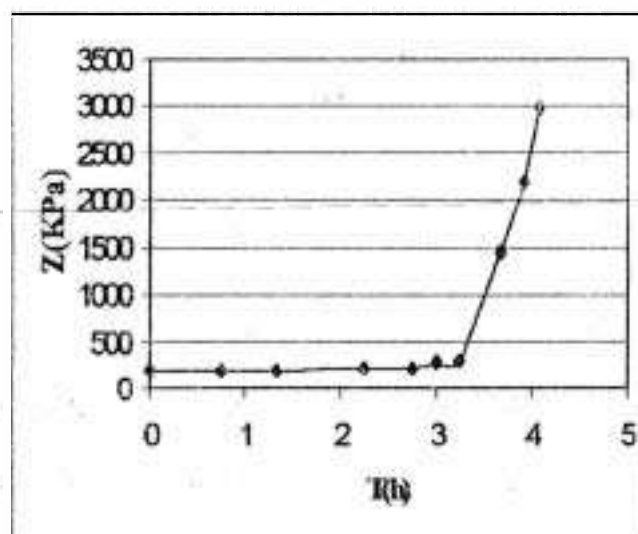


Fig II-3 : Evolution du **taux de cisaillement** en fonction du **temps**.

Z : Cisaillement de la pâte de ciment.

P

Avec $Z = \frac{P}{SL+10S}$

SL+10 S ~

P : poids de l'aiguille VICAT (300g).

SL : Section Latérale = $(40 - d) \cdot \pi \cdot \phi$ SP = $(\pi \cdot \phi^2 / 4)$ ϕ : Diamètre de l'aiguille VICAT = 1.13 mm

Les temps de début et fin de prise sont normaux pour la pâte de CPA ce qui vérifie la formule de LERCH utilisée.

b) Essais de prise avec Adjuvants :

Cas du SP :

Essai de consistance

SP (%)	E/C	Consistance d (mm)
0,4	0,24	0
0,4	0,22	5
0,4	0,19	8

Tableau TI-14 : Consistance de pâte de CPA + 0,4% SP en fonction des rapports E/C.

%SP : représente le dosage en extrait sec par rapport au poids du ciment.

La quantité d'eau et d'extraits secs contenus dans un volume donné de fluidifiant sont déterminés à partir de [GO].

- Essai de prise :

Temps (h)	E/C = 0,24 d (mm)	E/C = 0,22 d (mm)	E/C = 0,19 d (mm)
0,25	0	0	0
0,5	0	0	0
1	0	0	0
1,5	0	0	0
2	0	0	0
2,5	0	0	0
3	0	0	0
3,5	0	0	0
4	0	0	0
4,5	0	0	0
4,83	0	0,5	0,5
5,42	0,5	0,5	0,5
6,33	0,5	0,5	0,5
6,75	0,5	0,5	0,5
7	0,5	0,5	0,5
7,33	0,5	0,5	0,5
7,58	1	1	1

Tableau 11-15 : Mesure du temps de prise sur pâte de CPA + 0.4%SP en fonction du rapport E/C.

On constate que le temps de début de prise est supérieur à 7h 30min donc le SP se comporte comme un puissant retardateur de prise.

Cas du SP + CSF :

Essai de consistance :

E/C	%SP	%CSF	Consistance d (mm)
0,19	0,8	10	0

Tableau 11-16 : Consistance de pâte CPA + 0.8% SP+ 10%CSF.

On a essayé de réaliser une pâte avec E/C=0,18 mais celle ci était ferme. Ce qui nous a conduit à adopter un rapport E/C=0,19.

Essai de prise :

T (h)	0,5	1	1,33	1,66	2,17	2,33	2,83	3	3,5	4	4,5	4,83	5,17	5,5	5,83	6	6,5	6,83	7,08
d (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	6

Tableau 11-17 : Temps de prise de pâte de CPA + 0.8% SP+ 10%CSF.

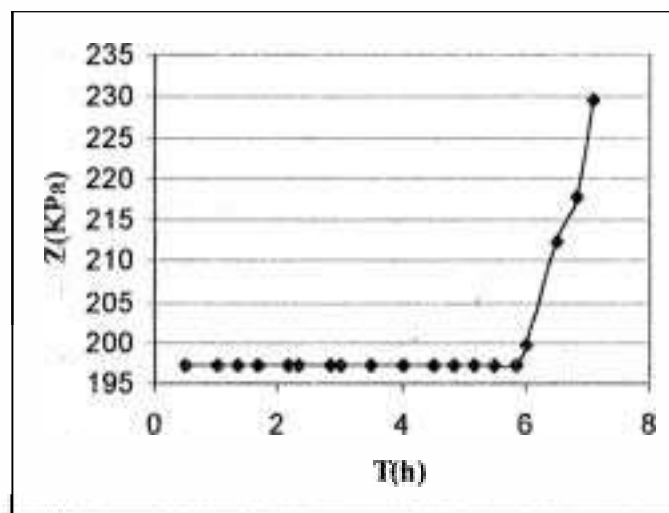


Fig II-4 : Evolution du cisaillement de pâte CPA + 0.8% SP + 10% CSF en fonction du temps.

Le temps de début de prise est égal à 6h 50min d'où la fumée de silice a un effet accélérateur comparativement à l'utilisation du SP seul.

Cas du SF :

Essai de consistance :

SF (%)	E/C	Consistance d(mm)
0,8	0,25	0
0,8	0,23	5
0,8	0,20	8

Tableau 11-18 : Consistance de pâte de CPA + 0.8%SF en fonction de E/C

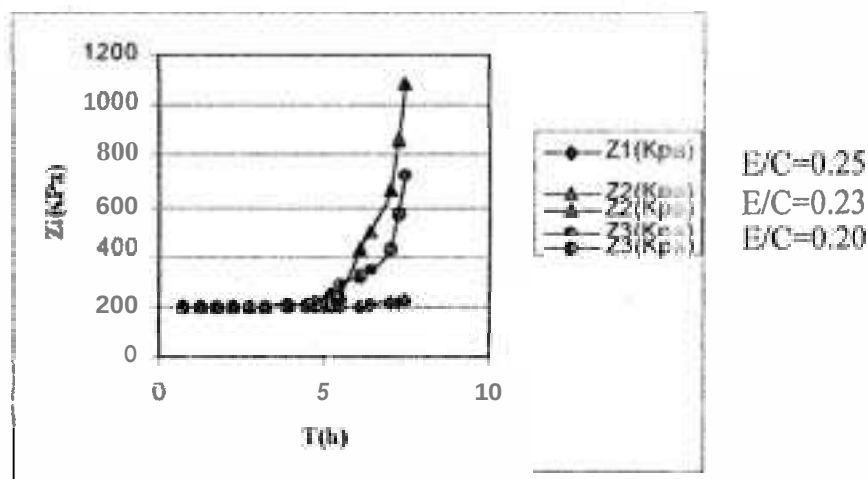
- **Essai de prise** :

Temps (h)	E/C=0,25 d (mm)	E/C=0,23 d (mm)	E/C=0,20 d (mm)
0,75	0	0	0
1,25	0	0	0
1,75	0	0	0
2,25	0	0,5	0,5
2,75	0	0,8	1
3,25	0	1	1
3,92	0	1,5	1,5
4,5	0	2	2
4,75	0	3	3
5	0	3,5	4
5,25	0	4	9
5,5	0,3	8	13
6,08	0,8	23	17
6,42	1,5	26	18
7	3	30	23
7,25	4	33	28
7,42	5	35	31

Tableau 11-19 : Temps de prise des pâtes de CPA +0,8% SF en fonction de E/C.

Le temps de début de prise diminue avec la diminution du rapport E/C, il est de :

- 7h15min pour E/C = 0,25
- 5h15min pour E/C = 0,23
- 5 h pour E/C = 0,20



Fia II-5 : Influence du rapport E/C sur le cisaillement des pâtes de CPA + 0,8% SF.

- Cas du SF+CSF :

- Essai de consistance :

E/C	%SF	%CSF	Consistance d (mm)
0,18	0,8	10	0

Tableau 11-20 : Consistance de pâte CPA + 0.8% SF + 10%CSF

- Essai de prise :

T (h)	0,5	1	1,33	1,66	2,17	2,33	2,83	3	3,5	4	4,5	4,83	5,08	5,3	5,5	6	6,5	6,58
d (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5	5	6	8

Tableau 11-21 : Temps de prise des pâtes de CPA +0.8%SF + 10%CSF.

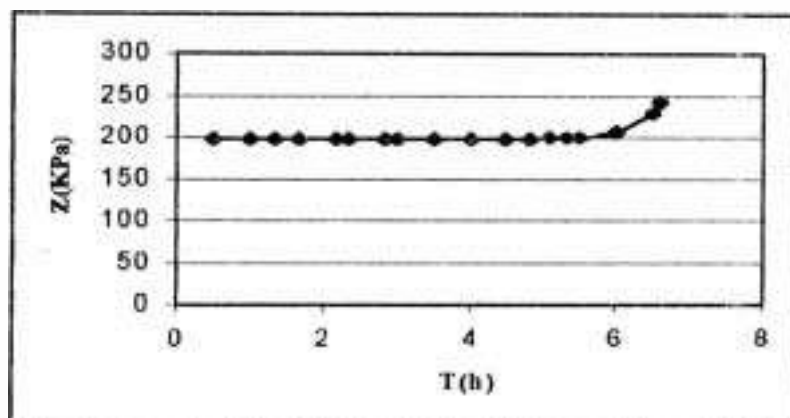


Fig II-6 : Evolution du cisaillement pour pâte de CPA + 0.8% SF+ 10%CSF.

Le temps de début de prise est égal à **6h00** d'où la fumée de silice a un effet accélérateur.

II.6.2 Essais de prise sur pâte de ciment CPJ45 :

a) Essais de prisesans substitution :

Consistance normale :

La **constitution** normale du CPJ a été obtenue en faisant varier la quantité d'eau de gâchage dans les pâtes de **ciment**. La pâte **normale** est obtenue pour un rapport E/C = 0,295.

- Essais de prise :

D'après le tableau suivant, on constate que le **temps** de début de prise est de **5h20min** quant au temps de fin de prise il est de **6h10 min**.

T (h)	1.17	1.75	2.5	3.5	4	4.5	5	5.25	5.5	5.61	5.83	6	6.17
d (mm)	0	0	0	0	0	0	2	4	7.5	20	36	39	39.5

Tableau 11-22 : Prise de la pâte normale de CPJ45 ($E/C=0,295$).

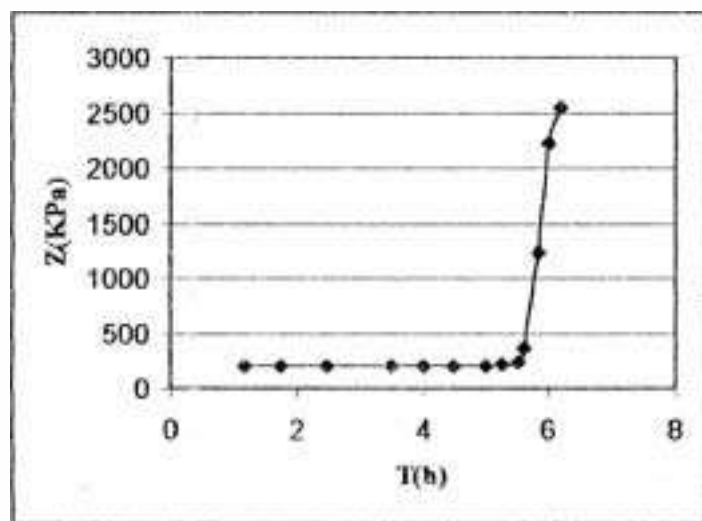


Fig II-7 : Evolution du cisaillement de pâte de CPJ45 à $E/C = 0.295$.

b) Essais de prise avec substitution :

- Consistance des pâtes :

E/C	SD (°)	Calcite (%)	Consistance d (mm)
0,295	5	0	0,5
0,295	10	0	0
0,295	15	0	0
0,295	8	2	1

Tableau 11-23 : Consistance des pâtes de CPJ45 en fonction des % de substitution.

- Essai de prise :

Les valeurs de l'enfoncement de l'aiguille VICAT dans les différentes pâtes sont données dans le tableau suivant :

Temps (h)	5%SD d (mm)	10%SD d (mm)	15%SD d (mm)	8%SD+2% Calcite d (mm)
1,83	0	0	0	0
2	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0
3	0	0	0	0
3,25	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0
4,25	0	0	0	0
4,83	0	0	0	0
5,08	1	1,5	0	2,5
5,5	6	7	4	6
5,66	8	12,5	11	25
5,83	38	18	26	38
5,92	39	30	35	39
6	39,5	39,5	39	39,5

Tableau 11-24 : Prise des pâtes de CPJ45 en fonction des % de substitution.

Le début de prise est de 5h30 tandis que la fin de prise s'opère à 6h00 on peut donc conclure que le SD n'a pas d'influence sur la prise

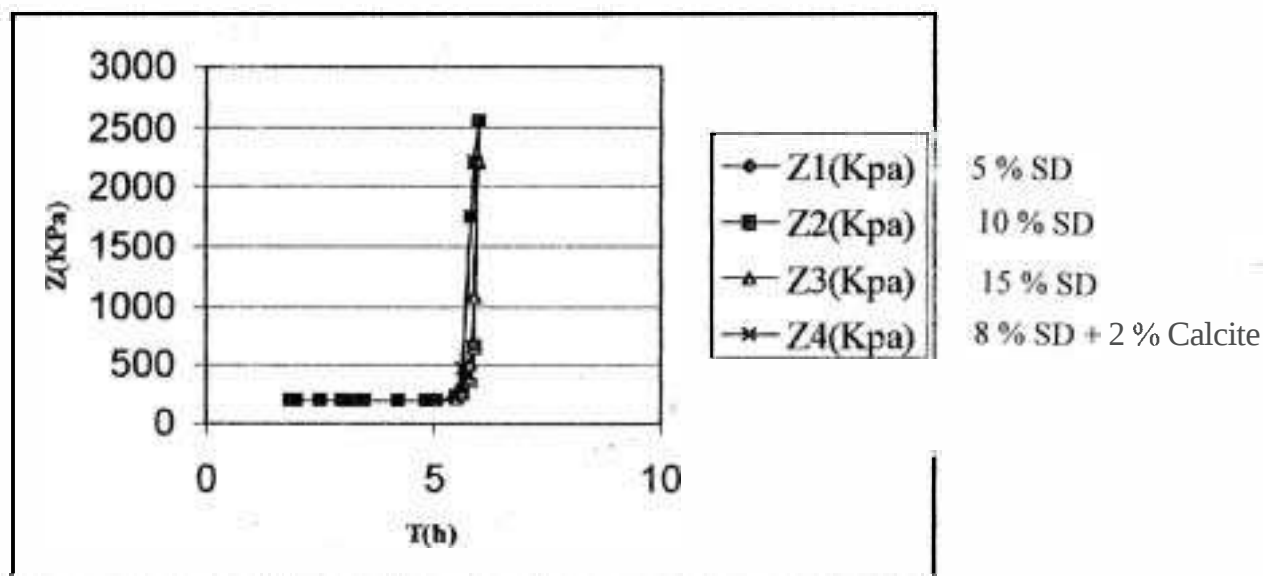


Fig 11-8 : Variation du cisaillement des pâtes de CPJ45 en fonction du % de substitution.

II-7 Composition du béton [61] :

La composition du béton ordinaire a été déterminée selon la méthode de DREUX-GORISSE qui se base sur les courbes granulométriques des différents composants du Eton. La composition du béton ordinaire obtenue est résumée dans le tableau suivant :

Matériaux	Poids pour 1 m ³ de béton [Kg]
Graviers 8/15	958.7
Graviers 3/8	119.5
Sable 015	607.4
Eau (pour E/C=0.42)	177.96
Ciment	420

Tableau II-25 : Composition du béton ordinaire.

II.5 Préparation des éprouvettes :

II.5.1 Malaxage :

Le **malaxage** du béton est réalisé selon la norme NF **P18-404** :

- Malaxage à sec des **granulats** + liant pendant une minute.
- Introduction de l'eau de gâchage et malaxage pendant deux minutes.

En présence de fluidifiant SF et selon sa fiche technique, on divise la quantité d'eau de gâchage en deux parties. La 1^{ère} moitié sans adjuvant et la seconde avec **adjuvant**.

On fait un malaxage avec la première moitié durant une minute et **30** secondes, puis on ajoute la deuxième moitié **et** on poursuit le malaxage pendant **30** secondes.

II.5.2 Vibration :

On remplit les moules à raison de deux couches **qu'on** vibre respectivement **durant 15** secondes et **15** secondes à l'aide d'une aiguille vibrante.

Une fois le moule rempli, on arase et on lisse la **surface** avec une truelle.

II.5.3 Conservation :

Après démoulage et marquage, les éprouvettes sont conservées **selon le** type d'essai à effectuer :

- dans l'eau pour les éprouvettes destinées **aux** essais d'écrasement en compression et en flexion
- à l'air libre pour les éprouvettes destinées aux mesures du retrait

II-9 Essais sur bétons frais :

Après malaxage on a procédé à la détermination de la masse **volumique** apparente et de l'affaissement au **cône d'Abrams** (slutnp test NF.P18-451) **conformément** aux **normes** AFNOR.

II-10 Essais sur bétons durcis :

II-10-1 Rectification et surfacage :

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

Des recherches réalisées par F. De LARRARD et C. BOULAY [62] montrent que le surfaçage au soufre n'est pas adapté pour les bétons à hautes performances, à cet effet, une boîte à sable est confectionnée. Le seul inconvénient de ce type de surfaçage est le temps d'exécution de l'opération qui est un peu long.

Généralement pour les éprouvettes cubiques le surfaçage est inutile.

II.10.2 Essais de résistance mécaniques :

L'essai de compression simple est effectué conformément à la norme NF P 406, sur des éprouvettes cubiques de 10 cm et 14 cm de côté. La presse utilisée est une presse hydraulique sur deux bâtis de capacité maximale de 1500 KN.

Sa mise en charge s'effectue avec une vitesse de chargement liée à la forme et la dimension de l'éprouvette (9 KN/s pour $\phi 16 \times h 32$ cm et 12 KN/s pour les cubiques d'arête de 14 et 15 cm).

Par contre l'essai de résistance à la flexion, est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm³. L'essai est effectué sur 4 points avec une vitesse de 0.14 KN/s.

On note que les vitesses de chargement sont normalisées.

11-10-3 Module d'élasticité :

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

On a utilisé un retractorétre pour mesurer les déformations du béton à des valeurs de contraintes unitaires.

Le module d'élasticité E selon la norme algérienne NA 437 est la valeur calculée d'après la formule :

$$E = \Delta \sigma / \Delta \epsilon$$

Où $\Delta \sigma$ et $\Delta \epsilon$ sont les différences de contrainte et de déformation entre, respectivement, un niveau de chargement de base de 0.5 N/mm² et un niveau supérieur de chargement de un tiers de la résistance à la compression du béton.

II-10-4 Absorption capillaire [61][63] :

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

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

L'éprouvette déjà conservée dans l'eau à $20 \pm 2^\circ \text{C}$, doit être séchée à l'étuve. Elle doit subir un sciage sur une face et un traitement imperméabilisant sur les autres faces à l'aide de paraffine.

L'éprouvette est ensuite posée dans un bac contenant du sable saturé d'eau sur sa face sciée.

On mesure ensuite en fonction de temps, l'accroissement du poids de l'éprouvette dû à la montée capillaire de l'eau par la formule :

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

Où :

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

11-11 Analyse par diffractométrie aux rayons X :

JI-11-1 La diffraction des rayons X par les cristaux [64] :

La très **grande** majorité des substances solides est constituée de cristaux. Un cristal est un **arrangement régulier d'atomes** (ou d'ions) dans l'espace. On dit qu'il forme un réseau à **trois** dimensions. On **raisonne souvent** sur un réseau plan, plus facile à représenter.

La **généralisation est** ensuite plus facile.

Etant donné la structure régulière de l'**édifice cristallin**, pour caractériser un réseau, il **suffit** de considérer une figure géométrique simple qui reproduit **tout** le réseau par translation.

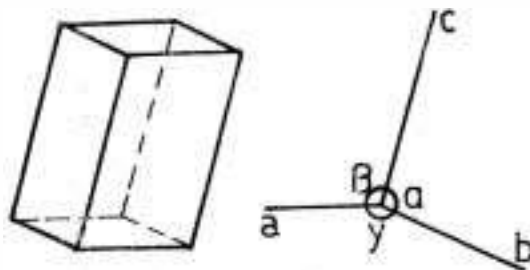
Cette figure est appelée maille. On la choisit de façon qu'elle mette en évidence la symétrie du réseau.

Dans l'espace, la maille est un parallélépipède. On distingue quatre types de mailles :

Disposition des atomes dans le parallélépipède	Nom de la maille
Aux huit sommets seulement	Simple ou primitive
Aux huit sommets et au centre	Centrée
Aux huit sommets et aux centres des faces	A faces centrées
Aux huit sommets et aux centres de deux faces parallèles	A bases centrées

Tableau 11-26 : Différents **types** de mailles dans un **réseau** cristallin.

On décrit une maille d'un solide donné – et par **conséquent** un **réseau** donné – par ses paramètres. On appelle ainsi l'ensemble des trois **côtés** a, b, c du parallélépipède et des trois angles **a**, **β**, **γ**, situés entre ces trois côtés.



Fia II-9 : Maille et paramètres réseau à trois **dimensions**.

Lorsque les rayons X arrivent sur un cristal, ils provoquent une **accélération** du mouvement des **électrons**.

Ces **derniers**, à l'image d'une antenne, émettent un rayonnement X de même longueur d'onde que le rayonnement incident. Ce phénomène est appelé **diffusion cohérente**.

Les rayons X **diffusés** sont émis dans toutes les directions (**Fig.II-10**) et par tous les atomes.

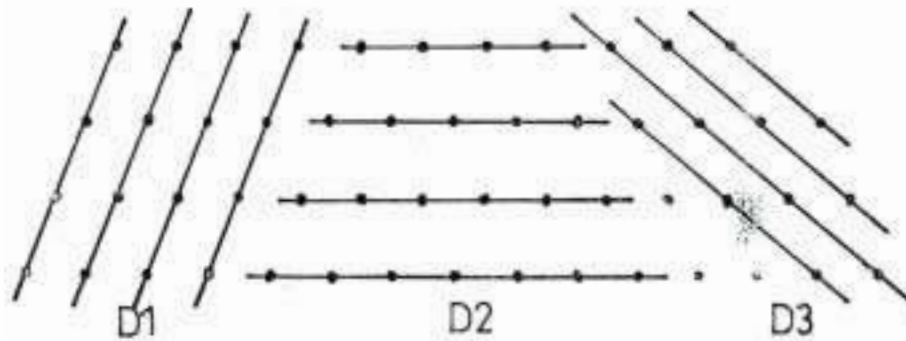


Fig 11-10 : Familles de droites réticulaires.

Les ondes **diffusées** sont susceptibles de s'ajouter ou de **se retrancher selon leurs phases**. Le résultat des superpositions de ses ondes constitue le phénomène de diffraction des rayons X par le cristal.

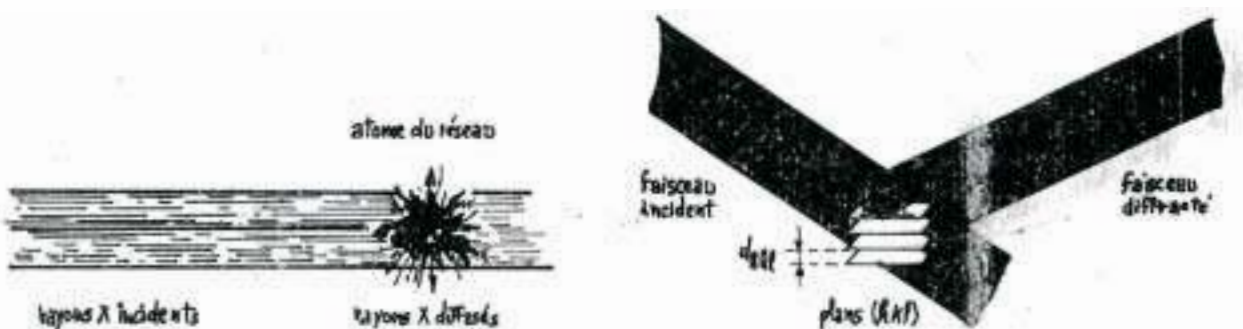


Fig 11-11 : Diffusion des rayons X.

Fig II-12 : La **réflexion** des rayons X par les plans réticulaires

Etant donné le nombre pratiquement infini d'atomes dans un cristal, les ondes émises dans une direction donnée s'éliminent en général. Car à chaque onde on peut toujours associer une onde de phase opposée qui l'annule.

Pour des incidences particulières **aux** plans réticulaires d'une famille **donnée**, toutes les ondes émises dans certaines directions sont **en phase** et s'ajoutent. Si λ est la **longueur d'onde** du rayonnement, d_{hkl} , la distance **inter-réticulaire** des plans, les incidences particulières sont celles

pour lesquelles l'angle θ du rayon incident avec les plans réticulaires vérifie la relation de BRAGG à savoir:

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta$$

n = nombre entier .

Les directions de diffraction sont situées dans le même plan que les directions d'incidence et forment le même angle θ avec les plans réticulaires (fig. II-12)

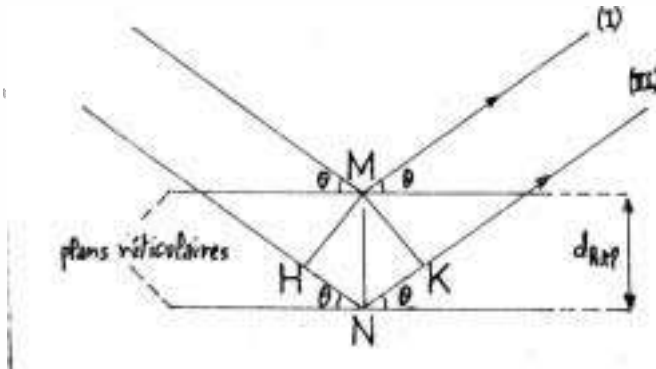


Fig 11-13 : Représentation schématique de la loi de BRAGG.

On peut montrer facilement que la relation de BRAGG implique que deux rayons diffractés, issus de deux plans de la famille sont en phase.

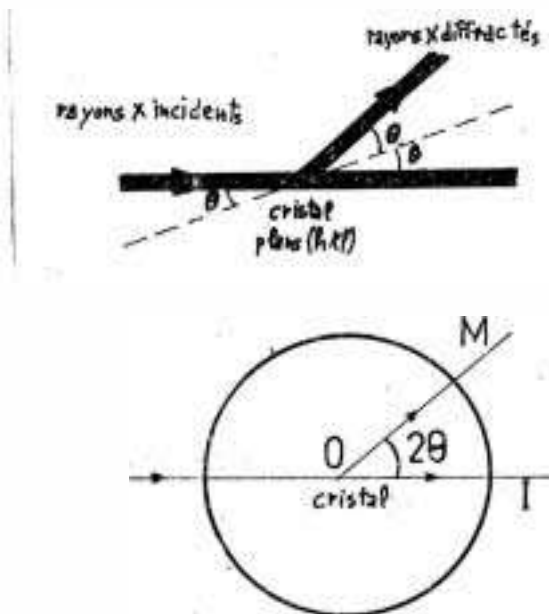


Fig 11-14 : Principe de la mesure de l'angle de diffraction.

La différence de **marche** des rayons (I) et (II), est:

$$\delta = HN + NK = 2 MN \sin \theta = 2 d_{hkl} \sin \theta.$$

Comparant ce **résultat** à l'expression de la relation de BRAGG, on déduit :

$$\delta = n\lambda$$

Les marches des **deux** rayons **diffèrent** d'un nombre entier de longueur d'onde. Les ondes (I) et (II) sont en phase.

II.11.2 Application : Diagramme de rayons X d'un solide :

Un solide cristallisé donne lieu à une **diffraction** de rayons X dans des directions caractéristiques de ses distances **inter-réticulaires**. Les méthodes expérimentales consistent en la mesure de l'angle de **diffraction**. La connaissance de θ permet de calculer d_{hkl} par la relation de BRAGG.

On voit sur la figure 11-12 que les rayons incidents et **diffractions** forment un angle 2θ .

Il suffit de repérer le faisceau incident, en I, après la traversée du cristal, puis le faisceau **diffractions** en M. Le montage est tel que I et M sont à la même distance $OM = OI = r$ du cristal placé en O. Par suite, la mesure de l'arc $IM = l$ conduit immédiatement à θ grâce à la relation :

$$l/2\pi r = 2\theta/360$$

La méthode la plus usuelle de repérage de I et M est une méthode photographique. Les rayons X impressionnent un **film** cylindrique dont l'axe est perpendiculaire aux rayons X et contient le cristal.

La détermination des distances inter-réticulaires sert à l'identification des substances solides.. Elle est l'étape essentielle de l'étude qualitative des cristaux.

La mesure de l'intensité du rayonnement **diffractions** permet d'obtenir des résultats quantitatifs (dosages de mélanges solides par exemple). La **détermination** d'une intensité **diffractions** par **chaque** famille de plans réticulaires conduit à la localisation des atomes dans l'espace.

11.1.1.3 Méthode d'analyse diffractométrique :

Parmi les diverses méthodes **existantes**, on a choisi la méthode **diffractométrique** sur poudres qui est la plus utilisée.

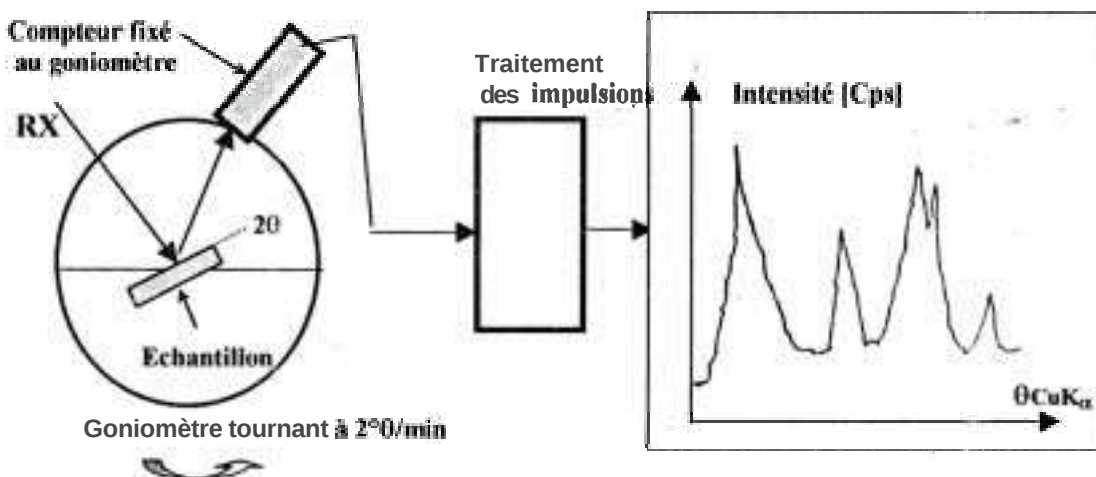


Fig 11-15 Schéma de principe d'un diffractomètre X.

Le montage est schématisé sur la figure 11-13, le matériau, broyé en grains dont la dimension maximale est $30 \mu\text{m}$ est placé dans un porte-échantillon offrant ainsi une face plane aux

rayonnements. Selon le type d'appareil, on peut avoir l'échantillon fixe soit bien tournant à une vitesse de $0^\circ/\text{min}$. Un compteur, fixé sur un goniomètre et animé d'une vitesse de rotation $20^\circ/\text{min}$, mesure le rayonnement diffracté.

On peut obtenir, en **définitive**, un diagramme **caractéristique** du matériau, comportant des raies d'intensité bien définie pour des valeurs angulaires elles mêmes définies. Le dépouillement du diagramme, à l'aide des fiches ASTM, conduit à identifier le (ou les) minéral **renfermé(s)** dans le matériau.

Ce procédé de diagnose présente de nombreux avantages :

- rapidité d'exécution ;
- possibilité, dans certains cas, de dosages quantitatifs ;
- identification de minéraux et pas seulement d'élément comme le fait l'analyse chimique.

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.

Les résultats des analyses à la diffraction aux rayons X sont présentés dans le chapitre III.

11.12 Conclusion :

Les caractéristiques **physico-mécaniques** des matériaux utilisés sont proches de celle requises pour l'élaboration d'un béton à hautes performances. En effet le gravier est de nature **silico-calcaire** de forme presque cubique mais contenant des formes plates et d'aiguille. Aussi on a utilisé un sable de rivière assez propre mais grossier. Ce sable diminue la maniabilité du béton.

On a utilisé deux types de ciment CPJ45 et CPA45 que nous avons préparé à la cimenterie de **RAIS HAMIDOU**.

On a fait des tests de prise sur pâte avec deux adjuvants SF et SP, produits confectionnés par une société Algérienne. Ces essais nous ont conduit à utiliser le SF car il est moins retardateur de prise que le SP.

Pour améliorer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du béton on a utilisé des ajouts en substitution du ciment : **fumée de silice**, sable de dunes broyé et **calcite**.

Les résultats de l'incorporation de ces ajouts dans les bétons sont présentes au chapitre III.

Chapitre III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction :

Après avoir étudié les propriétés physico-chimiques des différents constituants du béton qui seront utilisés pour l'élaboration d'un BHP, le présent chapitre expose les résultats expérimentaux obtenus avec l'introduction dans la pâte liante du béton des ajouts suivants : la fumée de silice, le sable de dunes broyé et la calcite. L'interprétation des résultats et la comparaison avec ceux d'un béton ordinaire seront traitées dans ce chapitre.

III- 2 Optimisation du dosage en fluidifiant :

L'ajout de fluidifiant lors du malaxage de bétons frais permet d'améliorer sa maniabilité par rapport au béton ordinaire.

Les présents résultats montrent l'influence du fluidifiant sur la maniabilité et sur la résistance en compression des bétons à base de ciment CPJ45 sans ajouts.

composition		b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
C	[kg/m ³]	420	450	450	420	450	450	420	420	420
E/C		0.42	0.42	0.42	0.32	0.32	0.28	0.28	0.28	0.28
SF	[%]	-	-	1.3	1.3	1.3	1.8	1.5	1.8 + 0.4%SP	2.5
ρ_{bf}	[t/m ³]	2.470	2.480	2.490	2.530	2.535	2.540	2.527	2.627	2.557
$\rho_{bd_{90}}$	[t/m ³]	2.460	2.470	2.480	2.490	2.492	2.530	2.526	2.510	2.51
Rc ₉₀	[MPa]	34.2	37.5	45.8	46.5	57.1	63.3	49	51.1	50.2
Affaissement [cm]		2	5	25	16.5	20	3	1.5	3	3

Tableau III-1 : Influence des dosages en fluidifiants sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons.

Les résultats du tableau montrent que pour un béton ordinaire dosé à 450 kg/m³ la maniabilité, la résistance à 90 jours et les masses volumiques à l'état frais et durcis sont meilleures que celles des bétons avec des dosages de 420 kg/m³ à E/C constant.

Pour un même dosage en ciment et en eau (E/C=0.42) l'ajout de 1.3% de SF améliore considérablement l'ouvrabilité du béton. Le béton passe d'une consistance plastique (Aff = 5cm) à une consistance fluide (Aff = 25 cm) ce qui nous permet de réduire encore le rapport E/C.

- Pour un rapport E/C=0.32 et en présence de 1.3% de SF la résistance, la maniabilité et les masses volumiques à l'état frais et durcis des bétons dosés à 450 kg/m³ sont supérieures à celles des bétons à 420 kg/m³.

- A un rapport E/C=0.28, la maniabilité du béton reste faible même après augmentation des taux en fluidifiants (1.5%, 1.8%, 2.5% de SF et 1.8% de SF + 0.4% de SP) !

Les résultats obtenus nous ont conduit à adopter le dosage de 450 kg/m³ de ciment CPJ45 car la résistance et la maniabilité sont améliorées par rapport à celle de 420 kg/m³.

Le dosage maximum de SF utilisé est de 1.8% et ce conformément à la fiche technique du produit.

III-3 Influence du type de ciment sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons :

III-3-1 Bétons à base de CPJ45 sans ajouts :

Les résultats des essais effectués sur des bétons à base de CPJ45 (notés B_i) avec et sans fluidifiants sont résumés dans le tableau III-2 :

Composition	B ₁	B ₂	B ₃
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450
E/C	0,42	0,32	0,28
SF [%]	0	1,3	1,8
Ajouts [%]	0	0	0
$\rho_b f$ [t/m ³]	2,510	2,510	2,540
ρ_b durcis [t/m ³]	2,430	2,492	2,525
Affaissement[cm]	5	17	4
A.C [g/cm ²]	9,8	5,3	3
Rt _{7j} [MPa]	2,09	3,9	4,5
Rc _{7j} [MPa]	22,6	37	41,6
Rt _{28j} [MPa]	4,22	4,39	4,89
Rc _{28j} [MPa]	35,6	41,8	50,6

Tableau III-2 : Influence de E/C et du fluidifiant sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de CPJ45.

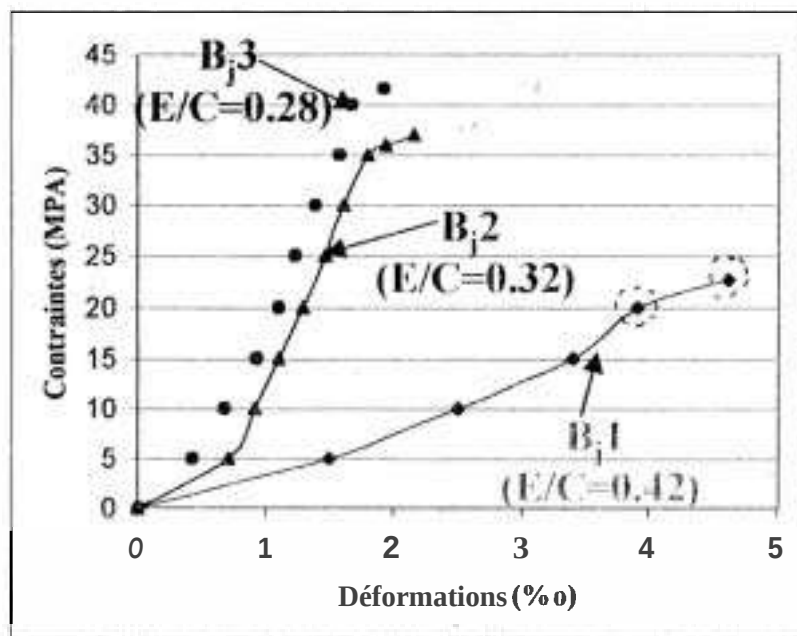


Fig III-1 : Diagrammes Contraintes-Déformations des bétons B_i à base de CPJ45 à 7 j.

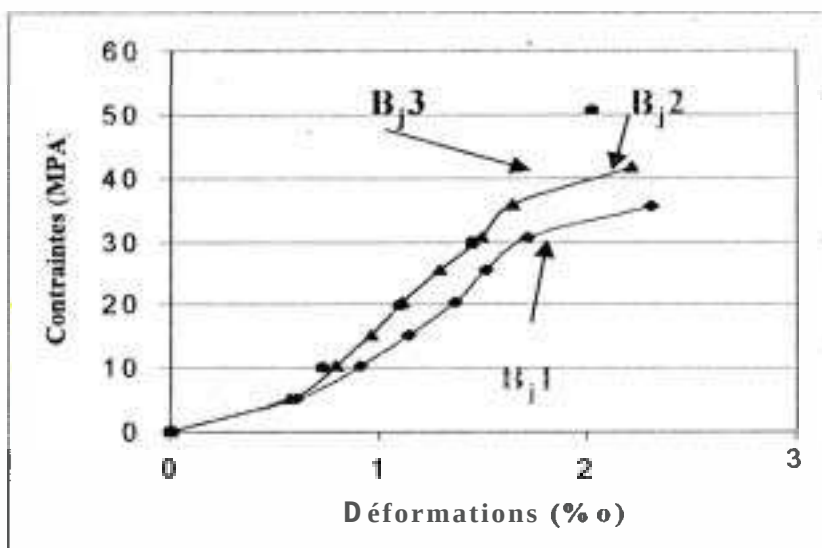


Fig III-2 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B_{ji} à base de CPJ45 à 28 j.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que :

- Sans fluidifiant, la **maniabilité** du **béton** atteint une limite à $E/C=0.42$ (Aff = 5cm) car le malaxage du béton devient difficile quand E/C se **rapproche** de 0.40 [5].
- En diminuant le rapport E/C des bétons la résistance en compression à 7 et 28j augmente. Ceci est dû à la compacité plus élevée de ces bétons par rapport aux bétons **ordinaires**.
- La maniabilité des **bétons** à $E/C = 0.32$ est nettement supérieure à **celle** des **bétons** avec $E/C = 0.42$ et 0.28 ceci est dû à l'efficacité du fluidifiant qui a une **limite** à un $E/C = 0.30$ environ.
- La diminution du rapport E/C en présence de fluidifiant entraîne **l'atteinte** de plus de 80% de résistance en compression à 7j par rapport à **celle** de 28j, par contre pour un **béton** sans **fluidifiant** la résistance à 7j représente environ 60% seulement de celle à 28j.

III-3-2 Bétons à base de CPA45 sans ajouts :

Le tableau suivant représente les résultats obtenus sur bétons à base de CPA45 ($B_{a,i}$) :

Composition	$B_{a,1}$	$B_{a,2}$	$B_{a,3}$
G1(3/8) [kg/m^3]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m^3]	958.7	958.7	958.7
S(0/5) [kg/m^3]	607.4	607.4	607.4
C [kg/m^3]	450	450	450
E/C	0.42	0.32	0.28
SF [%]	0	1.3	1.8
Ajouts [%]	0	0	0
pb frais [t/m^3]	2.49	2.556	2.556
pb durcis [t/m^3]	2.48	2.517	2.527
Affaissement[cm]	5	18	5
A.C [g/cm^3]	6.2	4.7	2.8
R_{t7j} [MPa]	3.61	4.1	4.6
R_{c7j} [MPa]	25.3	38	45.08
R_{t28j} [MPa]	4.29	4.59	5.38
R_{c28j} [MPa]	46.2	49.2	52.6

Tableau III-3 : Influence de E/C et l'adjuvant sur les **propriétés** des **bétons** à base de CPA45.

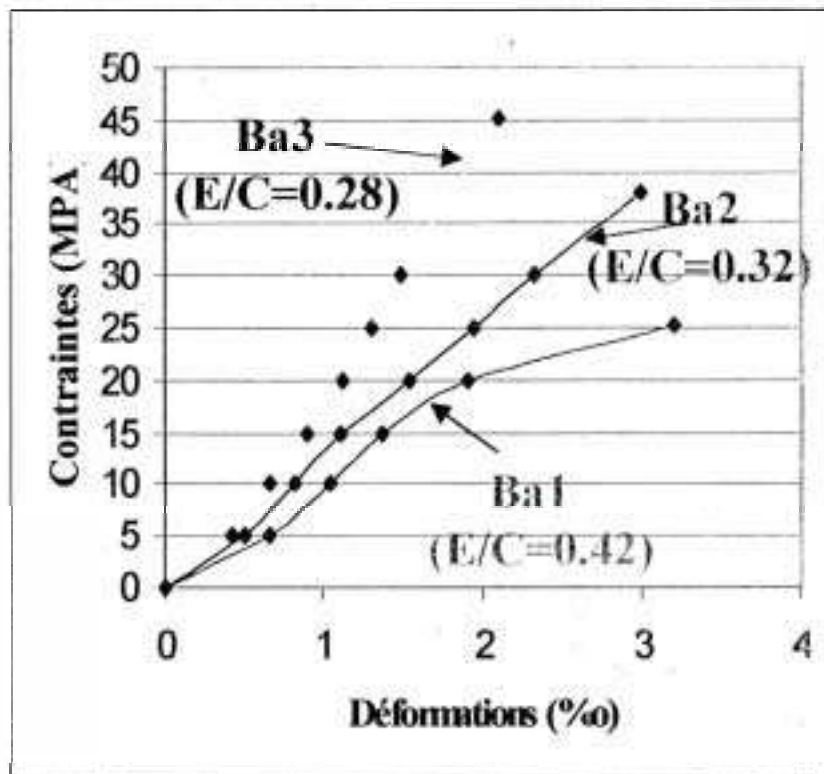


Fig III-3 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B_{ai} à base de CPA45 à 7j.

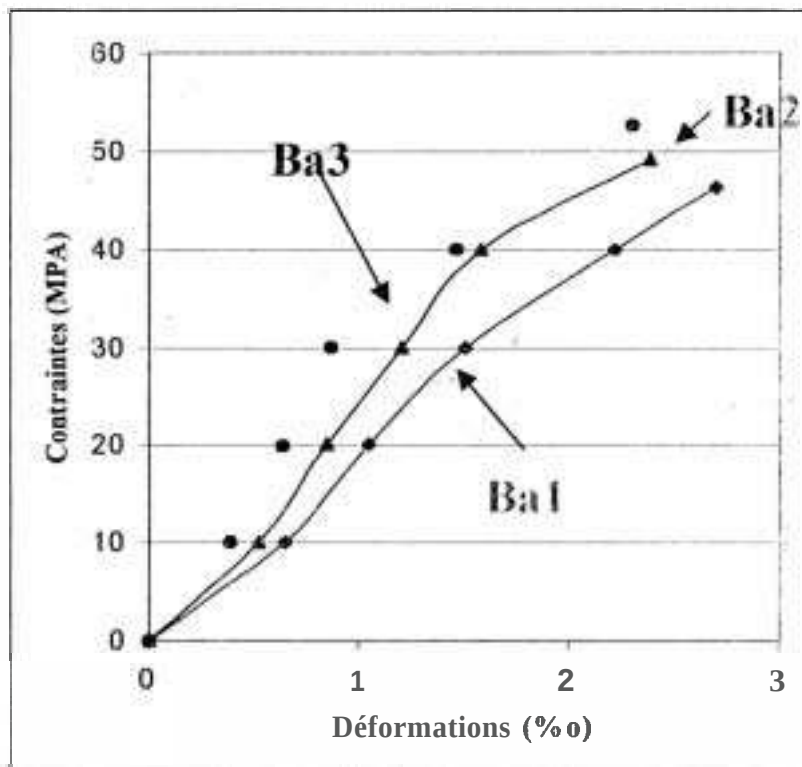


Fig III-4 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons B_{ai} avec CPA45 à 28j.

Les résultats obtenus sur les bétons à base de CPA45 montrent que :

- La maniabilité des bétons sans ajouts est identique à celle obtenue avec le CPJ45.
- Les résistances mécaniques augmentent en diminuant le rapport E/C.

- L'absorption capillaire des bétons avec CPA45 est nettement inférieure à celle des bétons à base de CPJ45.
- Les déformations à la rupture à 7j sont **supérieures** à celles de 28j et ce indépendamment du ciment utilisé (CPA ou CPJ).
- Les déformations à la rupture diminuent avec la diminution du rapport E/C.
- Les résistances mécaniques des bétons à base de CPA sont plus élevées comparativement à celles à base de CPJ.

III-4 Bétons avec ajouts :

Il a été donné que la proportion de chaux (portlandite) des ciments Portland est estimée à 20 % des hydrates formés d'une part (voir tableau I-6) et que les rapports C/S des CSH pouvaient varier entre 0.5 et 3 (voir tableau I-4), d'autre part, on a donc choisi de fixer les substitutions à 10 et 15 % pour l'ensemble des ajouts utilisés.

Ces substitutions conduiront à la fixation de la totalité de la Portlandite formée lors des éventuelles réactions **pouzzolaniques** entre les ciments (CPJ et CPA) et les ajouts.

III-4-1 Bétons avec fumée de silice (CSF) :

Les résultats présentés dans le tableau suivant montrent l'influence de l'ajout des CSF sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons à base de **CPJ45** :

a- Bétons à base de CPJ45 :

En utilisant le **CPJ45** avec et sans ajouts de **fumée de silice** on a obtenu les résultats suivants :

Composition		B3	B5	B9
G1(3/8)	[kg/m ³]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15)	[kg/m ³]	958.7	958.7	958.7
S(0/5/)	[kg/m ³]	607.4	607.4	607.4
C	[kg/m ³]	450	450	450
E/C		0.28	0.28	0.28
SF	[kg]	1.8	1.8	1.8
CSF	[%]	0	10	15
ρ_b frais	[t/m ³]	2.54	2.56	2.543
ρ_b durcis	[t/m ³]	2.525	2.532	2.537
Affaissement	[cm]	4	8	6
A.C	[g/cm ²]	3	2.0	1.20
R _{t7j}	[MPa]	4.5	4.4	4.2
R _{c7j}	[MPa]	41.6	46	45
R _{t28j}	[MPa]	4.89	5.8	5.2
R _{c28j}	[MPa]	50.6	53.4	54

Tableau III-4 : Influence des CSF sur les propriétés physico-mécaniques des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0.28).

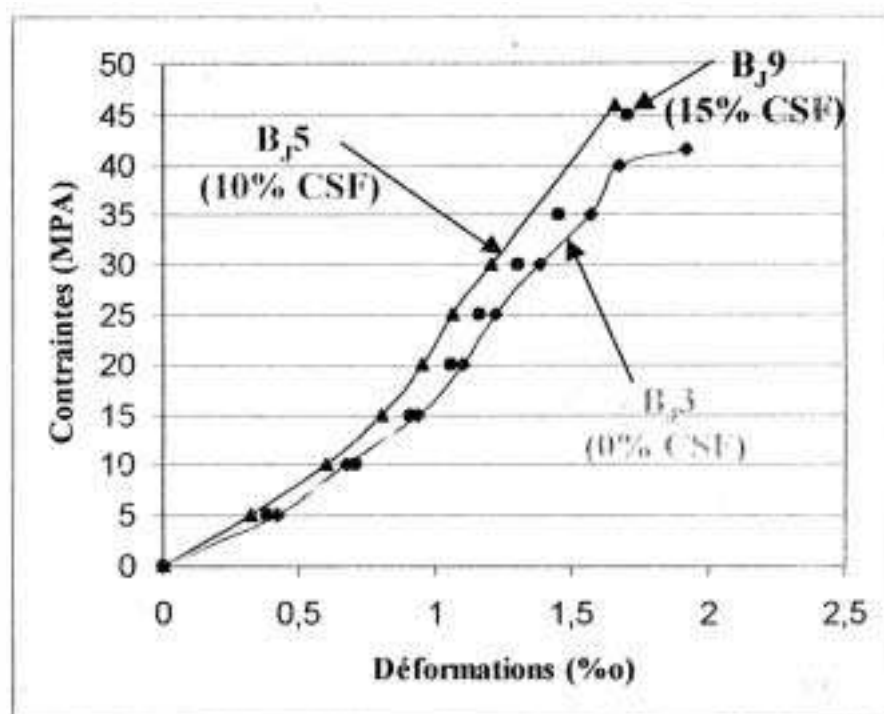


Fig III-5 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du %CSF à 7j (E/C=0.28).

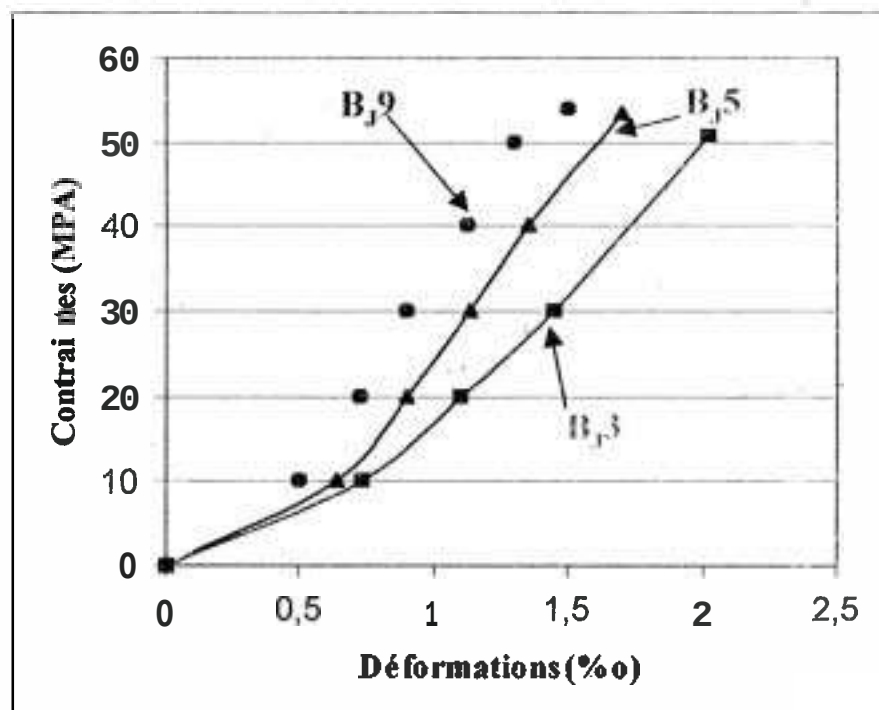


Fig III-6 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du %CSF à 28 j (E/C=0.28).

A partir du Tableau III.4 on peut conclure que :

- La maniabilité des bétons préparés avec CSF est améliorée par rapport à ceux sans ajouts. En effet, pour 10% et 15 % de CSF on a des affaissements au cône d'ABRAHMS de 8 et 6 cm respectivement. Ceci est dû au rôle de fluidifiant de la fumée de silice en présence d'un adjuvant superplastifiant. Ce qui vérifie les résultats trouvés par d'autres chercheurs [15][16][62] qui préconisent que la fumée de silice a un effet fluidifiant en plus de l'effet donné par les superplastifiants. Cet effet n'est pas aussi spectaculaire dans notre cas car le fluidifiant (SF) utilisé n'est pas compatible avec le ciment CPA45, car la maniabilité n'était pas améliorée au même rapport E/C=0.28 pour les bétons sans ajouts.
- Les bétons avec CSF sont beaucoup plus denses que ceux sans ajouts en effet, les masses volumiques apparentes du béton frais et durcis sont améliorées en présence de CSF.
- L'absorption capillaire est très faible dans les bétons avec CSF par rapport à ceux qui ne les contiennent pas, celle ci décroît lorsque le pourcentage de CSF est plus élevé.
- Les résistances en traction ne sont pas améliorées avec les bétons aux CSF à 7j par rapport à ceux sans ajouts.
- L'ajout de CSF augmente les résistances mécaniques d'une manière significative dès le 7^{ème} jour. Ceci est dû aux réactions pouzzolaniques des CSF avec la chaux libérée par le ciment et qui se développent surtout après le 7^{ème} j en créant de nouveaux CSH qui rendent par conséquent le béton plus dense et plus compact.
- La résistance à la traction des bétons à 15% de CSF est inférieure à celle des bétons avec 10% de CSF ce qui nous ramène à dire que cette dernière n'augmente pas du même ordre de grandeur que la résistance à la compression.
- Les bétons avec CSF se déforment moins que les bétons sans ajouts.

b- Bétons à base de CPA45 :

En utilisant du CPA45 avec et sans ajouts de fumée de silice on obtient les résultats suivants :

Composition	Ba3	Ba5	Ba9
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450
E/C	0,28	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8	1,8
CSF [%]	0	10	15
pb frais [t/m ³]	2,556	2,56	2,565
pb durcis [t/m ³]	2,527	2,537	2,555
Affaissement[cm]	5	9	7
A.C [g/cm ³]	2,8	1,2	0,7
Rt7j [MPa]	4,6	4,8	5,1
Rc _{7j} [MPa]	45,08	46,3	48
Rt _{28j} [MPa]	5,38	6,2	6,7
Rc _{28j} [MPa]	52,6	58	65,5

Tableau III-5 : Influence des CSF sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).

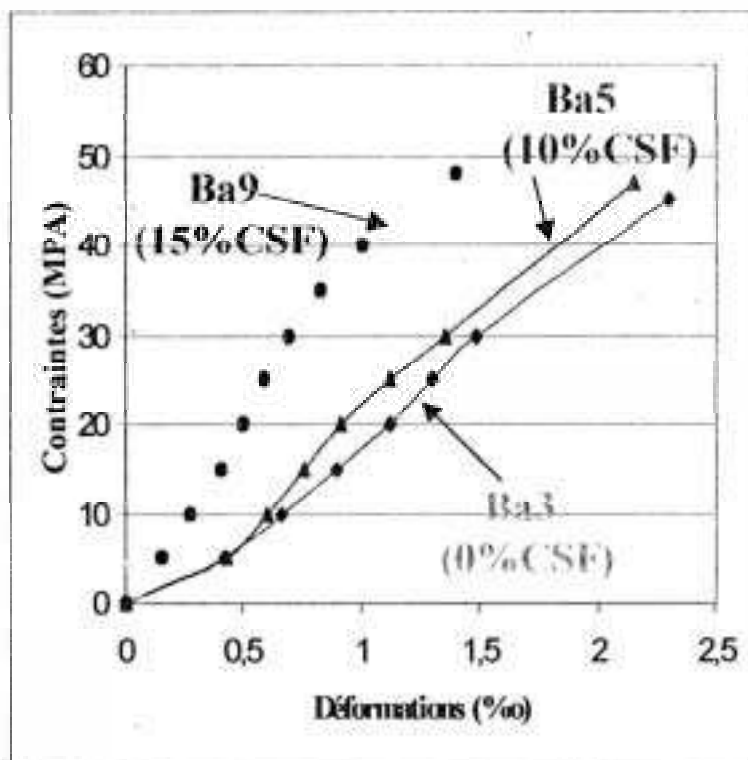


Fig III-7 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % CSF à 7j (E/C=0.28).

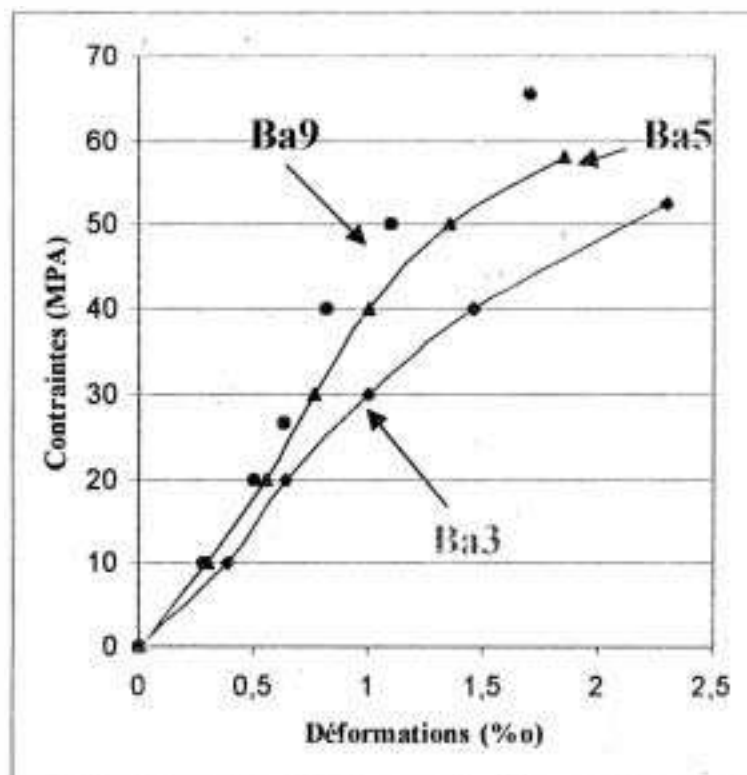


Fig III-8 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % CSF à 28j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- La maniabilité des bétons à base de CSF est améliorée par rapport aux bétons sans ajouts. Celle-ci est meilleure en utilisant du CPA45 au lieu de CPJ45.
- Les bétons à base de CPA45 avec ajouts de CSF sont légèrement plus denses que ceux avec du CPJ45. En effet, les masses volumiques à l'état frais et durcis sont améliorées.
- L'absorption capillaire des bétons aux CSF est plus faible que celle des bétons sans ajouts.
- L'ajout de CSF contribue à augmenter les résistances mécaniques dès le 7^{ème} jour. Ces dernières sont nettement supérieures à celles du témoin (CPA) à 28 j. Ceci est dû à la formation de CSH supplémentaires qui rend ces bétons plus denses et plus compacts.
- Les bétons aux CSF se déforment moins que ceux sans ajouts.
- Les résistances en traction et en compression augmentent avec le dosage en CSF et en Clinker (%Clinker dans le CPA45 > % Clinker dans CPJ45).
- L'ajout de 15% de CSF est plus efficace pour l'augmentation des résistances en traction et en compression à 7 et 28 j. L'idéal est d'introduire 20 % de CSF pour aboutir à des rapports C/S ≈ 1 dans les CSH formés à partir de la réaction **pouzzolénique** puisque le % de CH représente 20 % des hydrates formés lors de l'hydratation complète des ciné Portland d'après [23] (voir Tableau 1.6).

III-4-2 Bétons avec Sable de Dunes :

a- Bétons à base de CPJ45 :

Les résultats obtenus avec et sans ajouts de Sable de dunes (SD) sont **présentés** dans le tableau suivant :

Composition	B ₃	B ₆	B ₈
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450
E/C	0,28	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8	1,8
SD [%]	0	10	15
ρ_b frais [t/m ³]	2,54	2,551	2,53
ρ_b durcis [t/m ³]	2,525	2,527	2,51
Affaissement[cm]	4	7	5
A.C [g/cm ²]	3	2,8	4,0
Rt7] [MPa]	4,5	4,01	3,8
Rc _{7j} [MPa]	41,6	40,6	34,5
Rt _{28j} [MPa]	4,89	5,1	4,5
Rc _{28j} [MPa]	50,6	51,3	48

Tableau III-6 : Influence des SD sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0.28).

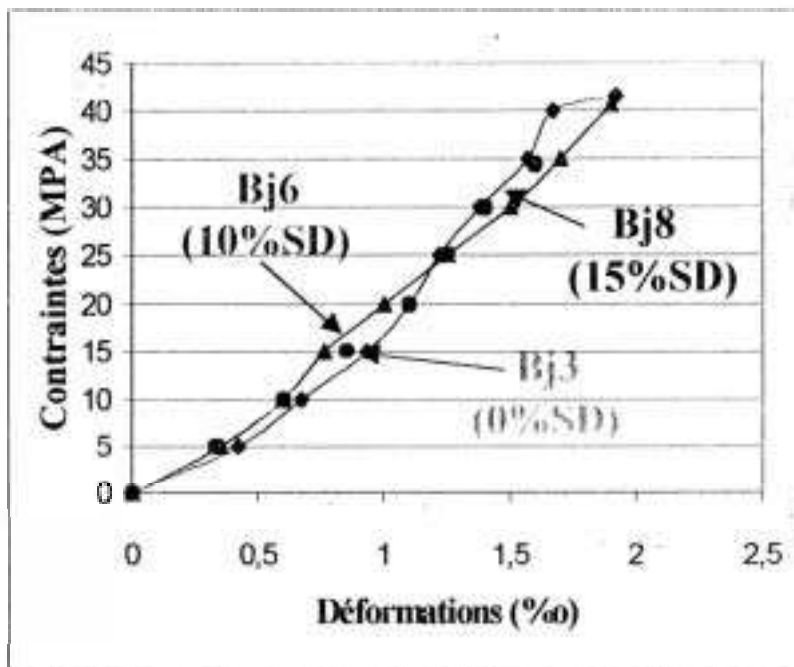


Fig III-10 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du % SD à 7j (E/C=0.28).

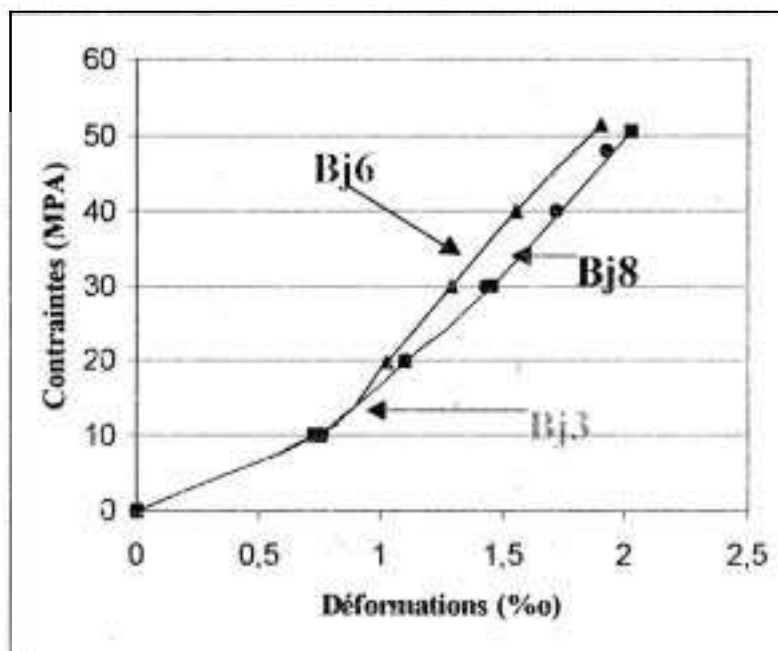


Fig III-11 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 en fonction du % SD à 28j (E/C=0.28).

A partir du **tableau III.6** et les figures **III.10** et **III.11** on déduit que :

- La maniabilité des **bétons** avec ajouts de SD est meilleure que celle sans ajouts surtout pour un dosage de 10% de SD (dont l'affaissement au cône d'ABRAHMS est de 7 cm au lieu de 4 cm sans ajouts). Le dosage de 15% de SD augmente **légèrement** la maniabilité (l'affaissement au cône d'ABRAHMS est de 5 cm) mais cette dernière reste faible comparée à celle obtenue avec 10 % de SD.

- Les masses volumiques à l'état frais et durcis sont améliorées en **présence** de 10 % de SD. Par contre **l'incorporation** de 15 % de SD **conduit** à un effet inverse.
- L'absorption capillaire des bétons avec ajouts de 10% de SD est légèrement inférieure à celle du témoin et du béton à base de 15% de SD.
- L'ajout de 10% de sable de dunes (SD) donne des résistances **con-**→arables à celles du témoin à 7j. A 28 jours les résistances sont **légèrement** supérieures ce qui est dû, outre le rôle de remplissage, à la réactivité pouzzolanique des sables de dunes broyés laquelle a été mise en évidence par **DRX** (III-7).
- L'ajout de 15 % de SD, diminue légèrement les résistances mécaniques à 28 j et ce en raison de la forte proportion d'inerte (15%) contenu initialement **dans** le témoin (**CPJ45**), et ce, malgré la réactivité pouzzolanique attribuée au sable de dunes broyé.
- L'ajout de CSF augmente les résistances mécaniques d'une manière significative dès le **7^{ème}** jour, même lorsque le pourcentage de CSF est porté à 15 %. Ceci confirme la plus grande réactivité pouzzolanique du CSF comparativement à celle du SD.

b- Bétons à base de CPA45 :

Les résultats de l'introduction de sable de dunes (SD) broyé dans les **bétons** en comparaison avec ceux sans ajouts sont présentés dans le tableau suivant :

Composition	Ba3	Ba6	Ba8
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450
E/C	0,28	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8	1,8
SD [%]	0	10	15
ρ_b frais [t/m ³]	2,556	2,556	2,539
ρ_b durcis [t/m ³]	2,527	2,515	2,51
Affaissement[cm]	5	7	6
A.C [g/cm ²]	2,8	2,8	3,5
Rt7j [MPa]	4,6	4,3	4,2
Rc7j [MPa]	45,0.8	42,5	40,5
Rt28j [MPa]	5,38	5,4	5,1
Rc28j [MPa]	52,6	53,2	51.5

Tableau III-7 : Influence des SD sur les propriétés physiques et **mé-aniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).**

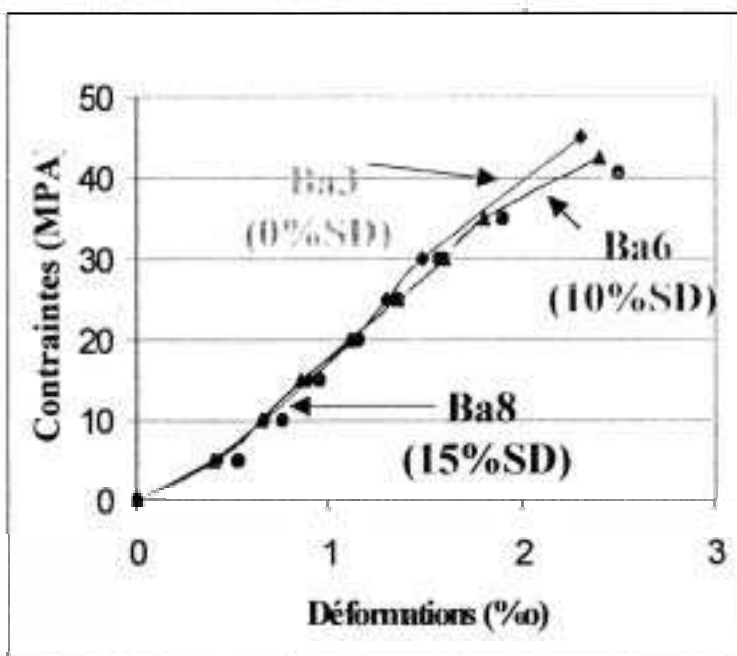


Fig III-12 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % SD à 7j (E/C=0.28).

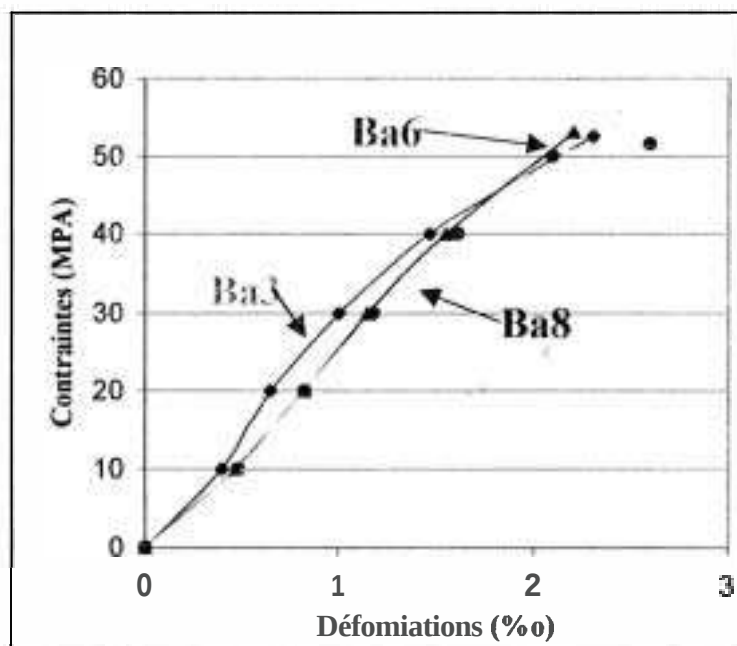


Fig III-13 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 en fonction du % SD à 28j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- La maniabilité des bétons à base de 10 et 15 % de SD est légèrement supérieure à ceux sans ajouts.

- Les masses volumiques à l'état frais et durcis des bétons avec de SD sont légèrement inférieures de ceux sans ajouts.
- L'absorption **capillaire** des bétons à base de 10 % de SD est inférieure à celles du témoin et des bétons à base de 15 % de SD.
- L'ajout de 10 % de SD donne des résistances comparables à celles du témoin à 7j. A 28 j les résistances sont légèrement supérieures à celles du témoin.
- A 10 % de SD, les résistances sont identiques à celles obtenues à partir de 10% de CSF mais à base de CPJ45 ce qui traduit le rôle important lié à la nature du ciment.
- L'ajout de 15 % de SD permet d'obtenir des résistances mécaniques supérieures à celles des bétons à base de CPJ seul.

III-4-3 Bétons avec Calcite :

Afin de mettre en évidence le rôle physique dû au remplissage, on a effectué des essais sur une variété de Calcite très pure et dont la surface spécifique est très élevée (supérieure à $10^4 \text{ cm}^2/\text{g}$ BLAINE). A ce titre on s'est intéressé **uniquement** à la substitution de 10 % de calcite aux différents ciments utilisés (CPJ45 et CPA45) ; Ce choix de 10 %, nous a été dicté par les meilleures performances des bétons à base d'ajout **siliceux** obtenus à partir de 10 % SD, et ce **indépendamment** du ciment utilisé.

a – Bétons à base de CPJ45 :

Composition	B,3	B,4
G1(3/8) [kg/m ³]	119,5	119,5
G2(8/15) [kg/m ³]	958,7	958,7
S(0/5/) [kg/m ³]	607,4	607,4
C [kg/m ³]	450	450
E/C	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8
Calcite [%]	0	10
ρ_b frais [t/m ³]	2,54	2,51
ρ_b durcis [t/m ³]	2,53	2,48
Affaissement[cm]	4	21
A.C [g/cm ²]	2,8	5,2
Rt7j [MPa]	4,5	3,6
Rc _{7j} [MPa]	41,6	28,4
Rt _{28j} [MPa]	4,89	4,1
Rc _{28j} [MPa]	50,6	36

Tableau III-8 : Influence de la calcite sur les propriétés physiques et **mécaniques** des bétons utilisant du CPJ45 (E/C=0,28).

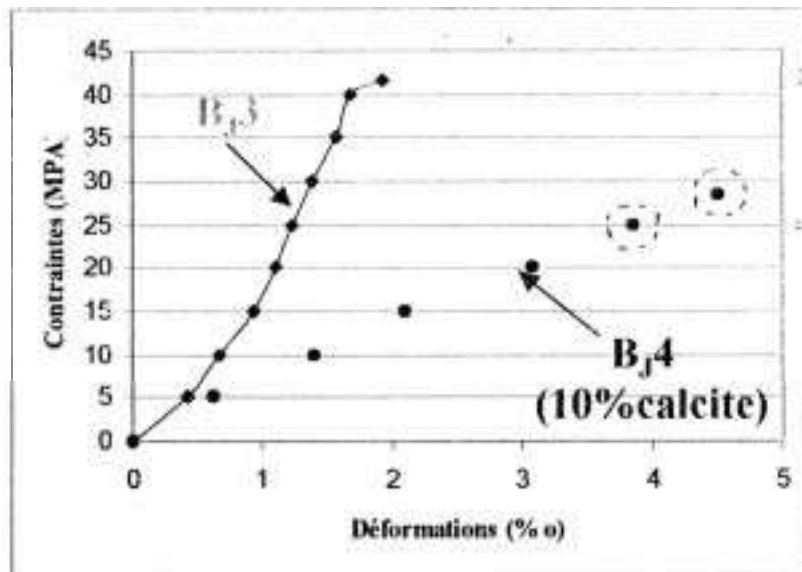


Fig III-14 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite à 7j (E/C=0.28).

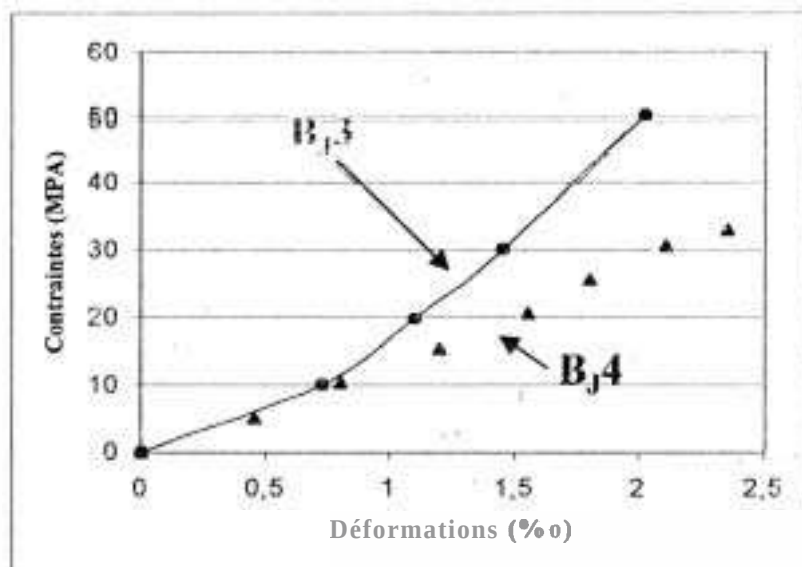


Fig III-15 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite à 28 j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- Les masses volumiques des bétons à base de 10 % de calcite sont inférieures à celles du témoin.
- La maniabilité des bétons à base de 10 % de calcite est nettement supérieure à celle des bétons sans ajouts (21 cm d'affaissement au cône d'ABRAHMS au lieu de 4cm). Ceci est dû à l'effet physique de la calcite qui a une grande finesse par rapport au ciment (SSB de

la calcite est supérieure à $1\text{m}^2/\text{g}$). En effet, de la même manière que les ajouts siliceux notamment les CSF, les grains constituant la calcite ayant des dimensions bien plus faibles que les grains du ciment, ils peuvent se substituer en partie à l'eau pour combler les vides entre les grains du ciment.

L'absorption capillaire des bétons à base de 10 % de calcite est supérieure à celle du témoin (5.2 g/cm^2 de 3 g/cm^2 sans ajout).

Les bétons avec 10 % de calcite ont des résistances mécaniques en compression et en traction à 7 et 28 jours inférieures à celles des bétons sans ajouts. En effet on remarque une diminution des résistances en compression à 7 et 28 j de l'ordre de 30 %. Cette diminution n'est pas aussi grande pour la résistance en traction (à 7 et 28 j respectivement on a obtenu 3.6 et 4.1 MPA avec 10 % de calcite au lieu de 4.5 et 4.89 MPA sans ajouts).

b – Bétons à base de CPJ45 avec ajout de 8% de SD et 2 % de calcite :

Ayant obtenus des résistances mécaniques élevées en présence de 10 % SD, à 28 j d'une part, et une consistance fluide en présence de calcite ($\text{Aff}=21\text{cm}$) d'autre part, on s'est donc proposé de conjuguer ces deux effets en incorporant dans nos bétons l'ajout de (8 % SD + 2 % calcite).

Composition	B ₃	B ₄	B ₆	B ₇
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450	450
E/C	0,28	0,28	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8	1,8	1,8
Ajouts [%]	0	Calcite 10	SD 10	2%Calcite +8%SD
pb frais [t/m ³]	2,54	2,51	2,551	2,535
pb durcis [t/m ³]	2,53	2,48	2,51	2,51
Affaissement[cm]	4	21	7	9
A.C [g/cm ²]	3	5,2	2,9	2,9
Rt _{7j} [MPa]	4,5	3,6	4,01	3,8
Rc _{7j} [MPa]	41,6	28,4	40,6	37
Rt _{28j} [MPa]	4,89	4,1	5,1	4,9
Rc _{28j} [MPa]	50,6	36	51,3	50,7

Tableau III-9 : Résultats obtenus avec différents pourcentages d'ajouts de SD et de Calcite sur bétons à base de CPJ45 avec E/C=0.28.

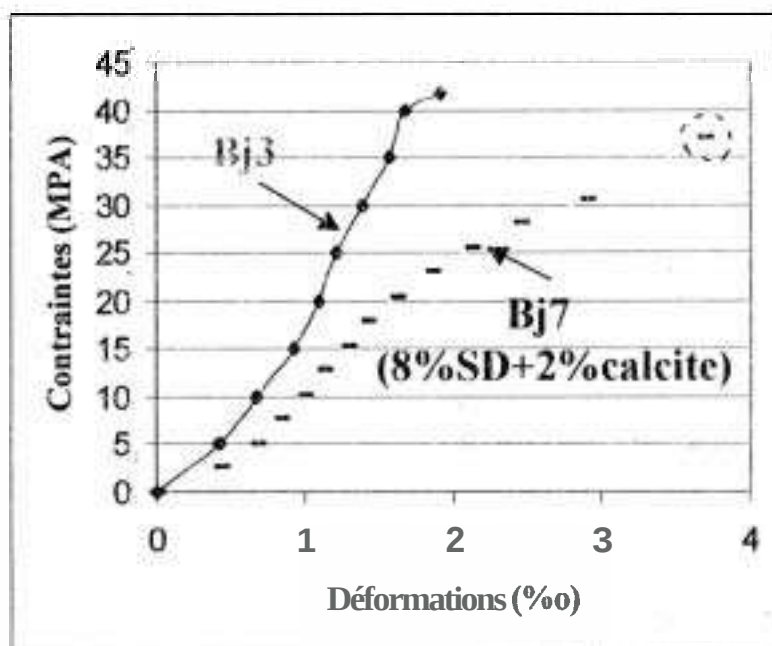


Fig 111-16 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajouts de 8% SD + 2% Calcite à 7 j (E/C=0.28).

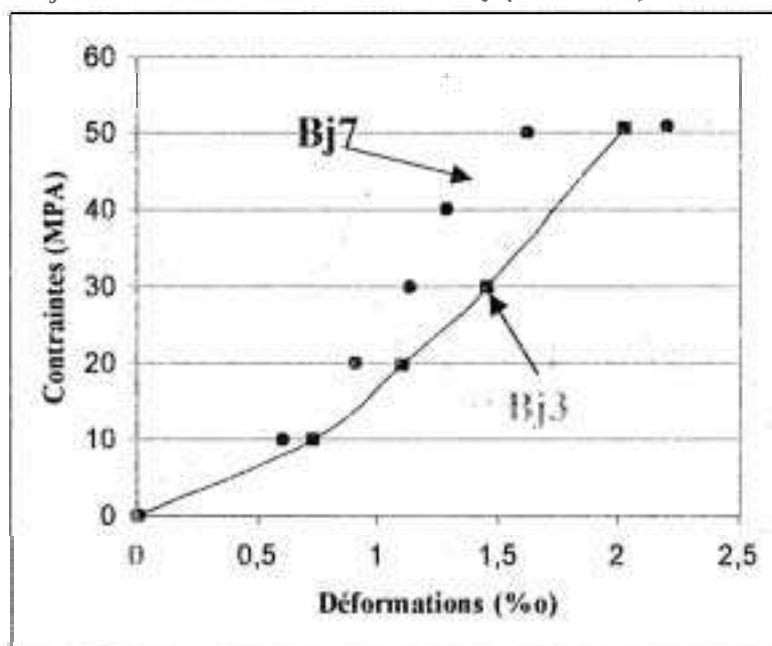


Fig III-17 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPJ45 avec et sans ajouts de 8% SD + 2% Calcite à 28 j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- Les masses volumiques à l'état frais et durcis de bétons à base de 8%SD+2%Calcite sont améliorées par rapport à ceux avec 10 % de Calcite et restent proches de celles du témoin et des bétons à base de 10% de SD.

- La maniabilité des bétons à base de **8%SD+2%Calcite** est supérieure à celle du témoin et du béton à base de 10% de SD (9 cm au lieu de 4 cm et 7 cm respectivement). Elle reste inférieure à celle de bétons à base de 10 % de Calcite (21 cm d'affaissement au cône d'ABRAHMS).
- L'absorption capillaire des bétons à base de **8%SD+2%Calcite** est inférieure à ceux du témoin et des bétons à base de 10 % de Calcite et reste égale à celle de bétons à base de 10 % de SD.

La présence de calcite de par sa grande **SSB > 10⁴ cm²/g** rend les bétons très maniables.

Notons que les résistances mécaniques à base de 10 % de SD sont nettement supérieures à celles obtenues avec 10 % de Calcite bien que cette dernière soit plus finement broyée. Cela traduit le rôle chimique joué par le SD et donc confirme une fois de plus l'activité pouzzolanique du SD montrée dans le paragraphe III-7.

c- Bétons au CPA45 avec ajout de 10 % de Calcite :

Les résultats obtenus avec et sans ajout de 10 % de Calcite sont présentés dans le tableau et les graphes suivants :

Composition	Ba3	Ba4
G1(3/8) [kg/m ³]	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450
E/C	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8
Calcite [%]	0	10
pb frais [t/m ³]	2,556	2,586
pb durcis [t/m ³]	2,527	2,49
Affaissement[cm]	5	15
A.C [g/cm ²]	2,8	4,8
R ₁₇ [MPa]	4,6	3,8
R _{c7j} [MPa]	45,08	29,5
R _{t28j} [MPa]	5,38	4,4
R _{c28j} [MPa]	52,6	38,7

Tableau III-10 : Influence de la calcite sur les propriétés physico-mécaniques des bétons utilisant du CPA45 (E/C=0.28).

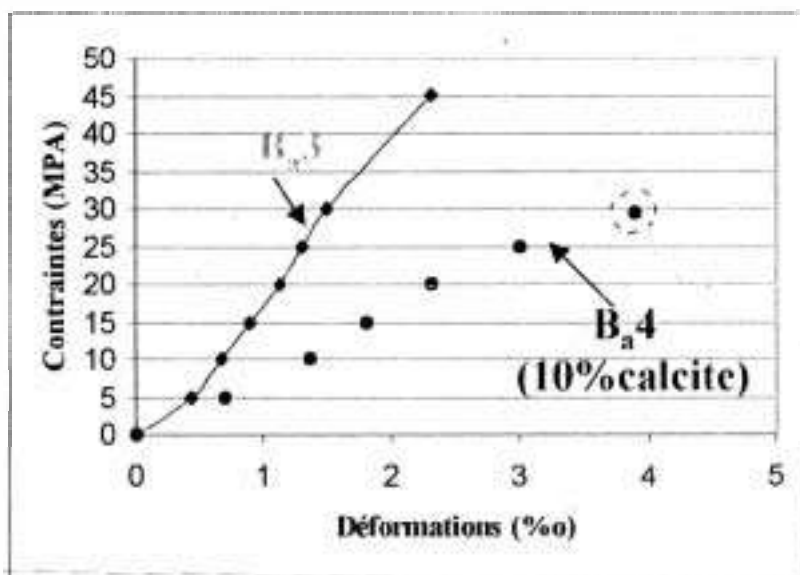


Fig III-18 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 à 7j avec et sans ajout de 10 % Calcite (E/C=0.28).

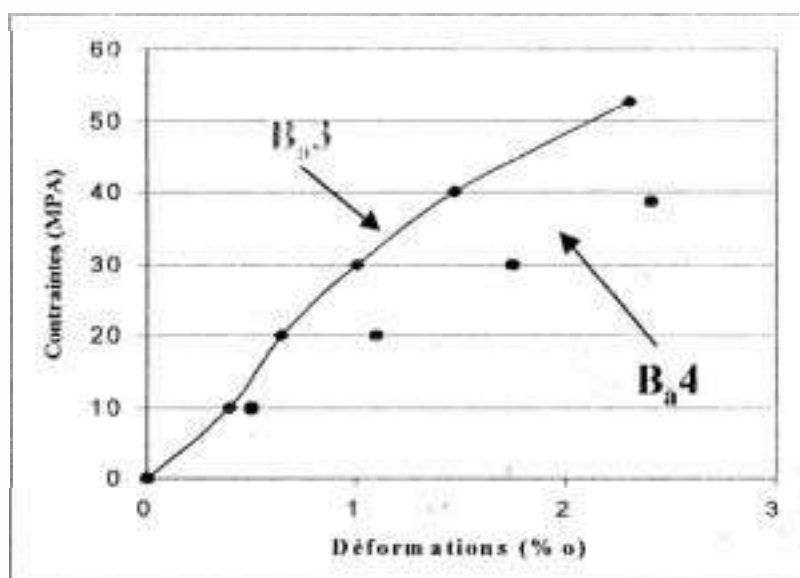


Fig III-19 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 10 % de Calcite 28j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- Les Wons à base de 10% de Calcite ont une masse volumique : apparente à l'état frais supérieure à celle du témoin au même rapport E/C=0.28 mais, à l'état durcis elle est inférieure (2.586 t/m³ avec 10% de Calcite au lieu de 2.556 t/m³ sans ajout à l'état frais et 2.49 t/m³ avec 10% Calcite au lieu de 2.527 t/m³ sans ajouts à l'état durcis). Ce phénomène est dû à une forte évaporation d'eau après durcissement des bétons avec 10% de Calcite.
- L'affaissement au cône d'ABRAHMS des bétons à base de 10% de Calcite est nettement supérieure à ceux sans ajouts (15 cm pour bétons avec 10% de Calcite au lieu de 5 cm sans ajouts).

- Les résistances en traction et en compression à 7 et 28 j des bétons avec 10% de Calcite sont inférieures à celles du témoin.
- Les déformations des bétons à base de 10% de Calcite sont supérieures à celles des bétons sans ajouts au même rapport E/C=0.28. On note que les déformations à la rupture à 7 jours entouré de cercles sont supérieures à 3.5 ‰ (voir Fig III-1, Fig III-14, Fig III-16, Fig III-18), ceci est probablement dû à leur surestimation lors de la lecture.

d- Bétons au CPA45 avec 8% SD+2% Calcite :

En raison de la maniabilité supplémentaire apportée par l'introduction de Calcite, on a réalisé des bétons à base de CPA45 avec 8% de sable de dunes broyé et 2 % de Calcite. Les résultats sont présentés dans le tableau et les graphes suivants :

Composition	Ba3	Ba4	Ba6	Ba7
G1(318) [kg/m ³]	119.5	119.5	119.5	119.5
G2(8/15) [kg/m ³]	958.7	958.7	958.7	958.7
S(0/5/) [kg/m ³]	607.4	607.4	607.4	607.4
C [kg/m ³]	450	450	450	450
E/C	0,28	0,28	0,28	0,28
SF [%]	1,8	1,8	1,8	1,8
Ajouts [%]	0	Calcite 10	SD 10	2%Calcite+8%SD
ρ_b frais [t/m ³]	2,556	2,586	2,556	2,527
ρ_b durcis [t/m ³]	2,527	2,49	2,515	2,51
Affaissement[cm]	5	15	7	13
A.C [g/cm ³]	2,8	3,0	2,2	1,9
Rt7j [MPa]	4,6	3,8	4,3	4,1
Rc7j [MPa]	45,08	29,5	42,5	41,5
Rt28j [MPa]	5,38	4,4	5,4	5,01
Rc28j [MPa]	52,6	38,7	53,2	53

Tableau III-11 : Résultats obtenus sur bétons à base de CPA45 avec; et sans ajouts de 10%SD, 10%Calcite et 8%SD+2%Calcite.

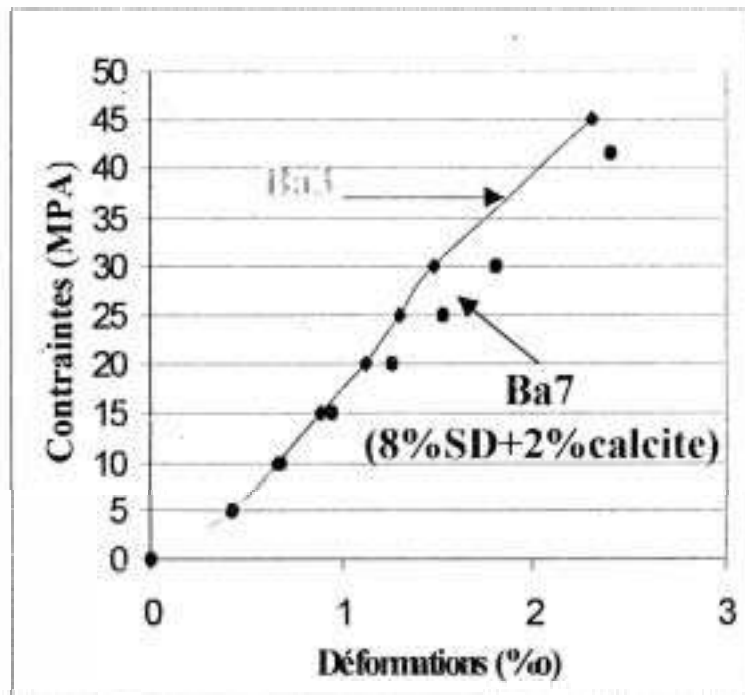


Fig III-20 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 8%SD+2%Calcite à 7j (E/C=0.28).

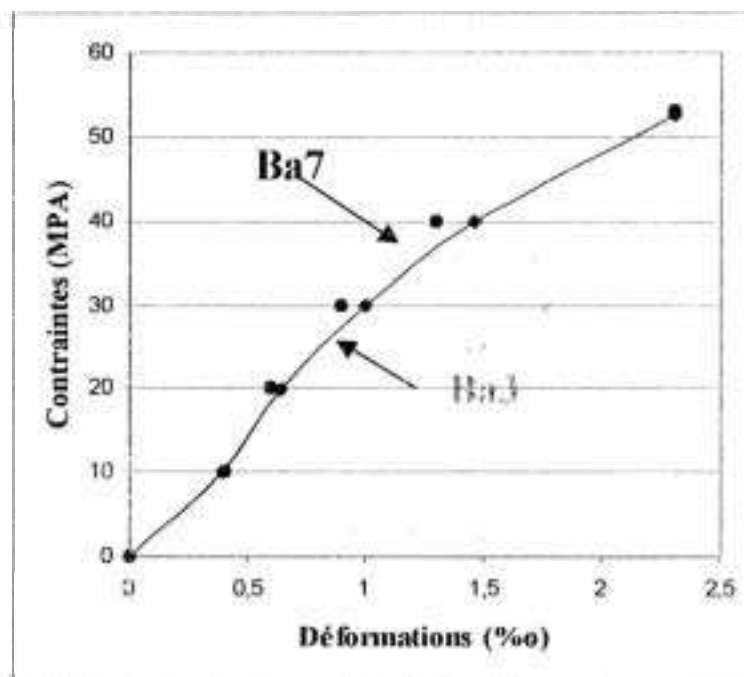


Fig III-21 : Diagrammes contraintes-déformations des bétons à base de CPA45 avec et sans ajout de 8%SD+2%Calcite à 28j (E/C=0.28).

Les résultats montrent que :

- La masse volumique apparente à l'état frais des bétons à base de 8%SD+2%Calcite est inférieure à celle du témoin et des bétons à base de 10% SD et 10% Calcite mais celle-ci

est supérieure à celles de bétons à base de 10% de Calcite à l'état durcis et reste comparable à celles de bétons à base de 10% SD.

- La maniabilité des bétons avec **8%SD+2%Calcite** est supérieure à celle du témoin et des bétons à base de 10% de SD mais reste inférieure à celle de bétons avec 10% de Calcite.
- L'absorption capillaire des bétons avec **8%SD+2%Calcite** est inférieure à celles du témoin et des bétons à base de 10% de SD ou de Calcite.
- Les résistances mécaniques des bétons à base de **8%SD+2%Calcite** sont comparables à celles des bétons à base de 10 % de SD à 7 et 28 j. Elles sont supérieures à celles des bétons à base de 10 % de Calcite.
- Les **déformations** des bétons avec **8%SD+2%Calcite** sont **supérieures** à celles du témoin.
- L'augmentation des résistances mécaniques est due au rôle **pouzzolanique** partielle du SD (voir sous chapitre III-7) et de la compacité des bétons à base de 2% **Calcite+8%** de SD.

III-5 Module d'élasticité statique des bétons avec et sans ajouts à 7 et 28 j :

Le module d'élasticité statique, a été évalué à partir des graphes contraintes-déformations en mesurant la pente correspondante au 1/3 de la résistance à la rupture pour chacune des différentes éprouvettes en bétons testées. Les valeurs de ces modules d'élasticités sont sériées dans les tableaux III.12 et III.13 qui résument l'ensemble des caractéristiques et propriétés **physiques** et mécaniques des bétons étudiés.

Composition	Bj1	Bj2	Bj3	Bj4	Bj5	Bj6	Bj7	Bj8	Bj9
C [kg/m ³]	450	450	450	450	450	450	450	450	450
E/C	0,42	0,32	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
SF [%]	0	1,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Ajouts [%]	0	0	0	Calcite 10	CSF 10	SD 10	2% Calcite+ 8%SD	SD 15	CSF 15
ρ_b frais [t/m ³]	2,51	2,51	2,54	2,51	2,56	2,551	2,535	2,53	2,543
ρ_b durcis [t/m ³]	2,43	2,492	2,53	2,48	2,555	2,51	2,51	2,51	2,537
Affaissement[cm]	5	17	4	21	8	7	9	5	6
A.C [g/cm ³]	9,8	5,3	3,0	2,7	2,0	2,9	2,9	4,0	1,20
R _{t7j} [MPa]	2,09	3,9	4,5	4,3	4,4	4,0	4,1	3,8	4,2
R _{c7j} [MPa]	22,6	37	41,6	28,4	46	40,6	37	34,5	45
R _{t28j} [MPa]	4,22	4,29	4,89	4,5	5,8	5,1	4,9	4,5	5,2
R _{c28j} [MPa]	35,6	41,8	50,6	36	53,4	51,3	50,7	48	54
E _{7j} [GPa]	5	12,9	22,7	4,7	29,4	21,9	17	16,1	25
E _{28j} [GPa]	23,1	25	31,4	12,8	37	33,9	32,6	30,5	40

Tableau III-12 : Récapitulatif des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques des bétons à base de CPJ45.

Les résultats obtenus sur bétons avec CPA45 sont présentés dans le tableau suivant :

Composition	Ba1	Ba2	Ba3	Ba4	Ba5	Ba6	Ba7	Ba8	Ba9
C [kg/m ³]	450	450	450	450	450	450	450	450	450
E/C	0,42	0,32	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
SF [%]	0	1,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Ajouts [%]	0	0	0	Calcite 10	CSF 10	SD 10	2%Calcite+ 8%SD	SD 15	CSF 15
ρ_b frais [t/m ³]	2,49	2,556	2,556	2,586	2,576	2,556	2,527	2,539	2,55
ρ_b durcis [t/m ³]	2,48	2,527	2,527	2,49	2,537	2,515	2,51	2,51	2,54
Affaissement[cm]	5	18	5	15	9	7	13	6	7
A.C [g/cm ³]	6,2	4,7	2,8	3,0	1,2	2,8	1,9	3,5	0,70
Rt _{7j} [MPa]	3,61	4,1	4,6	3,8	4,8	3,5	4,1	4,2	5,1
Rc _{7j} [MPa]	25,3	38	45,08	29,5	46,9	42,5	41,5	40,5	48
Rt _{28j} [MPa]	4,29	4,59	5,38	4,4	6,2	5,4	5,01	5,1	6,7
Rc _{28j} [MPa]	46,2	49,23	52,6	38,7	58	53,2	53	51,5	65,5
E [GPa]	10,6	15,7	23,6	11,1	30,5	22,8	19	19	44,1
E _{28j} [GPa]	24,4	27,2	32,7	15,9	39,5	34	33	32,3	45,8

Tableau III-13 : Récapitulatif des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques des bétons à base de CPA45.

Les résultats montrent que :

- Les modules d'élasticité calculés à partir des graphes **Contraintes-Déformations** pour les bétons à base de CPA45 sont supérieures à ceux des bétons à base de CPJ45.
- Le module d'élasticité le plus élevé est obtenu pour les bétons avec ajouts de fumée de silice à raison de 15 % du poids du ciment CPA45 à 28j et vaut 45.8 GPA.
- Les modules d'élasticité des bétons avec 10 % de Calcite sont les plus faibles, et ce, indépendamment du ciment et âge considérés.
- Les modules d'élasticité statiques augmentent avec le temps.
- Les modules d'élasticité statique augmentent avec la contrainte de rupture.
- Les modules d'élasticité statiques des bétons à base d'ajout de 8 % SD + 2% Calcite sont inférieures à ceux de bétons avec ajouts de 10 % de SD à 28 jours.
- Les modules d'élasticité statiques des bétons à base de 10 % de SC sont supérieures à ceux du témoin et des bétons à base de 15 % de SD, et ce, **indépendamment** du type de ciment utilisé.

111-6 Retrait total de bétons à base de CPA45 :

Les essais de retrait sont réalisés sur des éprouvettes 7x7x28 cm³ conservées à l'air libre à une température ambiante d'environ 25°C.

On a testé en premier lieu l'effet du rapport E/C sur le retrait du béton puis l'effet des ajouts (fumée de silice, sable de dunes broyé, calcite, combinaison de 8% de sable de dune broyé et 2 % de Calcite).

a- Effet du **rapport E/C** :

La figure III-22 montre l'évolution du retrait en fonction du temps et du rapport E/C des bétons à base de CPA45 :

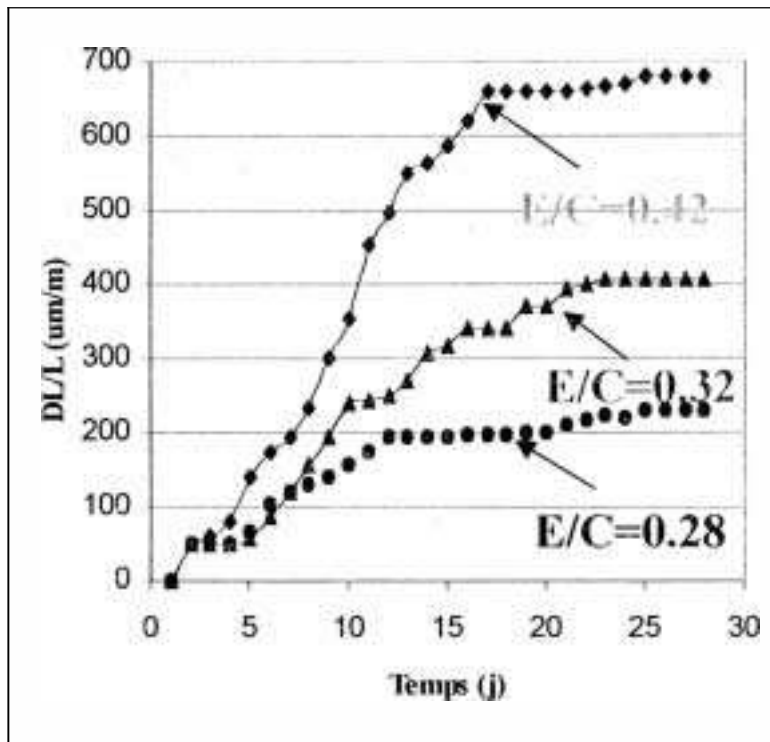


Fig III-22 : Influence du rapport E/C sur le retrait des bétons à base de CPA45.

Le graphe III-22 montre que le retrait du béton varie en fonction du rapport E/C. Les déformations dues au retrait diminuent quand le rapport E/C diminue. Cela nous confirme que la grande quantité d'eau introduite dans un béton crée un nombre important de pores capillaires et le séchage est ainsi augmenté.

b- Effet des ajouts :

L'effet des ajouts sur le retrait est montré dans le graphe suivant :

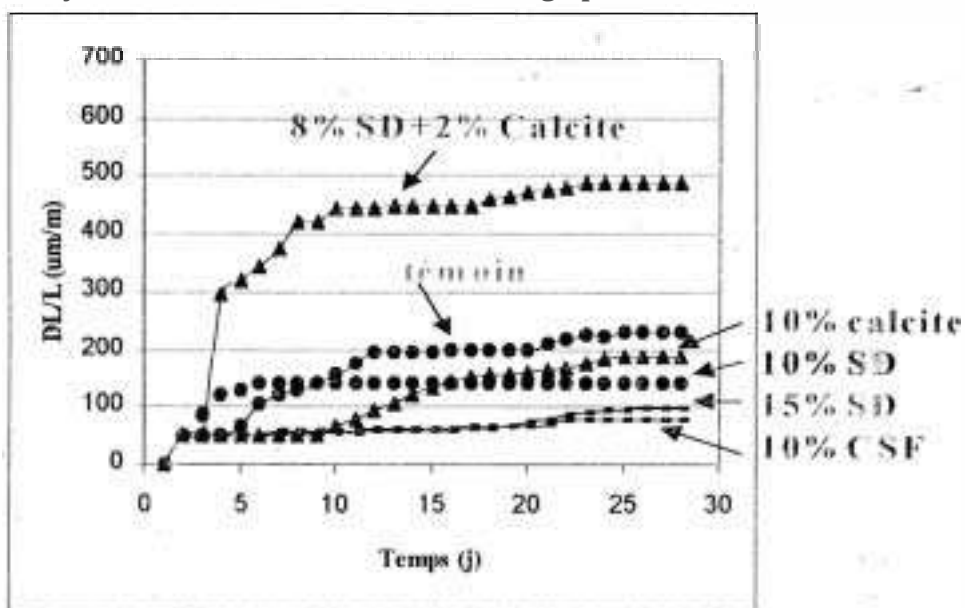


Fig III-23 : Influence des ajouts sur le retrait à E/C=0.28.

On constate d'après le graphe III-23 que les ajouts ont des effets **variables** sur le retrait, en effet, on a remarqué **que** les plus petites déformations dues au retrait par rapport au témoin sont obtenues avec ajout de 10 % de CSF et 15 % de SD. Les bétons avec ajout de **8%SD+2%Calcite** ont les déformations de retrait les plus importantes, les bétons à base des autres ajouts (10 % de SD ou Calcite) ont des déformations de retrait **inférieures** à celle du témoin.

III-7 Analyse par diffraction aux rayons X des pâtes de ciment avec différents ajouts :

Cette analyse nous permet d'identifier la nature des hydrates formés dans les pâtes de ciment avec les différents ajouts utilisés et de voir leur influence sur la microstructure des bétons.

Les résultats des **analyses** par diffraction aux rayons X des pâtes avec les **différents** ajouts **sont** représentés par les diffractogrammes X ci-après.

L'analyse a été faite ~~sur~~ des niélanges (**CPJ45+ajouts**) en pâte après une cure à 20°C de 17 jours dans des tubes en P.V.C fermés hermétiquement.

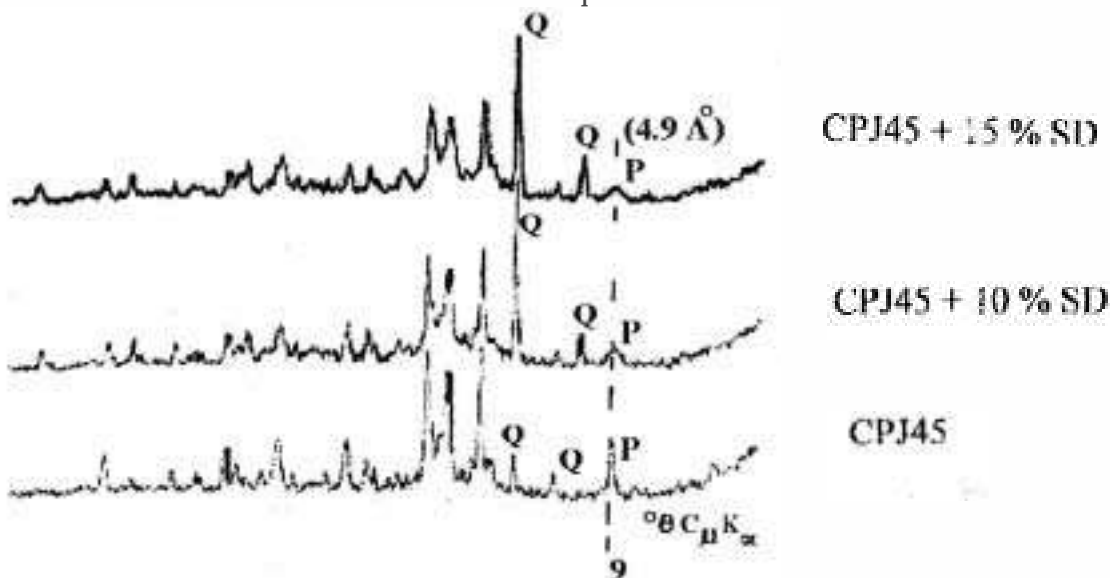


Fig III-24 : Diffractogramme aux rayons X des pâtes de CPJ45 avec et ~~sans~~ SD (t=17j).

On constate que la Portlandite formée lors des réactions d'hydratation **du ciment** en **présence** du sable de dune a été partiellement consommée. En effet, le pic lui **correspondant** a diminué **par rapport au témoin** (raie à 4.9Å°).

Cette diminution est proportionnelle au pourcentage du sable de dune **broyé** ce qui confirme qu'il y a eu réaction **pouzzolanique** entre le ciment et le SD.

La réactivité **pouzzolanique** du CSF est plus importante que celle du sable de dune, de par, la fixation de la totalité de Portlandite par 10 % CSF Fig III.25.

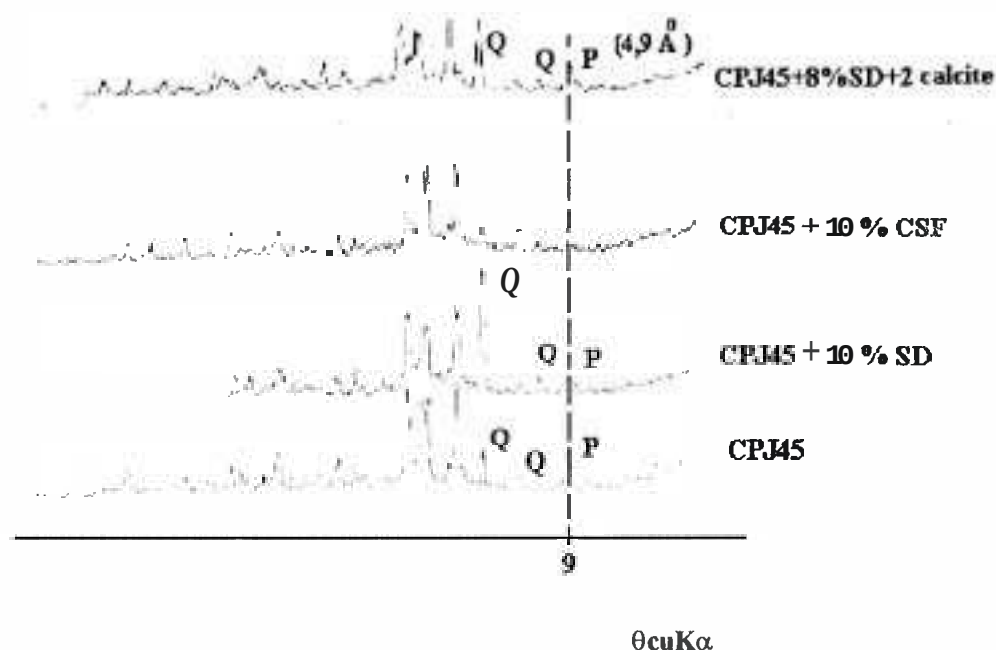


Fig III-25 : Diffractogrammes X des pâtes CPJ45 en présence des ajouts utilisés (t=17j).

La présence des ajouts ne modifie pas la nature des hydrates après 17 j de conservation (fig 111.24 et III.25).Celles ci montrent que la **portlandite** a été entièrement consommée par la **fumée** de silice mais partiellement par le sable de dunes broyé. On remarque aussi que la nature des hydrates formés dans le mélange CPJ45 + (8%SD+2%Calcite) n'a pas changé. Ceci confirme que le sable de dunes broyé n'est pas inerte et participe ainsi à la formation de nouveau CSH qui rendent la pâte plus dense et plus compacte mais celui ci (SD) n'atteint pas la performance obtenue sur pâte CPJ45 + CSF vue que les CSF sont **amorphes** et ont une grande surface spécifique (de l'ordre de 20 m²/g [B.E.T]).

III.8 Conclusion :

- 1- Les résistances mécaniques, tant en traction qu'en compression, des bétons à base de CPA sont supérieures à celles des bétons à base de CPJ45.
- 2- A proportion d'ajout constante (sous forme de substitution au ciment), les bétons à base de CPA ont des résistances supérieures à celles des bétons à base de CPJ45.
- 3- L'affaissement, même légèrement amélioré en présence d'ajout reste faible comparé aux résultats bibliographiques [5][14][52][62][65][66][67][68]. Ceci est lié aux natures différentes des ciments et adjuvants utilisés.
- 4- Pour les bétons à base de CPJ :
 - a- L'ajout de 10 % de sable de dunes broyé (SD) donne des résistances mécaniques comparables à celles du témoin à 7j. A 28 j les résistances sont **légèrement** supérieures

- ce qui est dû, outre le rôle de remplissage, à la réactivité pouzzolanique des SD, laquelle a été mise en évidence par D.R.X.
- b- L'ajout de 15 % de SD diminue légèrement les résistances mécaniques à 28 j et ce en raison de la forte proportion d'inerte (13%) contenu initialement dans le témoin (CPJ45) malgré la réactivité pouzzolanique attribuée au SD.
 - c- L'ajout de CSF augmente les résistances mécaniques d'une manière significative dès le 7^{ème} jour, même lorsque le pourcentage de CSF est porté à 15 %. Ceci confirme la plus grande réactivité pouzzolanique du CSF comparativement à celle du SD.
- 5- Pour les bétons à base de CPA :
- a- L'ajout de CSF contribue à augmenter les résistances mécaniques dès le 7^{ème} jour, elles sont nettement supérieures à celles du témoin (CPA) à 28 jours.
 - b- A 10 % de SD, les résistances sont identiques à celles obtenues à partir de 10 % de CSF mais à base de CPJ ce qui traduit le rôle important lié à la nature du ciment.
 - c- 15% de SD permet d'obtenir des résistances mécaniques supérieures à celles des bétons à base de CPJ seul.
 - d- Le retrait des bétons à base de 10 et 15 % de SD est nettement inférieure au témoin et s'approche des résultats obtenus sur bétons à base de 10 % de CSF.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Nous venons de mettre en évidence, à partir des essais mécaniques couplés aux résultats obtenus par D.R.X, qu'il est possible d'obtenir des bétons ayant des résistances mécaniques élevées en **substituant** du SD finement broyé.

Le pourcentage de **substitution** permettant d'atteindre des résistances **comparables** à celles des bétons sans ajouts est fixé soit à :

- 10 % de SD pour les bétons à base de CPJ.
- 15 % de SD **pour** les bétons à base de CPA.

Dans le cadre de la revalorisation des matériaux locaux tout en **garantissant** un gain économique certain, il est préférable d'utiliser le liant CPJ+10% SD, car ce dernier permet d'économiser 23 % de Clinker correspondant à 13 % d'inertes + 10 % de SD.

Il est **clair**, de par la très grande réactivité **pouzzolanique** des CSF dû à leur très grande **finesse** et leur état vitreux, qu'en présence de CSF on peut atteindre des **résistances** plus élevées (65.5 MPA à 28 j) néanmoins ces dernières (CSF) sont coûteuses.

L'ajout d'ultrafines de calcite permettant d'obtenir des bétons fluides (**affaissement** = 21cm) Pour de faible rapport E/C alors qu'en présence de CSF la **consistance** des bétons était plastique (Affaissement = 9cm) ce qui nous permet de conclure que le fluidifiant SF utilisé n'est pas compatible avec les ajouts siliceux (SD et CSF).

L'ajout de **8%SD + 2% Calcite**, nous a **permis** d'obtenir des **résistances** à 28 j comparables à celles de l'ajout de 10 % SD tout en améliorant la maniabilité des bétons (**Aff=9cm** avec CPJ et **Aff=13 cm** avec CPA). L'incorporation des 2 % de calcite, **contribuera** à long terme à augmenter les **résistances** mécaniques des bétons car la calcite (CaCO_3) **très** finement broyée empêchera la **conversion** des aluminates en C_3AH_6 en formant des **arboaluminates** [25] notamment dans les **cas** des bétons utilisant des granulats **siliceux**.

On a aussi mis en **évidence** que la portlandite formée lors des réactions d'**hydratation** du ciment en présence du sable de dune broyé a été partiellement consommée **ce** qui **confirme** que le sable de dune a un effet **pouzzolanique** partiel. dû à l'effet du **broyage**. Par contre la portlandite a été **totale**ment consommée en **présence de** CSF, ceci est **attribué** à la grande surface spécifique (de l'ordre de $20 \text{ m}^2/\text{g}$ [BET]) et à l'aspect vitreux des **grains** de CSF.

Les résultats **obtenus** par DRX ont confirmé **que** la nature des hydrates formés en présence d'ajouts n'a pas été **modifiée** comparativement à celle du témoin.

Le retrait des **bétons** avec ajouts (**10%CSF**, **15%SD** et **10%SD**) est **nettement** inférieur à celui du témoin.

Pour compléter ce travail nous recommandons de :

- Réaliser un **ciment** CPA à forte teneur en C3S et **faible teneur** en C3A **pour** avoir une classe vraie **élevée** qui permettra de réaliser **des** bétons à hautes performances en utilisant un fluidifiant **très** efficace.
- **Faire** des analyses par **diffraction** aux rayons X sur des pâtes de **(CPJ+SD)** à long terme **afin** de voir l'**évolution** de la réaction **pouzzolanique** dans le temps.
- **Faire** des essais **supplémentaires** sur le retrait des bétons avec ajouts de SD et de la combinaison (**8%SD+2%calcite**) et voir la possibilité de projeter leur **utilisation** dans les structures en **bétons** précontraints.
- **Faire** des essais **permettant** d'évaluer les déformations différées des **bétons** avec ajout de SD.

- Voir la possibilité d'améliorer la réactivité pouzzolanique du sable de dune, par un broyage poussé au point d'atteindre des surfaces spécifiques supérieures à $1 \text{ m}^2/\text{g}$.
- Faire des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) pour déterminer la morphologie des hydrates formés.

Bibliographie

Classée par ordre d'apparition dans cette thèse.

- [1] : **M.VENUAT** : « Adjuvants et traitements (techniques modernes d'amélioration des ouvrages en Eton) »— ouvrages auto – Edition Moniteur, 1^{ère} édition. Paris. 1984.
- [2] : **V.S.RAMACHANDRAN** : Concrete Admixtures Handbook – Noyes Publications , Park Ridge, N.J, USA, 1984 .
- [3] : **C.Jolicoeur, P.C.NKIMUBANZI, M.A.SIMARD and M.PIOTTE** : Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete ,4th CANMET/ACI International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete , ACI SP-148, Montréal, october 1994.
- [4] : **P.C.AÏTCIN, C.JOLICOEUR, and J.G.MAC GREGOR** : Superplasticizers : How they work and why they occasionally don't. «Selected papers on high performance concrete » in {Béton concrete Canada}, pp 93-127, 1994.
- [5] : **P.C. AÏTCIN, M.BAALBAKI** : Admixtures key components of durable concrete Presented at CONTECH 94 International RILEM workshop on Technologie Transfer of the trends in concrete, Barcelona, Spain, nov 1994.
- [6] : **MINDESS S, YOUNG.J.F**, « concrete », Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ pp15 (1981).
- [7] : **GARRISSON, E.G** : A history of engineering and Technology, CRC Press ,Boca Raton, Fa, pp.106 (1991).
- [8] : **P. De LARRARD** : Thèse de Doctorat: Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, L.C.P.C 1988.
- [9] : **DODSON. V** : Concrete Admixtures, Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A, 211 pp (1990).
- [10] : **GAGNE.P, M.X** thesis. Université de Sherbrooke, 1993.
- [11] : **GERHARD RAU and P.C. AÏTCIN** : Diffrent types of Silica Fumes, les éditions de l'université de Sherbrooke 1983.
- [12] : **G.RATE, G.RAV and P.C. AÏTCIN**: Different types of condensed Silica Fume for the production of Forrisilicon and Silicon metal, 1983.
- [13] : **M.N. OUDJIT** : Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment Portland. Thèse de Docteur Ingénieur, I.N.S.A. TOULOUSE, 1986.
- [14] : **F.De LARRARD et F.GORSE** : efficacité comparée de divers fumées de silice comme additif dans les bétons à hautes performances. BULL Liaison P et CH 168, juillet - août 1990.
- [15] : **M.BUIL** : Comportement physico-chimique du système ciment - fumée de silice .I.T.B.T.P. No 483. mai 1990.
- [16] : **J.P.OLIVIER, A.C.GIBERGUES et B.HANNA** : Activité pouzzolanique et action de remplissage d'une fumée de silice dans la matrice de bétons de hautes performances, cement and concrete research, vol.18, pp.438-445, 1988.
- [17] : **F.De LARRARD, P.C. AÏTCIN** : Physico-chemical properties of condensed silica fume 1983.
- [18] : **BACHE, H.H** : Densified cement ultrafine particle based Material. The second international conference on superplasticizers in concrete, OTTAWA, june, 1981 pp.185-213.
- [19] : **M.N.OUDJIT** : « influence des ajouts naturels et artificiels sur la prise et le durcissement des bétons et mortiers », DEA, I.N.S.A de TOULOUSE 1981.
- [20] : **M.N.OUDJIT** : « Influence du carbone imbrûlé sur la réactivité de: fumées de silice condensées en présence du ciment portland » dans ({Conférence Internationale sur la sismicité,

le Génie parasismique et la gestion des catastrophes naturelles en Algérie **IGC/USTHB**, ALGER 1999.

[21]: **P.CAÏTCIN, A.CARLES-GIBERGUES, M.N.ODJIT et A.VAQUIER** : « Influence des éléments autres que Si sur la réactivité des fumées de silices ». 8 Congresso International de Quimica do cimento. Thème 3 volume IV Rio de Janeiro Brésil. 1986.

[22]: **DUTRUEL, F.ESTOUP, J.M** : Effect of addition of silica fume or pouzzolanic fines on the durability of concrete products 1984.

[23]: **J.SKALNY, J.F.YOUNG** : Mécanisme d'hydratation du ciment portland, sous thème II-1, 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments, vol.1. Paris 1980.

[24]: **E.PARAMICHALI** DEA : Etude de la vitesse de fixation de l'eau dans les pâtes de ciment Portland 1980.

[25]: **J.P.OLIVIER** : Thèse d'état : Contribution à l'étude de l'hydratation de la pâte de ciment Portland au voisinage des granulats, Toulouise, France(1981).

[26]: **REGOURD et Al** : Résistance du béton aux facteurs physico-chimiques. Thème 111. P 104. 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments Paris 1980.

[27]: **CALLEJA** : Durabilité, 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments Paris 1980.

[28]: **B.PERRIN** : Observation en microscopie électronique des caractères morphologiques de la liaison pâte de ciment durci – matériaux associés. Thèse de Docteur Ingénieur Toulouise (1974).

[29]: **J.P.OLLIVIER** : Etude de la liaison entre la pâte de ciment portland et les granulats par observation directe au microscope électronique par transmission. Thèse de Docteur Ingénieur Toulouse (1975).

[30]: **F.MASSAZA, M.PEZZDOLI** : Ciment past-quartz bond in autoclaved concretes , . 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments Paris 1980 VII .16 tome III.

[31]: **G.P.TOGNON et Al** : Bond strength in very high strength concrete. 7^{ème} congrès international de la chimie des ciments Paris 1980 VII .75.tome III.

[32]: **P.CAÏTCIN** : La technologie des bétons à hautes résistances en Amérique du nord, 1987.

[33]: **BURGH.T.A** :14000 Psi within 24 hours. ACI Annual convention. Atlanta, January 1982, pp.1-23.

[34]: **M.MRANVILLE, REGOURD** : Microstructure des bétons à hautes performances. Les BHP, édition E.N.P.C 1990.

[35]: **GRUTZECK, M.ROY, D.M, WOLF CONFED** : Mechanisms of hydration of Portland cement composites containing Ferrosilicon Dust .4th international conference on cement microscopy, LAS VEGAS, April 1982, pp.193-202.

[36]: **Y.OHAMA, K.DEMURA** : Process technology and properties of super high strength concrete made by polymer impregnation of silica fume concrete 1986.

[37]: **WOLSIEFER** : Ultra high strength field placeable concrete with silica fume admixture. Concrete international, vol .6, N°4, 1984, pp.25-31.

[38]: **MICROPEZ**-Aid Material for cement-based products. Notice Norcem Cement , , NORVEGE ,1982 , 23p .

[39]: **T.C.HOLLAND, A.KRYSA, M.D.LUTHER, T.C.LIU** : Use of silica fume concrete to repair abrasion – erosion damage in Kinzua dam stilling basing 1986.

[40]: **M.BUIL** : Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante –rapport de recherche L.P.C No 92 PARIS 1979.

[41]: **A.M.PAILLERE, M.BUIL, J.J.SERRANO** : Bétons à très hautes performances par optimisation de l'emploi de fluidifiant et de fibres d'aciers –à paraître dans Proceeding of AIPC Congress, PARIS 1987.

[42]: **HJORTILL** : Microsilica in concrete – Nordic concrete research publications Nol, pp Y, p.1-18 Nordic concrete Federation ed . OLSO 1982.

- [43] : GJORV O.E, JOHANSEN R. et Al : Silica in concrete, SINTEF Report No STF A81 031, TRONDHEIM (NORVEGE) 1982.
- [44] : OMAHA Y, MURANISHI R : Influence of curing conditions to the compressive strength of concrete mixed with silica fume, Annual conventions of JAPAN Architectural Engineering Association (structural division), sept 1983 ,pp.96-70.
- [45] : SEKLS, MORIMOTO.M, YAMANE.N : Recherche expérimentale sur l'amélioration du béton par l'incorporation de sous-produits industriels • Annales de l'I.T.B.T.P No 436 – juillet –août 1985.
- [46] : MBUIL, PACKER : Creep of a silica fume concrete cement and concrete research,1985.
- [47] : T.YAMATO, Y.EMATO, M.SOEDA : Strength and freezing –and- thawing resistance of concrete incorporating CSF 1986.
- [48] : BACHE, H.H : Densified cement ultra-fine particle-based materials. The second International conference on superplasticizers in concrete, OTTAWA, june 1981, pp.185-213.
- [49] : HERTZ : Heat induced explosion of dense concretes – Institute of building design- Report No 6 –LINGEY, DENMARK 1984.
- [50] : S.T.SHIRLEY, R.G.BURG, A.H.FIORTATO : Fire endurance of high strength concrete slabs. ACI Meeting • SAN ANTONIO 1987.
- [51] : P.C.AITCIN, M.REGOURD : The use of condensed silica-fume to control alkali silica reaction - a field case study – cement and concrete research , vol.15, pp.711-719 1985.
- [52] : P.F.RADJY, T.BOGEN, E.J.SELLEVOED, K.E.LOELAND : A review of experiences with condensed silica-fume concretes and products-proceeding of the 2nd international conference of fly ash ,silica-fume , slag and natural pozzolans in concrete ,ACI S-P-91 ,MADRID 1986.
- [53] : P.C.AITCIN : historical data on the use of condensed silica-fume 1983.
- [54] : ILLISABELLE : Development of a canadian specification for silica-fume in proceeding of 2nd international congress on fly ash, silica-fume, slag and natural pozzolans in concrete, ACI SP-91 , MADRID 1986 .
- [55] : A.PARISOT :Bilan économique des BHP – session de formation continue ENPC – PARIS – octobre 1986.
- [56] : B.K.BARDHAM-ROY : Applications of high strength concrete in the construction of national day parade grandstand at ABU-DI-HABI UAE 1986 .
- [57] : L.ZHANG, F.MEN-LIN, W.PEI-GANG : The applications of high strength concrete to long span arch gates 1986 .
- [58] : LERCH : Adjuvants et traitement techniques modernes d'amélioration des ouvrages en béton, par Mer VENUAT Application aux bâtiments et aux travaux publics, 1^{ère} édition 1984.
- [59] : NABILA.A.ALFADHLI : « Contribution à l'étude du comportement des ciments actuels - Applications sur chantier : maniabilité, temps de prise et durcissement », N° 469, pp 7-27. Décembre 1988.
- [60] : YVES. MALLIER : Les bétons à hautes performances caractérisation, durabilité, applications.
- [61] : R.DUPLAIN – R.LANCHON,J.C.SAINT ARROMAN : Granulats, sols, ciment et bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, édition CASTEILLA 1995.
- [62] : F.De LARRARD et C.BOULAY : Comportement post - rupture du béton a hautes ou très hautes performances soumis en compression –Bull.Liaison, L.P.C, 17., mai -juin 1992.
- [63] : FRANCIS GORISSE : Essais et contrôle des bétons, édition EYROLLES 1978.
- [64] : ROUAHES, B.DEVELLEZ : Chimie générale, OPU, 2^{ème} édition; Alger 1981.

[65] : **PASCAL ROUGERON** and **PIERRE CLAUDE AÏTCIN** : Optimization of the composition of a high **performance** concrete, **published in** cement, concrete and aggregates, vol.16, No 2, **december** 1994.

[66] : **MINH.TAN.DO**, **ISABELLE SHALLER**, **FRANCOIS DE LARRARD** et **PIERRE CLAUDE AÏTCIN** : Fatigues ~~des~~ bétons a hautes performances sept 1995.

[67] : **BOUBAKIR LYES** : Elaboration et étude d'un béton à hautes performances, Thèse de **Magister**, E.N.P 1999.

[68] : **K.ARROUDJ** : Influence des ajouts sur la prise et le durcissement des bétons, thèse de Magister, IGC/USTHB, 2001.

CIMENT PORTLAND CPJ 45

DEFINITION

Le ciment portland composé CPJ 45 résulte de la mouture:

- D'au moins 65 % de CLINKER PORTLAND
Du complément à 100 % d'un ou plusieurs constituants secondaires: (laitier, filler calcaire, etc...)
- De sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.



CE CIMENT EST CONFORME A LA NORME NF P 15 301

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

La proportion des sulfates SO₃ dans le ciment est inférieure à 4 %.

- La teneur en CHLORURE est inférieure à 0,05 %.

CARACTERISTIQUES PHYSICO MECANQUES

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

EMPLOIS COURANTS

- Maçonnerie.
- Béton courant (non armé ou faiblement armé).
Béton armé sollicité.
- Travaux de fondation en milieu non agressif.
- Béton routier.
- Travaux en grandes masses moyennement sollicités qui exigent une chaleur d'hydratation modérée.

CONTRE-INDICATIONS:

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

MARQUAGE

CIMENT PORTLAND		
COMPOSE CPJ		
45	50KG	NF
MOYENNE	P15-301	