

4/97

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

projet de fin d'étude

**ELABORATION D'UN CIMENT A
PRISE RAPIDE**

ETUDIE PAR:

DEBRI OUAHAB SALIM
SKOUDARLI AHMED

PROMOTEURS:

Pr: A.BALI
Pr: M.T.ABADLIA
Dr: R. BOUTEMEUR

promotion: juillet 1997

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

projet de fin d'étude

**ELABORATION D'UN CIMENT A
PRISE RAPIDE**

ETUDIE PAR:

DEBRI OUAHAB SALIM

SKOUDARLI AHMED

PROMOTEURS:

Pr: A.BALI

Pr: M.T.ABADLIA

Dr: R. BOUTEMEUR

promotion: juillet 1997

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos promoteurs: *M^r A.BALI* professeur à l'ENP pour nous avoir proposé un sujet aussi passionnant, et avoir dirigé et suivi avec intérêt notre travail; pour sa sollicitude, ses conseils et ses encouragements permanents, *M^r M.T.Abadlia* professeur à l'INMC pour nous avoir permis de bénéficier de son suivi de son expérience et de ses conseils, et *Dr.R.Boutemour* pour sa disponibilité et ses conseils précieux dans l'élaboration et l'étude du programme d'essai béton.

Nous remercions *Ami Rabah* pour son aide au laboratoire de l'INMC Boumerdes et *M^r Hadj Rabia* Ingénieur à la cimenterie R.Hamidou.

Un très grand merci pour *Sofiane, Sid Ahmed, K.Mohamed,*
M^r et M^{me} Merzougui, Alilou et M^r Hadj Rabia.

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

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

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail,

A la Mémoire de ma grand mère

A mes très chères parents

A ma soeur *ASSIA*

A mon frère *Nabil* et a son nouveau né *Aymene*

A mon oncle *Abdelhafid*

A ma tante (ma mère) *Sakina*

A toute ma famille habitant Constantine, Annaba et Tunisie

A tous mes amis; particulièrement *Kamel; Sofiane; Fayçal;*

Réda; Khaled; Abdelrahmen; Ameur et yacine

A mon amie *Drra*

DEBRI OUIASAB SALIM

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail,

A mes très chères Parents

A mes deux Grands Mères

A mes Frères & Soeurs

A ma petite nièce "SARA"

A mes neveux *OUSAMA & ASMA*

A toute la famille *KHELLAS*

A tous mes amis en particulier le magnifique *KHELLAS*

AHMED

A tous ce qui ont participé que ce soit de près ou de loin à la

réalisation de ce mémoire

SOUVDARLI AHMED

SOMMAIRE

INTRODUCTION	01
METHODES DE TRAVAIL	03

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE I: GENERALITES DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL

1-1 Définition	04
1-2 Propriétés Générales	04
1-3 Les différentes catégories de C.P.A	04
1-4 Les ciments et la normalisation.....	05
1-5 Les classes de résistance et les caractéristiques principales	06
1-6 Domaine d'emploi principaux des C.P.A et C.P.J	07
1-7 Les constituants des ciments	08
1-8 Matières premières utilisées dans la fabrication de C.P.A	10
1-9 Les constituants minéralogique du clinker	12
1-10 Caractéristiques des composés formés	14
1-11 Mécanisme de formation des minéraux	15
1-12 Composition chimique	16
1-13 Processus d'hydratation des constituants du ciment	19
1-14 La prise des ciments et les catalyseurs d'hydratation	24

CHAPITRE II: CHOIX DES MATERIAUX

2-1	Introduction	25
2-2	Méthodes de fabrications du ciments	28
2-2-1	Préparation du cru	28
2-2-2	Cuisson par voie sèche	29
2-2-3	Cuisson par voie humide	33
2-2-4	Refroidissement	36
2-3	Gravillons	39
2-3-1	Résistance mécanique du granulat	39
2-3-2	Granulométrie	40
2-4	Sable	43
2-4-1	Courbe granulométrique	43
2-4-2	Module de finesse d'un granulat	43
2-5	Eau de gâchage	44

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE

3-1	Introduction	45
1	SSB surface spécifique de blaine	45
2	Consistance normale	46
3	Début et fin de prise	47
4	Résistance a la compression	48
5	Action de chlorure de calciume	49
6	Finesse de mouture	51

3-2	Broyage du ciment -----	52
3-3	Mésure de la SSB -----	52
3-4	Essais de consistance sur les ciments de référence -----	53
3-5	Début et fin de prise des ciments a différentes SSB avec 0%, 0,5%, 1%, 2% de CaCl₂ -----	54
3-6	Essais de début et fin de prise des ciments de référence, en fonction des différentes SSB -----	57
	* Interprétations des résultats -----	57
	* Conclusion -----	61
3-7	Combinaison de l'action du CaCl₂ et celle de la SSB -----	61
	3-7-1 Essais de DP et FP pour un broyage de 3h -----	61
	3-7-2 Essais de DP et FP pour un broyage de 4h -----	62
	3-7-3 Essais de DP et FP pour un broyage de 5h -----	62
	3-7-4 Essais de DP et FP pour un broyage de 6h -----	63
	* Interprétations des résultats -----	63
	* Conclusion -----	69
3-8	Essais de compression -----	70
	3-8-1 Les ciments de référence -----	70
	3-8-2 Les ciments spéciaux -----	70
	* Interprétation des résultats -----	70
	* Conclusion -----	74
	CONCLUSION -----	75
	* Pour la SSB -----	75
	* Pour le CaCl₂ -----	75
	CONCLUSION GENERALE -----	76
	BIBLIOGRAPHIE	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Introduction

Le ciment reste un matériau complexe pour la plupart des ingénieurs qui conçoivent et construisent des ouvrages dans le domaine du génie civil. Mélangé à un agglomérat, non cohérent de granulats, de sable, d'adjuvant et d'eau, le ciment possède, en effet, la capacité de transformer cet ensemble en un solide, de béton.

Les performances mécaniques et la durabilité, toujours plus élevées des bétons, en font les matériaux de choix pour la construction économique d'ouvrages de toute nature.

Quand on a affaire à une catégorie déterminée de ciments, l'une des caractéristiques indispensables, c'est non seulement la régularité dans la finesse de mouture, le retrait escompté, les résistances à prévoir dans les conditions normales de gâchage, de prise et de durcissement, mais c'est également la régularité du commencement de la prise dans des conditions bien définies de gâchage. Il est indispensable pour la bonne réussite des travaux que le metteur en œuvre puisse savoir, avec une précision suffisante, à quel moment son béton commencera à faire prise, puis durcir.

Le but de notre travail consiste à établir un ciment à prise rapide à partir d'un CPJ 45 ordinaire.

Cette étude permettra l'utilisation de ces nouveaux ciments pour des travaux qui exigent de hautes résistances initiales :

- décoffrage rapide
- travaux aériens ou hydrauliques en béton armé
- la préfabrication
- traitement rapide des dégâts qui peuvent toucher les édifices stratégiques, tels que les aéroports, barrages, centrales nucléaires, ponts, routes, ports, installations industrielles, centrales de production d'électricité, plate formes pétrolières.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et encourageants.

Notre étude est structurée en deux parties.

La première partie porte sur les travaux antérieurs et axés sur la théorie employée.

La deuxième partie, essentiellement expérimentale, décrit les essais effectués et l'interprétation des résultats.

Méthode de travail

Il y a des facteurs qui influent sur la durée de prise ; ce sont, d'une part, les conditions ambiantes car la température accélère généralement la prise et le froid la retarde. Ce sont, d'autre part, les additions éventuelles de certains produits aux ciments et qu'on désigne sous le nom de catalyseur d'hydratation.

Certains de ces produits peuvent avoir une grande influence sur la modification de la durée de prise.

Si l'on emploie des produits chimiques pour agir sur la durée de prise, il faut que ces produits soient rigoureusement dosés pour éviter des détériorations et effets néfastes au moment de l'utilisation.

Parmi les facteurs qui influent aussi sur la durée de prise, on trouve la finesse de mouture qui a une grande influence sur la caractéristiques du ciment (l'hydrolyse et l'hydratation plus ou moins accélérées).

Pour notre étude, on utilisera, comme addition chimique le CaCl_2 (chlorure de calcium) et on procédera à un broyage du ciment CPJ 45, afin d'arriver à une SSB (finesse de mouture) qui nous permettra d'atteindre le but de notre étude.

PARTIE
THEORIQUE

CHAPITRE I

*GENERALITES DU CIMENT PORTLAND
ARTIFICIEL*

GENERALITES DU CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL

1-1 DEFINITION:

Le ciment portland est un liant hydraulique durcissant à l'air et dans l'eau. C'est le produit du broyage fin du clinker portland et du gypse naturel (teneur inférieure à 5%). Le clinker portland est le produit de la cuisson des températures supérieures à celles du frittage (1450°C près) d'un mélange de composition bien définie des matières premières (généralement du calcaire et de l'argile). Le gypse naturel est ajouté au clinker portland pour régler le temps de prise des ciments. Dans certains cas on ajoute au clinker portland des ajouts minéraux (actifs et inertes) et des fillers.

1-2 PROPRIETES GENERALES:

Les ciments sont des liants hydrauliques formés de constituants anhydre cristallisés ou vitreux, renfermant essentiellement de la silice, de l'alumine et de la chaux et dont le durcissement est principalement dû à la formation par combinaison de ces constituants anhydres avec l'eau. Le mélange de ciment portland avec l'eau une pâte plastique qui au bout d'un certain temps fait la prise et durcit progressivement avec la formation d'un corps solide. La prise du ciment portland est la réduction de la maniabilité de la pâte et le passage de la pâte de l'état plastique à l'état solide. La prise et le durcissement des ciments comportent les processus d'hydratation des minéraux de clinker portland et de cristallisation des composants hydratés.

1-3 LES DIFFERENTES CATEGORIES DE C.P.A:

- Le ciment portland artificiel pur (C.P.A): il contient au moins 97% de clinker et pas plus de 3% de fillers.

- le ciment portland composé (C.P.J): il contient au moins 65% de clinker et au plus de 35% d'autres constituants: pouzzolane, cendres volante, fillers, laitier.
- les ciment de hauts fourneaux (C.H.F): il contient entre 40 et 75% de laitier, le reste est constitué de clinker.
- les ciment du laitier et aux cendres (C.L.C): ils contentent de 25 a 50% de clinker, de 20 a 25% de cendres volantes et 20 a 45% de laitier.
- Les ciments (CHF), (CLC) peuvent comporter au plus de 3% fillers.

1-4 LES CIMENT ET LA NORMALISATION :

L'objectif de la normalisation est de répondre a un souci de qualité et de régularité des ciments, grâce a des spécifications rigoureuses de leurs composition de leurs caractéristiques. L'évolutions des ciments depuis les années 50 a justifié, en 1978. L'homologation en France de la nouvelle norme AFNOR NF-P15-301 qui définit et classe la plupart des ciments selon des spécifications conformes a l'évolution actuelle des textes réglementaires et a l'approche performantielle AVEC la norme NF-P15-301 on a d'autres 4 normes qui couvert le ciment:

- Les normes de définition et de spécification des ciments qui ne font pas l'objet de la norme NF-P15-301 (NF-P15-295 , NF-P-300 , NF-P15-310etc).
- Les normes décrivant les différents essais physiques et chimiques (NF-P15-401 a NF-P15-466).

1-5 LES CLASSES DE RESISTANCES ET

LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES:

1-5-1 LES LIMITES DES CLASSES:

Les ciment sont répartis en quatre classe, suivant leurs résistance a la compression, mesure a 28 jours d'âge.

Les résistances sont mesurée suivant la norme NF-P15-451 et exprimées en Mégapascal (1MPa=10daN/cm²=10 bars).

Les limites de ces classes sont indiquées dans le tableau ci-dessous:

tableau 1-1 classes de résistances:[1]

Désignation de la Classe	Sous-classe Eventuelle	Résistance à la compression		
		A 2 jours	A 28 jours	
		limite inférieure nominale	limite supérieure nominale	limite supérieure nominale
35	—	—	25	45
45	— R (rapide)	— 15	35 35	55 55
55	— R (rapide)	— 22,5	45 45	65 65
HP (hautes) performances	— R (rapide)	— 27	55 55	— —

tableau 1-2 Les valeurs minimales garanties font l'objet du tableau ci-dessous:

Classes	2 jours	7 jours	28 jours
35	—	10	25
45	—	17,5	35
45 R	12	—	35
55	10	—	45
55 R	17	—	45
HP	15	—	55
HP R	22	—	55

R - ciment a durcissent rapide.

HP - ciment de haute performance.

1-5-2 AUTRES CARACTERISTIQUES GARANTIES DES CIMENTS:

Trois propriétés, le temps de prise, le retrait hydraulique a 28 jours, et l'expansion sont garanties, ainsi que 03 caractéristique de composition: teneur en SO₃, MgO et Cl.

tableau 1-3 différents caractères du ciment [1]

Caractéristiques	Normes d'essais	Conditions de mesure	spécification de la mesure		
				Début de prise	Fin de pris
Prise	NF.P 15,431	Pâte pure	35 et 45	> 1h 30	4h 15
			55et HP	> 1h	—
Retrait	NF.P 15,433	Mortier	C.P.A 35 et 45	< 800 µm/m à 28 jours	
			45 R et 55 35,0	< 1000 µm/m à 28 jours	
SO ₃	NF.P 15,461		CLK	≤ 5%	
			aut.ciment	≤ 4%	
MgO	NP.P 15,472		C.P.A	≤ 5%	
CL (Chlore)	—	—	CPA et CP	≤ 0,04%	

1-6 DOMAINE D'EMPLOI PRINCIPAUX DES CPA ET CPJ :

Les CPA ordinaires conviennent des travaux de toute nature, en béton armé et non armé ou en béton précontraint par caractéristiques viens justifient pas toujours l'emploi pour les travaux de maçonnerie courant et les bétons en grande masse ou faiblement armés.

Les CPA rapides conviennent pour des travaux similaires mais permettent un décoffrage rapide, appréciable notamment pour les travaux de béton armé ou précontraint pour lesquels est recherchée une résistance à brève échéance exceptionnelle.

Pour les travaux en milieu agressif (terrain gypseux, eau de mer, eaux sulfatées, . . .), on emploiera des ciments portland spéciaux: ciment prise mer, ou ciment résistant aux eaux sulfatées, par exemple.

Les CPJ 35 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie et les bétons peu sollicités. les CPJ 45 et 55 conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé ou en béton précontraint.

De façon générale, les CPJ sont bien adaptés les travaux massifs exigeant une élévation de la température modérée. les routes et le béton manufacturé.

La sous-classe R (rapide) sera préférée pour les travaux exigeant de hautes résistances initiales (préfabrication et décoffrage rapide) pour les travaux en milieux agressifs, on emploiera les ciments prise mer (PM) ou résistante aux eaux sulfatées (HRS).

1-7 LES CONSTITUTIONS DES CIMENTS:

Ces constituants présentent l'un ou plusieurs des propriétés suivantes:

- **des propriétés hydraulique** c'est-à-dire qu'ils forment par réaction avec l'eau des composés hydratés stables et très peu solubles dans l'eau.
- **des propriétés pouzzolaniques**, c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former, par combinaison avec la chaux, à température ordinaire et en présence d'eau des composés hydratés stables.
- **des propriétés physiques** qui améliorent certaines qualités du ciment.

a- le clinker:

C'est un produit obtenu par cuisson d'un mélange homogénéisé, en proportions très précises, de calcaire et d'argile. Le clinker est constitué de chaux combinée (CaO) 62 à 6%, de silice (SiO₂) 19 à 25%, d'alumine (Al₂O₃) 2 à 9% et d'oxyde de fer (Fe₂O₃) 1 à 5%.

b- Le laitier de hautes fourneaux:

C'est un produit d'origine volcanique, essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant des propriétés pouzzolaniques naturelles.

c- la pouzzolane naturelle:

C'est un produit d'origine volcanique, essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant des propriétés pouzzolaniques naturelles.

d- la pouzzolane artificielle:

On appelle pouzzolane artificielle toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

e- les cendres volantes:

C'est un produit pulvérulent résidu de combustion en centrale thermique de houille ou de lignite pulvérisée, généralement entraîné par les fumées.

f- les fillers ou fines:

Produits obtenus par broyage fin de certaines roches, le plus souvent calcaires, parfois siliceuses.

g- les additions:

Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés en petites quantités aux constituants dans des limites bien définies pour chaque type de ciment.

h- le sulfate de calcium: (gypse ou anhydrite)

Il est incorporé aux ciments pour régulariser sa prise.

i- les sels solubles:

Ils sont utilisés en très faibles proportions pour faciliter le broyage du ciment et éviter l'agglomération des grains ils ne doivent pas avoir d'action sur les ciment.

1-8 MATIERES PREMIERES UTILISEES DANS

LA FABRICATION DU CPA:

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland a partir de matériaux quelconques renfermant de la chaux, de la silice, de l'alumine et du fer. En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir. Pour des raisons évidentes, des matières premières faciles a extraire, a traiter et a combiner. On peut utiliser aussi des matériaux sous-produits d'autres industries tels le laitier de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques. On classe habituellement les matières premières naturelles en:

- Calcaire: contenant plus de 80% de CaCO_3 (surdose).
- Élément argilo-calcaire: contenant de 40 à 80% de CaCO_3 (moyennement dosé).
- Argiles: contenant moins de 40% de CaCO_3 (sous dosé).

le calcaire:

Les calcaires peuvent être de dureté et de pureté variables, ils proviennent de dépôts du CaCO_3 contenu dans les eaux des mers ou des lacs; dépôts provoqués par précipitation chimiques, dont certaines réalisées par l'intermédiaire d'organismes vivants. Certains de ces dépôts, soumis a une pression et a une température suffisantes donnent des calcaires cristallins tels le marbre dont la dureté est élevé.

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont:

a- la silice:

Qui se présente sous plusieurs formes:

- Libre: elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz qui présenteront des duretés être nuisibles lors du broyage; il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée et répartie dans la masse du calcaire.
- Combinée à divers éléments: tels que le fer, la magnésie et l'alumine: cette combinaison se retrouve, par exemple, dans les particules argileuses contenues dans le calcaire.

b- la magnésie:

Qui est un élément dangereux du fait de son expansion tardive, après hydratation des ciment, suivie d'une augmentation de volume fatale à toute structure.

En tenant compte d'une utilisation maximale de **80%** de calcaire dans le cru nécessaire à la fabrication de ciment, on se donne une limite conventionnelle de teneur en magnésie, dans le surdose, qui ne doit pas être supérieure à **5%**.

c- le fer:

Qui se rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde de fer (Fe_2O_3) ou de pyrite (Fe_2S), le fer joue un rôle utile de fondant.

d- les alcalis:

Comme la soude et la potasse, sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières de four lesquelles sont actuellement souvent recyclées.

Les alcalis peuvent occasionner certaines difficultés au cours de la fabrication de ciment (formation d'anneaux).

e- les éléments argilo- calcaires:

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication de ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de parfaire leur dosage.

f- les argiles:

Les argiles sont constituées essentiellement de silice d'alumine et de fer et constituent par là-même, le complément indispensable du calcaire.

Les argiles peuvent être classées de plusieurs manières du point de vue minéralogique, on peut classer les argiles en différents groupes:

- groupe du Kaolin: $Al_2O_3 ; 2SiO_2 ; 2H_2O$.
- groupe de L'halloysite: $Al_2O_3 ; 2SiO_2 ; 4H_2O$.
- groupe de la montmorillonite: $Al_2O_3 ; 2SiO_2 ; nH_2O$.
- groupe des minéraux argileux micocés (séricite).
- groupe des minéraux argileux magnésiens (sépiolite).

1-9 LES CONSTITUANTS MINÉRALOGIQUES DU CLINKER:

La connaissance de la composition chimique permet de calculer les différents modules caractéristiques du clinker:

$$\bullet \text{ module hydraulique : } \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = (1,7 \div 2,2)$$

$$\bullet \text{ module silicique : } \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = (2,4 \div 2,7)$$

$$\bullet \text{ module alumino-ferrique : } \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = (1,5 \div 2,5)$$

Aspect physico-chimique du clinker :

Le clinker est le composé constitué par les nouvelles espèces formées au cours des réactions chimiques qui se produisent lors de la cuisson du cru à haute température.

Le clinker est essentiellement composé de quatre phases cristallines:

Les silicates (bi) et tricalciques, l'aluminate tricalcique et l'alumono-ferrite de calcium. En chimie cimentière, afin d'abrégé les notations, les composés primaires sont représentés par:

C pour CaO; S pour SiO₂; A pour Al₂O₃; F pour Fe₂O₃;
M pour MgO; S pour SO₃; C pour CO₂; H pour H₂O;
N pour Na₂O; K pour K₂O.

tableau 1-4 Principales phases du clinker [1]

notation	nom	formule chimique
C ₃ S	silicate tricalcique-alite	3CaO . SiO ₂
C ₂ S	silicate bicalcique-bélite	2CaO . SiO ₂
C ₃ A	aluminate tricalcique	3CaO . Al ₂ O ₃
C ₄ Af	alumino-ferrite tétracalcique	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃

Selon leur mode et leur température d'obtention, ces phases se présentent sous des formes cristallines et minéralogiques différentes. Ces composés sont présents en proportions variables dans le clinker.

Le tableau suivant indique les proportions pondérales des principaux composants du clinker du ciment portland ordinaire:

tableau 1-5 proportions des différents composants dans le ciment

composé	CaS	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
teneur minimale	40	0	2	0
teneur moyenne	60	15	8	5
teneur maximale	70	30	15	8

Le clinker contient aussi, en faibles proportions, de la chaux libre et de l'oxyde de magnésium ainsi que des impuretés qui peuvent modifier sensiblement ses propriétés.

1-10 CARACTERISTIQUES DES COMPOSES FORMES:

Les travaux de LE CHATELIER effectués au début du siècle. décrivent les quatre principaux composés formés:

- **le silicate tricalcique:** $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ ou C_3S

C'est le composé actif du clinker car il développe une résistance initiale élevée (sa chaleur d'hydratation est assez forte). Examiné au microscope il se présente sous l'aspect de cristaux polygonaux..

Le silicate tricalcique se dissocie au delà de 1900°C et donne le C_2S ; il se dissocie en C_2S et CaO vers 1100°C si le clinker au cours de refroidissement est maintenu trop longtemps à cette température.

- **le silicate bicalcique:** $\text{SiO}_2, 2\text{CaO}$ ou C_2S

La bélite se forme en majeure partie sous la forme minéralogique β qui peut, sous certaines conditions, se transformer en forme γ inactive; cette inversion polymorphique s'accompagne d'une augmentation de volume de 10 % qui conduit à la désintégration du clinker. On évite ce phénomène de rétrogradation par un refroidissement rapide du clinker, la bélite concourt à la résistance du ciment à long terme.

- **l'aluminate tricalcique** $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ou C_2A

C'est le composé qui possède la prise la plus rapide et la chaleur d'hydratation la plus élevée. les cristaux formés ont un aspect variable suivant le mode de refroidissement du clinker.

Ce composé joue un rôle important dans la résistance à court terme et dans la tenue du ciment à certaines eaux agressives (eau de mer par exemple).

• **l'alumino-ferrite tétracalcique:** $\text{Al}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O} \cdot 4\text{CaO}$ ou C_4Af

Ce composé apparaît en cristaux de formes variable suivant le mode de refroidissement, il ne participe pratiquement pas aux résistances mais facilite la formation de C_3S , composant essentiel pour les résistances initiales du CPA.

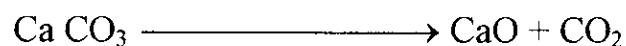
1-11 MECANISME DE FORMATION DES MINERAUX:

Les réactions de clinkérisation se produisent par cuisson des matières à très haute température et conduisent à la formation des minéraux artificiels constituant le clinker. Ces réactions complexes sont examinées plus loin; elles peuvent se résumer comme suit:

lorsque la farine crue est introduite dans le système de l'échangeur de chaleur à environ 250°C , il y a évaporation de son eau résiduelle ainsi de son eau d'adsorption; c'est à environ 700°C que la farine crue perd le reste de l'eau liée chimiquement aux minéraux argileux constitués sous forme de groupe hydroxydes.

A une température d'environ 800°C commence à se former de l'aluminate tricalcique ainsi que des ferrites d'aluminates tricalciques.

A $800 - 950^\circ\text{C}$, la farine chaude quitte l'échangeur de chaleur pour rentrer dans le four. Lorsque la température atteint 800°C on about à une formation complète de C_3A et parallèlement de C_2S . En outre, le CaCO_3 est totalement décarbonaté suivant la réaction:



La chaux non liée, le C_3A , ainsi que l'augmentation continue de la température déclenchent la formation des silicates bicalciques.

A 1300°C il va fusion dans le clinker et formation de ferro-aluminates. Cette fusion facilite la transformation de C_2S en C_3S grâce à l'association de CaO qui se trouve en excès et la combinaison de SiO_2 quartzique avec la chaux libre.

Cette fusion joue un rôle prépondérant pour l'établissement de l'équilibre entre les différents minéraux..

Une augmentation de la température vers $1400 \approx 1450^{\circ}\text{C}$ exerce une influence positive dans la formation du C_3S .

A la sortie du four le clinker subit un refroidissement rapide qui lui permet de se figer dans l'état où il se trouve à haute température de cuisson pour conserver la forme minéralogique acquise lors de la clinkérisation.

Le ciment est obtenu par broyage des granules de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse et éventuellement d'un ou deux constituants secondaires. Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts sur ou dans les cristaux.

1-12 COMPOSITION CHIMIQUE:

Les liants constitués d'un mélange de corps composés dont les proportions sont variables :

- oxyde de calcium : CaO
- la silice : SiO_2
- alumine : Al_2O_3
- oxyde de fer : Fe_2O_3
- oxyde de magnésium : MgO
- l'anhydride sulfurique : SO_3
- sulfate de chaux : CaSO_4

Certains de ces produits sont actifs et caractérisent le liant comme l'oxyde de calcium, la silice et l'alumine.

D'autres sont inertes, comme l'oxyde ferrique, enfin d'autres sont nuisibles comme la magnésie ou l'anhydride sulfurique.

Tout ces produits se rencontrent dans les roches naturelles ou dans les produits artificiels servant à la fabrication des liants et qui sont :

- les calcaires dures ou tendres
- les craies
- les argiles
- les marnes
- les pouzzolaines (laitier, trass ect...)

Le clinker est composé de Mn_2O_3 et TiO_2 et les oxydes constituant le liant à l'exception de $CaSO_4$ et SO_3 .

l'oxyde de calcium: CaO

- est lié avec la silice, l'alumine et l'oxyde de fer.
- l'augmentation du CaO provoque l'augmentation de la résistance.
- dans le clinker portland le CaO varie (58 à 67%)
- CaO provoque l'inégalité du changement du volume .

l'oxyde de silicium: SiO₂

- lié avec $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ réagit avec CaO qui donne la silicate de calcium.
- la teneur élevée du SiO₂ dans un ciment donne un ciment qui durci longtemps.
- la quantité de cette oxyde varie (16 à 26%).

l'oxyde d'aluminium: (Al₂O₃)

- l'alumine contribue à la prise et le durcissement rapide du ciment.
- l'alumine joue un rôle de fondant lors de la cuisson .
- l'alumine diminue la température de cuisson.
- la teneur de Al₂O₃ varie (4 à 8 %).

l'oxyde ferrique: (Fe₂O₃)

- diminue considérablement la température de cuisson du clinker et contribue à la stabilité chimique les eaux sulfatées.

- même rôle que Al_2O_3 , c'est-à-dire rôle fondant.
- la teneur Fe_2O_3 varie (2 à 5 %).

l'oxyde de magnésium: (MgO)

- la quantité élevée de MgO à l'état libre sous forme de peryclasse dans le clinker provoque l'inégalité du changement du volume du ciment.
- la teneur MgO est limitée 5%.

l'oxyde de titane: (TiO_2)

- cet oxyde se trouve dans les composantes argileuses.
- la teneur : (0 à 0,5 %).

l'oxyde de manganèse: (Mn_2O_3)

- cette oxyde entre dans la composition du clinker dans le cas où on utilise la matière le laitier.
- sa teneur est (0 à 1,5 %).

l'oxyde de phosphore: (P_2O_5)

peut être présenté comme des impuretés par hasard dans la composition du clinker.

les alcalis:

Une parties des alcalis se volatilise lors de la cuisson mais la composition du clinker peut comprendre jusqu'à 0,5 à 1 % d'alcalis.

La présence des alcalis provoque la diminution des propriétés décoratives des ciments

.le SO_3 : ne dépasse pas 5% dans le ciment.

CONCLUSION:

Tout ces composants (principaux ou secondaires) jouent un rôle aussi important l'un que l'autre, en participant dans la clinkérisation et dans l'hydratation du ciment.

Leurs proportion excessives peuvent nuire la cuisson et influencer négativement sur les propriétés du ciment.

1-13 LES PROCESSUS D'HYDRATATION DES CONSTITUANTS DU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Cette vue phénoménologique classique occulte cependant quelque peu la complexité des réactions chimiques des composants du ciment entre eux et avec l'eau.

Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri le chatelier. IL a notamment décrit les trois phénomènes concomitants qui concourent au phénomène de prise.

- La dissolution des constituants du ciment dans l'eau.
- La formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates.
- La précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires

Est donc un mélange des principaux constituants suivants:

C_3S	silicate tricalcique	$3CaO, SiO_2$
C_2S	silicate bicalcique	$2CaO, SiO_2$
C_3A	alumine tricalcique	$3CaO, Al_2O_3$
C_4AF	alumino-ferrite tétracalcique	$4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$

En proportions variables selon l'origine des matières premières utilisées. Une petite quantité de sulfate de calcium est ajoutée lors du broyage du clinker sous forme de gypse ou d'anhydre.

Mélangés à l'eau, les grains de ciment, constitués de cristaux de ces différents constituants se dissolvent lentement. Les réactions chimiques d'hydratation du ciment se produisent entre ces constituants et l'eau, aux interfaces cristal-eau. Elles mettent en jeu plusieurs phénomènes physico-chimiques tels que l'adsorption, la dissolution et la cristallisation.

L'adsorption de l'eau sur la surface des cristaux réside dans la fixation de molécules d'eau au réseau cristallin des composants par des liaisons physiques, donc faibles, ou chimiques, beaucoup plus fortes. Dans ce dernier cas, l'eau est liée par échange d'ions avec son support, il y a chimisorption. Il se produit une hydrolyse lorsqu'il y a modification de la structure chimique du support.

La dissolution résulte de la rupture des liaisons ioniques d'un solide par l'action électrostatique suffisamment forte des ions d'un solvant tel que l'eau. Il se crée une solution dans laquelle diffusent et se dispersent les ions du soluté.

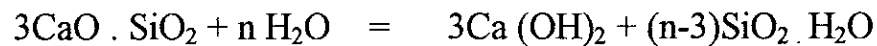
La cristallisation débute par une phase de germination. Les ions en suspension s'assemblent aléatoirement en noyaux stables, constituant autant de germes, lorsque se trouvent réunies les conditions énergétiques favorables. Les germes croissent alors par agglomération de couches successives d'ions sur l'interface cristal-suspension à une vitesse qui dépend du taux de sursaturation, donc de la vitesse de diffusion des ions.

Ces phénomènes affectent différemment les constituantes du ciment. Le rôle prépondérant joué par le silicate tricalcique et par l'aluminate tricalcique dans l'acquisition des propriétés recherchées pour la pâte durcie, c'est-à-dire une faible porosité et, corrélativement, une résistance à la compression élevée, conduit à examiner plus particulièrement les réactions chimiques d'hydratation de ces composants.

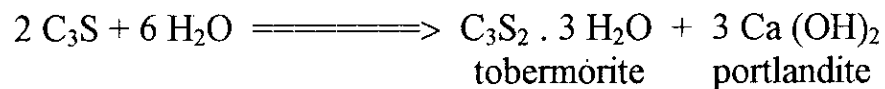
1-13-1 HYDRATATION DES PRINCIPAUX ELEMENTS CONSTITUES LE CIMENT

a-HYDRATATION DE C₃S:

L'hydratation de C₃S donne des hydrosilicates de calcium et hydroxyde de chaux. L'hydrolyse complet de C₃S donne un excès d'eau peut être présent sous la forme suivante:

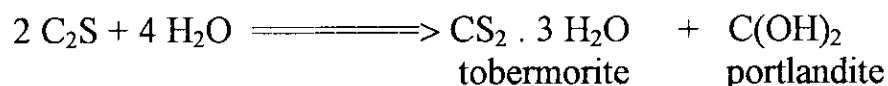


Dans les conditions réelles ce processus ne se passe pas jusqu'à la fin car la réaction d'hydrolyse de C₃S est freinée à la suite de la formation d'une solution Ca(OH)₂ saturé et peut à peu Ca(OH)₂ augmentes



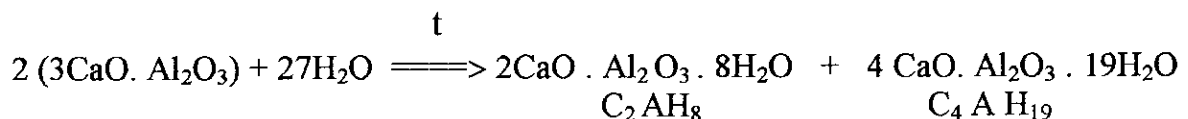
b-HYDRATATION DE C₂S:

Hydratation de C₂S ou (bélite) se fait lentement que celle de C₃ S mais elle libère moins de portlandite (2 à 3 fois). La composition de l'hydrosilicate de chaux change avec le temps et avec la quantité d'eau glacée pour une pâte normale.



c-HYDRATATION DE C₃ A:

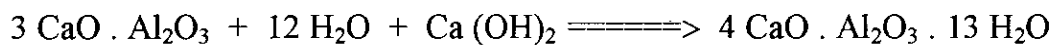
L'hydratation de C₃ A (célite) s'hydrate en donnant des hydro-aluminate de calcium.



Le développement de l'hydratation de $C_3 A$ est la diffusion à travers les couches d'hydrate se transforment rapidement en $C_3 AH_6$ et $C_4 AH_3$. Cela est dû à la grande chaleur d'hydratation d'hydrate de $C_3 A$ qui élève la température des pâtes à des niveaux critiques.

L'hydroaluminate $C_3 AH_6$ se précipite sous forme de cristaux cubiques qui constituent autour des grains de $C_3 A$. Une enveloppe perméable à l'eau.

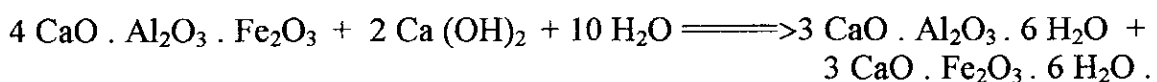
La chaux provenant d'une légère hydratation de $C_3 A$. Et la chaux libre ainsi que les sulfates (gypse) se combinent avec $C_3 A$ suivant la double réaction.



Cette étringite forme une couche protectrice qui a l'apparence d'un gel qui retarde l'hydratation, ce qui explique le rôle de retardeur du gypse surtout dans le cas du ciment à grande teneur en $C_3 A$. Quand à $C_4 AH_{13}$. Dans 24 heures sur l'étringite pour donner du monosulfoaluminate de calcium. ($C_3 A \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$)

d-HYDRATATION ALUMINOFERRITE $C_4 AF$. (félite):

L'hydratation aluminoferrite $C_4 AF$. (félite) pour une solution saturée en eaux donne avec l'eau à la température ambiante la réaction stoechiométrique suivante:



Ce la aboutit à la formation des cristaux mixtes très stables $C_3 (AF) H_6$.

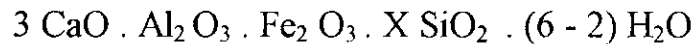
e-HYDRATATION MgO ET CaO:

CaO et MgO libre s'hydratent en donnant la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Ces oxydes dans le clinker s'hydratent très lentement et provoquent la variation du volume de la pierre du ciment durci à des échéances ultérieures (10ans) de durcissement.

La phase amorphe du clinker (verre du clinker) s'hydrate activement en donnant les solutions solides.



et des hydrogranates ayant cette formule générale.



1-13-2 Propriétés principales des constituants hydrates:

a-Le silicate de calcium: ($2\text{SiO}_2, 3\text{CaO}, 3\text{H}_2\text{O}$), tobermorite.

Ce composé, formé par l'hydratation de C_3S et C_2S , est faiblement cristallisé et se présente sous forme de fibres ou de paillettes; ce composé est essentiel, c'est lui qui donne la résistance au ciment. Il peut absorber et perdre de l'eau en changeant de dimensions sans modification de structure.

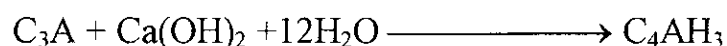
b-l'hydroxyde chaux: ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), portlandite

La portlandite apparaît sous forme de cristaux de forme hexagonale, de structure feuilletée, elle provient de l'hydratation de C_3S et C_2S ainsi que de l'hydratation de la chaux libre éventuellement contenue dans le ciment.

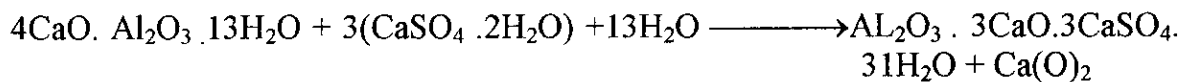
c-l'aluminate tetracalcique: ($\text{C}_4\text{A}, 13\text{H}_2\text{O}$)

L'interaction de C_3A avec l'eau est très rapide, à la température de 21°C .

Cette réaction dégage une très grande quantité de chaleur et donne, en s'hydratant un aluminate de calcium cristallisant dans le système monoclinique:



en présence de gypse, l'aluminate tétracalcique se transforme en hydrosulfoaluminat tétracalcique suivant la réaction:



Autres constituants:

La magnésie:

Elle peut se présenter à l'état vitreux dans le clinker lorsque la trempe a été forte (refroidissement très rapide) ou à l'état cristallisé (périclase) lorsque le refroidissement a été lent. Cette forme est dangereuse car hydratation s'effectue lentement en donnant $\text{Mg}(\text{OH})_2$, avec un gonflement analogue à celui de la chaux libre ($\text{MgO} \leq 5\%$).

Les alcalis:

Provenant de la matière première en général et de certains groupes argileux, ils se volatilisent en partie lors de la cuisson et on les retrouve dans la poussière du four, les alcalis solubles du ciment peuvent dépasser 1%.

1-14 LA PRISE DES CIMENT ET LES

CATALYSEURS D'HYDRATATION:

Le silicate tricalcique SC_3 a toutes les propriétés du portland, il durcit assez vite et donne des résistances élevées. Le silicate bicalcique SC_2 prend lentement et il durcit très lentement de résistances finales aussi élevées que ce que l'on obtient avec le silicate tricalcique.

L'aluminate tricalcique prend d'une manière rapide avec un fort dégagement de chaleur.

L'alumino-ferrite tétracalcique prend très vite, mais sa prise est retardée et régularisée par le gypse. Il donne un certain durcissement à l'air, mais ses mortiers et bétons s'effritent quand on veut réaliser leur durcissement dans l'eau.

CHAPITRE II

CHOIX DES MATERIAUX

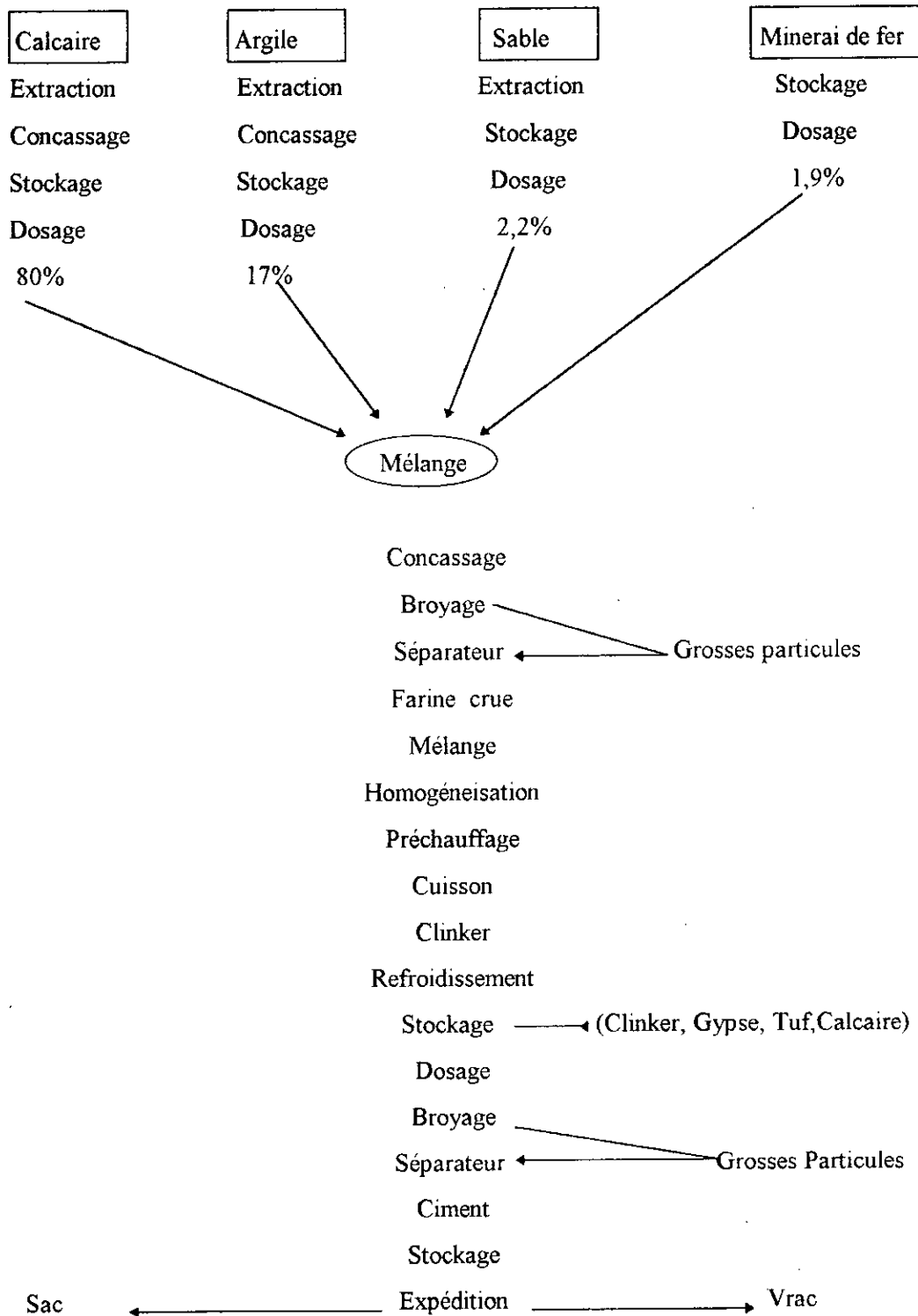
LE CHOIX DES MATERIAUX

2-1 INTRODUCTION:

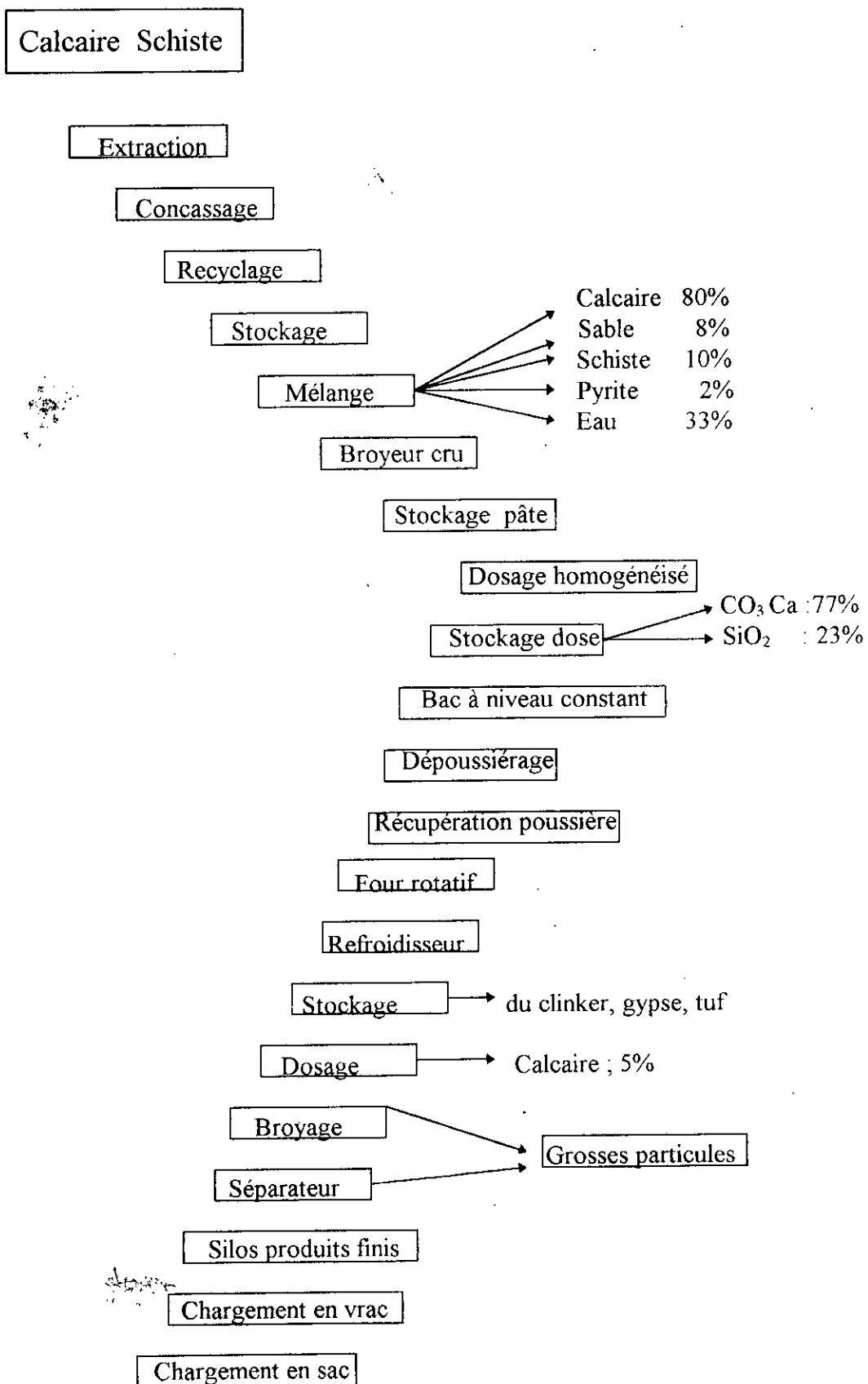
Le choix des matériaux est essentiel, il à été porté sur deux ciments à natures égales (CPJ 45). Le premier provenant de la cimenterie de Meftah, le deuxième de celle de Raïs Hamidou, à la différence que l'un est fabriqué suivant la méthode sèche (C.Meftah) et l'autre suivant la méthode humide (R.Hamidou) que nous développons ci-dessous .

SCHEMA DE LA CHAINE TECHNOLOGIQUE

Pour la fabrication du ciment dans l'usine de MEFTAHA



SCHEMA DE LA CHAINE TECHNOLOGIQUE pour la fabrication du ciment dans l'usine de RAIS HAMIDOU



2-2 METHODES DE FABRICATIONS DU CIMENT

2-2-1 LA PREPARATION DU CRU:

Le Cru, à partir duquel est fabriqué le ciment, est constitué par un mélange de matières premières naturelles de composition chimiques adéquates. Les matières extraites de la carrière contiennent les éléments nécessaires à l'élaboration du ciment dans des proportions qui ne sont pas celles qui conviennent à l'obtention d'un produit de qualité. Il est donc nécessaire de créer un mélange optimisé de matières premières qui présente la composition requise, celle-ci doit demeurer aussi constante que possible malgré la relative variabilité de la composition des matériaux de carrière.

Une combinaison intime des différents matériaux préalablement concassés et broyés doit être réalisée de manière à dépasser d'un mélange de caractéristiques chimiques et physiques uniformes dans sa masse, ses procédés d'homogénéisation spécifiques permettent d'obtenir cette constance de propriétés à l'échelle d'une production industrielle de grande ampleur. Ils sont mis en œuvre en deux temps:

la préhomogénéisation permet premier mélange des matériaux provenant directement des carrières, l'homogénéisation ultérieure parfait ce mélange après broyage des matières préhomogénéisées, la farine crue ainsi obtenue est ensuite acheminée vers le four de cuisson quel que soit le procédé, la matière passe par les stades successifs suivants:

- Préchauffage jusqu'à 500⁰ C
- Décomposition des argiles au-dessus de 500⁰ C
- Décarbonatation des calcaires de 500 à 1050⁰C
- Clinkérisation de 1200 à 1450⁰ C
- Refroidissement de 1450 à 80⁰ C

2-2-2 CUISSON PAR VOIE SECHE:

La maîtrise de techniques d'homogénéisation, de dosage et de préparation du cru a permis le développement de la cuisson par voie sèche au cours des années 1950/1960. Le procédé a été perfectionné vers 1970 par l'introduction de précalcinateurs disposés au pied du préchauffeur. fig(A, B).

a-LE FOUR:

Le four rotatif est l'élément principal de l'installation de fabrication du clinker. Il est essentiellement constitué par un tube cylindrique dans lequel brûlent des substances combustibles injectées à fort débit en produisant une flamme de plusieurs dizaines de chaleur à contre-courant dans lequel la flamme, dirigée de l'aval vers l'amont, porte à très haute température la farine crue qui progresse en sens inverse, le tube étant inclinée de 3 à 4% vers l'aval. La consommation énergétique des fours est de l'ordre de 850 kcal/kg de clinker, celle des installations modernes les plus performantes est inférieure à 700kcal/kg .

b-LE PRECHAUFFAGE:

A fin d'améliorer le rendement thermique et utiliser au mieux la chaleur dégagée par le combustible dans le four, Les gaz qui préchauffage du cru disposée à l'entrée du four un préchauffeur du farine crue est un échangeur de chaleur dans lequel les transferts de cyclones séparateur et de gaines ou se font les échanges, ceux ci ont lieu en concourant dans chaque cyclone, et à concourant sur l'ensemble de l'échangeur. Le rendement de l'échange dépend entre autres de la dispersion de la matière dans le flux gazeux .

Un ventilateur de tirage de grande puissance, l'exhausteur, assure la circulation ascendante de gaz provenant du four dans l'ensemble des cyclones et des chambres de turbulence . Le débit de l'exhausteur est réglé en fonction de la combustion dans le four .

La farine crue est introduite en partie haute de four dans le carneau d'entrée des cyclones, ces cyclones offrent un degré de séparation plus élevé que celui des étages inférieurs afin de réduire les échappements de matière .

La matière descend par gravité d'un cyclone au carneau du cyclone inférieur par un conduit de diamètre réduit le courant gazeux ascendant provenant du cyclone inférieur entraîne cette matière vers le cyclone supérieur par une gaine de grandes dimensions. C'est dans ces gaines que se produisent une partie des échanges thermiques . Les gaz sortant du four ont une température d'environ 950 à 1100⁰C ; après avoir traversé le préchauffeur, c.a.d à l'entrée de l'exhausteur, leur température n'est plus que de 230 à 400⁰C selon le nombre d'étages de la tour ces gaz d'exhaure sont dirigés vers les appareils de broyage s'échange pour y être utilisés .La farine entre dans la tour à une température de 60 à 80⁰C, elle atteint l'entrée du four en 30 à 60 secondes, sa température ayant été portée à environ 850⁰C. Elle est partiellement décarbonatée, son degré de décarbonatation de 20 à 50%. L'emploi de précalcinateurs permet de porter ce taux de décarbonatation à 90 %.

c-LA PRECALCINATION:

L'emploi de l'appareils de précalcination, insérés entre le préchauffeur et le four, ne date que des années 1970. Bien que d'introduction récente, ces appareils se sont rapidement répandus; au japon, 90% des fours de fabrication de clinker sont aujourd'hui équipés de précalcinateurs .

La réaction de décarbonatation est très endothermique: elle consomme environ 400 kcal/kg entre 800⁰C et 900⁰C l'opération de précalcination a pour but d'obtenir un taux de décarbonatation de la farine de l'ordre de 90%, avant son entrée dans le four .

A capacité de production égale, la précalcination présente l'intérêt d'entraîner une diminution des dimensions du four puisque seules restent à y réaliser la fin de la décarbonatation et la clinkérisation. A dimensions de four égales, la précalcination permet un accroissement important de capacité de production.

La consommation du précalcinateur représente entre 30% et 60% de la consommation totale en combustible, selon le procédé employé.

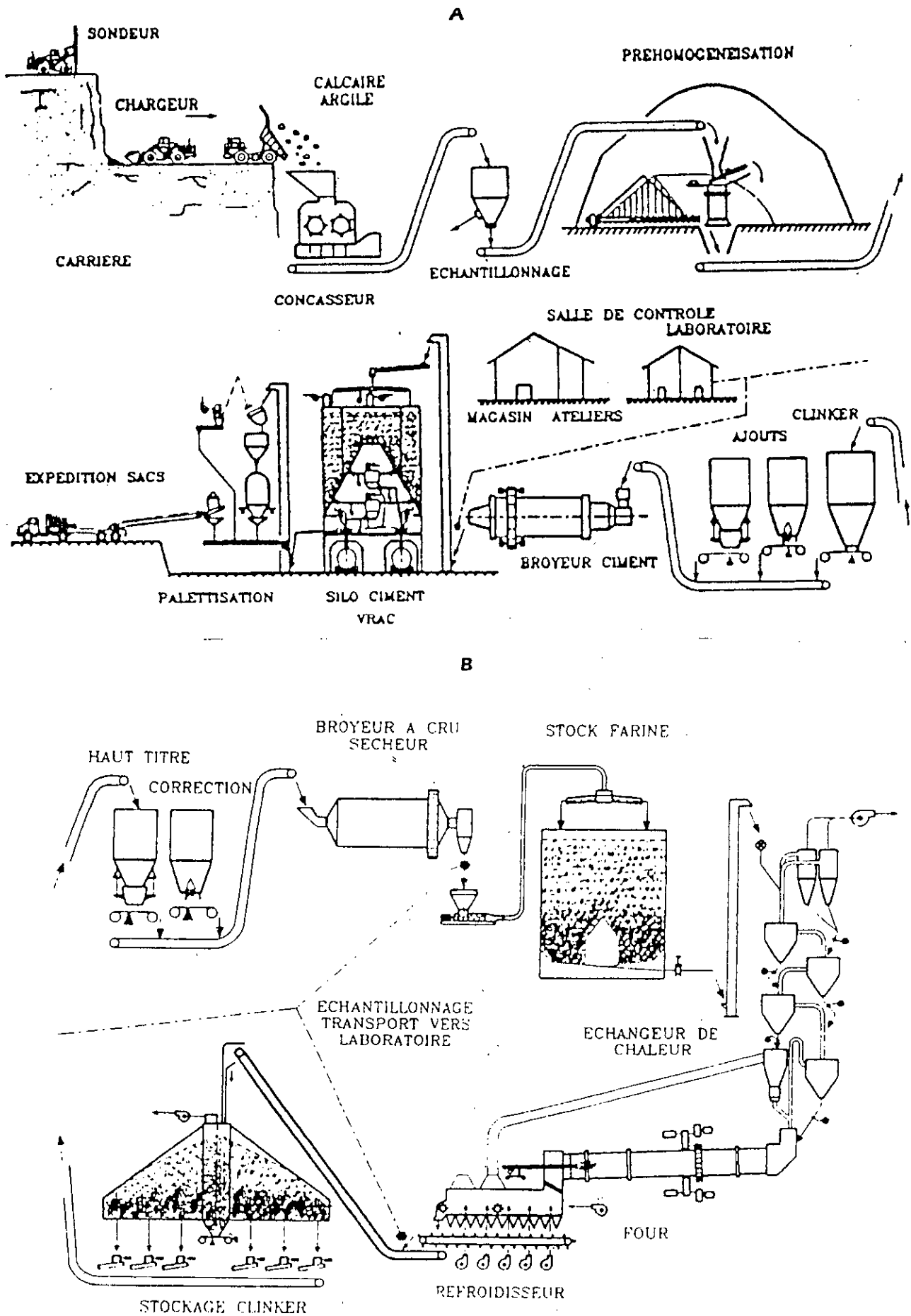


fig (AetB): Fabrication du ciment par voie sèche.

2-2-3 CUISSON PAR VOIE HUMIDE:

Le mélange de matière et d'eau, homogénéisé dans de grands bassins fig(C), constitue une pâte dont la teneur en eau varie de 25 à 40% selon la nature de la matière, la teneur en eau est ajustée en fonction de la viscosité de la pâte. Cette pâte crue est introduite à l'amont de fours rotatifs de grande longueur dans lesquels s'effectue la cuisson. La voie humide constitue un procédé d'emploi relativement simple mais qui implique une consommation énergétique élevée, de l'ordre de 1200 à 1600 kcal/kg. Malgré cet inconvénient il existe encore dans le monde de nombreuses et importantes cimenteries fonctionnant en voie humide. Leur production est généralement inférieure à 3000 t/jour

Le four rotatif est essentiellement un tube cylindrique fig(D), fonctionnant comme échangeur de chaleur à contre-courant, dans lequel la pâte progresse de l'amont vers l'aval, le tube étant incliné de 3 à 4% vers l'aval. Sa vitesse de rotation est de l'ordre de 1 à 2 tour/mn de tels fours ont, pour la dernière génération, une longueur de 50m et un diamètre de 4,50m les plus grand atteignent 7m de diamètre et une longueur supérieure à 200m . Les viroles en acier ont une épaisseur de 30 à 90 mm.

On distingue quatre zones de l'amont vers l'aval du four les zones de déshydratation, de décarbonatation, de cuisson et de refroidissement.

C'est dans la zone de déshydratation, d'une longueur de 25 à 30m de la longueur totale du four, qu'est effectué le séchage de la pâte afin d'améliorer le ressèment des échanges thermiques et donc de réduire la consommation énergétique, différents procédés sont mis en oeuvre pour augmenter la surface d'échange entre les gaz chaud à une température de l'ordre de 200⁰ C, et la pâte cela permet d'éviter d'allonger démesurément le four.

Le chaînage est la technique la plus répandue. Elle consiste à disposer des réseaux de chaînes accrochées à la paroi du four; ces chaînes sont simplement pendantes à l'entrée puis en guirlandes pendantes. Les premières ont une longueur de l'ordre de 0,60 à 0,70 fois le diamètre du four; les secondes, fixées par leurs extrémités, forment des nappes croisées en hélice. Au cours de la rotation du four, les chaînes raclent la paroi et se raclent mutuellement, provoquant ainsi la progression de la pâte dans le four .

Les gaz chauds cèdent leur chaleur aux chaînes et à la pâte qui les enrobe en situation haute; en situation basse, un transfert de chaleur s'opère entre les chaînes et la pâte dans laquelle elles baignent. La quantité de chaleur transmise est proportionnelle à la surface développée des chaînes.

Classiquement, on distingue trois zones successives qui correspondent respectivement aux états liquide, plastique et granulaire de la pâte. A l'amont, la première zone est équipée d'un réseau dense de chaînes pendantes fines, à maille d'un diamètre de 15 à 20 mm; la seconde zone est munie de très grosse chaînes en guirlande afin d'éviter tout collage de la matière; la dernière zone est celle où se produit un transfère intensif de chaleur vers la matière; elle comporte des chaînes en guirlande à mailles de 20 à 30 mm de diamètre .

Au fur et à mesure de l'avancement de la matière, les propriétés de la pâte se modifient avec l'évaporation de l'eau, la pâte s'épaissit jusqu'à prendre la consistance d'un mastic; elle a tendance à coller aux parois et aux chaînes et à former des anneaux . La formation de tels anneaux est la source de perturbations de fonctionnement du four . Dans le cas où un anneau de pâte devient important, et le four est partiellement bouché, ce qui provoque des irrégularités d'avancement de la pâte et une baisse de tirage des gaz, il peut être nécessaire d'arrêter la marche du four pour détruire l'anneau. Des réseaux de chaînes auto nettoyantes permettent d'éviter cet inconvénient .

D'autres types d'échangeurs thermiques sont employés, le plus souvent en complément de chaînages. Le dessiccateur Vickers, placé dans le four, comporte deux hélices créant deux canaux hélicoïdaux équipés de chaînes dans lesquels circulent les gaz de combustion; ce type d'appareil ne convient cependant pas aux pâtes à faible teneur en eau. Le calcinateur MIAG est constitué par un cylindre horizontal, d'axe perpendiculaire à celui du four, la pâte est déversée dans le cylindre qui tourne à une vitesse de 0,5 tour/mn; elle est séchée et divisée par les anneaux; ce type d'appareil n'est utilisé que dans les installations produisant moins de 700 t de clinker par jour.

Lorsque le chaînage est bien adapté, la conduite des installations pose peu de problèmes. En régime stabilisé, il faut veiller à compenser les variations éventuelles des doseurs d'alimentation en pâte et combustible.

Les processus de décarbonatation et de cuisson se déroulent dans les zones aval du four.

Les principaux paramètres qui caractérisent la marche du four sont:

- La température de la matière à l'entrée et à la sortie de la zone des chaînes, qui permet de déceler des anomalies de profil thermique;
- La température de la sortie de la zone de chaînes, mesurée par thermocouples;
- La température de la zone de cuisson, mesurée par pyromètre optique;
- La température des fumées à la sortie du four ;
- L'analyse de ces fumées ;
- La dépression à la sortie du four, qui est fonction du débit des gaz et de la résistance du circuit; l'analyse du relevé de la dépression peut mettre en évidence l'éventuelle formation d'un anneau ;
- La puissance absorbée par le four; en voie humide, ce paramètre est très sensible et permet de détecter des défauts de fonctionnement de la zone des chaînes, tels que la formation et la destruction d'anneaux.

La matière séjourne 2 à 3 heures dans un four à voie humide.

2-2-4 LE REFROIDISSEMENT:

A l'aval du four, quel que soit le procédé mis en oeuvre, le clinker soit à une température de 1200 à 1450°C et tombe dans un refroidisseur le refroidissement a notamment pour buts, d'une part, d'abaisser la température du clinker de manière à en autoriser le transport et la manutention dans des conditions normales et, d'autre part, de récupérer au maximum la chaleur qu'il emmagasine, de l'ordre de 380 kcal/kg de clinker. Cette récupération réduit sensiblement la consommation spécifique de chaleur nécessaire à la production de clinker par apport thermique à l'air de combustion du four (air secondaire), du précalcinateur (air tertiaire) ainsi qu'à l'air éventuellement utilisé dans les opérations de broyage-séchage du cru. Le rendement de l'opération est défini par le rapport de la quantité de chaleur récupérée à la quantité initialement présente dans le clinker .

De plus, le refroidissement est une opération importante de la vis-à-vis de la qualité du clinker une refroidissement rapide (t rampe) permet de maintenir le C_3S dans un état métastable, alors qu'un refroidissement lent conduit à la transformation du C_3S en C_2S avec libération de chaux libre et du C_2S en ses formes les moins hydrauliques. La cinétique de refroidissement joue également sur la broyabilité du clinker. Selon le type de refroidisseur, la température de clinker refroidi est comprise entre 50 et 300°C .

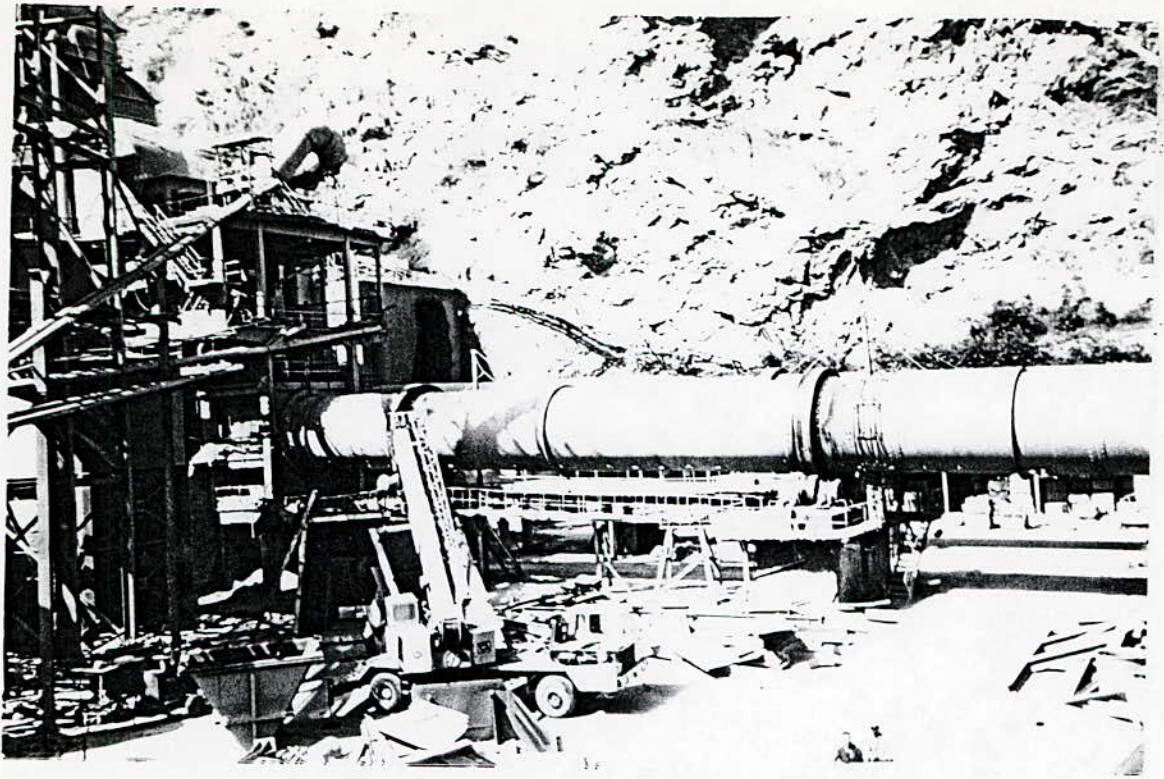


fig (D): Four rotatif [C.R.Hamidou]

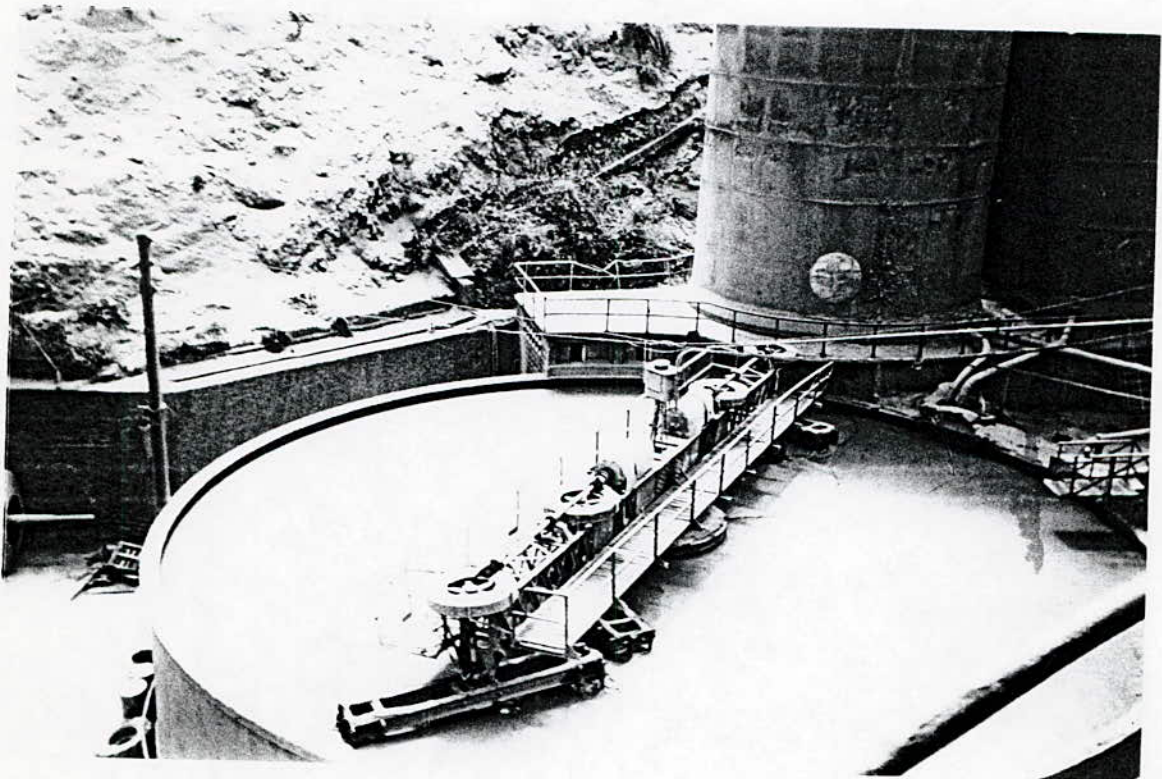


fig (C): les grands bassins [C.R.Hamidou]

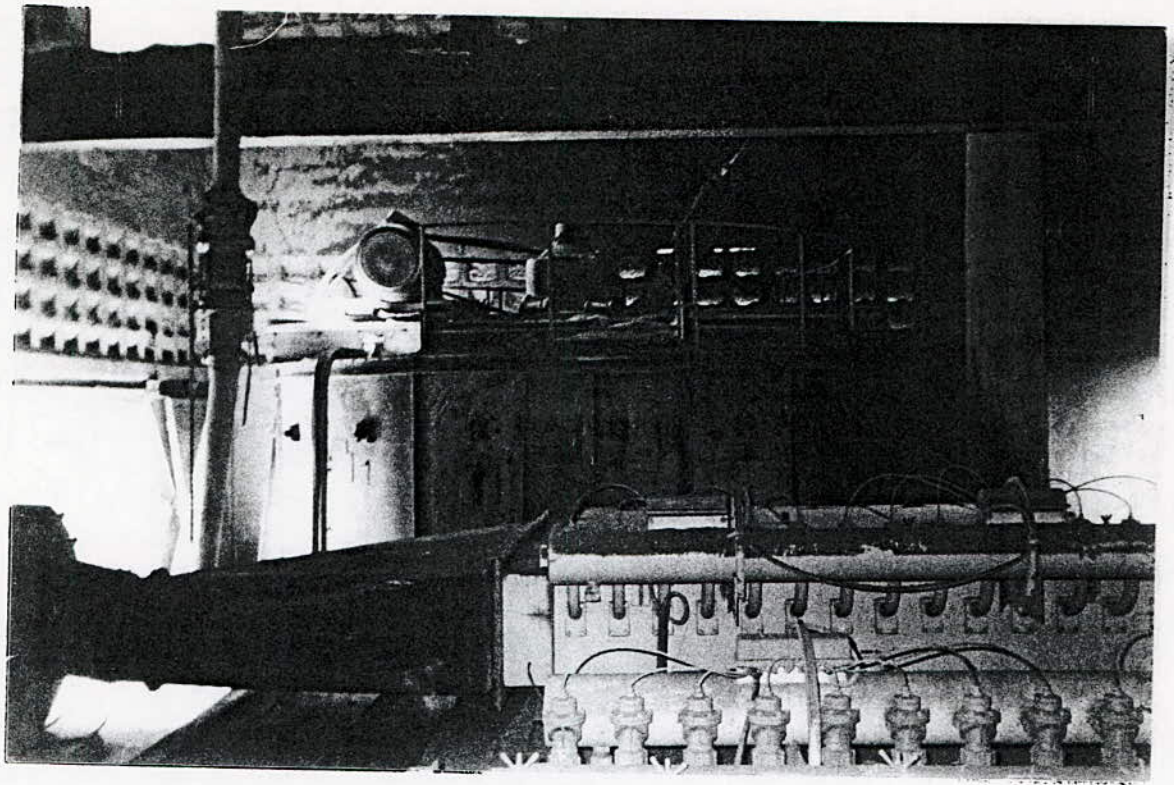


fig (F): Séparateur [C.R.Hamidou]

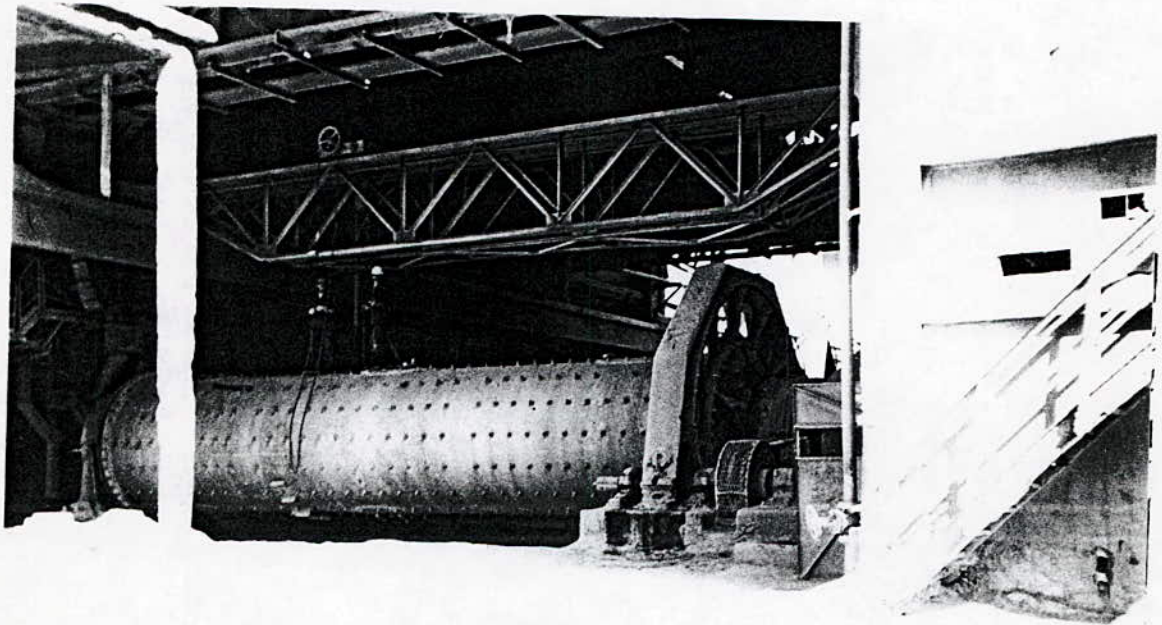


fig (E): Broyeur [C.R.Hamidou]

Les granulats que nous utilisons on fait l'objet d'une étude précédente [4], qui a donner des résultats suivants:

2-3 GRAVILLONS:

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

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

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

2-3-1 RESISTANCE MECANIQUE DU GRANULAT:

La résistance a l'écrasement est un facteur important pour fabriquer un bon béton. Elle doit être suffisamment élevée si l'on veut que le béton ait une résistance élevée.

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

Granulat	15/25	5/15	3/18	0/3
Caractéristique				
Masse volumique apparente (Kg/)	1,25	1,28	1,39	1,26
Masse volumique absolue (kg/)	2,58	2,56	2,60	2,60
Coefficient volumétrique	0,28	0,18	0,16	/
Los Angeles %	25	25	25	/

2-3-2 GRANULOMETRIE:

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

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

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

a-GRAVIER 3/8

Q (mm)	Refus (gr)	Tamisât (gr)	Pourcentage (%)
12,5	2,725	997,275	99,72
8	16,648	900,627	90,62
5	347,659	552,968	55,29
2	513,194	39,7774	3,97
1,25	31,105	8,669	0,86
Reste	5,254	/	0,52

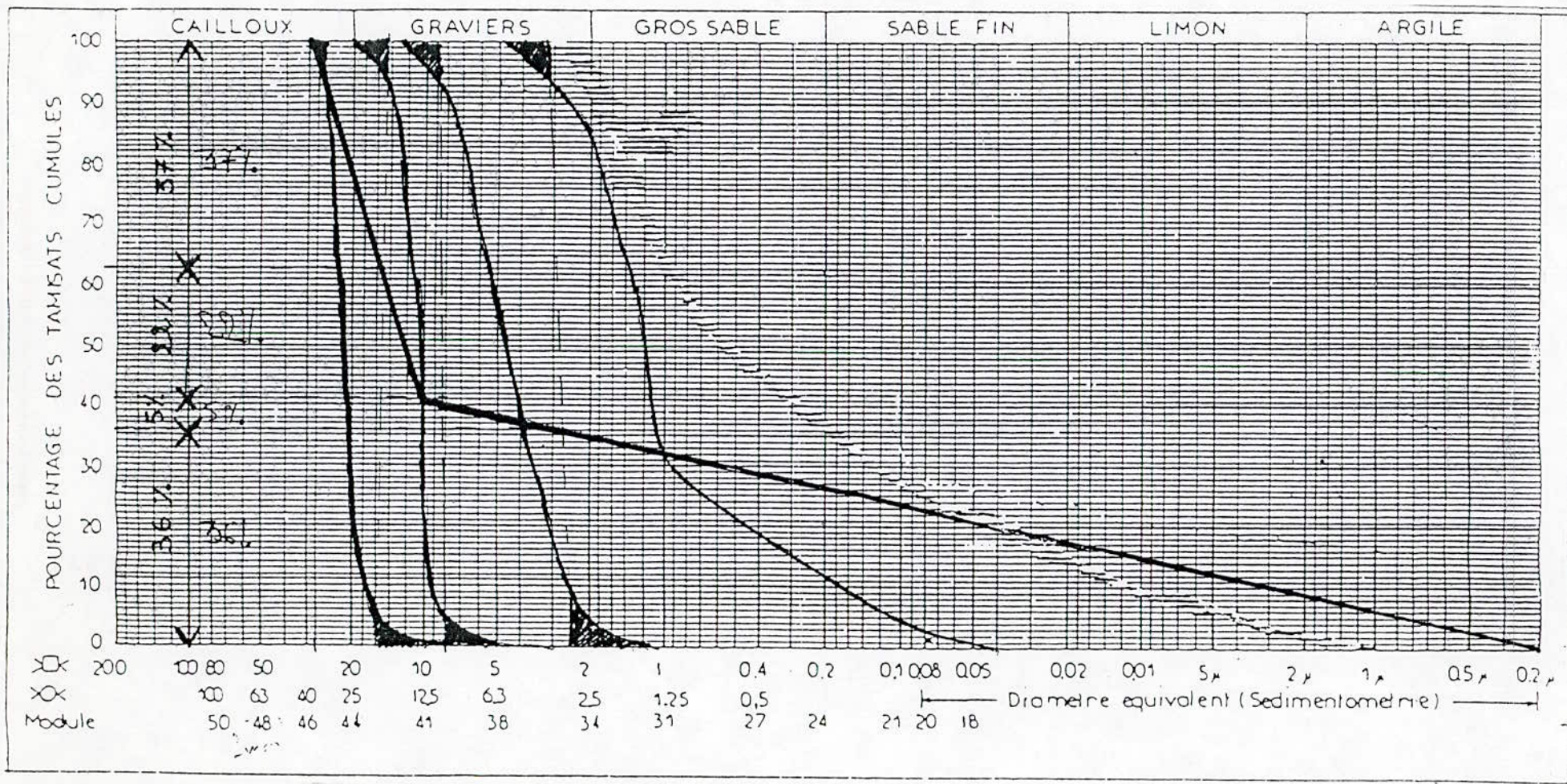
b-GRAVIER 5/15

Q (mm)	Refus	Tamisât (gr)	Pourcentage (%)
12,5	2,725	997,275	99,72
8	16,648	900,627	90,62
5	347,659	552,968	55,29
2	513,194	39,774	3,97
1,25	31,105	8,669	0,86
Reste	5,254	/	0,52

c-GRAVIER 15/25

Q (mm)	Refus (mm)	Tamisât (gr)	Pourcentage (%)
32	0	1000	100
25	76,349	923,651	92,36
20	418,167	514,484	51,45
16	180,83	133,654	23,36
12	190,15	43,504	4,35
8	35,75	7,754	0,77
Reste	5,986	/	0,59

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



2-4 SABLE:

Une granulométrie bien étagée est souhaitable, en évitant le manque de continuité avec le ciment (qui conduit à des ressuyages excessifs). Les grains de sable Alluvionnaires ont en générale une forme satisfaisante, mais sont parfois trop rares dans l'intervalle [100, 500mm]; dans ce cas on améliore le mélange par un ajout de sable concassé. pour cela on a choisi correctement un sable concassé fourni par la carrière JOBERT D'ALGER, ce sable est caractérisé par:

2-4-1 COURBE GRANULOMETRIQUE:

sable 0/3 M = 2000gr

Q (mm)	Refus (gr)	tamisât (gr)	tamisât (%)	refus (gr)
4,75	10,913	1989,08	99,45	0,54
2	449,07	1540,01	77,00	83
1,25	406,07	1133,94	56,69	43,30
0,63	452,59	681,342	34,06	65,93
0,315	274,561	406,78	20,33	79,66
0,125	242,26	164,52	8,22	91,77
Reste	160,17	/	7,99	/

2-4-2 MODULE DE FINESSE D'UN GRANULAT:

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

0,125 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2 - 4,75 .

Il est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante; par exemple le sable dont la courbe est tracée ci-après a pour module de finesse $M_f = 3,04$ calculé ainsi :

Refus sur le tamis $d = 0,125$; = 91,77 %

Refus sur le tamis $d = 0,315$; = 79,66 %

Refus sur le tamis $d = 0,63$; = 65,93 %

Refus sur le tamis $d = 1,25$; = 43,30 %
Refus sur le tamis $d = 2$; = 23,00 %
Refus sur le tamis $d = 4,75$; = 0,54 %
Total = 304 ; $M_f = (1/100) \times 304 = 3,04$.

$2,8 < M_f < 3,1$, correspondant a des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité.

2-5 EAU DE GACHAGE:

Ce qu'il faut rechercher lorsqu'on désire améliorer la résistance en compression d'un béton, c'est d'augmenter au maximum sa capacité n'introduisant, pour cela dans le béton que la quantité d'eau strictement nécessaire a l'hydratation effective des grains de ciment; toute eau additionnelle affaiblira de façon irréversible la résistance en compression du béton.

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

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

Le dosage en eau conduit a des rapports eau/ciment (en poids) compris entre 0,35 et 0,5, il est important de diminuer le plus possible ce rapport, tout en gardant une maniabilité convenable.

PARTIE

EXPERIMENTALE

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre III - ETUDE EXPERIMENTALE

3.1- Introduction :

Les caractéristiques principales que nous devons déterminer, dans notre étude, portent sur :

- 1) - SSB - surface spécifique de Blaine
- 2) - Consistance normale
- 3) - Délais de prise
- 4) - Résistance à la compression

1.- SSB - surface spécifique de Blaine

L'appareil Blaine se compose essentiellement d'une cellule de mesure, d'un piston et d'une grille en métal inoxydable, ainsi que d'un manomètre en verre en forme de 'U', l'appareil est étalonné avec une poudre étalon de surface spécifique et de masse volumique connues, la masse spécifique est la surface exprimée en cm^2 par gramme de mouture.

Ce que l'on mesure c'est le temps que met l'air, filtrant à travers la cartouche de poudre tassée, pour que le niveau d'un liquide non volatil, de faible densité, préalablement en dépression jusqu'à un repère supérieur du tube manométrique, redescende jusqu'au niveau d'un repère inférieur de ce tube

- Principe de la méthode :

On place la grille perforée au fond de la cellule puis, dessus, un disque de papier filtre, on verse la poudre, que l'on tasse au moyen du piston, on aspire de l'air, à travers la cartouche de ciment (comprimé préalablement) l'aspiration se fait au moyen d'un tube à poire de manière à créer une dépression sous la cartouche, au moyen d'une différence de hauteur du liquide aspiré, on note en seconde le temps 't' mis pour rétablir un certain niveau dans le tube par rentrée d'air à travers la cartouche de ciment.

La surface spécifique 'S' est calculée par la formule suivante :

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

SSB: surface spécifique de Blaine

K : constante de l'appareil

t : temps mesuré en seconde

ρ : masse spécifique

e : porosité de la couche tassée = 0,5

η : viscosité de l'air à la température d'essai

2. - Consistance normale

Le but de la norme : la pâte normale est une pâte pure, c'est-à-dire telle qu'on opère avec l'appareil de Vicat. La lecture donnant l'épaisseur de la pâte restant entre l'extrémité inférieure de la sonde et le fond du moule ; quant celle-ci cesse de s'enfoncer à l'aide de son propre poids (6 ± 1) mm

- Spécification de l'appareil de Vicat

L'appareil de Vicat est composé essentiellement d'un piston vertical immobile, muni à son sommet d'un plateau destiné à recevoir une surcharge et portant un creuseur se déplaçant devant une graduation de 40 mm.

A sa partie inférieure, le piston peut recevoir soit la sonde, soit une porte-aiguille, pèse 300 ± 1 g avec une surcharge (100 ± 2 g).

- Préparation de la pâte

On verse dans le malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminée par des tâtonnements successifs de manière à réaliser la C.N, lui ajouter 500 g de ciment afin de remplir le moule tronconique.

- Confection de l'éprouvette

Avec la pâte, ainsi préparée, on remplit le moule tronconique qui est constitué par un anneau reposant sur place support, puis arroser la surface avec une truelle en la déplaçant d'un mouvement de scie de faible amplitude.

- Vérification de la consistance normale

Placer le moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde et la laisser descendre. Cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte est immobilisée à son contact puis l'abandonner à elle-même sans vitesse initiale. Procéder à la lecture de la pâte quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids.

3) - Début et fin de prise

Le délai de prise a pour but de déterminer le temps de prise qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage, le début et fin de prise.

Mesurer une pâte pure, conformément à la norme NFP 15.431 aux spécifications ci-après :

a) - ciment des classes 35 et 45 ont à 20°C, un temps de début de prise supérieure à une 1h30 mn

b) - les ciments des classes 55 et H.P ont à 20°C : temps de début de prise supérieur à 1h.

-Techniques de l'essai

On détermine l'essai de prise avec l'appareil de Vicat , l'essai de prise est effectué sur une pâte normale NFP 15.402 ou sur un mortier normal NFP 15.403.

Après avoir préparé une pâte normale, il faut remplir, immédiatement, le moule tronconique et arroser la surface avec une truelle. Donc, placer le moule rempli de pâte sous l'axe de l'aiguille, lui laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface et immobiliser à son contact, puis l'abandonner à elle-même sans vitesse initiale.

- Détermination du temps de prise

Le but de prise est l'instant où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à un mm du fonds du moule pour une pâte normale.

La fin de prise s'est l'instant où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte.[2].

4) - Résistance à la compression

La résistance à la compression et, dans la plupart des cas, la qualité la plus recherchée dans l'emploi du liant.

La contrainte de rupture par compression est déterminée par des cubes de 10 cm d'arrête ;chaque cube est essayé en compression dans une presse. Le cube est placé entre les deux plateaux de cette dernière de telle sorte que la charge puisse croître à une vitesse permettant l'écrasement.

$$R_c = P \text{ (MPa)}$$

P = charge en KN

S = section (100 cm²)

Ce qui nous intéresse le plus dans les essais de compression, c'est l'évolution de la résistance à la compression les premiers jours, sinon les premières heures, conformément à ce qu'exigent les besoins d'utilisation du ciment spécial.

Remarque :

- Un étallonnage de la presse a été effectué avant le début des essais.
- Pour chaque résultat d'essai de compression, on prendra la moyenne de 2 écrasements.

**Avant d'engager notre travail de recherche, il importe de connaître :

l'action du chlorure de calcium

- l'action de la finesse de mouture

5)- Action du chlorure de calcium

L'influence du chlorure de calcium au ciment, ainsi qu'au mortier et béton, à base de différents ciments, a fait l'objet, dans la plupart des pays, d'importantes études.

Le chlorure de calcium du commerce se présente sous forme de paillettes ; il est composé de deux hydrates et il titre de 72 à 75% de CaCl_2 pur. Ce point ne doit pas être perdu de vue.

Le CaCl_2 anhydre a pour densité 2,15 à 25°C et 2,26 à 20°C . Le chlorure de calcium fondu se dissout dans l'eau et provoque un grand dégagement de chaleur (environ 17.500 calories de chaleur de dissolution moléculaire, dont 200 molécules d'eau à 15°C).

La chaleur de formation de $\text{Cl}_2 + \text{Ca} = \text{CaCl}_2$ est de 190.500 calories environ.

Le CaCl_2 a pour masse moléculaire 111.

Le CaCl_2 augmente la vitesse de prise de durcissement qui correspond à un dégagement de chaleur qui, dans certains cas, se manifeste très rapidement après le gâchage. C'est un adjuvant précieux quand on l'utilise pour bétonner en période de gel.

Le CaCl_2 donne au sein des ciments, en cours d'hydratation, du chloro- aluminate tricalcique hydraté de formule $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

En outre, le CaCl_2 n'a d'effets heureux que pour des doses optimales, assez étroitement limitées, la moyenne est aux environs de 2% du poids du ciment. Ces 2% étant évalués en produit commercial qui contient $\frac{3}{4}$ de CaCl_2 pur.

L'action du CaCl_2 sur le retrait.

Le chlorure de calcium accroît le retrait des ciments, mais il accroît en même temps les résistances, de telle sorte que jusqu'à une teneur optimale de 2 % en

poids de ciment, le risque de fissuration n'est pas augmenté (le retrait est approximativement augmenté dans la même proportion que la résistance à l'attraction, dans les premiers jours du durcissement, qui sont les plus critiques). Notons, d'ailleurs, que jusqu'à un dosage de 2 % du poids du ciment, l'accroissement du retrait est modeste (ce retrait est environ doublé pour 2 %, mais il est décuplé pour 5 % de CaCl_2). [1].

Action du CaCl_2 sur les armatures d'acier du béton armé :

En 1947, les essais ont été effectués au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France) sur des bétons armés consistant, dans la mesure de la résistance à la traction des aciers utilisés avec une présence de chlorure de calcium dans le béton.

Ces essais ont montré que l'acier ne subit aucune diminution de résistance du fait de la présence du CaCl_2 dans le béton. (dosage maximum : 4%) ; ceci tendrait donc à prouver que l'acier, dans ces conditions, n'est l'objet d'aucune corrosion particulière. L'examen des barres après démoulage des prismes de béton armé a permis de constater que les résultats étaient pratiquement identiques, quelle que soit la proportion de CaCl_2 utilisée (entre 0% et 4%), de plus l'analyse chimique de l'acier prélevé sur les différentes barres n'a montré aucune différence de décomposition du métal [1].

Disons quelques mots des réalisations pratiques :

- aux USA on utilise couramment, depuis 1930, l'addition du CaCl_2 pour les bétons routiers, notamment dans l'état de New York, de même qu'au Canada ;
- par temps froid, la construction des barrages en béton se fait souvent par addition de CaCl_2 (barrage de Grand coulée - France) ;
- en Belgique, le CaCl_2 est très utilisé en masse ou en surface ;
- à citer, également, les bâtiments de l'Université de Gand - France ;
- les dalles de la route nationale Bruxelles - Lille, certaines sections ayant été bétonnées entre 0 et +4°C.

6)- La finesse de mouture

Cette finesse a une grande influence sur les caractéristiques et les quantités du liant avant, durant et après la prise.

L'hydratation du ciment se propageant de la surface vers l'intérieur des grains est fonction de la surface spécifique des grains et par suite de la finesse.

La finesse a aussi une grande influence sur la perméabilité de retrait, l'événement, la rapidité du durcissement et l'élévation des températures du béton en cours de prise.

** Connaissant les effets du chlorure de calcium et de la finesse de mouture sur la diminution des délais de prise et sur le durcissement, et pour faire entrer en ligne de compte les performances à atteindre avec ces deux éléments sur notre ciment, le CPJ45, on effectuera un certain nombre d'essais qui sont :

un broyage des ciments à différents temps (3h, 4h, 5h, 6h)

mesure des différentes SSB obtenues

essai de consistance normale des ciments de référence

■ mesure des délais de prise des ciments de référence avec 0,5 %, 1 %, 2 % de chlorure de calcium

mesure des délais de prise des ciments avec les différentes SSB obtenues

mesure des délais de prise des ciments avec la combinaison de la SSB et le chlorure de calcium (0,5 %, 1 %, 2 %)

essai de compression :

- essai de compression des ciments de référence à 3 jours et à 7 jours
- essai de compression des ciments spéciaux obtenus à 3h, 6h, 24h, 3 jours

3.2- Broyage du ciment

Le broyage a été effectué au Département Génie Minier en utilisant le broyeur à boulets dont la masse broyante est : (4 Ø 25 et 6 Ø 40) = 3.4 kg.

Le broyage a été réalisé à différents temps 3 h, 4 h, 5 h, 6 h.

3.3 - Mesure de la SSB

Pour chaque type de ciment, nous avons procédé à 3 essais.

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

$$K = 19,6426$$

$$e = 0,5$$

$$\rho = 3,15$$

$$A) \text{ Broyage : } 3h \quad T = 26^\circ \Rightarrow \sqrt{\eta} = 0,01355$$

Ciment	t ₁	t ₂	t ₃	SSB
CM	118s	104s	117s	3485
CRH	110s	139s	138s	3709

$$B) - \text{Broyage } 4h \quad T = 23^\circ \Rightarrow \sqrt{\eta} = 0,01350$$

Ciment	t ₁	t ₂	t ₃	SSB
CM	132s	121s	146s	3758
CRH	163s	195s	175s	4355

$$C) - \text{Broyage } 5h \quad T = 23^\circ \Rightarrow \sqrt{\eta} = 0,0135$$

Ciment	t ₁	t ₂	t ₃	SSB
CM	219s	218s	209s	4777
CRH	221s	200s	211s	4740

D) - Broyage 6h $T = 26^{\circ} \Rightarrow \sqrt{\eta} = 0,01355$

Ciment	t ₁	t ₂	t ₃	SSB
CM	246s	261s	243s	5150
CRH	258s	255s	267s	5250

Remarque : on peut diminuer le temps de broyage, donc une consommation moindre en électricité, en augmentant la masse broyante.

F)- Ciment de référence $T = 26^{\circ} \Rightarrow \sqrt{\eta} = 0,01355$

Ciment	t ₁	t ₂	t ₃	SSB
CM	90s	93s	91s	3112
CRH	112s	100s	90s	3264

3.4 - Essais de consistance sur les ciments de référence

Ciment	CN	profondeur de la sonde
CM	29%	30 cm
	31%	39 cm
	30%	37 cm
	30%	34.5 cm
	29.5%	34 cm
CRH	28%	40 cm
	26%	26 cm
	27%	31 cm
	27.5%	34 cm

Remarque : on remarque qu'il y a 2 % de différence entre les 2 consistances des 2 ciments ; cela est dû au fait qu'on utilise la méthode sèche pour préparer le ciment de Meftah auquel on ajoute du tuf. Ce dernier, qui est poreux, absorbe une certaine quantité d'eau, ce qui explique cette différence par rapport au ciment de Raïs Hamidou.

3.5- Début et fin de prise des ciments à différentes SSB avec 0% - 0,5% - 1% - 2% - de chlorure de calcium

- Ciment	% CaCl ₂	DP	FP	CN	SSB
CM	0%	1h30	3h45	29.5%	3112
	0.5%	50mn	2h30	29.5%	
	1.5%	40mn	1h35	28.875%	
	2%	30mn	1h15	28.5%	
CRH	0%	1h30	3h35	27.5%	3264
	0.5%	52mn	2h40	28.6%	
	1%	35mn	2h	29.1%	
	2%	30mn	1h25	29.6%	

Les résultats représentés au tableau ci-dessus sont une synthèse de plusieurs essais entrepris (21 essais).

Interprétation des résultats

On remarque pour les 2 ciments que les temps de prise, (le début ou la fin de prise), diminuent au fur et à mesure qu'on augmente le pourcentage du CaCl₂ (figures 1, 2), cela est dû au fait que le CaCl₂ :

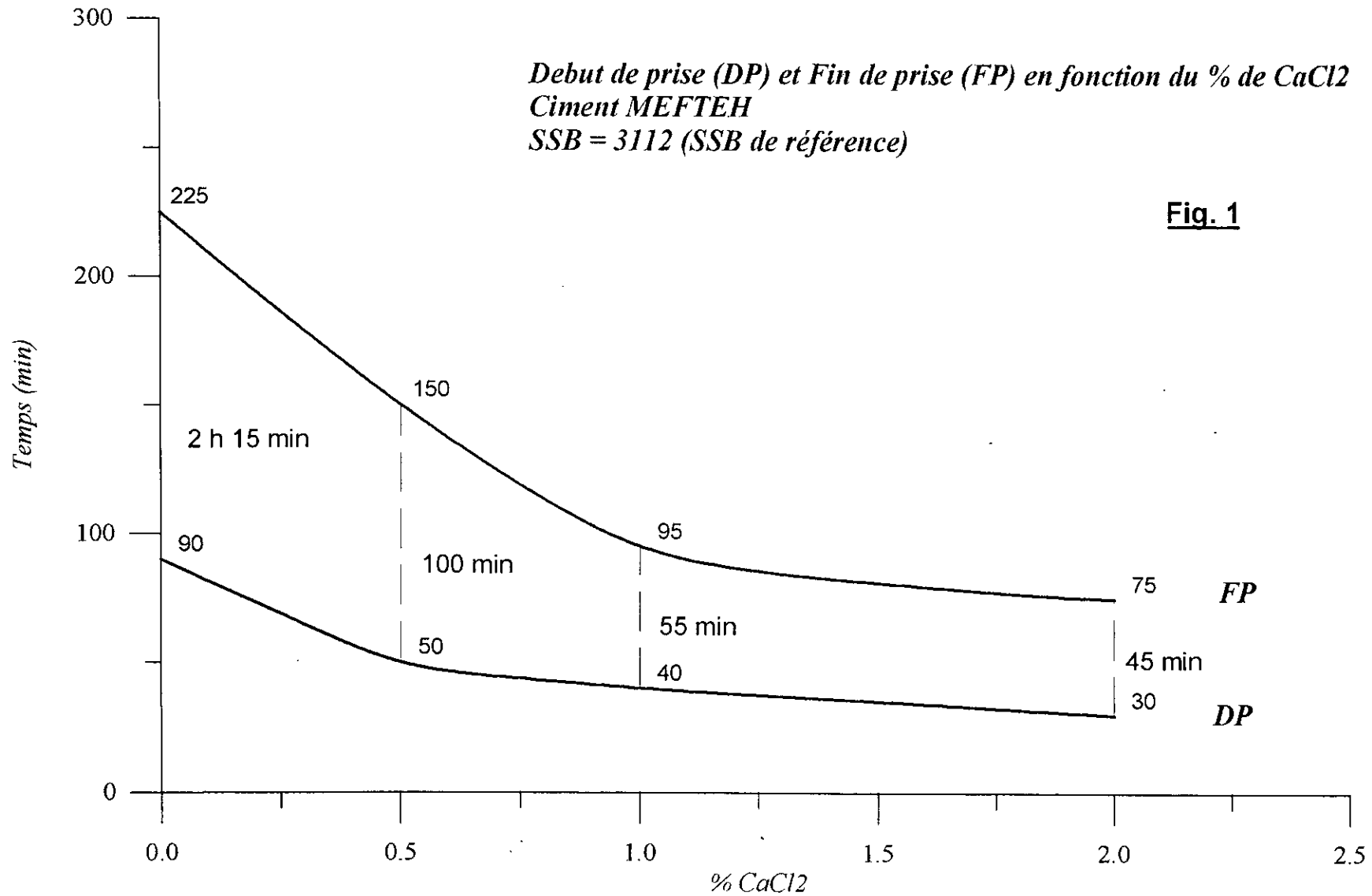
- * augmente le degré d'hydratation
- * accélère la transformation des produits hydratés
- * augmente la dissolution du C₃S
- * accélère la vitesse d'hydratation d'où augmentation de la réaction de l'eau

Conclusion :

Le CaCl₂ est un bon accélérateur de prise

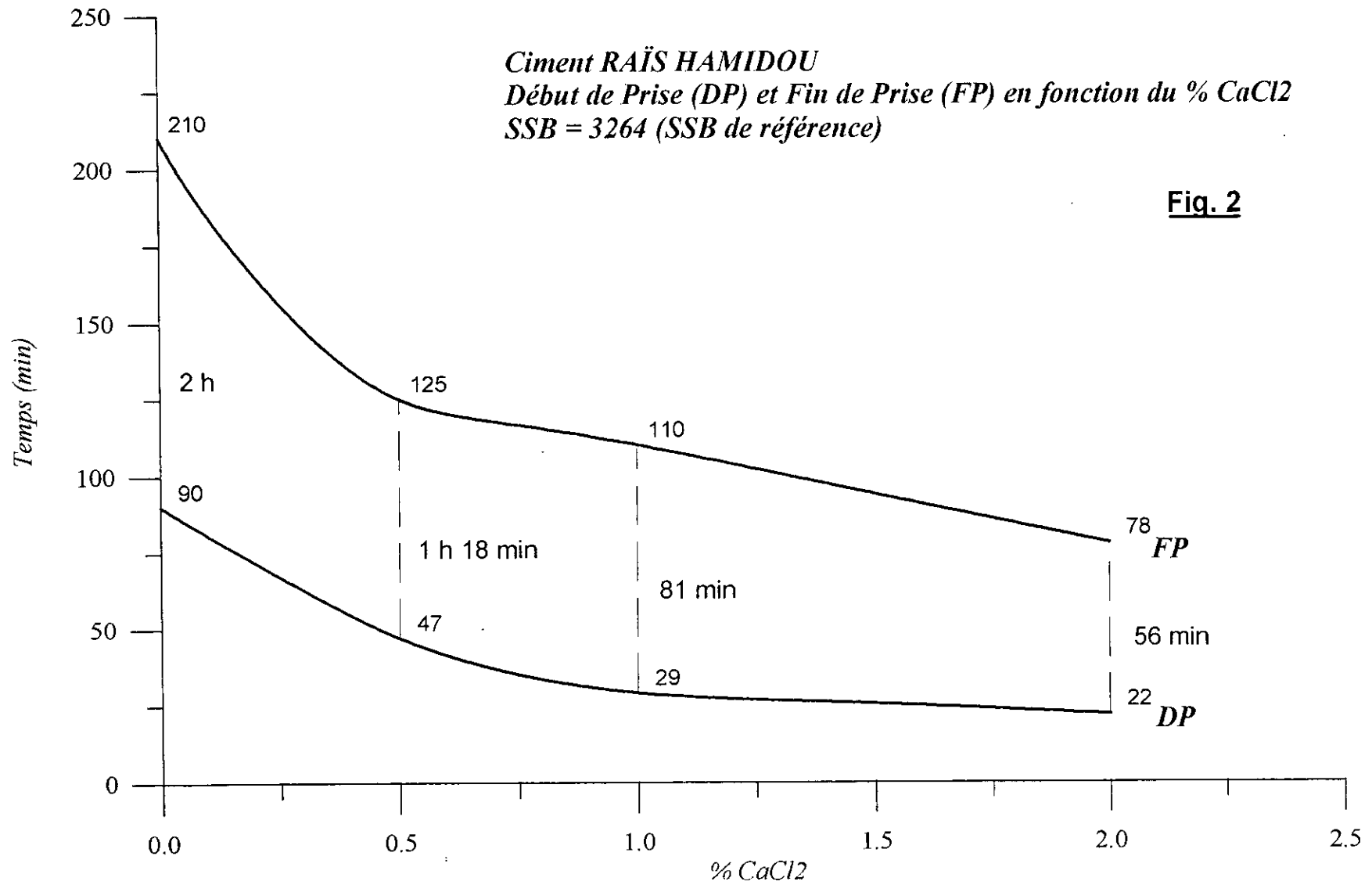
*Debut de prise (DP) et Fin de prise (FP) en fonction du % de CaCl2
Ciment MEFTEH
SSB = 3112 (SSB de référence)*

Fig. 1



Ciment RAÏS HAMIDOU
Début de Prise (DP) et Fin de Prise (FP) en fonction du % CaCl₂
SSB = 3264 (SSB de référence)

Fig. 2



3.6- Essais de début et fin de prise des ciments de référence, en fonction des différentes SSB - broyage 3h - 4h - 5h - 6h

Ciment	SSB	DP	FP	CN
Ciment	3485	1h20	3h10	26.7%
de	3758	1h	2h55	26.5%
Mefteh	4777	47mn	1h55	26.3%
	5150	35mn	1h45	26.2%
Ciment	3709	1h20	2h55	28.8%
de	4258	1h15	2h35	28.5%
Rais	4740	1h10	2h25	27.4%
Hamidou	5250	58mn	2h17	26.9%

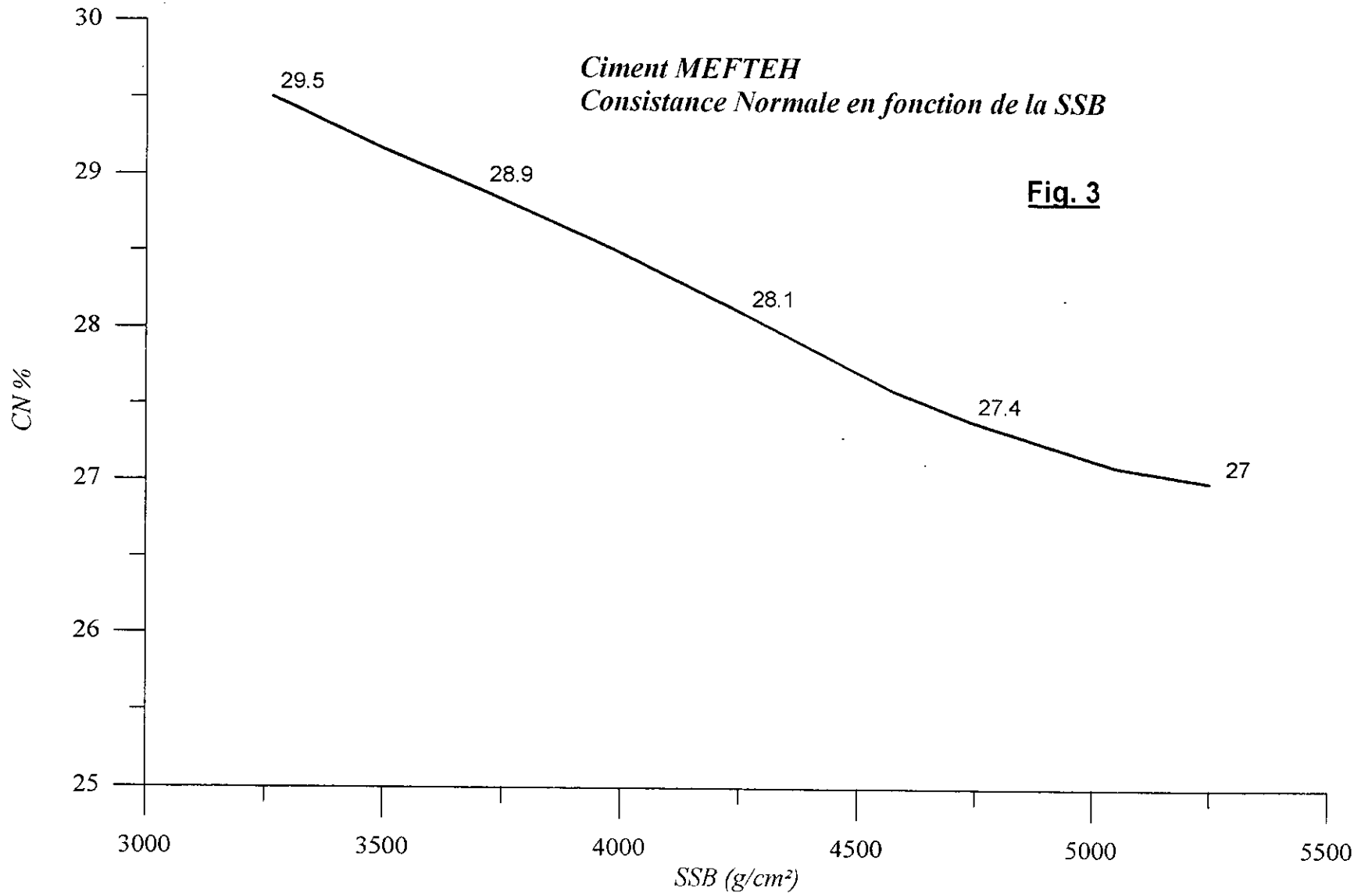
Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, nous constatons que l'augmentation de la SSB modifie la consistance normale ; cette dernière diminue au fur et à mesure que la SSB augmente (voir figures 3 et 4).

En effet, les grains du ciment sont plus fins, donc beaucoup plus compacts entre eux et la teneur nécessaire en eau, varie dans le même sens que la surface offerte par les grains, ce qui fait plus la SSB est grande, moins on a de vides entre les grains, moins on utilise d'eau.

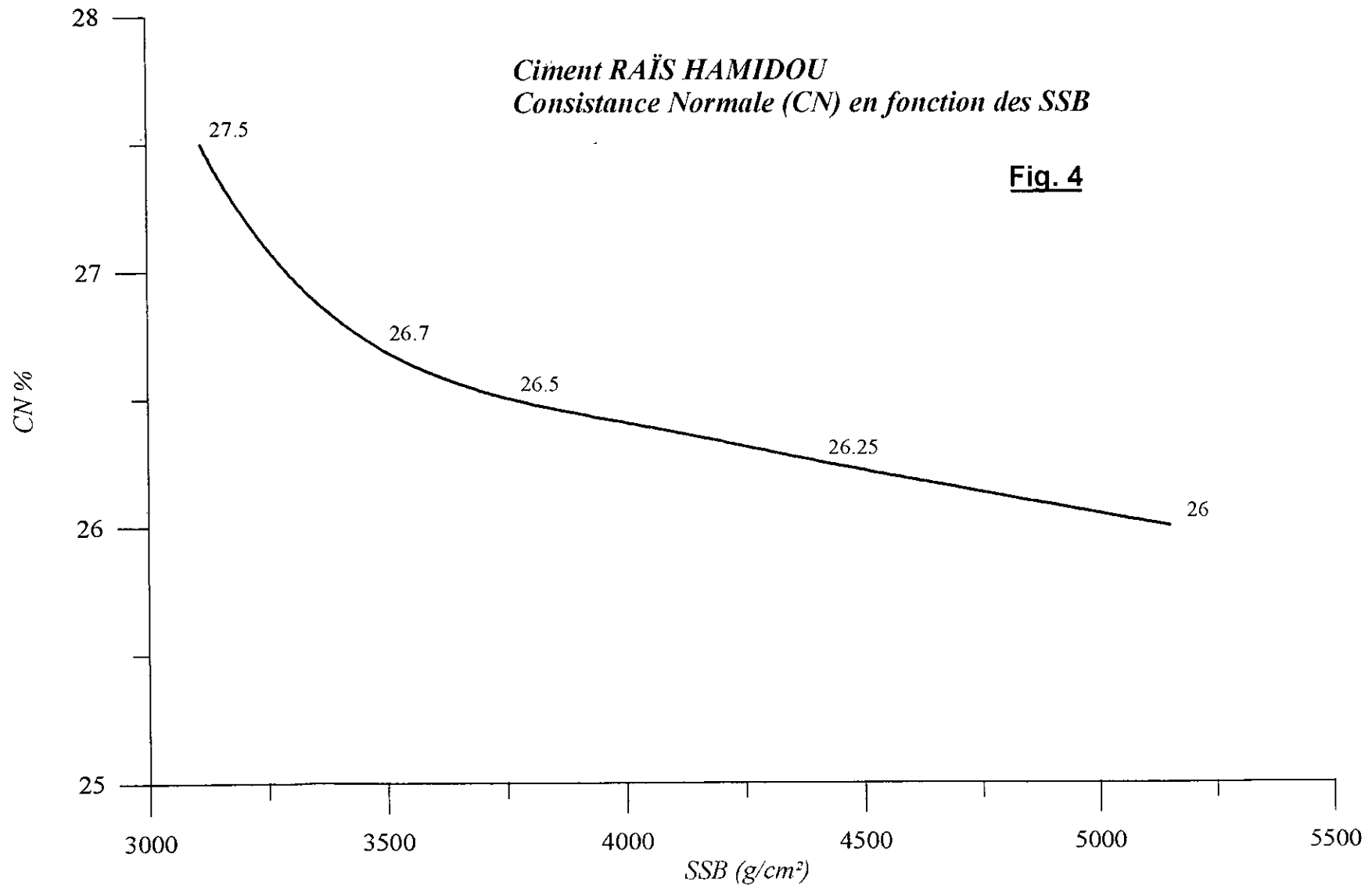
On constate aussi que les délais de prise diminuent au fur et à mesure que la SSB augmente (figures 5, 6).

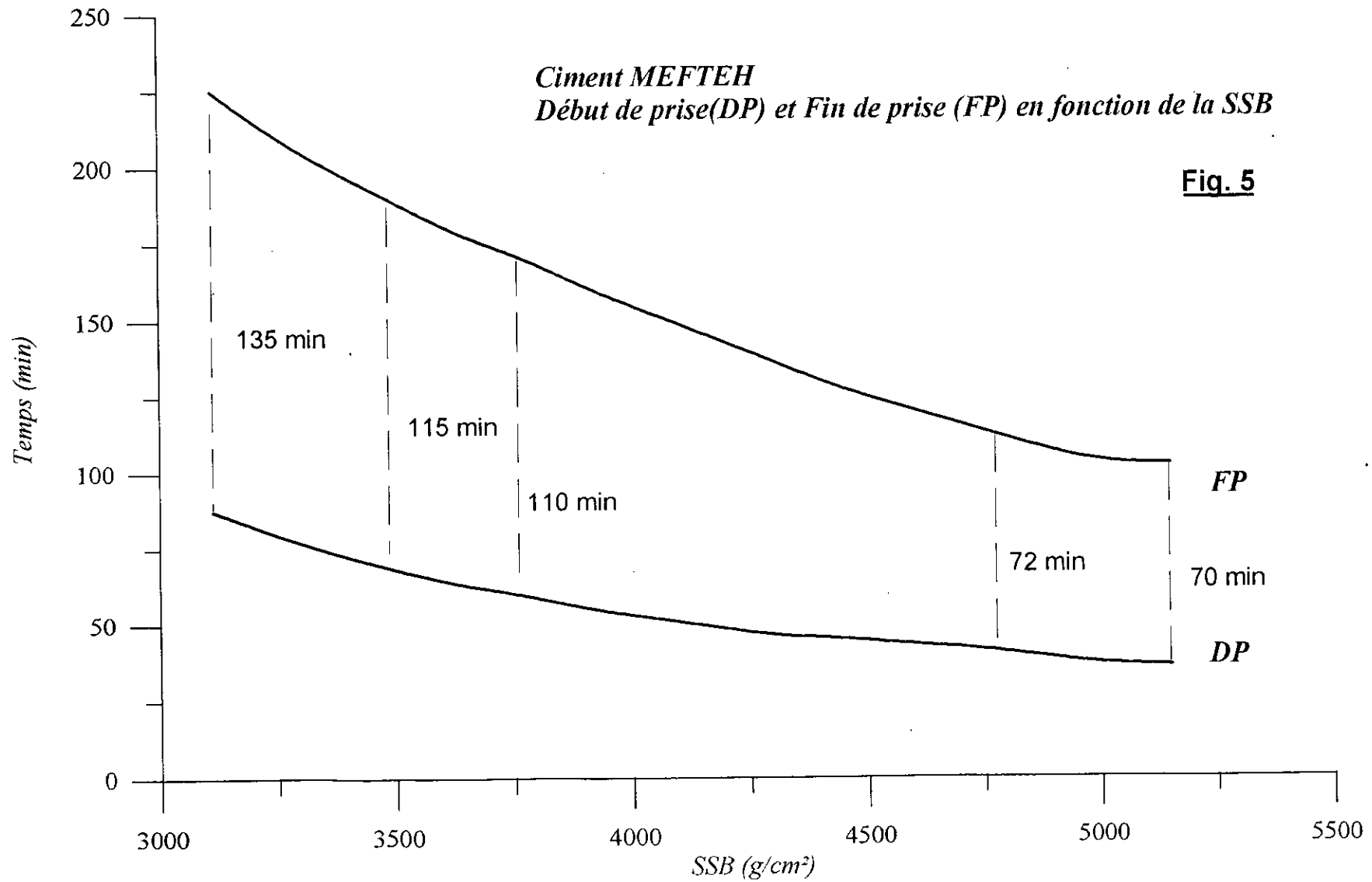
Ce phénomène s'explique d'ailleurs parfaitement dans un ciment à minimum d'eau. La fin de prise du ciment est atteinte bien plus rapidement que les ciments plus riches en eau, car lors de l'hydratation du ciment, les films d'eau entre grains sont entièrement saturés en éléments dissous, puis sursaturés en éléments hydratés. La précipitation cristalline est donc plus rapide (les gradients concentrés n'existent pas comme dans un ciment riche en eau).



Ciment RAÏS HAMIDOU
Consistance Normale (CN) en fonction des SSB

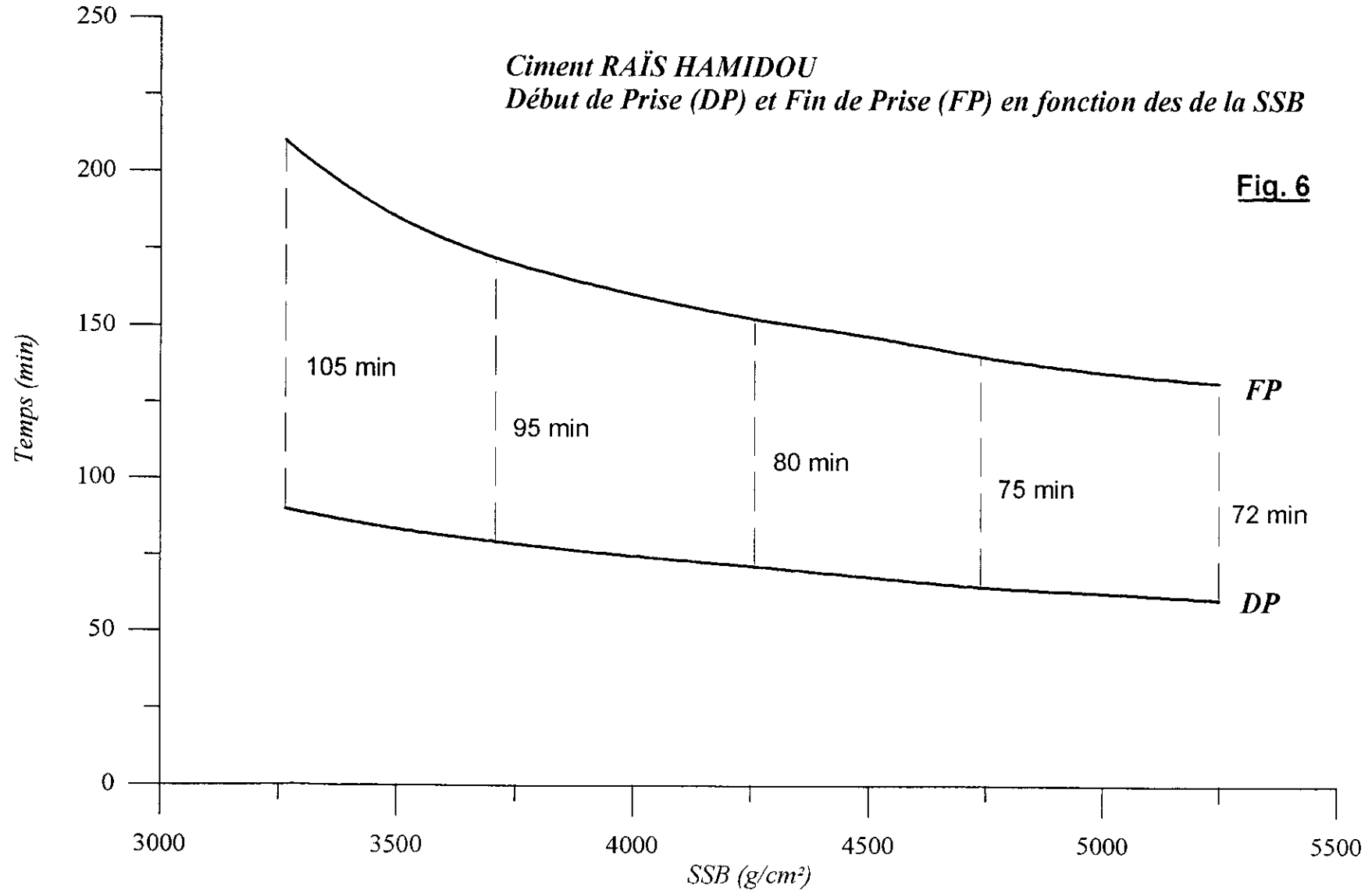
Fig. 4





Ciment RAÏS HAMIDOU
Début de Prise (DP) et Fin de Prise (FP) en fonction des de la SSB

Fig. 6



Conclusion : la finesse de mouture est un bon accélérateur de prise. Elle a une grande influence sur les caractéristiques du ciment, l'hydrolyse et l'hydratation.

3.7- Combinaison de l'action du CaCl₂ et celle de la SSB

Pour arriver à notre but, l'effet du chlorure de calcium sera combiné à celui de la finesse de mouture.

La quantité optimale recommandée pour l'emploi du CaCl₂ ne peut excéder les 2 %. A cet effet, nous procéderons, surtout à un contrôle de la SSB.

Les différents essais s'effectueront en ajoutant à différentes quantités de CaCl₂ 0,5% - 1% - 2% - du poids du ciment aux différentes SSB (obtenues après broyage).

3.7.1- Essais de DP et FP pour un broyage de 3h.

Ciment	% de CaCl ₂	DP	FP	CN	SSB
CM	0%	1h20mn	3h10mn	26.71 %	3485
	0.5%	40mn	1h55mn	29.5 %	
	1%	35mn	1h45mn	29.225 %	
	2%	23mn	1h10mn	28.875 %	
CRH	0%	1h20mn	2h55mn	28.8%	3709
	0.5%	47mn	2h05mn	28.5%	
	1%	29mn	1h50mn	28.8%	
	2%	28mn	1h18mn	29.4%	

3.7.2- Essais de DP et FP pour un broyage de 4h.

Ciment	% de CaCl ₂	DP	FP	CN	SSB
CM	0%	1h	2h55mn	26.5%	3758
	0.5%	30mn	1h35mn	27.87%	
	1%	23mn	1h25mn	27.4%	
	2%	15mn	1h02mn	27.075%	
CRH	0%	1h15mn	2h35mn	28.5%	4258
	0.5%	35mn	1h40mn	28.2%	
	1%	22mn	1h27mn	28.4%	
	2%	16mn	1h10mn	29%	

3.7.3- Essais de DP et FP pour un broyage de 5h.

Ciment	% de CaCl ₂	DP	FP	CN	SSB
CM	0%	47mn	1h55mn	26.3%	4777
	0.5%	20mn	1h20mn	26.25%	
	1%	15mn	1h10mn	25.75%	
	2%	10mn	50mn	25.375%	
CRH	0%	1h10mn	2h25mn	27.4%	4740
	0.5%	23mn	1h30mn	27.5%	
	1%	16mn	1h12mn	27.7%	
	2%	12mn	55mn	28.3%	

3.7.4- Essais de DP et FP pour un broyage de 6h.

Ciment	% de CaCl ₂	DP	FP	CN	SSB
CM	0%	35mn	1h45mn	26.2%	5150
	0.5%	17mn	1h10mn	26.1%	
	1%	12mn	1h	25.775%	
	2%	4mn	40mn	25.5%	
CRH	0%	58mn	1h17mn	26.9%	5250
	0.5%	18mn	1h18mn	27.1%	
	1%	12mn	1h	27.3%	
	2%	6mn	47mn	27.4%	

Remarque : Les résultats représentés aux tableaux ci - dessus sont une synthèse de plusieurs essais entrepris (132 essais)

Interprétation des résultats

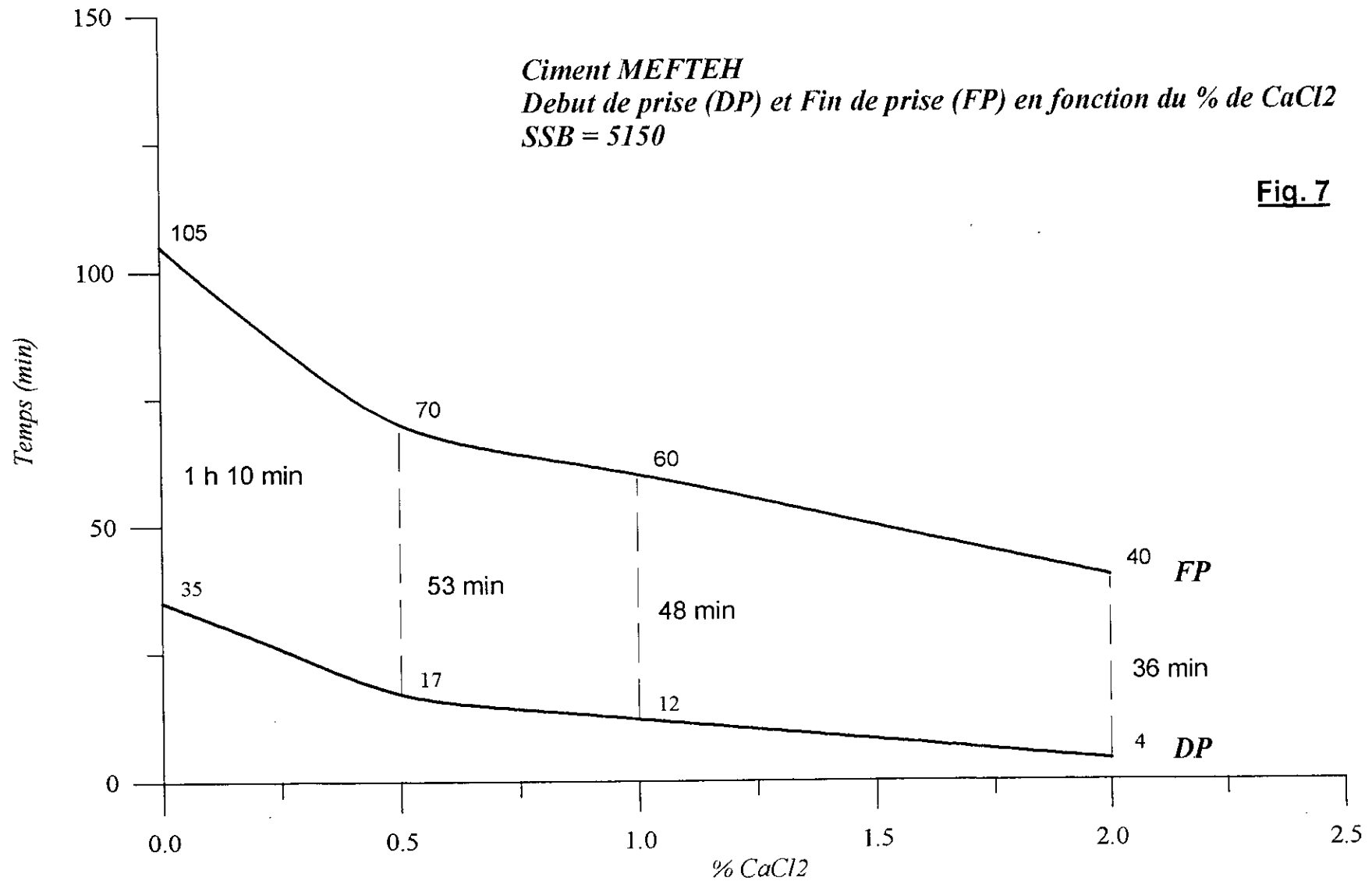
Toutes les conditions étudiées et choisies pour les deux ciments assurent dans tous les cas une diminution de la durée de prise.

Les graphes 7, 8, 9, 10, 11 montrent bien que pour chaque SSB la durée de prise diminue parallèlement à l'augmentation du chlorure de calcium (0 %, 0,5 %, 1 %, 2 %).

Etant limités par une addition de 2 % de chlorure de calcium (comme indiqué sur les tableaux), les durées de prise des ciments, pour un même pourcentage de CaCl₂, diminuent au fur et à mesure que la SSB augmente.

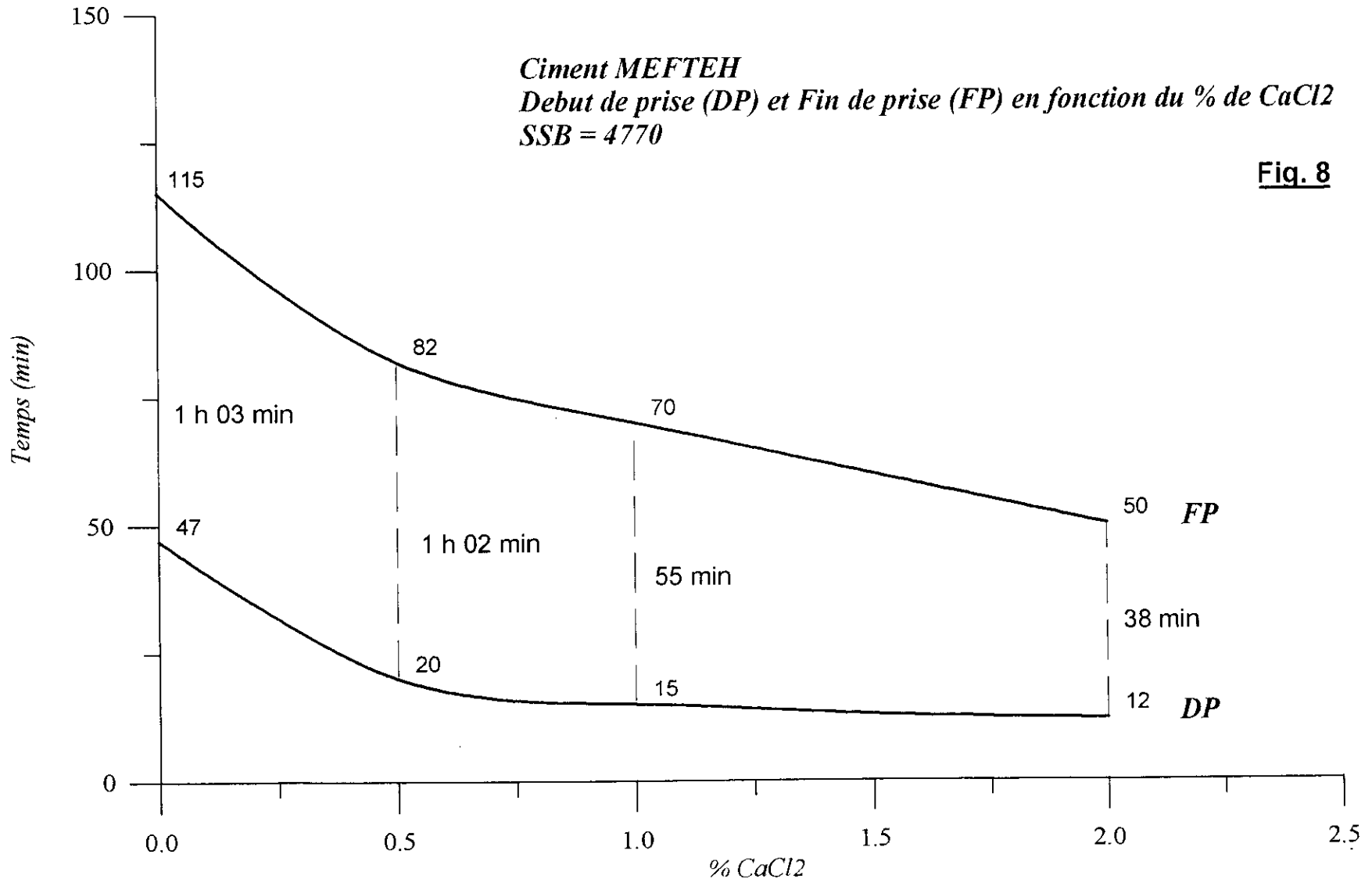
Ciment MEFTEH
Debut de prise (DP) et Fin de prise (FP) en fonction du % de CaCl2
SSB = 5150

Fig. 7



Ciment MEFTEH
Debut de prise (DP) et Fin de prise (FP) en fonction du % de CaCl2
SSB = 4770

Fig. 8



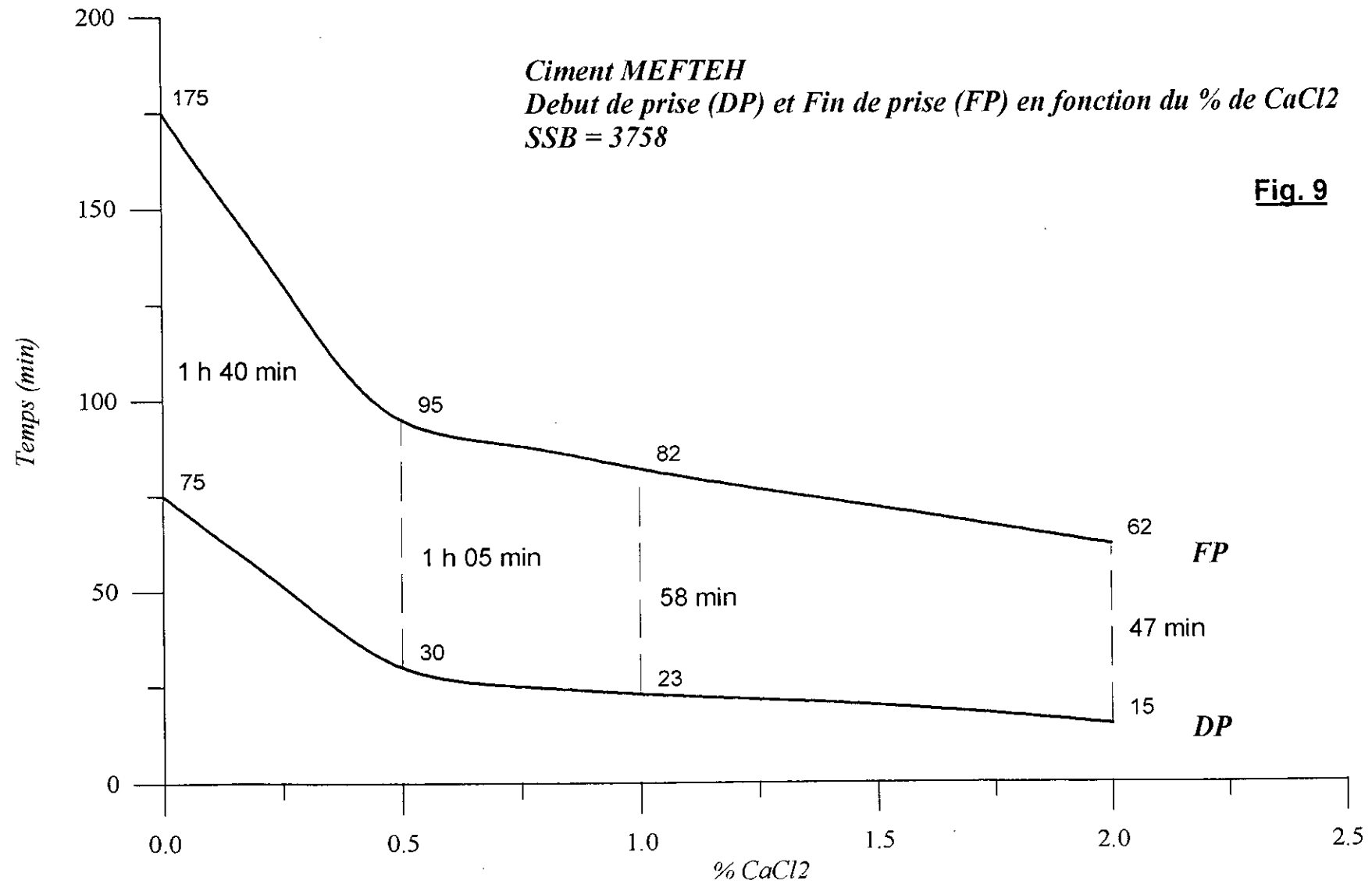
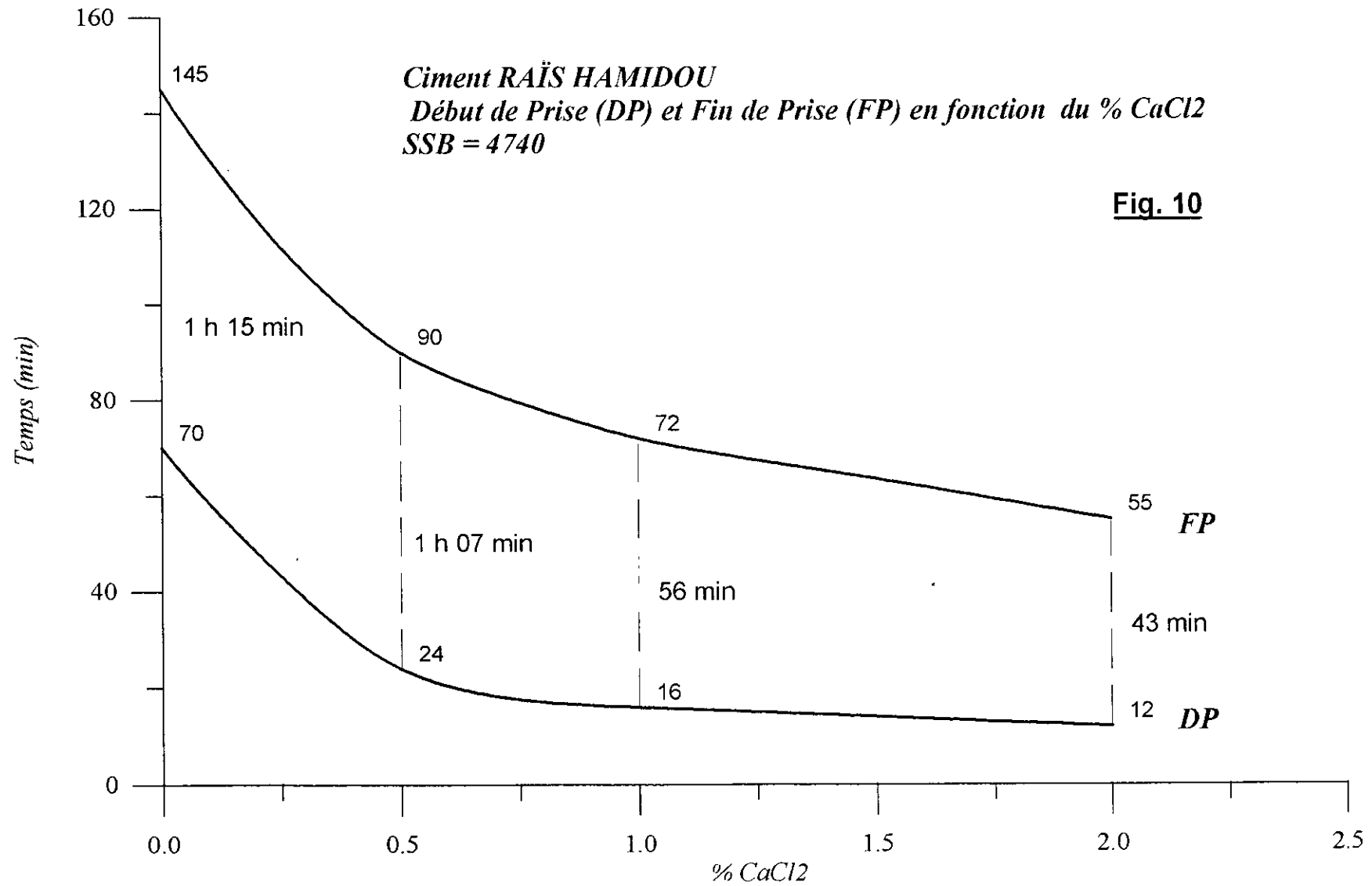
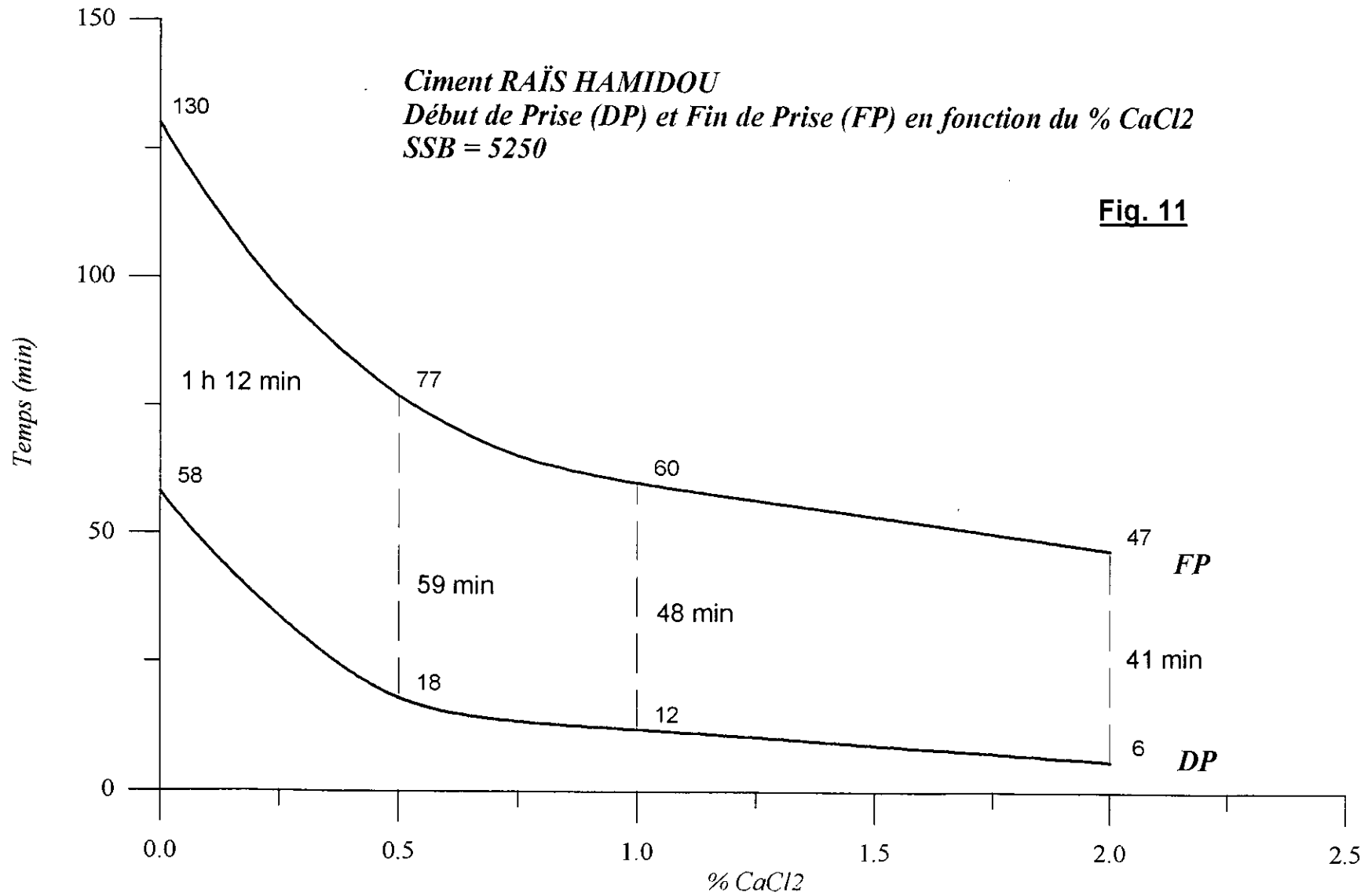


Fig. 9



Ciment RAÏS HAMIDOU
Début de Prise (DP) et Fin de Prise (FP) en fonction du % CaCl₂
SSB = 5250

Fig. 11



Les meilleurs résultats ont été obtenus :

- pour le ciment de Meftah : début de prise 4 mn, fin de prise 40 mn et une SSB de 5.150 et une teneur en chlorure de calcium de 2 %.
- pour le ciment de Raïs Hamidou : début de prise 6 mn, fin de prise 47 mn avec une SSB de 5.250 et une teneur en chlorure de calcium de 2 %.

Remarque :

La consistance normale du ciment de Meftah diminue au fur et à mesure qu'on ajoute du chlorure de calcium, (voir figure 13) alors que celle du ciment de Raïs Hamidou augmente. (voir figure 14).

En ce qui concerne la diminution de la consistance normale du ciment de Meftah, celle-ci est due, probablement, à une réaction entre le chlorure de calcium et le tuf qu'on ajoute au ciment de Meftah, lors de sa fabrication.

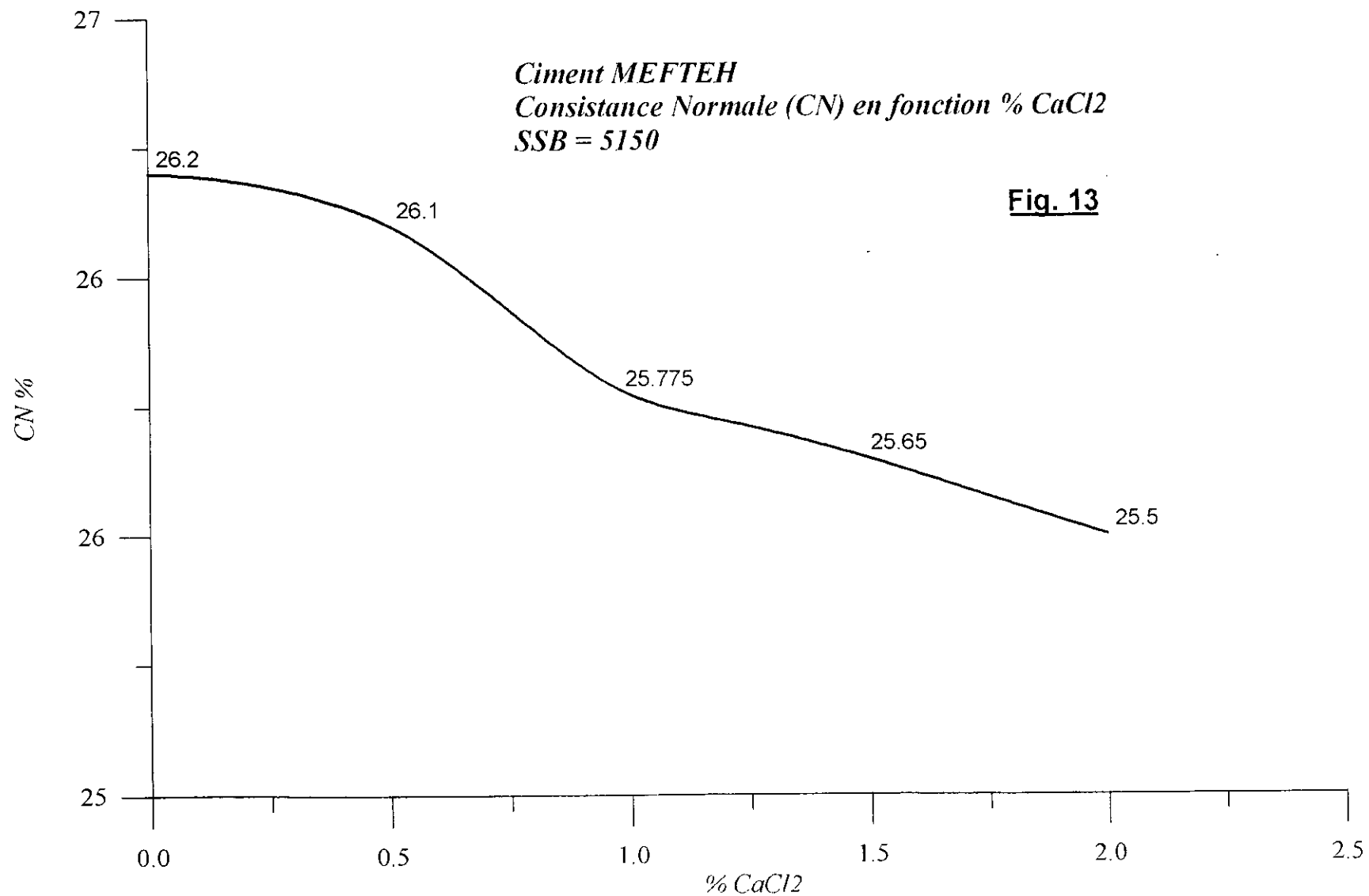
Pour ce qui est de l'augmentation de la consistance normale du ciment de Raïs Hamidou, celle-ci est due, principalement, à la réaction du chlorure de calcium avec les aluminates tricalciques qui donne le chloro - aluminate tricalcique hydraté.

Conclusion

La combinaison du chlorure de calcium et une SSB de près de 5.000 montre un effet positif et entraîne une réduction importante du temps de prise des ciments traités. Il est à noter que le début de prise d'un ciment Portland ordinaire (sans ajouts) est de l'ordre de 3 à 4 h.

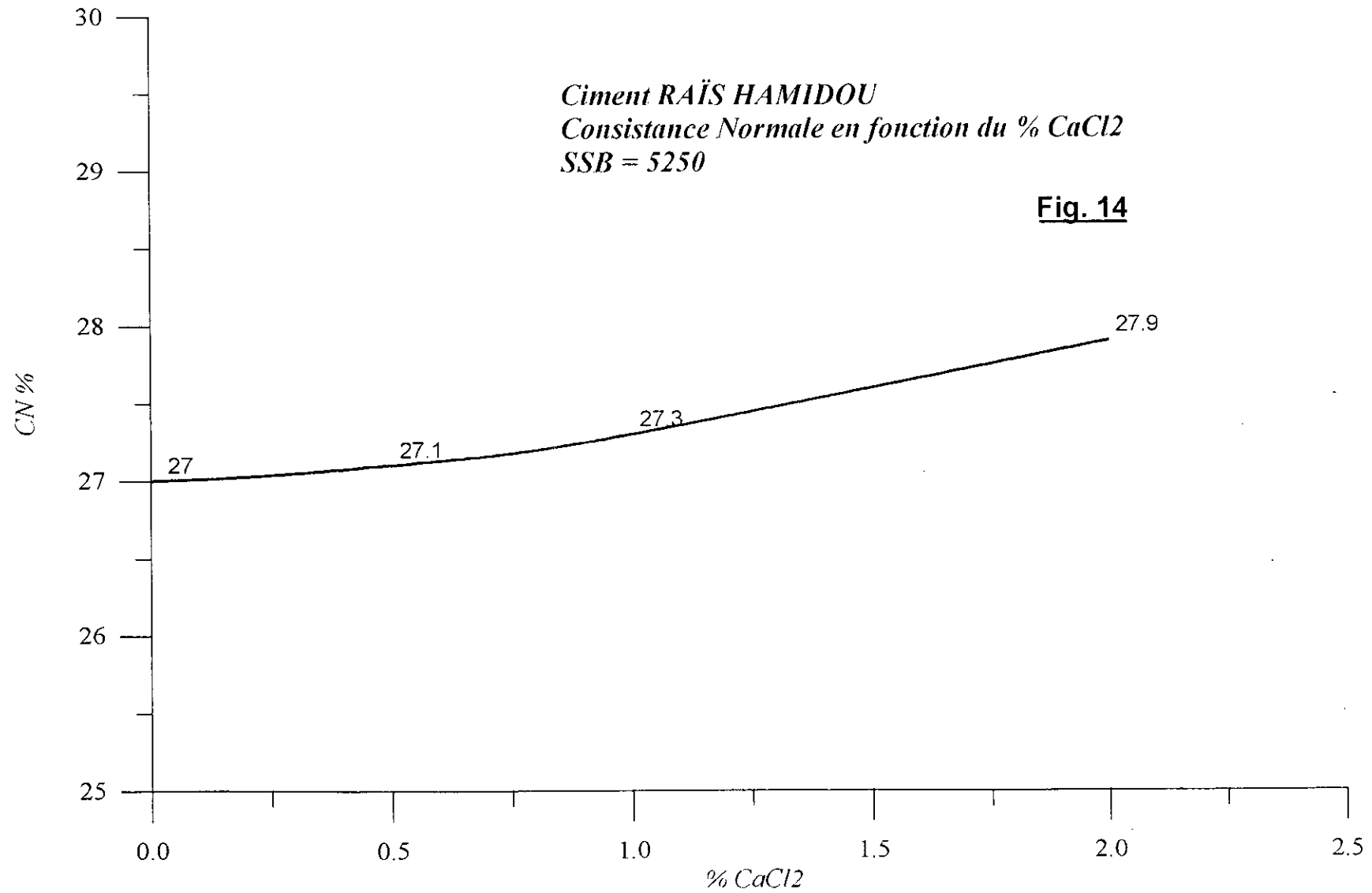
Ciment MEFTEH
Consistance Normale (CN) en fonction % CaCl2
SSB = 5150

Fig. 13



Ciment RAÏS HAMIDOU
Consistance Normale en fonction du % CaCl₂
SSB = 5250

Fig. 14



3.8- ESSAIS DE COMPRESSION

On a procédé à l'étalonnage de la presse (fig. 17).

Les résultats des essais de compression se présentent comme suit :

3.8.1- les ciments de référence :

Ciment	CN	Résistance à la compression (MPa)	
		3jours	7jours
Ciment de Meftah	48%	18,4	23,25
Ciment Rais Hamidou	45%	12,4	14,5

3.8.2- les ciments spéciaux

Ciment	CN	Résistance à la compression (MPa)			
		3h	6h	24h	3jours
Ciment de Meftah	42%	1,7	6,7	23,35	38,6
Ciment Rais Hamidou	46%	1,3	3,7	13,5	30,55

Interprétation des résultats

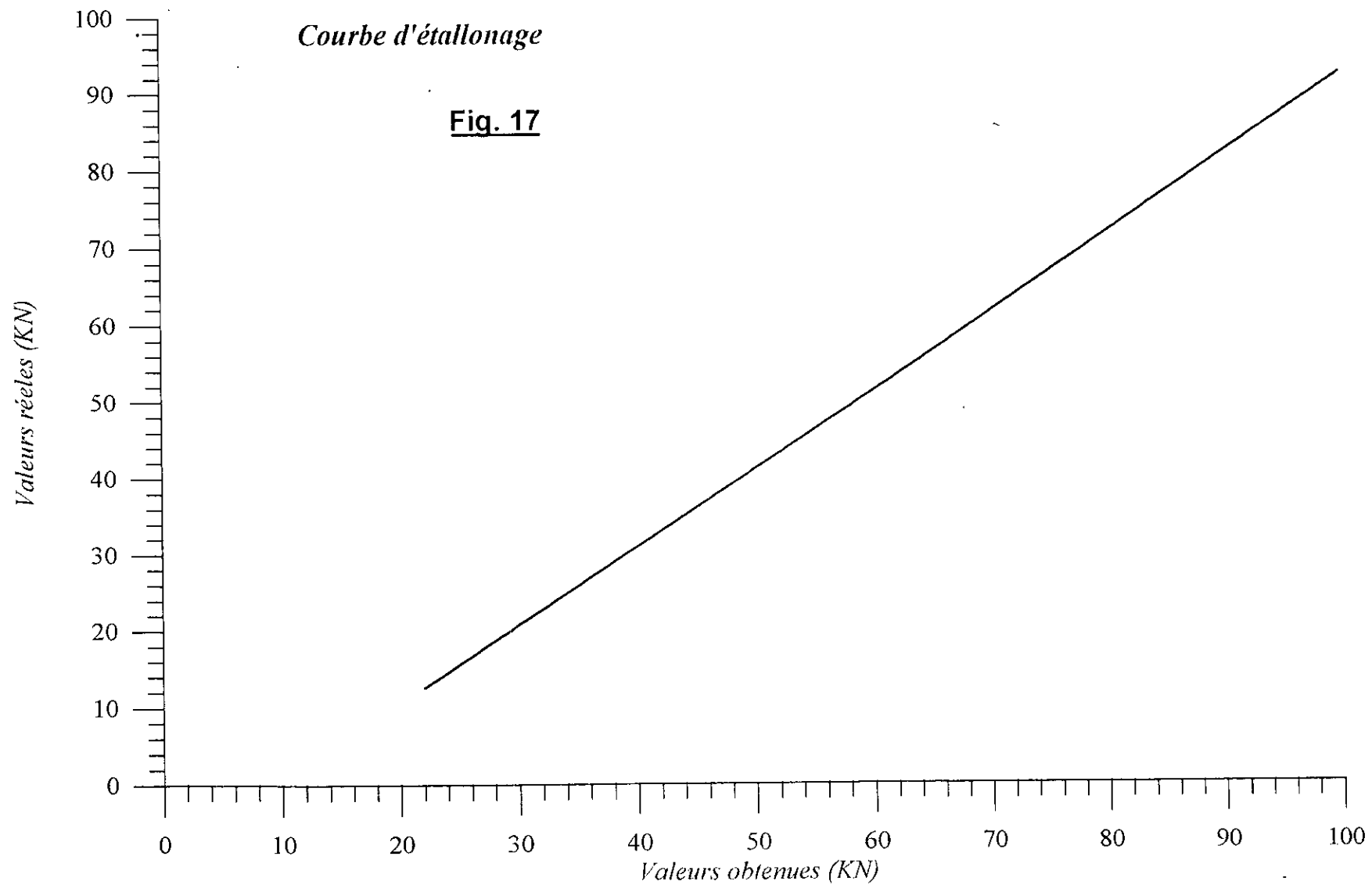
L'action combinée entre le CaCl_2 à 2% et la SSB de près de 5000 a une action favorable sur la résistance à la compression.. En effet, elle permet de doubler la résistance les premiers jours.

Ainsi, les résultats enregistrés à 3 jours nous donnent pour :

- le ciment de Meftah, une augmentation de 109%
- le ciment de Rais Hamidou une augmentation de 111% .

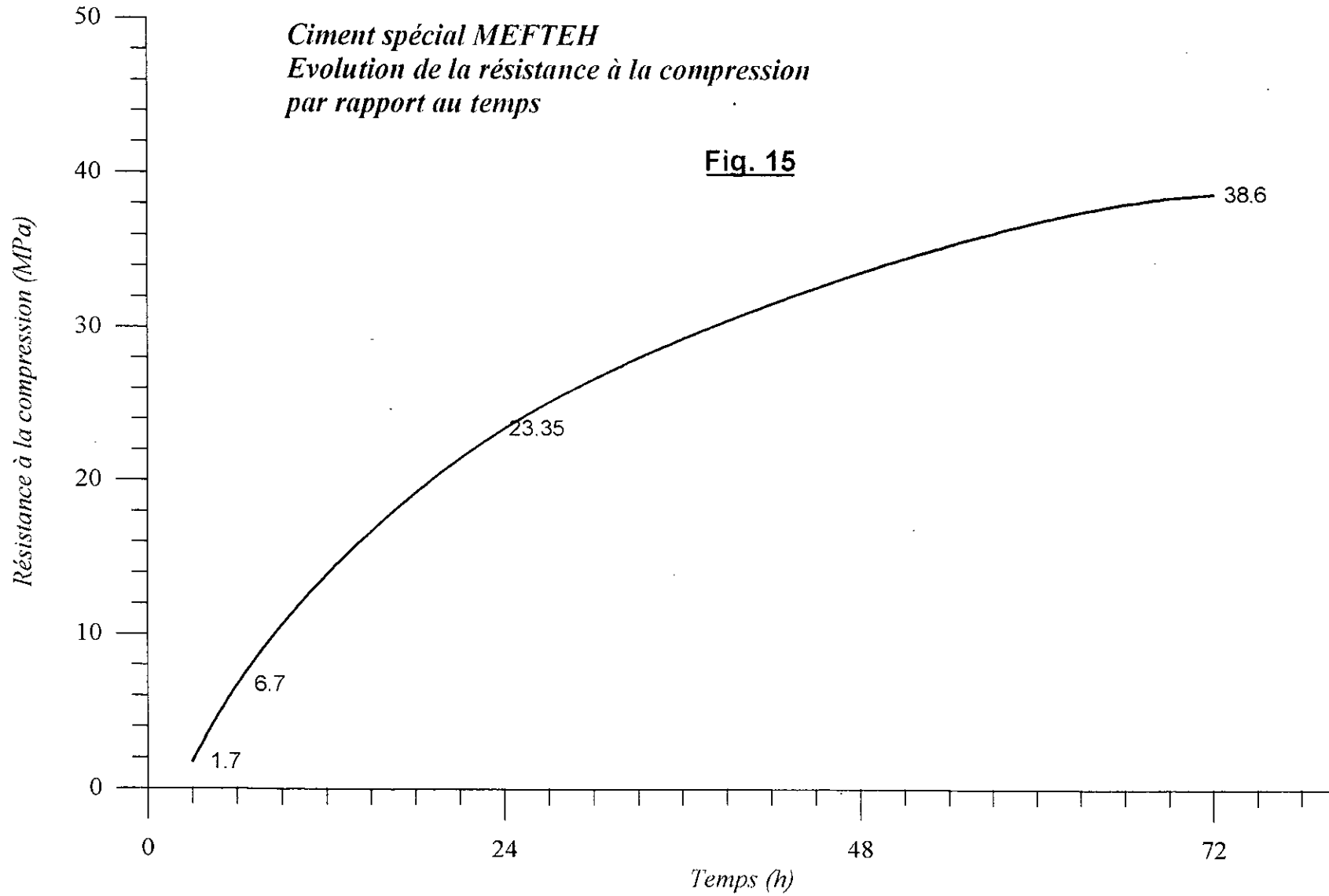
Il est à noter que la résistance du béton, du ciment de Meftah est plus grande que celle de Rais Hamidou.

Nous constatons aussi que l'évolution de la résistance, les premières heures, est très grande, car la résistance à un jour pour le ciment de Meftah (spécial) est aussi grande qu'à 7 jours du même ciment.(voir figures 15, 16)



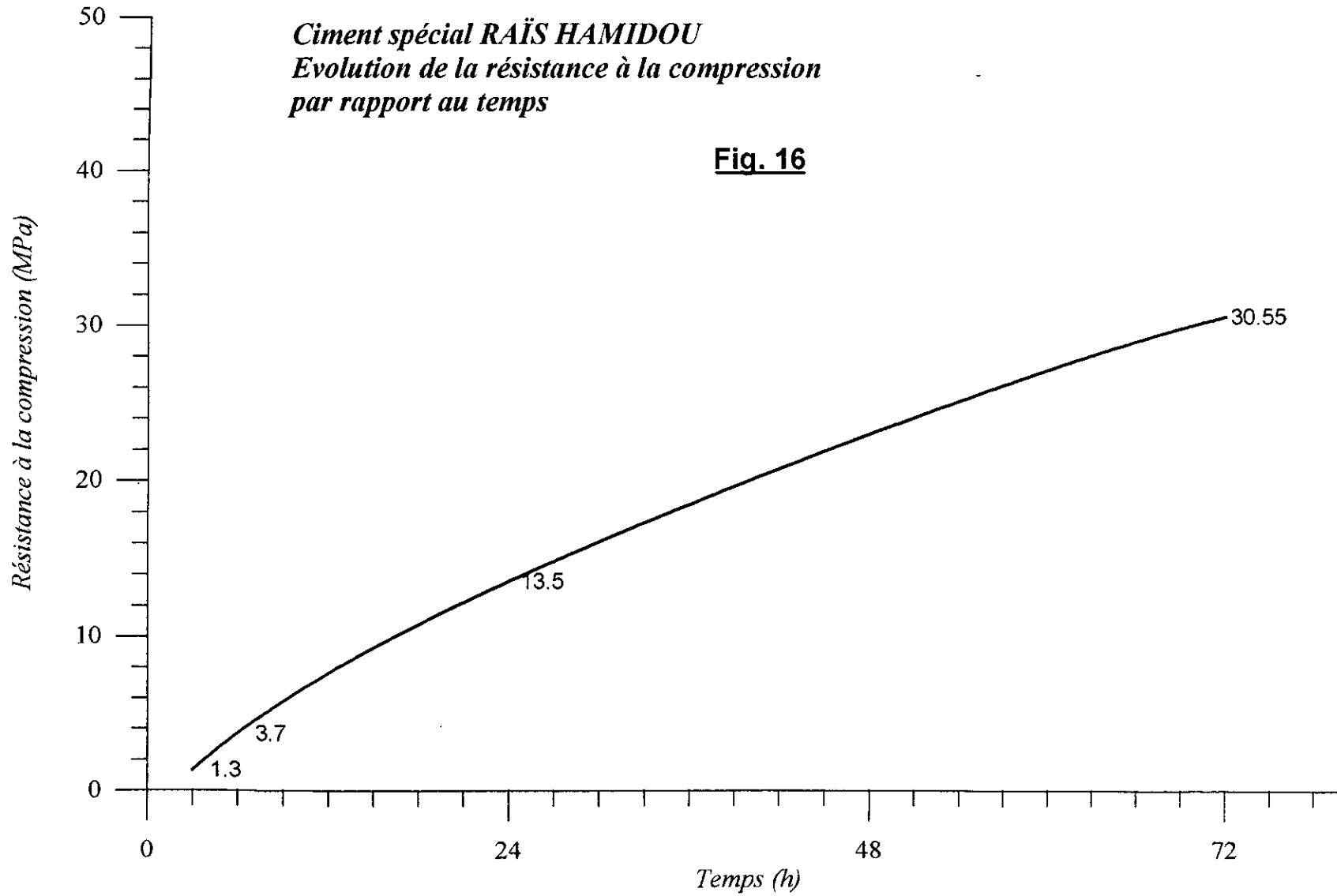
Ciment spécial MEFTEH
Evolution de la résistance à la compression
par rapport au temps

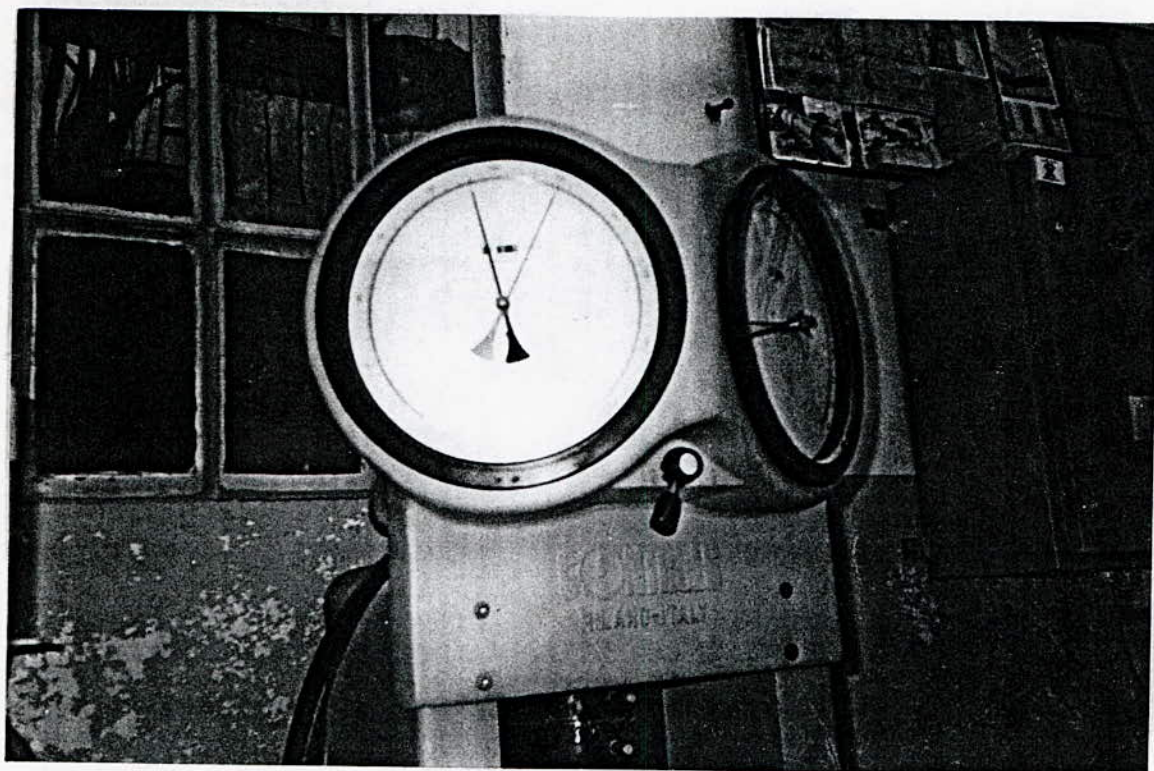
Fig. 15



Ciment spécial RAÏS HAMIDOU
Evolution de la résistance à la compression
par rapport au temps

Fig. 16





**LECTURE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU
BETON DE RAIS HAMIDOU ; (300 KN)**



EPROUVETTES ECRASEES DU BETON DE MEFTAH A 1 JOUR

L'effet du CaCl₂ sur la résistance à la compression

L'introduction du CaCl₂ influe sur la prise et le durcissement par la formation du chloro aluminat de calcium, ce dernier précipite vraisemblablement sous une forme micro cristalline qui favorise la diffusion et accélère de ce fait le durcissement.

Remarquons d'ailleurs que l'accélération du durcissement est réalisée par réaction physico-chimique du au CaCl₂ reçoit une sorte d'auto impulsion, du fait que la chaleur d'hydratation se dégageant en un temps plus court élève la température du mélange exothermique et produit un effet accru.

L'effet de la surface de mouture sur la résistance de compression

Pendant l'évaporation de l'eau, les différents grains de matière solide se rapprochent les uns des autres, sous l'influence des efforts du aux tensions capillaires. Ces efforts sont croissants au fur et à mesure qu'ils s'exercent dans des espaces de plus en plus restreints.

La dureté croît en même temps que la plasticité diminue, parce que les déplacements élémentaires des grains en contact sont de plus en plus réduits sous l'effet des contraintes d'hydratation et de cristallisation progressives des éléments, de ce fait, la résistance mécanique croît quant les grains sont très compacts entre eux, ce qui accélère les phénomènes cités.

Conclusion : la présence simultanée du chlorure de calcium et d'une SSB de près de 5000 pour un CPJ 45 conduit à un durcissement et à un resserrement de la texture interne très élevée les premiers jours, encore mieux les premières heures, ce qui donne une entière satisfaction pour les besoins exigés de l'emploi du ciment spécial.

Conclusion

1 - *Pour la SSB*

A chaque module de finesse correspond un pourcentage d'eau de gâchage déterminé quand sont fixés la nature des agrégats, le dosage en ciment et la consistance du béton désirés.

- A chaque dosage en ciment correspond un module de finesse optimum qui exige moins d'eau que tout autre module pour obtenir une plasticité déterminée.

- La proportion d'eau de gâchage diminue quand le module de finesse augmente.

- La résistance du béton croît quand le module de finesse croît.

2 - *Pour le CaCl₂*

Le chlorure de calcium a une action nettement favorable sur plusieurs caractéristiques essentielles qui sont :

- * la résistance à la compression, généralement augmentée dans une proportion variable suivant le ciment, dans notre cas le CPJ45.

- * la vitesse de prise qui est accélérée

- * la vitesse de durcissement qui correspond par son accélération à des accroissements de résistance initiales très importantes

- * le dégagement de chaleur qui, dans certains cas, se manifeste très rapidement après le gâchage et avant le dégagement de chaleur provoqué par la prise proprement dite du liant lui-même

- * on peut y ajouter, peut-être, un accroissement de la maniabilité des mortiers et bétons pour un même dosage en eau.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les résultats obtenus sont satisfaisants et encourageants. Ainsi, on a obtenu un ciment à prise rapide à partir d'un ciment ordinaire. On a pu, ainsi, accroître, notablement, les résistances les premiers jours, sinon les premières heures, du béton traité avec ce ciment spécial.

L'état actuel de la construction en Algérie exige, de plus en plus, un accroissement rapide du béton afin de pouvoir enlever et récupérer, dès que possible, les coffrages et les étais. Ces avantages sont aussi, particulièrement, appréciables dans le traitement rapide de colmatage des brèches causées par des sinistres ou autres.

Les premiers effets en date résultent de la dissolution du CaCl_2 correspondant à une accélération (de prise et de durcissement) par modification chimique. Les seconds effets résultent d'une présence de SSB de près de 5000 et correspondent à une accélération de la cristallisation. Il apparaît donc que l'emploi simultané du CaCl_2 à 2% et une SSB de près de 5000, conduit à des accélérations très importantes de la prise et du durcissement.

La combinaison du CaCl_2 et de la SSB donne à un ciment d'une nature déterminée des résistances initiales plus grandes que celles des ciments de même nature et de même catégorie non traités. Il en est de même pour la durée de prise qui est considérablement diminuée.

De ce fait, on a obtenu, à partir d'un ciment ordinaire (le CPJ 45) un ciment à prise rapide.

Notons que les meilleurs résultats ont été obtenus avec le ciment de Meftah qui met en première évidence la méthode de sa fabrication (la méthode sèche) qui est, à titre comparatif (d'ailleurs c'est le but du choix de 2 ciments fabriqués différemment) meilleure, par les résultats obtenus que la méthode humide.

Résumons comme suit quelques règles pratiques d'utilisation de notre ciment spécial.

Pour limiter les conséquences fâcheuses d'éventement, il est conseillé de stocker le ciment dans un milieu clos et sec, et de l'utiliser assez rapidement, étant donné des hautes résistances escomptées, un dosage insuffisant ou un manque d'homogénéité dans le béton obtenu, peut provoquer des dégâts considérables (fissurations).

La rapidité initiale théorique de durcissement réduit le délai de décoffrage, mais celui-ci ne doit, en aucun cas, être prématuré (risque d'accident). En ce qui concerne l'utilisation du chlorure de calcium, il ne faut pas dépasser, sans motif spécial, la teneur de 2 % en raison de l'accroissement rapide du retrait, à partir de cette teneur.

-L' addition de 1 % de chlorure de calcium a déjà un effet utile, au point de vue du durcissement plus rapide.

- L'addition du chlorure de calcium doit se faire de préférence dans de l'eau gâchée.

- Le chlorure de calcium ne doit jamais être utilisé avec les ciments alumineux.

- Le béton du ciment est rendu plus conducteur par l'emploi du chlorure de calcium et les armatures du béton armé doivent être rigoureusement enrobées par le mortier du béton pour éviter la corrosion.

En conséquence, pour utiliser avec le maximum de sécurité possible un béton armé en utilisant le chlorure de calcium, il est nécessaire d'utiliser celui-ci en solution dans l'eau de gâchage (2 % max.), il faut par ailleurs un béton suffisamment dosé en ciment (350 kg / m³) contenant de bons agrégats, ni argileux, ni gypseux et il faut qu'ils soient bien compactés par une mise en œuvre énergétiquement pour éviter toute ségrégation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **NOUVEAUX TRAITE DE MATERIAUX DU CONSTRUCTION**
DURIER.
- [2] **LA FABRICATION DU CIMENT**
LUCIEN. PLISKIN.
- [3] **THESE: ETUDE DE L'INFLUENCE DES ADDITIONS
INORGANQUES SUR LES PROCESSUS
D'HYDRATATION ET LE DURCISSEMENT
DU CIMENT (I.N.M.C)**
M : BEKHOUCHE
- [4] **THESE: ELABORATION D'UN BETON A HAUTE ET TRES
HAUTE PERFORMANCE (E.N.P)**
*M^s : MEDJHOUDA
SLAMANI*