

Ministère de l'Enseignement Supérieur

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

THESE

Présentée par :

Bélaïd ACHOUR, Ingénieur E. N. P.
en vue de l'obtention du Diplôme de
MAGISTER EN GENIE CIVIL

THEME

AMELIORATION DES PROPRIETES DES BETONS PAR LA CHALEUR

Soutenue le 22-12-1987

Devant le JURY d'Examen :

Président	: B. TILIOUINE	Professeur
Rapporteur	: C. CHARIF	Maître de Conférences
Examineurs	: P. BONNEVILLE	Professeur
	: A. BALI	Maître de Conférences
	: I. BESLIMANE	Maître Assistant
Invité	: C. TIARE	M.A.T.U.C.

Ministère de l'Enseignement Supérieur

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

THESE

Présentée par :

Bélaïd ACHOUR, Ingénieur E. N. P.
en vue de l'obtention du Diplôme de
MAGISTER EN GENIE CIVIL

THEME

AMELIORATION DES PROPRIETES DES BETONS PAR LA CHALEUR

Soutenu le

Devant le JURY d'Examen :

Président :	B. TILIOUINE	Professeur
Rapporteur :	C. CHARIF	Maître de Conférences
Examineurs :	P. BONNEVILLE	Professeur
	A. BALI	Maître de Conférences
	I. BESLIMANE	Maître Assistant
Invité :	C. TIARE	M.A.T.U.C.

THESE DE MAGISTER

**AMELIORATION DES PROPRIETES
DES BETONS PAR LA CHALEUR**

Par : Bélaïd ACHDUR

Directeurs de thèse : Abdelhamid CHARIF, Kiril TCHOUKANOV

DEPARTEMENT GENIE CIVIL --- LABORATOIRE MATERIAUX CONSTRUCTIONS

ملخص :

هذا العمل يمثل مساهمة في اصلاح مميزات الباطون الرطب أو الصلب من جراء التدفئة .
مؤثرات أساليب التأجيل (الأخذ بالسرعة) وتصلب الباطون مع اجابيات وسلبيات كذلك مميزات المواد المستعملة مبينة قبل كل شيء .
مميزات الباطون الدافئ كالتوعية وأجال الأخذ والتصلب ، الانتفاخ والصلابة درس وقرن مع مميزات الباطون الصلب في الاحوال العادية .

RESUME

Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des bétons frais ou durcis par préchauffage.

Les différentes méthodes d'accélération de prise et de durcissement du béton avec les avantages et inconvénients ainsi que les caractéristiques des matériaux utilisés sont décrits en premier lieu.

Les propriétés des bétons préchauffés (électriquement ou par étuvage) telles que la consistance, les délais de prise et de durcissement, le gonflement et la résistance sont étudiées et comparées avec celles des bétons témoins (durcissant dans les conditions normales).

ABSTRACT

The different methods of acceleration of setting and hardening of concrete with their advantages and disadvantages as well as the characteristics of the materials used are firstly described.

The properties of pre-heated concretes (electrically or in the oven) such as the workability, the setting and hardening times, expansion and the resistance are studied and compared to those of referential concrete.

- D E D I C A C E S -

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

- à ma femme
- à mes enfants
- à mes parents.

- REMERCIEMENTS -

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

MM. A. CHARIF , Maître de Conférence à l'E.N.P.
et K. TCHOUKANOV , Professeur à l'E.N.P. ont dirigé mon travail de recherche.
Par leur disponibilité, leur expérience et leurs précieux conseils, ils m'ont permis d'acquérir de nombreuses connaissances.

Je leur exprime toute ma sympathie et ma reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent également à Mr B. TILICUINE, Professeur à l'E.N.P. pour avoir bien voulu accepter la présidence du jury d'examen .

Je remercie également : MM .. P. BONNEVILLE , Professeur

-A. BALI , Maître de Conférences

-I. BENSLIMANE , Maître-Assistant

pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à mon travail et pour m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury d'examen.

Mr.C.TIARE du M.A.T.U.C. a bien voulu accepter d'être invité à participer à ce jury.

Je l'en remercie.

S O M M A I R E

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	5
CHAPITRE 2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	11
2.1 Introduction et historique	11
2.2 Méthodes classiques	12
2.3 Méthodes modernes	32
2.4 Conclusions	38
CHAPITRE 3 - PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNOLOGIE DES BETONS	41
3.1 Introduction	41
3.2 C.P.A de MEFTAH	42
3.3 C.R.S d'ECH.CHLEFF	48
3.4 Les agrégats	49
3.5 L'eau de gachage	56
3.6 Les adjuvants	56
3.7 Conclusions	59
CHAPITRE 4 - PROPRIETES DU BETON FRAIS PRECHAUFFE	60
4.1 Introduction	60
4.2 Mesure de la consistance	61
4.3 Délais de prise et de durcissement	69
4.4 Gonflement du béton frais	77
CHAPITRE 5 - PROPRIETES DES BETONS DURCIS	105

5.1 Introduction	105
5.2 Matériel utilisé	107
5.3 Variation de la résistance mécanique à la compression du béton en fonction de l'âge et du traitement	109
5.4 Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction de l'âge et des adjuvants	110
CHAPITRE 6 - CONCLUSIONS	116
6.1 Limitation de l'étude	116
6.2 Conclusions générales	116
6.3 Recommandations	118

BIBLIOGRAPHIE

I N T R O D U C T I O N

Le béton est sans doute le matériau qui aura été le plus utilisé au cours de notre XXème siècle; depuis la construction la plus modeste, jusqu'aux ouvrages d'art les plus hardis, en passant par les bâtiments de grande hauteur, le béton est employé sur tous les continents et sous toutes les latitudes.

Très vite depuis son invention, les constructeurs en ont compris l'intérêt au plan de l'économie, et les possibilités d'expression architecturale; ils en ont également perçu les limites qui tiennent essentiellement à sa faible résistance à la traction.

C'est ainsi qu'est né le Béton Armé, ce matériau composite qui utilise la bonne résistance du béton à la compression et les propriétés de l'acier pour résister à la traction.[1].

Néanmoins, les délais de prise et de durcissement du béton sont trop lents, si on veut réaliser des ouvrages plus économiques, sans en sacrifier la sécurité, l'esthétique et l'insertion dans l'environnement naturel et Humain.

C'est le cas de la préfabrication où l'on doit accélérer la cadence de production, la précontrainte qui exige de grandes résistances initiales et l'élimination des déformations de re-

trait avant la mise en tension afin de minimiser les pertes de tension ainsi que le bétonnage par temps froid.

La recherche d'une solution à ce problème nous a amené à l'utilisation du traitement thermique du béton, objet de la présente étude.

Le phénomène de durcissement est normalement accéléré par la température.

La cristallisation qui provoque la prise et le durcissement résulte de la différence de solubilité entre les corps qui disparaissent et ceux qui se forment en présence de l'eau.

Il s'agit là d'un phénomène thermodynamique et la température joue en conséquence un rôle prépondérant.

Pour un ciment Portland par exemple, le début de prise a lieu à 3h15 et la fin de prise à 7 heures à 15°C; ils deviennent 1h15 et 2h05 à 50°C, 0h15 et 0h55 à 100°C [1].

Les méthodes classiques de détermination de la consistance (affaissement du cône d'Abrams) et délais (début et fin) de prise (aiguille de vicat) ne sont pas adaptables pour le béton préchauffé d'où la nécessité d'autres techniques.

La méthode utilisée pour la détermination de la consistance d'un béton chaud est celle de la pénétration du cône de Kelly.

La mesure de la profondeur de la trace de ce dernier en corrélation à l'affaissement d'après le cône d'Abrams utilisé pour

les bétons témoins à 20°C renseigne sur la fluidité du béton à tout instant.

Le début de la prise se mesure habituellement à l'aiguille VICAT, à cause de la facilité d'exécution au chantier et son moindre coût.

Dans cette étude la méthode utilisée est celle de la résistance électrique du béton. La résistivité (1) apparente varie comme l'indique la figure (1.1).

La courbe correspondante comprend deux minima: Le premier, A, correspond au début de prise et le second, B, à la fin de prise.

Si au regard, on place l'indication de la température du béton faisant prise dans un calorimètre, on constate que le point A correspond à une légère discontinuité dans la courbe et le point B à un maximum très net.

A côté de la température, la composition du béton influe aussi sur les délais de prise et de durcissement.

Cette étude a considéré différentes températures (40, 50, 60 et 70°C), quatre compositions différentes de béton et l'influence des adjuvants pour la recherche des délais minimums de prise et (1) c'est en fait, une résistance chimique plus une réactance due à la capacité formée, par les deux électrodes et le diélectrique constitué par le béton.

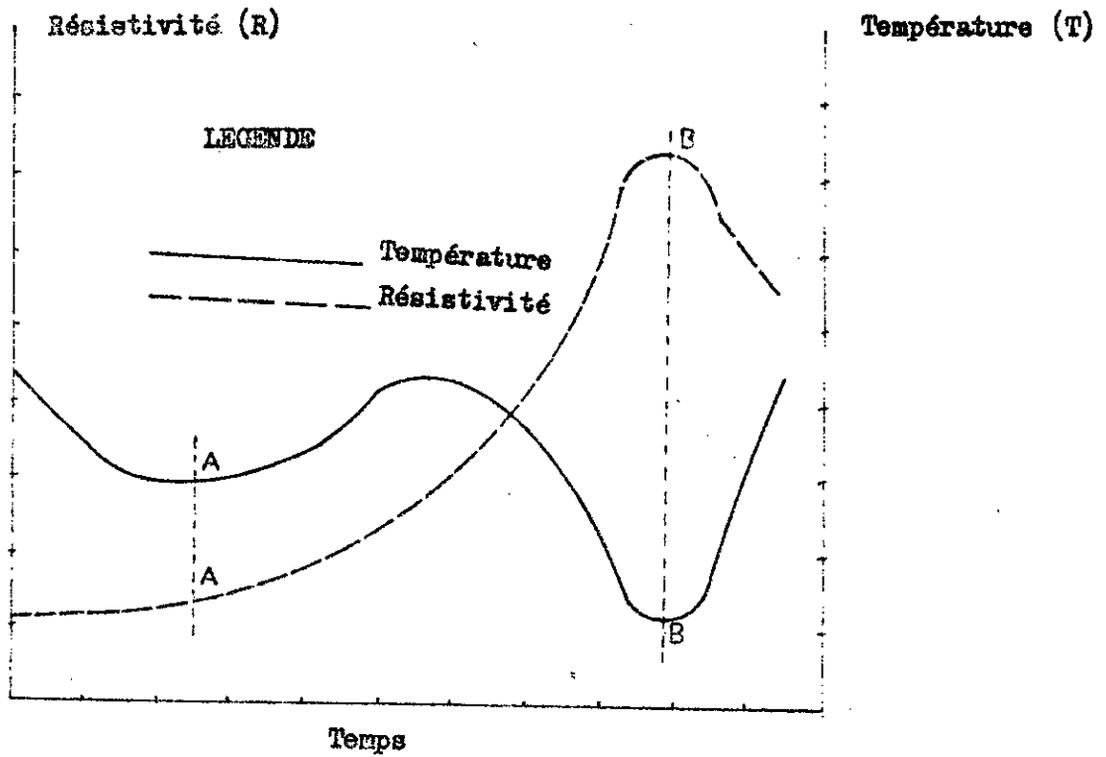


fig 1.1 - Début et fin de prise du béton en fonction du temps.

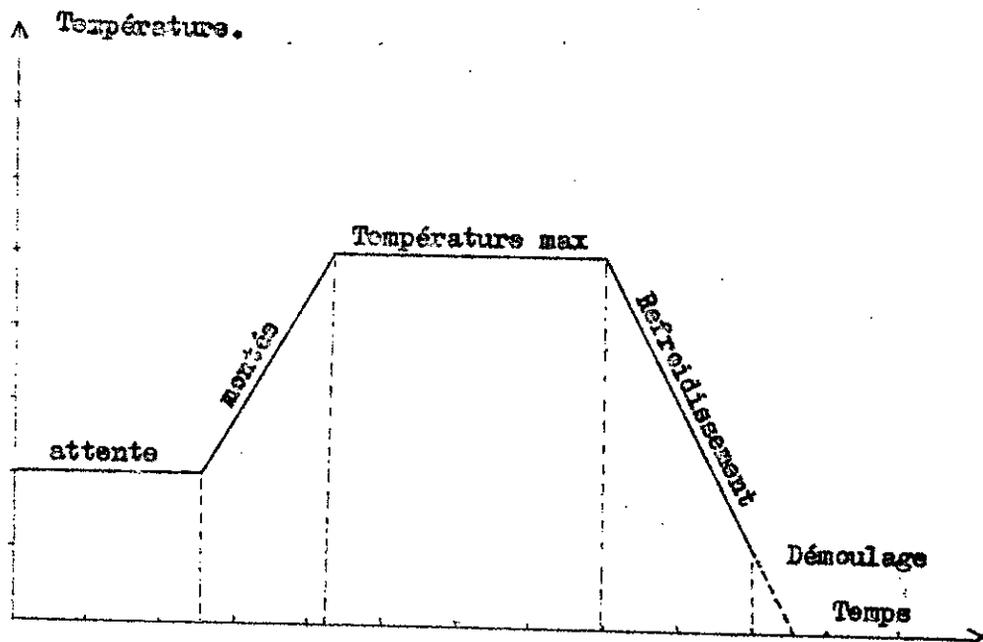


fig 1.2 - Cycle d'étuvage.

de durcissement.

En ce qui concerne le traitement thermique du béton, c'est un procédé ancien qui se développe de plus en plus de nos jours.

Les moyens et les conditions d'application des différents traitements possibles sont variés.

On applique le procédé qui, tout en étant le plus économique, aboutit au résultat recherché.

L'étuve est sans doute le type de traitement le plus répandu. Dans cette thèse, l'étuve utilisée est une enceinte chauffante où règne une atmosphère saturée de vapeur d'eau chaude à la pression atmosphérique.

Le traitement thermique du béton est influencé par la composition du béton utilisé et la température de préchauffage. Des essais tenant compte de ces différents paramètres ont été exécutés pour la recherche des conditions optimales.

Quant aux conditions de traitement, l'étude des quatre périodes composant le cycle d'étuvage a été l'objet de cette étude (fig 1.2).

Les quatre périodes sont:

- Un temps d'attente ou "préprise".
- Un temps de montée en température.
- Un temps de traitement à la température maximale choisie.
- Un temps de refroidissement.

Le but de la recherche est d'apporter des informations complémentaires dans les domaines suivants:

- Etude du traitement thermique de plusieurs compositions de béton avec ou sans adjuvants.
- Methodologie d'étude expérimentale des propriétés des bétons préchauffés.
- Détermination des paramètres optimums du cycle de chauffage (température de préchauffage, vitesse de montée de la température , température maximale de chauffage, durée de maintien de la température maximale, temps de refroidissement.

La première partie de la thèse décrit les méthodes classiques et modernes avec leurs avantages et inconvénients. Le troisième chapitre est consacré à l'étude des propriétés et caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la recherche.

Les propriétés des bétons frais préchauffés sont exposées dans le chapitre 4.

Quant au chapitre 5, il est consacré à la description des propriétés du béton durci.

Les conclusions générales ainsi que les recommandations sont données dans le chapitre 6.

CHAPITRE 2

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 INTRODUCTION ET HISTORIQUE

La nécessité de construire plus vite et meilleur marché maintient d'actualité les techniques d'accélération de la prise et du durcissement des bétons.

L'alcalinité du milieu jouant un rôle important dans le phénomène de prise, les sels à réaction alcaline en amenant une libération d'alcalis sont généralement accélérateurs de prise. C'est le cas en particulier des lessives alcalines, des carbonates et sulfates alcalins. On arrive par exemple à obtenir des prises très rapides avec des chlorures alcalins.

Prenons en exemple, le mélange suivant:

Lessive de potasse à 36°	: 4 kg
Silicate de potasse à 28-30°	: 0.250 kg
Chlorure de potassium	: 0.150 kg

Employé à raison de 10 % de l'eau de gâchage, ce mélange donne des débuts de prise de l'ordre de 15 minutes.

IL y'a un procédé très simple qui consiste en l'utilisation de la chaleur propre du béton. Cette méthode a été utilisée dans les usines de Londres, simplement en faisant passer les pièces dans un tunnel isolé calorifiquement; la chaleur propre du ciment porte la température à plus de 50°C et réduit de plus de la moitié le temps nécessaire pour rendre les pièces utilisables. La production se fait à la chaîne et les pièces sont

durcies au moment où elles sortent du tunnel [2].

Dans ce chapitre une revue des différentes méthodes d'accélération de prise et de durcissement est présentée.

2.2 METHODES CLASSIQUES

La théorie de la prise et du durcissement a été donnée pour la première fois par Henry LE CHATELIER, en 1887. Cette théorie est basée sur le fait que les constituants anhydres des ciments, instables en présence d'eau, se dissolvent jusqu'à saturation. La solution est alors sursaturée par rapport aux constituants hydratés stables moins solubles qui cristallisent.

Cette première cristallisation accompagnée d'une brusque discontinuité dans la viscosité de la pâte constitue le début de prise. La continuation du processus d'hydratation, accompagnée du feutrage et de la soudure des individus cristallins formés, constituent le durcissement [3].

2.2.1 Accélération du durcissement des ciments par l'utilisation de "germes" cristallins sélectionnés.

2.2.1.1 Principe :

Celui-ci réside dans l'utilisation de "germes" pour provoquer et orienter des précipitations et cristallisations au sein des ciments, mortiers et bétons hydrauliques permettant d'accélérer le durcissement et aussi d'accroître les résistances.

2.2.1.2 Méthodes utilisées :

Les germes cristallins expérimentés ont été choisis parmi les éléments de ciment de même type que celui utilisé, mais de ciment déjà durci ou de types apparentés ou même de types différents dans certains cas. Ces germes sont obtenus par l'hydratation préalable des ciments, dans des conditions de températures adéquates. Le ciment préalablement durci est ensuite rebroyé à la finesse du ciment frais et l'addition se fait à raison de 2% environ du poids du ciment utilisé au gâchage.

2.2.1.3 Résultats obtenus :

Les germes ainsi constitués de ciment en cours d'hydratation ont été introduits dans des mortiers au moment de leur confection. Trois séries d'éprouvettes ont été confectionnées :

- Une série avec 2% de germes (par rapport au poids du ciment)
- Une série avec 10% de germes
- Une série témoin sans addition de germes.

Les éprouvettes conservées dans l'eau à 20% ont été testées à la compression à 2 et 7 jours.

Six liants comportants six germes différents, ont été par la suite étudiés :

chaux hydraulique, ciment portland CPA, portland CPB, ciment métallurgique mixte, ciment de laitier au clinker de ciment pouzzolano-métallurgique.

La figure (2.1) montre en ordonnées les résistances à la compression et en abscisses l'âge des différents mortiers. Les traits pleins correspondent aux mortiers témoins, c'est à dire sans germes, et les pointillés aux mortiers avec germes.

En regardant la figure dans le sens horizontal, on a les résultats obtenus avec un liant déterminé, en regardant la figure dans le sens vertical, on a les types de germes qui ont été utilisés.

On peut constater dans ces essais que la chaux hydraulique, le ciment CPA, CPMF voient leurs résistances à 7 jours augmentées avec l'emploi des germes.

Les résistances de la chaux hydraulique passent en effet à 7 jours de 40 kg/cm² environ (pour mortier sans germes) à plus de 100 kg/cm² pour les mortiers avec germes.

Pour le CPA normal, de 280 kg/cm² pour les mortiers témoins à plus de 320 kg/cm² pour le CPA avec germes et enfin pour le CPMF de 280 kg/cm² environ à 300 kg/cm² environ.

Dans ces premiers essais les germes les plus favorables pour activer la chaux hydraulique semblait être constitués par ceux à base de ciment de laitier.

Les germes les plus favorables pour le CPA et le CPMF parais-

sent être, soit la chaux hydraulique, soit du ciment métallurgique mixte.

On constate dans ces cas favorables, que les résultats obtenus sont pratiquement indépendants du nombre de germes introduits. En ce qui concerne les mortiers à base de ciment de laitier, les résultats étaient décevants à première vue. Néanmoins dans ces cas défavorables on relève toujours un type de germes dont l'emploi donne des accroissements de résistance plus importants entre 2 et 7 jours que les accroissements de mortiers témoins durant le même intervalle de temps.

Par exemple, pour le CPB et le CMM on remarque qu'avec des germes constitués soit par de la chaux hydraulique, soit par du ciment de laitier au clinker, les accroissements des résistances sont plus importants pour les ciments traités que pour les autres.

Pour les mortiers confectionnés au CLK, ce sont les germes à base de CPA ou de CPB qui activent l'hydratation entre 2 et 7 jours [3].

On constate de ce qui précède, que les résistances à 7 jours restent inchangées. Par contre à 2 jours elles diminuent.

Ceci montre que les germes constituaient des accélérateurs de durcissement et non des accélérateurs de prise.

2.2.2 Utilisation de germes traités à des températures comprises entre 20 et 100°c.

2.2.2.1 Méthode utilisée :

Les germes ont été fabriqués comme précédemment, mais la conservation de la pâte normale durant les 7 jours a été faite à différentes températures.

- Dans une première série la conservation a eu lieu dans l'eau à 20°c.

- dans une seconde série, dans l'eau à 50°c et dans une troisième série, dans l'eau à 100°c.

Ce sont les ciments précédents qui ont été utilisés.

Mais pour un ciment déterminé, les germes introduits provenaient seulement de ce même ciment: par exemple, pour du mortier au CPA, les germes avaient été obtenus avec le même ciment CPA. Les dosages en germes (par rapport au poids du ciment) étaient les suivants dans chaque série d'éprouvettes:

- Une première série avec 2% de germes hydratés à 20°c.
- Une seconde série avec 2% de germes hydratés à 50°c.
- Une troisième série avec 2% de germes hydratés à 100°c.
- Une quatrième série comprenant des germes composés de 1% de germes hydratés à 20°c et 1% hydratés à 50°c.
- Une cinquième série comprenant des germes constitués par le mélange total des germes précédents, introduits dans une pro-

portion totale de 2% également.

Enfin cinq autres séries d'éprouvettes ont été fabriquées suivant les mêmes distributions de germes que précédemment, mais le dosage a été porté de 2 à 10% par rapport au poids du ciment.

2.2.2.2 Résultats obtenus :

On ne citera que le cas du ciment puisque l'objet est de montrer la différence par rapport à l'étude précédente.

Les cinq graphiques supérieurs de la figure (2.1) montrent la variation des résistances à la compression des mortiers traités et des mortiers témoins en fonction de l'âge du béton.

Les traits pleins correspondent aux mortiers témoins c'est à dire sans germes, les pointillés aux mortiers avec germes.

On a ainsi successivement la représentation des variations des résistances pour les mortiers comprenant des germes traités : à 20, 50 et 100°C.

On constate ainsi que les résultats sont d'autant plus satisfaisants que la température de traitement des germes est plus élevée.

Le graphique inférieur de la figure (2.2) qui donne en ordonnées les résistances à la compression des mortiers traités aux germes et en abscisses les températures de traitement de ces germes, fait ressortir l'intérêt du traitement à plus de 100°C. L'introduction de 2% de germes traités à 100°C fait passer la

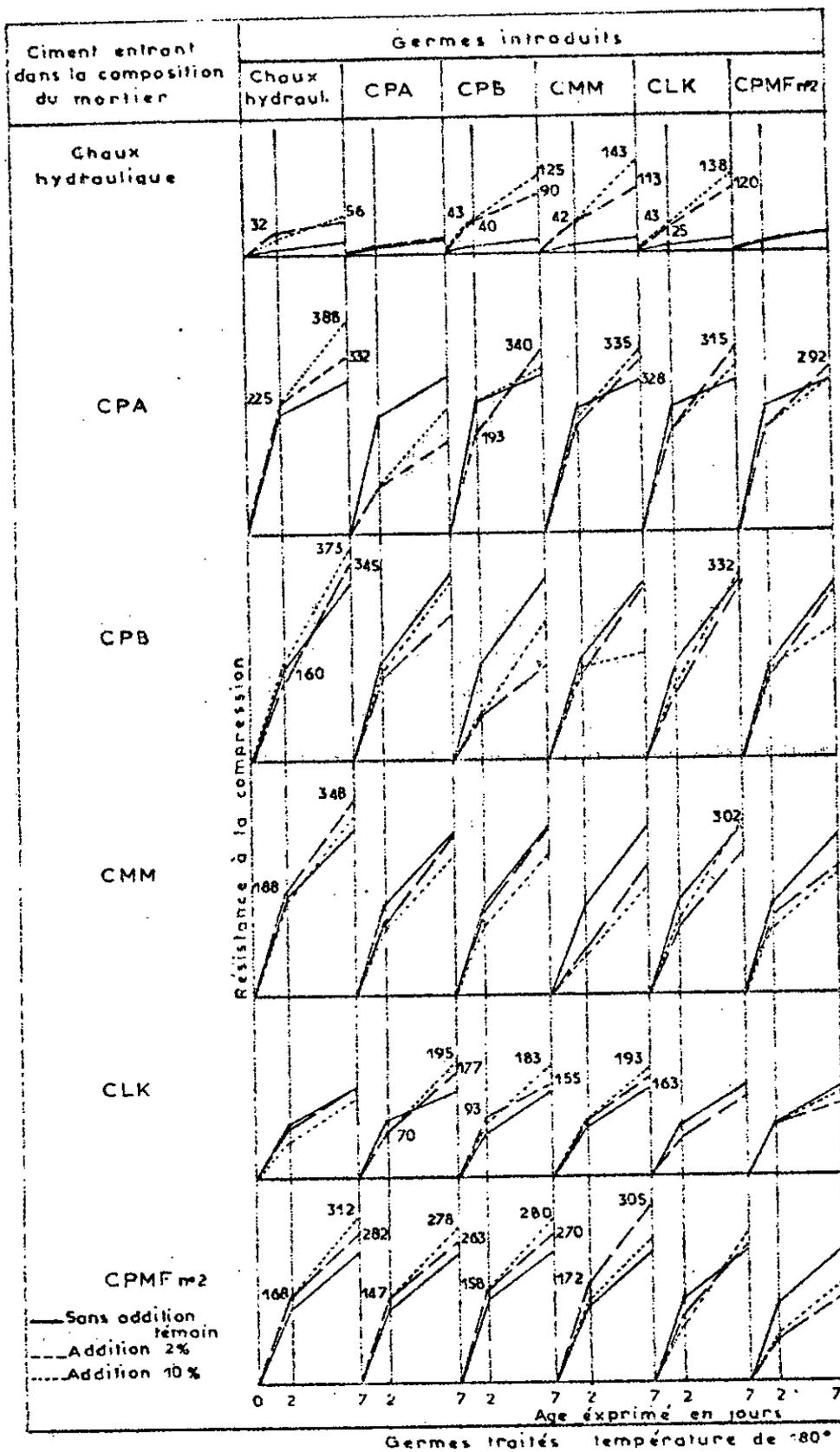


fig 2.1 - Résistances à la compression des différents mortiers en fonction de l'âge. (D'après M. LEZY, Annales I.T.B.T.P Février 1956)

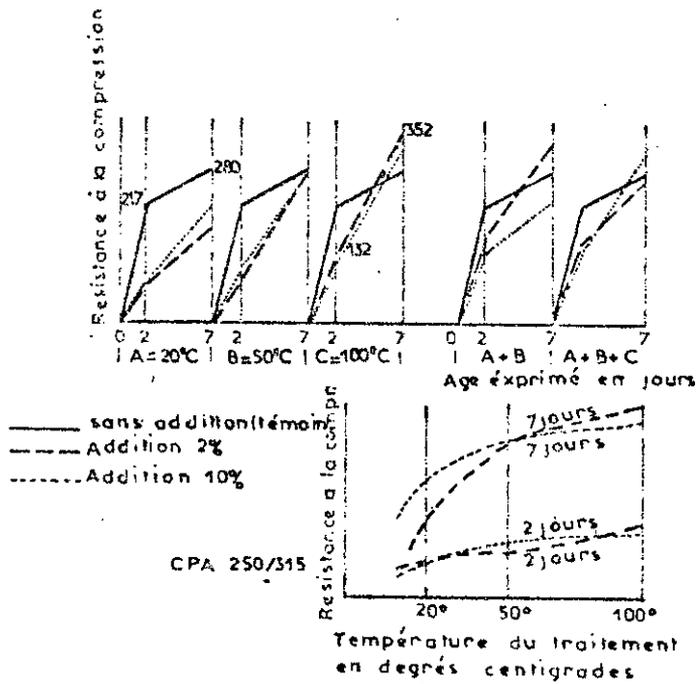


fig 2.2 - Résistances à la compression pour le mortier de ciment CPA traité à différentes températures et différentes conservations.

(D'après M.LEZY ,Annales I.T.B.T.P Février 1956)

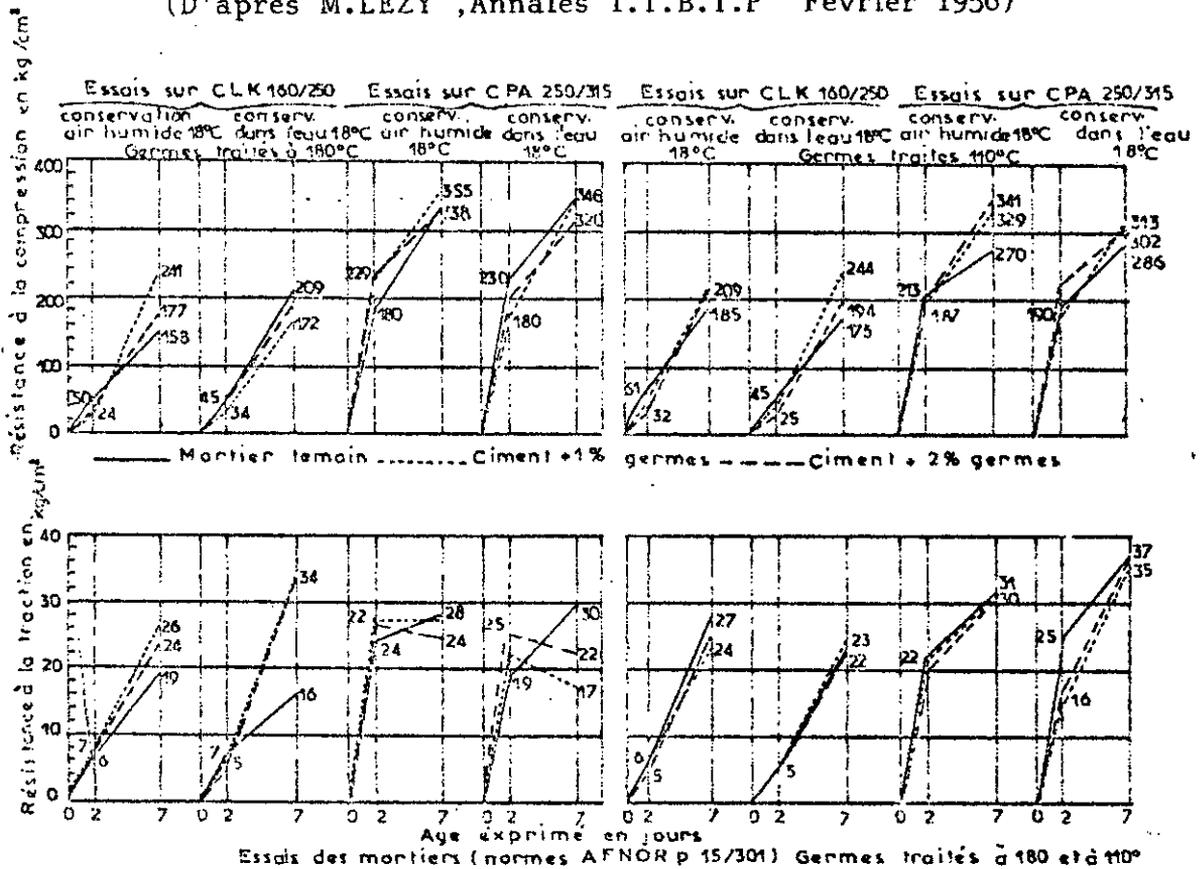


fig 2.3 - Résistance à la compression et à la traction pour les deux ciments CLK et CPA, les différents types de germes et les différentes conservations.

(D'après M.LEZY ,Annales I.T.B.T.P Février 1956)

résistance de 280 kg/cm² pour le mortier normal à plus de 350 kg/cm² pour le mortier traité.

On peut remarquer dans ce cas qu'un dosage de germes de 2% donne de meilleurs résultats qu'un dosage de 10%.

Ceci suggère l'existence d'un pourcentage optimum à ne pas dépasser [4].

2.2.3 Germes traités à des températures de plus de 100°C.

Dans ce cas la pâte de ciment destinée à la confection des germes a été conservée pendant 8 heures en autoclave à 110°C pour une première série d'éprouvettes, 8 heures à 180°C pour une seconde série.

Les ciments utilisés sont le CPA 250/315 et un CLK 160/250.

Les mortiers ont été traités à 1% et 2% de germes. Ces mortiers ont été conservés à l'air humide à 20°C pour une première série d'éprouvettes et dans l'eau à 20°C pour une seconde série.

Les résistances à la compression et à la traction ont été mesurées à 2 et 7 jours.

La figure (2.3) montre à la partie supérieure les variations des résistances à la compression, et la partie inférieure, les variations de résistances à la traction pour les deux ciments, les différents types de germes ainsi que les différentes conservations (Les traits pleins représentent toujours les variations des mortiers témoins et les pointillés celles des mor-

tiers avec germes).

Pour les résultats obtenus avec les germes traités à 110°C, on remarque qu'en ce qui concerne les résistances à la compression, ces résultats sont favorables, aussi bien pour le CPA que pour le CLK et quelque soit le mode de conservation dans l'air ou dans l'eau.

Non seulement toutes les résistances à 7 jours sont augmentées, en valeur absolue, mais l'allure générale de l'évolution des résistances montre que les améliorations continueront au delà de 7 jours.

En ce qui concerne les résistances à la traction, on remarque que pour trois résultats sur quatre, elles restent pratiquement inchangées. Il n'y a que pour le CPA conservé dans l'eau que l'on constate une tendance à l'augmentation des résistances au delà de 7 jours.

En ce qui concerne les germes traités à 180°C :

- Pour le CLK, si les résistances à la compression sont peu ou pas améliorées, les résistances à la traction sont, par contre, nettement augmentées, ceux-ci aussi bien dans les conservations à l'air que dans l'eau.

- Avec le CPA, les résistances à la compression sont également améliorées, mais les résistances à la traction subissent, par contre une décroissance systématique entre 2 et 7 jours

et dans les deux modes de conservation.

Ces résultats montrent qu'il existe une température optimale de traitement des germes et qu'il est dangereux de s'en écarter. On peut préciser d'ailleurs que les résultats défavorables n'ont été obtenus que pour la température de traitement de 180°C.

A 110°C et au dessus, les résultats n'ont jamais été inférieurs à ceux d'un ciment normal.

L'ensemble des essais entrepris au laboratoire montre qu'il existe toujours un type de germes ou de mélange de germes, susceptible d'accélérer le durcissement d'un ciment.

Par ailleurs, les essais poursuivis ont montré que le pourcentage de germes paraissait sans influence sur le résultat obtenu et qu'il suffit que ce germe existe pour que l'on constate une évolution différente du durcissement [4].

2.2.4 Accélération de prise des ciments par l'utilisation des adjuvants.

2.2.4.1 Principes:

Il est relativement facile d'accélérer le début de prise d'un ciment car celui-ci correspond simplement à la première floculation importante d'hydrates. Il est bon de noter d'ailleurs que les clinkers de ciment portland possèdent généralement une prise très rapide due à la présence d'aluminate tricalcique et que

L'on est obligé de les retarder avec une addition de gypse [2].

Ceci conduit à penser qu'il serait peut être intéressant d'utiliser pour les fabrications accélérées, des ciments ne contenant pas de gypse. L'expérience pratique a montré que les clinkers purs possèdent une prise très rapide mais très irrégulière [2].

2.2.4.2 Moyens utilisés :

L'accélérateur le plus souvent utilisé est généralement le chlorure de calcium CaCl_2 . Celui-ci augmente la concentration en alcalis de la pâte et entraîne avec une accélération de la précipitation du sulfo-aluminate de calcium à trois molécules de sulfate [2].

2.2.4.3 Résultats obtenus :

Voici par exemple des chiffres de début de prise d'un CPA 250/315 additionné de CaCl_2 (essai normal à l'aiguille de VICAT).

Début de prise en heures.

CPA 250/315	3 h 45 mn
+ 2% CaCl_2	1 h 45 mn
+ 5% CaCl_2	0 h 30 mn

On voit donc qu'une addition de 2% CaCl_2 réduit le temps de prise de moitié alors que 5% le réduisant de 7 fois et demi. D'autres chlorures possèdent une action qualitative analogue à celle du CaCl_2 mais leur action qualitative peut être différente [2].

Il faut remarquer que les catalyseurs d'hydratation employés seuls bien qu'ayant une action très nette sur le durcissement sont généralement insuffisants en préfabrication. Ils n'améliorent pas la cadence de production.

Des essais relativement anciens de la ville de Paris avaient donné les résultats suivants sur un béton de portland de classe 160/250 avec la composition suivante:

Agrégats roulés 20/50120 litres
 Sable 0,5/2 60 litres
 Ciment 30 kg
 Eau (E/C=0,55) 16,5 litres

âges	2 jours		7 jours		28 jours		90 jours		1 an	
CaCl ₂ ajouté	0	2%	0	2%	0	2%	0	2%	0	2%
Rc en kg/cm ²	67	101	190	202	216	214	266	263	295	313

On peut conclure que l'addition de CaCl₂, quoique assez sensible aux jeunes âges est néanmoins insuffisante pour répondre au problème d'accélération de prise et de durcissement.

2.2.5 Gâchage à l'eau chaude

En utilisant de l'eau chaude à 80 ou 90°C et des granulats maintenus hors gel, on peut obtenir après malaxage un béton dont la température se sera élevée d'une vingtaine de degrés. Ce procédé permet donc de bétonner en hiver et d'assurer une rotation des coffrages plus rapide l'été. L'eau chaude est produite la nuit en utilisant une cuve calorifugée à pression atmosphérique.

Cette citerne comporte à la partie inférieure des thermoplongeurs mis sous tension au début des <<heures creuses>> et un thermostat qui limite la température à 85°C. Une puissance de 12 Kw par m³ d'eau permet de monter à 85°C avec une consommation de 90 Kw h.

Dans la journée, la pompe puise l'eau chaude, l'orifice étant placé de manière à ce qu'il reste toujours un certain niveau d'eau recouvrant les thermoplongeurs [5].

2.2.6 Accélération du durcissement par la chaleur

2.2.6.1 Principe:

La chaleur accélère très sensiblement la dissolution des constituants du ciment ainsi que la précipitation des hydrates dont le gel microcristallin constitue la structure du ciment durci. Suivant certains processus bien déterminés, il est possible d'obtenir très rapidement des résistances importantes.

2.2.6.2 Action de la chaleur à la pression ordinaire

La méthode la plus commode consiste à chauffer le béton dans une enceinte où l'on injecte de la vapeur de façon à maintenir l'atmosphère saturante.

De toutes les études effectuées, on a pu conclure que la température la plus intéressante, est comprise entre 75 et 80°C. Au dessous l'accélération du durcissement est moins rapide et au dessus on risque qu'un dégazage important de l'eau de gâchage, entraîne des gonflements importants préjudiciables à l'obtention de bonnes résistances [2].

Résultats obtenus sur un béton de 800/400 dosé à 300 kg/m³ avec un portland 250/315, chauffage à 80°C en atmosphère saturante.

Temps en heures	Résistance à la compression en Kg/cm ²
2	101
4	125
8	154

Des essais ont été effectués sur des bétons de gravillons préparés avec un portland 250/315 dont la composition est la suivante :

Gravier 10/15 532 litres
Gravillon 2/5 458 litres

Sable 0,5/2 324 litres
 Ciment 350 Kg
 Eau 150 à 180 l/m³ suivant les
 essais

Le tableau ci-dessous donne les résistances des bétons témoins durcis à la température ordinaire confectionnés avec la composition ci-dessus :

! âge !	! Rc en Kg/cm ² !	! Rf en Kg/cm ² !
! 8 heures !	! 0 !	! 0 !
! 24 heures !	! 17 !	! 6 !
! 2 jours !	! 69 !	! 23 !
! 7 jours !	! 205 !	! 45 !
! 28 jours !	! 273 !	! 50 !

(Rc et Rf désignent les résistances à la compression et à la flexion)

Pour ce même béton étuvé dans la vapeur saturante à 80°C les résultats obtenus figurent dans le tableau ci-dessous :

! temps en heures !	! Rc en kg/cm ² !	! Rf en kg/cm ² !
! 1 !	! 38 !	! 3 !
! 2 !	! 114 !	! 18 !
! 4 !	! 137 !	! 23 !
! 8 !	! 166 !	! 26 !

Etant donné les dimensions des éprouvettes, ces résultats ne sont extrapolables qu'à des pièces dont l'épaisseur ne dépasse pas 10 cm. On remarque également qu'un cycle de 8 heures a fourni des pièces directement utilisables.

2.2.6.3 Critique:

Le point le plus délicat est le maintien de l'atmosphère saturante dans l'étuve de traitement. En effet si le ciment n'est pas au contact d'une humidité suffisante, les réactions d'hydratation ne peuvent pas se produire normalement et l'on obtient des éléments de béton incorrects. On risque alors d'avoir un phénomène masqué, c'est à dire qu'on risque d'obtenir une résistance à la compression suffisante alors que la résistance à la traction qui souffre du phénomène de dessiccation est très faible.

2.2.6.4 Action de la chaleur sous pression de vapeur.

Le principe est de traiter les mortiers et bétons par la vapeur d'eau sous pression. On trouve généralement, qu'un traitement très court peut nuire aux résistances, alors qu'un traitement plus long donne très souvent des résistances supérieures à celle obtenues à la température ambiante, comme l'illustre le tableau suivant:

! temps en heures !	! Rc en kg/cm ² !
! 2 !	! 780 !
! 4 !	! 1010 !
! 8 !	! 1240 !

2.2.7 Obtention très rapide de résistances suffisantes pour le démoulage.

L'expérience de chantier a montré qu'à partir d'une résistance mécanique de 50 kg/cm², on possède une sécurité suffisante au démoulage des pièces même compliquées. Un chauffage dans la vapeur à 80°C pendant une heure permet le démoulage, tout au moins pour des pièces dont l'épaisseur maximum ne dépasse pas 10 cm, étant donné les dimensions des éprouvettes de laboratoire.

Au bout d'une heure on obtient les résultats suivants [2] :

(même composition de béton que précédemment)

! quantité d'eau ! ! en l/m ³ !	! CPA 250/315 !	
	! Rc !	! Rf !
! 180 !	! 31 !	! 1 !
! 170 !	! 35 !	! 2 !
! 160 !	! 38 !	! 3 !
! 150 !	! 76 !	! 14 !

Ces résultats montrent que le rapport E/C est très important et que l'on peut avoir assez facilement des résistances suffisantes pour le démoulage et la manutention au bout d'une heure. Par contre si l'on désire manipuler des pièces après une demi-heure de traitement, la chaleur n'est pas suffisante. Ceci conduit à étudier l'action combinée des accélérateurs de prise et de la température.

Des essais déjà anciens ont montré que la quantité de CaCl_2 devait être de 2% du poids du ciment pour les applications à la température ordinaire et on a voulu vérifier si cela restait exact aux températures plus élevées. Pour cela on a utilisé un béton ayant la même composition que les précédents et on a fait varier la teneur en CaCl_2 de 0 à 10% par rapport au poids du ciment.

Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau suivant [2] :

CaCl ₂ % du poids du ciment	Portland 250/315	
	Rc en kg/cm ²	Rf en kg/cm ²
0	31	1
0,5	11	< 1
1	7,5	< 1
2	15	< 1
3	25	2
4	33	4
5	60	11
7,5	51	12
10	40	6

Ces résultats montrent que la proportion optimale se situe vers 5% .

Respectant cette proportion et avec des bétons dosés à 350 Kg/m³ possédant toujours la même composition (160l/m³ d'eau de gâchage), il a été obtenu au bout d'une demi-heure à 80°C les résultats suivants [2]:

Portland 250 /315	
Rc	Rf
44	2

2.2.7.1 Critique:

Pour ce ciment la résistance à la compression permet facilement le démoulage, par contre la résistance à la traction étant très faible, les manipulations et transports restent aléatoires pour les pièces compliquées.

On peut remarquer aussi que les rapports entre les résistances à la compression et à la flexion sont très variables et ne présentent pas de relations nettes avec ce que l'on observe pour les durcissements à la température ambiante.

Il faut donc admettre que les durcissements très accélérés conduisent à des matériaux relativement hétérogènes; car la très forte accélération des réactions de prise et de durcissement ne doit pas se faire sans anomalies. On peut avoir en particulier des gonflements dont l'origine doit être à la fois chimique par suite des transformations des sulfoaluminates de chaux et physique, par la dilatation de l'air contenu dans le béton et le dégazage de l'eau [2].

2.3 LES METHODES MODERNES.

2.3.1 Introduction

La rapidité de prise sous-entend un décoffrage plus précoce, donc un gain de temps et d'argent particulièrement intéressants, surtout en préfabrication car le rendement des installations peut être considérablement amélioré. Rien d'étonnant à ce que des méthodes

de chauffage du béton en préparation ou en place se soient donc développées depuis la dernière guerre et tout particulièrement les méthodes faisant appel à l'électricité [5],[6],[12],[14],[16].

2.3.2 Techniques électriques de traitement.

Elles sont très diverses, et touchant soit la préparation proprement dite du béton, soit sa mise en oeuvre, soit le béton en place dans un coffrage ou son moule. Il arrive également que l'on combine plusieurs de ces techniques, mais rarement plus de deux pour des raisons économiques mais aussi pratiques.

La méthode d'accélération pour le durcissement du béton par chauffage électrique est basée sur le principe de la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique. On y arrive en introduisant le béton comme résistance dans le circuit du courant alternatif de fréquence industrielle, par le moyen d'électrodes. De cette manière, la chaleur agit directement sur le béton et non pas sur le milieu environnant, comme cela se produit quand d'autres méthodes de traitement thermique sont utilisées.

2.3.2.1 La benne électrique.

Les sels qui font partie des constituants du ciment rendent le béton frais conducteur de l'électricité. Il suffit de plonger dans le béton frais trois électrodes reliées aux trois phases

du secteur et de mettre la benne contenant le béton à la terre pour obtenir un échauffement par effet Joule. L'expérience montre que le béton n'adhère que très peu aux électrodes et qu'un simple nettoyage au jet en fin de journée est suffisant. Cette solution, très séduisante pose néanmoins des problèmes de sécurité.

2.3.2.2 Chauffage par les armatures.

Le procédé consiste à faire passer du courant électrique dans les armatures. Cette technique est particulièrement adaptée pour la préfabrication en usine de poutrelles précontraintes par fils adhérents. Les fils de précontrainte étant de faible section s'échauffent facilement. Le procédé est également utilisable pour le béton armé qui nécessite des aciers de fortes sections donc des puissances électriques très importantes. Une bonne adhérence acier-béton se réalise dès le début de la prise, on peut démouler environ huit heures après mise en place [5].

La puissance électrique varie de 70 à 120 Watts/ml de poutrelles sous une tension d'utilisation de 120 à 180 volts [6]. Il est indispensable de bien calculer l'intensité du courant et de pouvoir la contrôler afin d'éviter un chauffage trop rapide qui conduirait à une déshydratation du béton autour de l'arma-

ture et entraînerait des ruptures d'adhérence.

2.3.2.3 Résistances électriques noyées

Le procédé consiste à utiliser des résistances électriques isolées, noyées dans le béton. Ces résistances ne pourront être récupérées après traitement; leur puissance est de l'ordre de 100 à 200 Watts/m, suivant que le fil est droit ou en boudin.

Cette méthode peut servir à un grand nombre d'ouvrages en béton armé et précontraint.

Les avantages sont les suivants : Les calories produites à l'intérieur du béton ont un rendement optimal. En plus on peut éviter les gradients thermiques en proportionnant la densité des résistances à la section du béton à chauffer.

L'énergie utilisée pour une dalle de 15 cm d'épaisseur est de 700 Watts/m² durant six à huit heures, la distance minimale entre fils est de 20 cm environ (voltage en général 42 volts) [6]. Ce procédé est intéressant pour bétonner par temps froid et quand il est nécessaire d'avoir un démoulage rapide. Il est relativement simple et d'une utilisation très souple.

En pratique les prix de pose et des fils noyés perdus en limitent l'application à des cas spéciaux.

2.3.3 Le chauffage externe

Le chauffage du béton s'effectue depuis le parement de l'élément et la chaleur se propage vers l'intérieur.

2.3.3.1 Chauffage par rayonnement infrarouge

Cette méthode soumet le béton dans son coffrage à un rayonnement infrarouge, cette technique est très souple et silencieuse. Ce mode de chauffage est employé aussi bien dans le rôle d'antigel que dans celui d'accélérateur de prise. La température en surface dépend évidemment de la distance à laquelle se trouve la source de rayonnement infrarouge.

Cette technique a été employée pour le traitement thermique de hourdis pour planchers en béton armé, d'arcs en treillis dans des chambres spéciales. Il faut noter cependant que ce procédé de traitement indirect semble moins efficace que celui du chauffage par électrodes [6].

2.3.3.2 Chauffage direct du coffrage en contact avec l'élément.

Le démoulage le plus rapide du produit est obtenu par cette méthode. L'investissement en table chauffante et coffrage chauffant est important.

Il est nécessaire que les opérations soient répétitives pour assurer la rentabilité des installations. Le coffrage chauffant à faible inertie thermique (mais plus léger) est employé in situ, alors que les tables qui possèdent une inertie thermique plus importante sont utilisées en usine. Elles conduisent à une utilisation quatre à cinq fois plus rapide des coffrages mais permettent uniquement une fabrication d'éléments standards.

Trois procédés de chauffage des coffrages ou des tables sont principalement utilisés :

a) Contreplaqué chauffant.

Le corps chauffant est constitué d'une trame électrique ensermée entre deux feuilles de contreplaqué. L'une sert de coffrage (épaisseur 15 mm) l'autre de protection (épaisseur 5 mm).

L'avantage réside dans la légèreté du matériel mais le nombre de réemplois est limité.

b) Coffrage métallique à trame chauffante électrique .

Le chauffage est assuré par un réseau de fils électriques scellés contre la tôle du coffrage.

Les fils peuvent être de grande longueur et constituer des serpentins placés sous le coffrage, soit être composés d'éléments plus courts et indépendants, de façon à permettre la constitution de zones de chauffage autonomes.

c) Coffrage métallique avec circulation d'eau chaude ou de vapeur.

L'élément chauffant est un serpentin soudé contre la tôle du coffrage dans lequel passe de l'eau chaude ou de la vapeur.

Cette eau est fournie par une chaudière.

Le système fonctionne bien, mais le coffrage est lourd. L'installation des branchements des canalisations est valable pour une production importante [6].

2.3.3.3 L'étuvage en chambre fixe.

Ce procédé est le plus utilisé pour la préfabrication des éléments en béton. Après la mise en place, les éléments frais sont placés dans une enceinte à l'intérieur de laquelle le traitement sera effectué. A la fin du traitement, les éléments sont évacués et conduits en stockage. Le traitement est le plus souvent réalisé avec la vapeur [6].

2.4 CONCLUSION

Il faut reconnaître qu'il n'existe pas de traitement idéal adaptable à tous les cas. En fonction de l'objectif recherché, de la nature de l'installation, de la destination et de la forme des pièces, les modalités à respecter pour le traitement sont différentes.

Pour choisir la solution favorable, il convient dans la plupart des cas, de trouver un compromis entre le point de vue économique et le point de vue technique.

En Algérie différentes méthodes sont utilisées pour l'accélération de prise et de durcissement du béton.

Parmi les usines visitées, les méthodes diffèrent en fonction des éléments à fabriquer.

a) Fabrication de tuyaux en béton armé précontraint pour ad-
duction d'eau (EL-ALIA et OUED FODDA)

Le traitement thermique se fait à la vapeur à atmosphère sa-

turante dans une chambre d'étuvage. La température n'est pas bien maîtrisée et varie entre 70 et 100°C pendant 8 heures environ. La durée du refroidissement est de 4 jours après étuvage et démoulage.

b) Fabrication de buses en béton armé pour assainissement.

Les buses sont coulées verticalement dans un moule métallique. Après vibration, on pose un couvercle sur le diamètre extérieur et on injecte de la vapeur d'eau chaude fournie par une chaudière. La température et la durée du traitement ne sont pas contrôlés.

c) Fabrication de panneaux pour bâtiments à l'usine de l'entreprise de construction de SIDI MOUSSA.

Les agrégats sont chauffés à la vapeur fournie par une chaudière. On obtient un béton de 30°C dans le malaxeur. Le béton est ensuite versé dans un moule reposant sur une cuve de même dimensions à moitié pleine d'eau tiède. Dans l'autre moitié circule de la vapeur sous pression à 100°C. Ce qui permet de chauffer l'eau.

Cette dernière transmet la chaleur au béton. Des manomètres et thermomètres sont fixés sur les moules pour le contrôle de la pression de vapeur ainsi que sa température.

d) L'usine d'éléments préfabriqués de l'entreprise de travaux de Boumerdes utilise un procédé Suisse (VARECO).

Ce dernier consiste à chauffer de l'huile (marque TORADA) à 250°C dans une chaudière et la faire circuler dans un serpentin fixé sous le moule à béton. L'élément est recouvert par une bâche étanche. Le traitement dure 4 heures environ. On attend ensuite 3 heures avant le démoulage.

Critique: Le rendement de ces procédés est très faible parce que ces modes opératoires sont prescrits par le constructeur sans se soucier de l'optimisation du système.

CHAPITRE 3

PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISES ET TECHNOLOGIE DES BETONS

3.1 INTRODUCTION

Les propriétés d'une structure ou d'un matériau composé et hétérogène comme le béton sont étroitement liées à celles de ses constituants.

La plus grande partie du volume du béton est occupée par un agrégat inerte, constitué par des particules de dimensions différentes (pierres concassées, pierres roulées, sables) réunies par le ciment. Ce dernier est obtenu à partir de deux constituants chimiquement actifs: le ciment sec et l'eau. De part leur destination, ces matériaux diffèrent d'une région à une autre surtout en qualité. Leur sélection est d'autant plus poussée que l'ouvrage à édifier est plus important. Une grande qualité est recherchée surtout en béton précontraint où une grande résistance est exigée les premiers jours. Les matériaux utilisés dans cette étude ont été choisis de manière à répondre à ces critères.

Pour cela on a choisi le ciment produit à M E F T A H comme échantillon des ciments portland artificiels et le ciment d'ECH-CHLEFF comme ciment utilisé en milieu agressif.

Quant aux agrégats on a utilisé ceux de la carrière de CAP-DJINET.

Ce chapitre décrit les propriétés des différents matériaux utilisés dans cette recherche.

3.2 CIMENT PORTLAND ARTIFICIEL (CPA 325) de M E F T A H

Ce liant hydraulique est très largement utilisé en construction. Il est obtenu par le broyage d'une roche artificielle, le clinker à laquelle on mélange environ 5% de gypse destiné à régulariser la prise. Le clinker est obtenu par cuisson vers 1450°C d'un mélange de calcaire (80% environ) et d'argile (20 % environ). Les constituants principaux sont donc, la chaux, la silice, l'alumine et le fer [7].

3.2.1 Composition chimique

La composition chimique des clinkers est donné ci-après :

Eléments principaux :	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
Teneur (%)	62-67	19-25	2-9	1-5	0-1 [7]

Les analyses faites au laboratoire de l'usine pour ce ciment ont donné les résultats suivants :

Eléments principaux :	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
Teneur (%)	64,29	22,12	5,26	3,06	0,95 [8]

On calcule à partir de ces éléments simples, certains modules caractéristiques. ceux-ci sont importants pour le cimentier qui veille à la régularité de la fabrication, afin d'obtenir un clinker de qualité constante.

CaO

Module hydraulique : ----- compris entre
 $\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$ 1,7 et 2,3

Module silicique : ----- compris entre 2 et 3
 $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3}$

Module Alumino-ferrique : ----- compris entre 1,5 et 2,5
 $\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO}}$

Degré de saturation en : -----
 chaux $2,8 \text{ SiO}_2 + 1,18 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
 compris entre 0,90 et 0,95 (c'est le rapport de la chaux présente totale à la chaux susceptible de se combiner totalement avec la silice SiO_2 , Al_2O_3 et l'oxyde ferrique Fe_2O_3) [7].

Les modules caractéristiques du ciment étudié sont :

- Module hydraulique: 2,11
- Module silicique: 2,65
- Module alumino-silicique: 1,71
- Degré de saturation en chaux : 0,91 [8]

3.2.2 Composition minéralogique

En examinant au microscope métallographique un grain de clinker on peut observer différents constituants minéralogiques.

Ce sont essentiellement des silicates de chaux, des aluminates de chaux et de fer.

- L'alite, constituée de silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$ ou C_3S ou SC_3)

- La bélite, constituée de silicate bicalcique ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$ ou SC_2 ou C_2S)

- La célite constituée d'un mélange : d'aluminate tricalcique $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$ (ou AFC_4)

La composition minéralogique peut être déterminée par :
microscopie optique, diffraction des rayons X .

• Les compositions minéralogiques des clinkers fabriqués en France sont comprises dans les limites suivantes :

Constituants	Celite			
	Alite	Belite	C3A	C4AF
Teneurs (étendu) (%) ..	50-75	7-30	0-18	4-20
Moyenne	55	23	10	12

L'échantillon de ciment étudié a pour composition minéralogique suivante [7]:

Constituants	Celite			
	Alite	Belite	C3A	C4AF
Teneurs (%)	56,87	18,85	8,76	9,30

3.2.3 Surface spécifique Blaine

La finesse de mouture d'un ciment est caractérisée par sa surface spécifique ou surface développée des grains contenus dans une masse donnée. Cette surface est mesurée conventionnellement selon la norme NFP 15-442 [10] exprimée en $\text{cm}^2/\text{gramme}$.

L'ordre de grandeur de la surface spécifique Blaine des ciments portland courants est compris entre 2800 et 3900 $\text{cm}^2/\text{gramme}$ [9]. Quant à la surface spécifique du CPA de MEFTAH, elle est de 3342 $\text{cm}^2/\text{gramme}$ [8].

3.2.4 Pâte normale

La pâte normale est une pâte pure de consistance normale, c'est à dire, telle qu'en opérant 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 quand celle-ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids, est de $6 \pm 1 \text{ mm}$. L'appareil de VICAT, la sonde de consistance et le moule tronconique sont définis par la norme P15-414 [9].

En ce qui concerne la préparation de cette pâte on doit se conformer aux prescriptions de la norme NFP 15-402.

La quantité d'eau nécessaire pour une pâte normale est de 28,5% pour le ciment utilisé dans cette étude.

3.2.5 Expansion à chaud

C'est un essai permettant de s'assurer de la stabilité aux

expansifs des liants hydrauliques. Un excès de gypse, de chaux vive (CaO) ou de magnésie (MgO) libre peut provoquer des gonflements. L'essai d'expansion aux aiguilles de LE CHATELIER normalisé (P15-432) [10] a été utilisé.

Quant au ciment étudié, son expansion est de 1,45 mm .

3.2.6 La prise

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement. On le détermine à l'aide de "l'aiguille de VICAT" (essai normalisé NFP 15-414 et P 15-431) [10].

La fin de la prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide (il n'existe pas d'essai normalisé); elle ne peut se définir avec précision. Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes, pour les ciments prompts (à prise rapide), à plusieurs heures pour les ciments à prise lente. Pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures [9].

En ce qui concerne le CPA de MEFTAH on a :

début de prise à 2 heures 30 minutes
fin de prise à 4 heures 21 minutes .

3.2.7 Essais mécaniques

Ils ont pour objet de définir les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture à

la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des liants hydrauliques.

L'éprouvette utilisée dans l'essai de flexion est une éprouvette prismatique 4x4x16 en mortier ou en pâte pure. La rupture est effectuée sous charge concentrée dans une machine munie d'un dispositif à trois rouleaux.

L'essai de compression est exécuté avec une presse pour matériaux durs sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai précédent.

Les essais sont normalement exécutés sur éprouvettes en mortier normal NF 15-403 [10].

La norme AFNOR actuellement en vigueur prévoit pour chaque produit une ou plusieurs valeurs de résistances à la compression définie, pour un liant donné, par la résistance minimale d'éprouvettes en mortier normal atteinte au bout de 7, 28 et éventuellement 2 jours de conservation dans l'eau à 20°C.

La classe est désignée par la résistance à 28 jours. Les essais mécaniques effectués sur le ciment étudié ont donné les résultats suivants : (en Kg/cm²)

Résistance à la compression	Résistance à la flexion
3 jours 230	3 jours 50
7 jours 366	7 jours 64
28 jours 493	28 jours 76

3.3 CIMENT RESISTANT AUX SULFATES C R S 400 D' ECH-CHLEFF

C'est un liant hydraulique utilisé surtout au sud où l'eau est souvent salée. On l'utilise aussi pour travaux en milieux agressifs (travaux maritimes, fondations) et travaux en grande masse. Les techniques des essais et contrôles sont similaires à ceux du ciment précédent. On se limitera donc à donner les résultats sous forme de fiche technique.[8]

COMPOSITION CHIMIQUE		ESSAI PHYSICO-CHIMIQUES	
Elements	Teneur (%)		
		Surface spécifique : 3420 cm ² /gr	
		Pâte normale : E=27%	
SiO ₂	23,5	Prise :	
Al ₂ O ₃	4,29	Début 2 h 35 mn	
F ₂ O ₃	3,96	Fin 4 h 17 mn	
CaO	63,43	Expansion à chaud : 1,45 mm	
COMPOSITION MINÉRALOGIQUE		RESISTANCE A LA COMPRESSION EN KG/CM ²	
Elements	Teneur (%)		
		3 jours 233	
C ₃ S	38,8	7 jours 352	
C ₂ S	38,2	28 jours 550	
C ₃ A	4,68		
C ₄ AF	12,04	RESISTANCE A LA FLEXION EN KG/CM ²	
		3 jours 48	
		7 jours 68	
		28 jours 84	

TABLEAU 3.1 : fiche technique du ciment CRS 400

3.4 LES AGREGATS

On appelle agrégat un matériau inerte constitué par du sable, graviers ou cailloux qui servent de base à la constitution du béton.

3.4.1 Classification granulaire

La norme AFNOR (P 18-304) permet de classer les agrégats selon leurs dimensions par rapport à des mailles de tamis ou des trous de passoires (tableau 3.2) [9].

Appellation des mailles	Diamètre des passoires usuels	Mailles des tamis usuels	Modules
Les fines (farines ou fillers)	---	< 0,08	
- fins	---	de 0,08 à 0,315	20 à 26
Les sables - moyens	---	de 0,315 à 1,25	26 à 32
- gros	---	de 1,25 à 5	32 à 38
- petits	de 6,3 à 10	---	38 à 40
Les gravillons - moyens	de 10 à 16	---	40 à 42
- gros	de 16 à 25	---	42 à 44
Les pierres - petits	de 25 à 40	---	44 à 46
concassées ou - moyens	de 40 à 63	---	46 à 48
cailloux - gros	de 63 à 100	---	48 à 50

TABLEAU (3.2) Classification des agrégats par grosseur.

3.4.2 Granulométrie

Un agrégat est désigné par deux nombres représentant la plus petite et la plus grande dimension de ses grains.

Exemple: on dira un gravillon de 6,3/25 mm. Les proportions

relatives des grains compris entre 6,3 et 25mm peuvent être cependant variables. On les détermine par l'analyse granulométrique. Pour cela, on prélève aux fins d'analyse, une certaine quantité du matériau, aussi représentative que possible. On la fait sécher, puis par pesée, on détermine sa masse. On a pris 2 Kg de sable 0/5 mm et 7 Kg de gravillon 5/40 mm pour la présente étude.

On a procédé ensuite à des tamisages successifs. Pour cela, on a employé des tamis et passoires normalisées AFNOR [9].

Pratiquement pour les analyses courantes des sables à béton, on n'utilise en général que les tamis dont les diamètres marqués d'un astérisque dans le tableau suivant:

Sables		Graviers
Mailles des tamis (en mm)	Mailles des tamis (en mm)	Diamètre des passoires (en mm)
0,08 *	0,80	6,3
0,1	1,00	8,0
0,125	1,25 *	10,0
0,16 *	1,60	12,5
0,20	2,00	16,0
0,25	2,50 *	20,0
0,315 *	3,15	25,0
0,40	4,00	31,5
0,50	5,00 *	40,0
0,625 *		50,0
		62,5
		80,0
		100,0

TABLEAU (3.3) Maille de tamis et diamètres de passoires

D'après les résultats du tamisage on trace la courbe granulométrique sur un diagramme gradué en abscisse suivant les dimensions des tamis et passoirs et en ordonnée suivant les pourcentages de 0 à 100 % en poids de la quantité qui passe à travers le tamis, par rapport à la quantité totale (tamisat). Les résultats sont représentés dans le tableau (3.4) et la figure (3.1) pour le sable; le tableau (3.5) et la figure (3.2) pour les gravillons.

Diamètre des tamis (en mm)	Résidu partiel Kg	Résidu partiel %	Résidu total Ai %	Quantité passées Pi%
10	0	0	0	100
5	0,020	1	1	99
2,5	0,051	2,55	3,55	96,45
1,25	0,165	8,25	11,80	88,20
0,5	0,697	34,85	46,65	53,35
0,315	0,830	41,50	88,15	11,85
0,16	0,233	11,65	99,80	0,20
0,08	0,004	0,2	100	0

TABLEAU (3.4) Analyse granulométrique du sable

Diamètre des tamis (en mm)	Résidu partiel Kg	Résidu partiel %	Résidu total Ai %	Quantité passées Pi%
40	0	0	0	100
20	2,227	31,81	31,81	68,19
10	2,420	34,57	66,38	33,62
5	1,535	21,93	88,31	11,69
Fond	0,818	11,62	100	0

TABLEAU (3.5) Analyse granulométrique des gravillons

QUANTITES PASSEES %

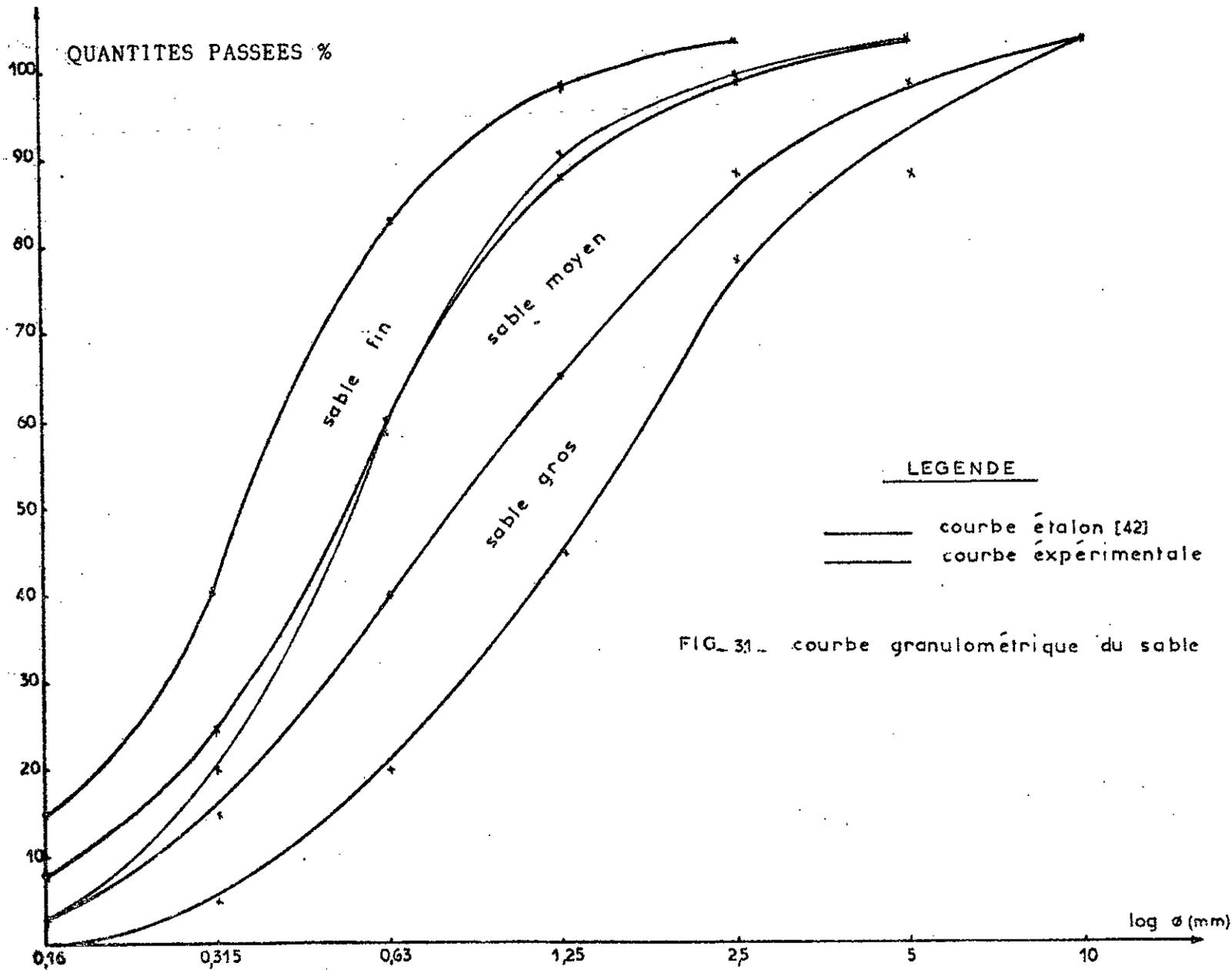


FIG. 31. courbe granulométrique du sable

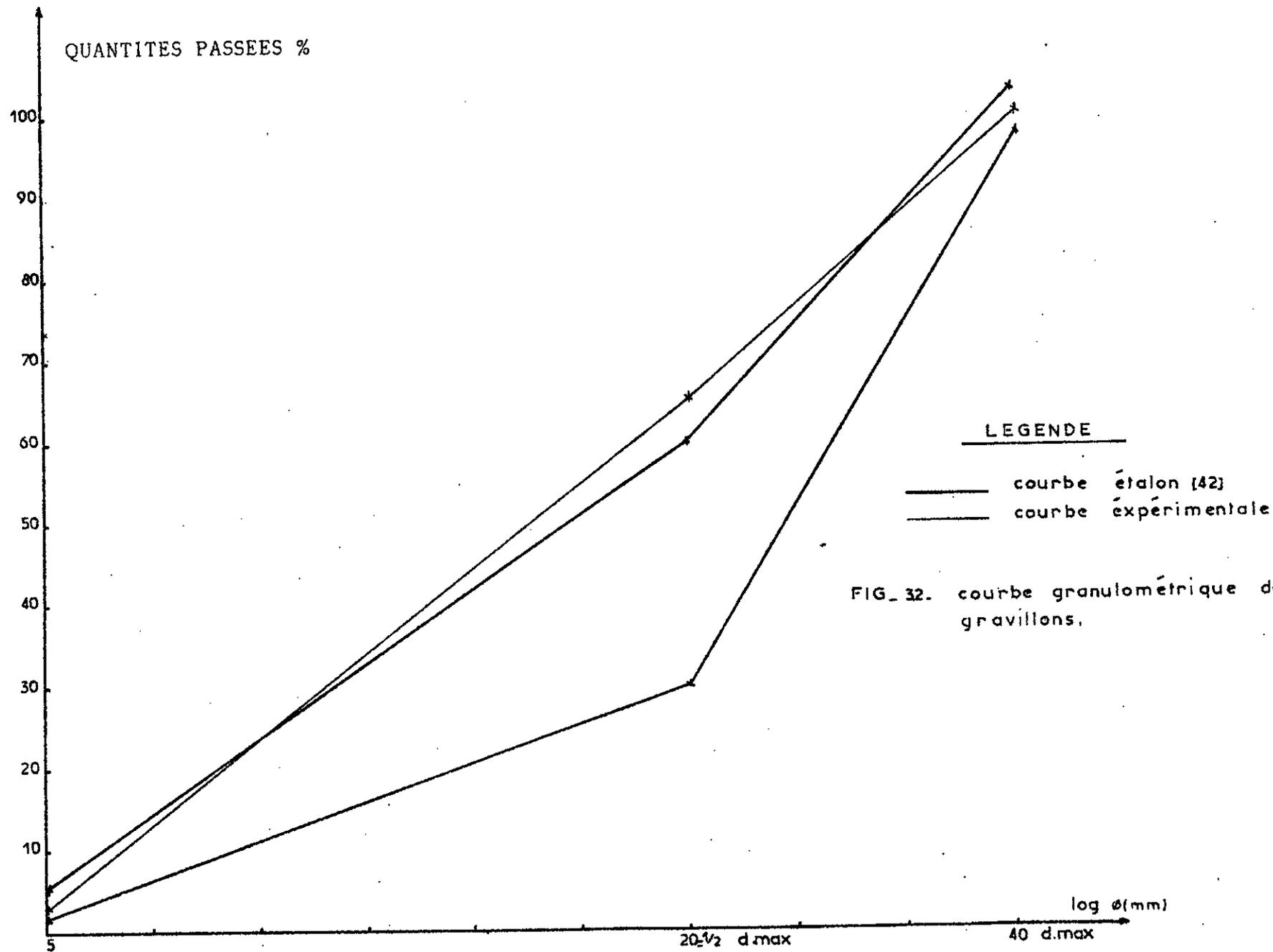


FIG. 32. courbe granulométrique des gravillons.

3.4.3 Masse spécifique et masse volumique des agrégats

- La masse spécifique est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains (volume absolu) [9].

Elle est de 2,63 gr/cm³ pour le sable et 2,66 gr/cm³ pour les gravillons étudiés.

- La masse volumique est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant (volume apparent). Elle est de 1,55 gr/cm³ pour le sable et 1,50 gr/cm³ pour les gravillons.

3.4.4 Module de finesse du sable

- Le module de finesse d'un agrégat est la somme des pourcentages ramenée à l'unité des quantités de matière qui restent sur les tamis (refus). Ces pourcentages sont cumulés sur des tamis de diamètre 0,16 et suivants de 3 en 3.

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins; ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité [9].

Le sable utilisé dans ces essais a un module de finesse de 2,56, ce qui correspond à un bon sable donc favorable à la bonne ouvrabilité et une bonne résistance.

3.4.5 PROPETE

La norme P18-301 [10] prescrit que dans les agrégats, le pourcentage de vase, limon, argile et matières solubles susceptibles d'être éliminées par le lavage et décantations successives, ne doit pas excéder 5 pourcent. Pour le sable, la propreté peut se contrôler par l'essai dit "équivalent de sable" (E.S).

On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante qui contient 111 gr de chlorure de calcium anhydre, 480 gr de glycérine et 12 gr de formaldéhyde pour 40 l d'eau; puis on laisse reposer; la hauteur du dépôt de sable visible étant h_2 et h_1 celle de la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension), l'équivalent de sable est : $E.S = 100 h_1/h_2$ (le processus est très exactement défini par la norme NFP 08-501) [10].

Un équivalent de sable compris entre 70 et 80 correspond à un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité [9].

Le sable étudié a un équivalent de sable : $E.S = 75$.

Quand aux gravillons utilisés ils proviennent d'une carrière de granit. Ils sont dépourvus de gangues argileuses et des poussières qui risquent de compromettre l'adhérence du mortier sur les gravillons.

3.5 L'EAU DE GACHAGE

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont définies par la norme AFNOR P 18-303 [10].

L'eau entrant dans la composition des bétons devra être pure, sans acide, huile, etc... . L'eau de mer ou autres eaux contenant des sels minéraux peut être employée à condition que la teneur en sels ne dépasse pas 2 pourcent. Pour les présents essais on a utilisé de l'eau potable. Le dosage en eau dépend de la pièce en béton, des moyens de mise en oeuvres utilisés (vibration) et de l'ouvrabilité désirée.

Un excès d'eau conduit à une ségrégation des agrégats et une chute de résistance alors que trop peu d'eau entraîne un excès de bulles [9].

Il est conseillé de contrôler régulièrement la plasticité du béton. Une bonne ouvrabilité correspond à un affaissement du cône d'Abrams (slump test) de 5 à 12 cm [9].

3.6 LES ADJUVANTS

On entend par "adjuvants" un produit qui, ajouté au béton en faible quantité permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités désirées soit sur un béton frais soit sur un béton durci.

Les adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de poudres solubles ou non, de liquides, etc... et sont vendus sous des appellations correspondants à une marque ou à une société.

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci.

Dans la pratique on propose la classification suivante:

- Plastifiants
- Fluidifiants
- Entraîneurs d'air
- Accélérateurs
- Retardateurs
- Hydrofuges
- Antigels et antigélifs

Les adjuvants utilisés dans cette étude sont commercialisés sous le nom de "SIKA". Ils sont très largement employés en Algérie.

L'utilisation de tous les adjuvants ainsi que la détermination des dosages optimums nécessite des recherches approfondies. Dans cette étude on s'est contenté de choisir un plastifiant et un accélérateur de prise pour connaître leur influence sur le béton frais et durci.

3.6.1 Les plastifiants

Ce sont des produits organiques qui, ajoutés au béton frais lui confèrent une meilleure plasticité améliorant ainsi ses qualités de maniabilité et d'ouvrabilité.

Pour une même ouvrabilité (même valeur de l'affaissement sur

l'essai du cône d'Abrams), les plastifiants doivent permettre de réduire la quantité d'eau à utiliser et par conséquent augmenter la résistance du béton durci et réduire ses déformations de retrait. Les essais réalisés avec les plastifiants commercialisés par GRANITEX ont toutefois donné les résultats opposés quant aux déformations de retrait [8].

Leur action est d'autant meilleure que le béton est plus raide (manque de sable fin) ou plus maigre (manque de ciment). Le plastifiant utilisé dans ce cas est le "plastiment liquide BV 40" (1) [11].

C'est un liquide brun de densité de 1,18. Le dosage est de 0,2 à 0,5 % du poids du ciment utilisé.

Pour les essais, le dosage choisi est de 0,3 % de la masse du ciment.

3.6.2 Les accélérateurs

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment. Cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

Dans cette étude on a utilisé l'accélérateur "SIKA RAPIDE liquide" (1) [11]. C'est un liquide de couleur jaunâtre translucide et de densité 1,30.

Le dosage est de 0,70 à 1% du poids du ciment.

(1) Formule chimique brevetée.

Dans les essais réalisés le dosage est de 0,80% de la masse de ciment.

3.7 CONCLUSIONS

Les essais des matériaux utilisés dans cette étude répondent aux normes réglementaires.

Le sable utilisé est dans l'intervalle des sables fins/ moyens. Le nombre d'adjuvants est limité par manque de temps. Le dosage choisi n'est que la moyenne alors qu'il faut rechercher l'optimum. Une étude dans ce sens est à envisager.

CHAPITRE 4

PROPRIETES DU BETON FRAIS PRECHAUFFE

4.1 INTRODUCTION

La prise des liants hydrauliques et le durcissement du béton sont des phénomènes complexes. On sait que le béton doit garder sa plasticité (son ouvrabilité) de départ un certain temps afin de pouvoir le transporter puis le mettre en place correctement avant que ne commence son durcissement.

Les temps de prise varient avec un grand nombre de paramètres comme la nature du ciment, la composition du béton, l'addition d'adjuvants, la température du milieu etc... .

Des mesures simples permettent de chiffrer au laboratoire ou sur chantier ces temps de prise.

Ce chapitre a pour but de bien montrer la variation de la consistance, du temps de prise, du gonflement du béton frais préchauffé en fonction du temps ainsi que des différents paramètres qui peuvent influencer sur ces propriétés.

Les essais effectués ne sont pas isothermes cela permet de représenter pour chaque type la variation de la température en fonction du temps.

4.2 COMPOSITION DES BETONS UTILISES

Des compositions normales simples ou adjuvantées de béton

avec un dosage de 350 Kg de ciment par m³ ont été employées. Les deux ciments CPA et CRS ont été traités. Pour les compositions simples, trois rapports E/C ont été considérés: 0,45 - 0,50 et 0,60. Deux compositions adjuvantées ont été ensuite examinées.

Composition de béton simple:

	Ciment	Gravier	Sable	Eau
C1 E/C=0,45	350	930	762	158
C2 E/C=0,50	350	920	755	175
C3 E/C=0,60	350	900	740	210

Tableau 4.1: Compositions du béton simple (unité:kg)

Composition de béton adjuvanté:

	Ciment	Gravier	Sable	Eau	Adjuvant
C4 E/C=0,50 plastifiant 0,3 %	350	920	754	175	1,05
C5 E/C=0,60 accélérateur 0,8 %	350	898	739	210	2,8

Tableau 4.2 : Composition du béton adjuvanté (unité:Kg)

4.3 MESURE DE LA CONSISTANCE

4.3.1 Principe :

La consistance (ouvrabilité) est mesurée généralement à l'aide du cône d'Abrams (norme AFNOR P18-451) [10].

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel non hautement qualifié.

Mode opératoire: On remplit de béton un moule en tôle tronconique ($D=20$ cm, $d=10$ cm, $h=30$ cm). Le remplissage s'exécute en quatre couches tassées avec une tige d'acier pointue de 16mm de diamètre à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

La norme distingue trois catégories de bétons suivant l'affaissement du cône.

- Béton Fermé (F) 0 à 2 cm
- Béton Plastique (P) 3 à 7 cm
- Béton Mou (M) 8 à 15 cm [9].

L'essai ne peut être effectué pour les bétons dont les agrégats ont plus de 40 mm de diamètre (gros béton). Il est mal adapté pour les bétons trop secs ou au contraire trop mous.

Pour les bétons préchauffés, l'utilisation de cette méthode n'est pas possible. Elle conduirait à des erreurs à cause des

pertes de chaleur du béton et l'évaporation de l'eau de gâchage pendant l'essai.

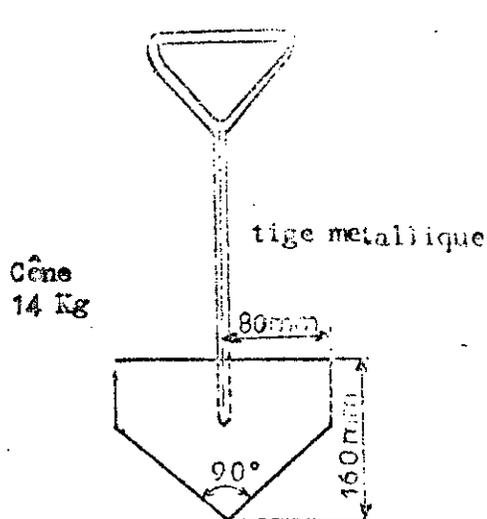
Une méthode de mesure qui permet de résoudre ce problème est celle du cône de KELLY (norme ASTM C360-63) [11].

4.2.2 Matériel utilisée

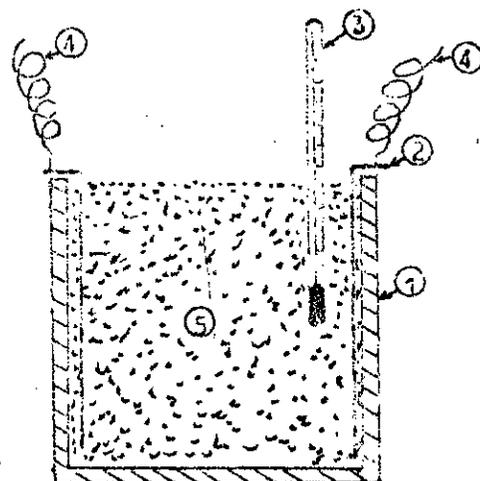
Le cône de KELLY (fig 4.1a) est une masse en acier de 14 kg. Il a 16 cm de diamètre et un angle au sommet de 90°. La hauteur de la partie conique représente la moitié du diamètre (photo 4.1). Le béton est chauffé dans un moule (fig 4.1b) par effet joule. On y arrive en introduisant le béton comme résistance dans le circuit du courant alternatif par le moyen d'électrodes [12]. La température moyenne du béton est indiquée en fonction du temps par un thermomètre à mercure. La pénétration du cône est obtenue en laissant tomber celui-ci après avoir posé la pointe sur la surface du béton. Le diamètre mesuré de la trace sur le béton représente deux fois la valeur de la profondeur h . Chaque valeur représente la moyenne arithmétique de 3 à 5 mesures.

Il est intéressant de comparer la pénétration h d'après le cône de KELLY et l'affaissement A d'après le cône d'Abrams pour un même béton à 20°C.

La figure (4.2) montre que la relation est une droite de la forme $y=ax+b$. Il existe donc une proportionnalité entre h et A .



a) Cône de KELLY



- ① Meule en bois
- ② Electrode en zinc
- ③ Thermomètre à mercure
- ④ Câbles électrique
- ⑤ Béton

b) Meule à béton

fig 41 - Essai de pénétration
" Cône de KELLY "

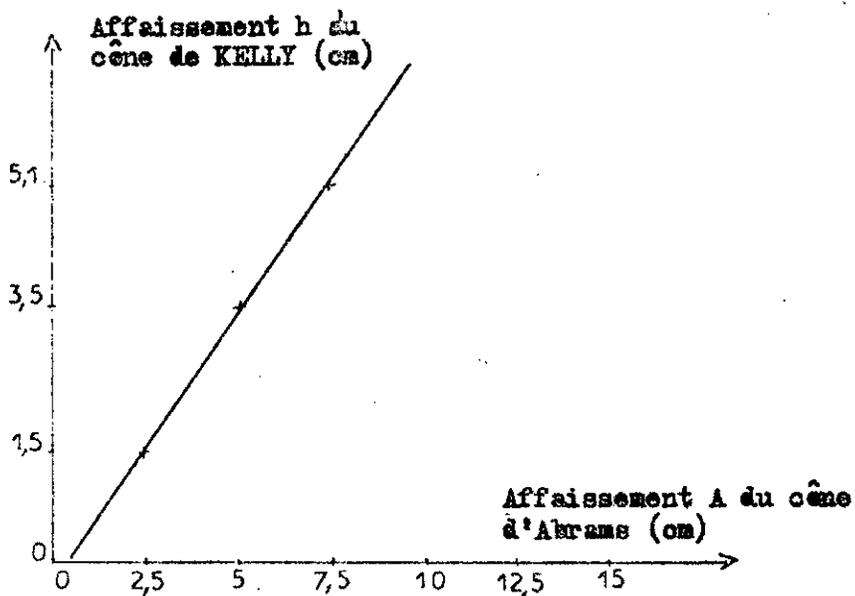


fig 42 - Relation entre l'enfoncement d'après le cône de KELLY
et l'affaissement du cône d'Abrams.

- LEGENDE -

- (1) Meule en bois.
- (2) Electrode en zinc.
- (3) Thermometre à mercure.
- (4) Cable électrique.
- (5) Cône de KELLY.

Photo 4.1 - Essai de pénétration du cône de KELLY.

sous la forme $h=aA+b$.

Quatre différentes températures de préchauffage ont été utilisées pour chaque composition de béton. La figure (4.3) représente les variations de la consistance ainsi que la température en fonction du temps pour le ciment CPA 325.

La consistance initiale correspond à une pénétration du cône de KELLY de 7 cm. On constate que pour la température de 40°C, la diminution de la consistance se fait lentement.

Par contre à 70°C, l'ouvrabilité décroît brusquement. Les essais sont faits au laboratoire. Les échanges de chaleur entre le béton et le milieu extérieur provoquent un refroidissement rapide. Les mêmes essais sont réalisés sur un béton de même composition mais de consistance initiale différente. Celle-ci correspond à 3 cm d'après la pénétration du cône de KELLY.

Les variations des consistances et températures sont représentées sur la figure (4.4).

Afin de comparer les deux ciments étudiés, on a procédé aux mêmes essais avec le ciment CRS 400. La figure (4.5) représente la variation de la consistance et de la température pour ce type de ciment en fonction du temps.

4.3.3 Observations

On peut constater que la variation de la consistance n'est pas linéaire avec le temps.

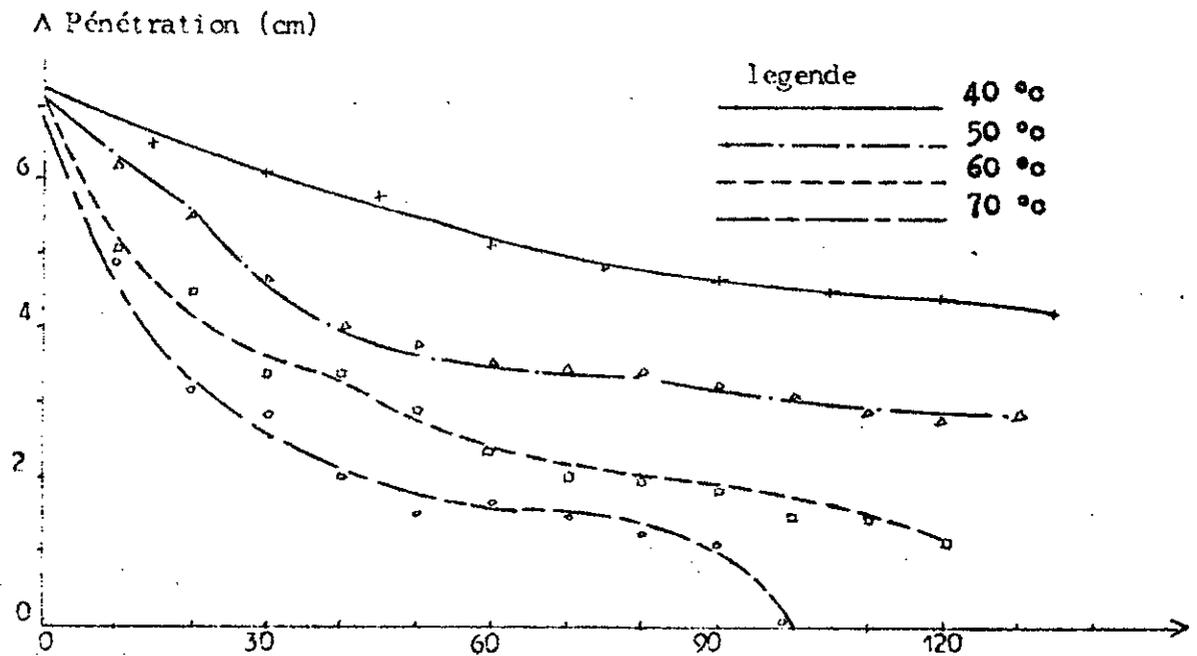
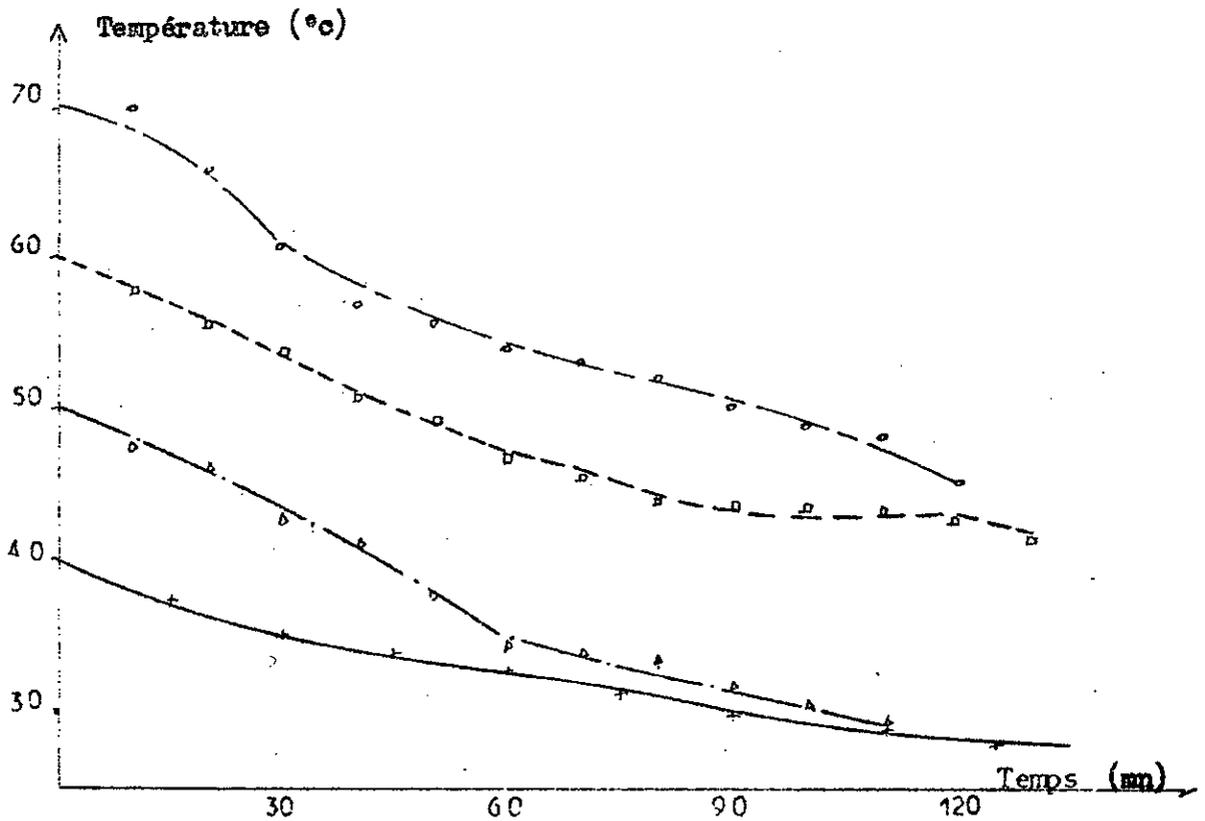


fig 4.3 - Variation de la consistance et de la température du béton en fonction du temps. Ciment CPA 325 profondeur initiale (HI = 7 cm) pour différentes températures initiales.

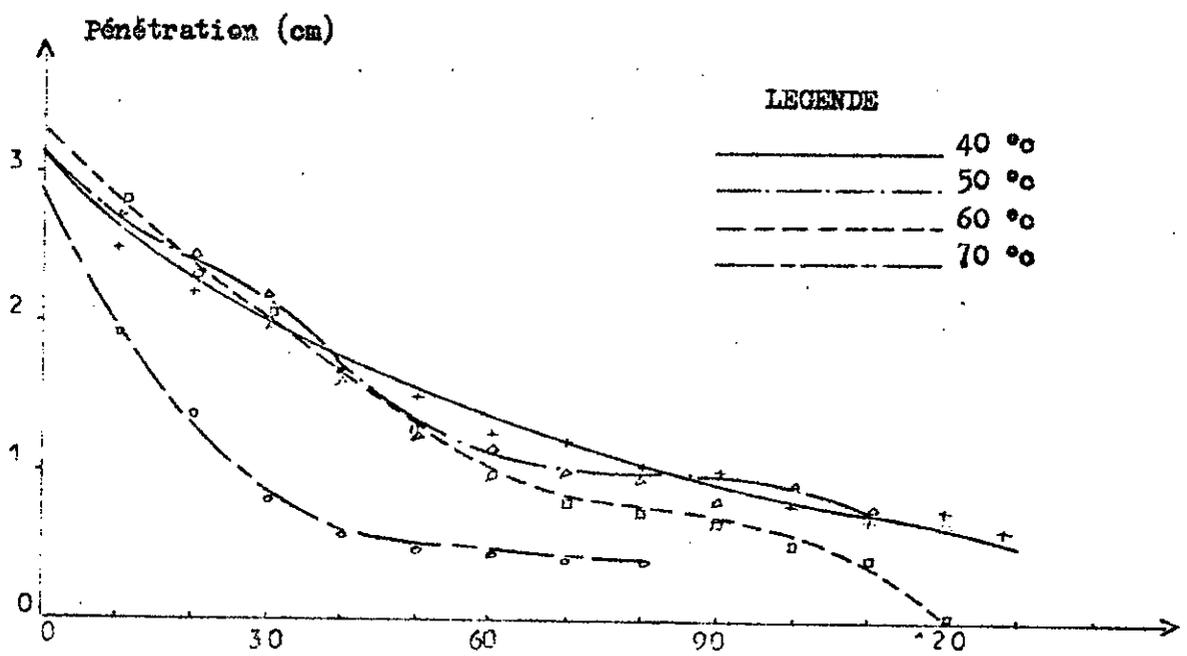
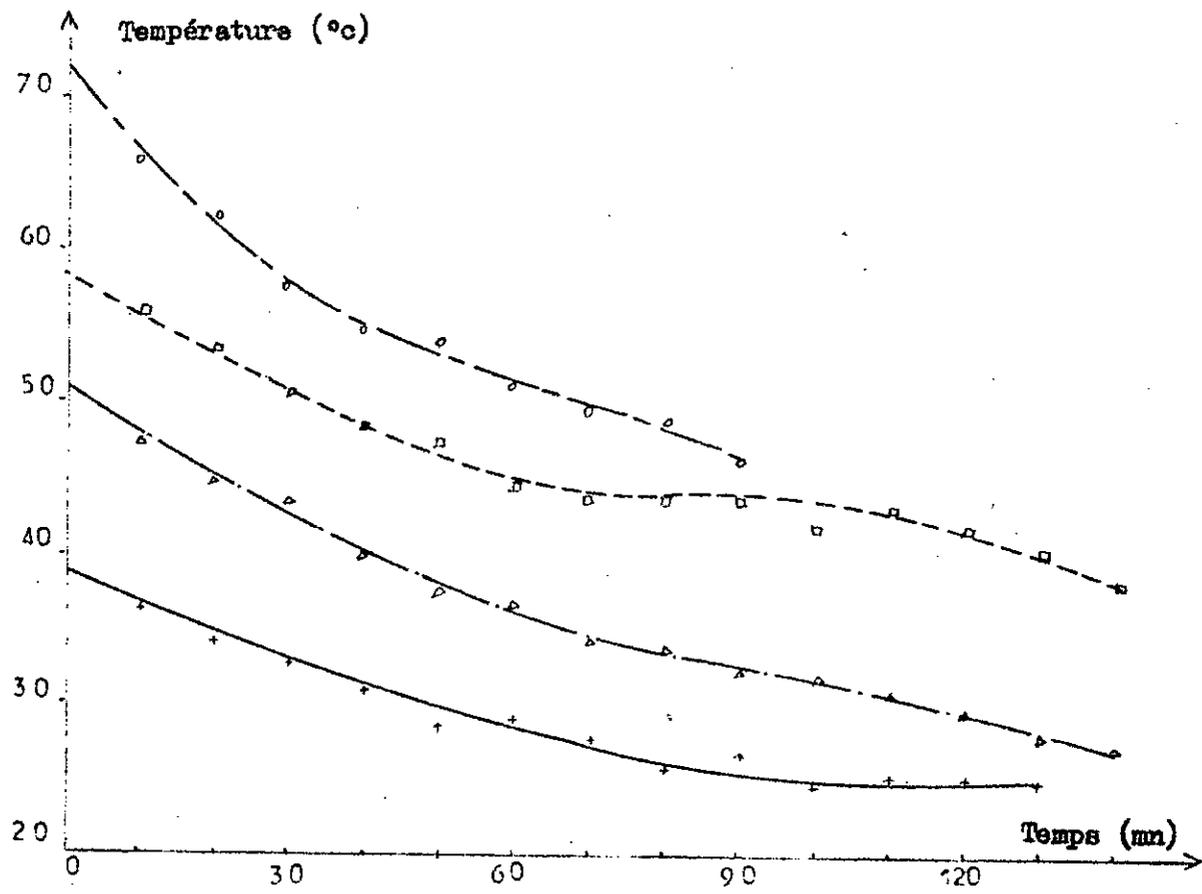


fig 4.4 - Variation de la consistance et de la température du béton en fonction du temps. Ciment CPA 325. Profondeur initiale ($h_i = 3$ cm) pour différentes températures initiales.

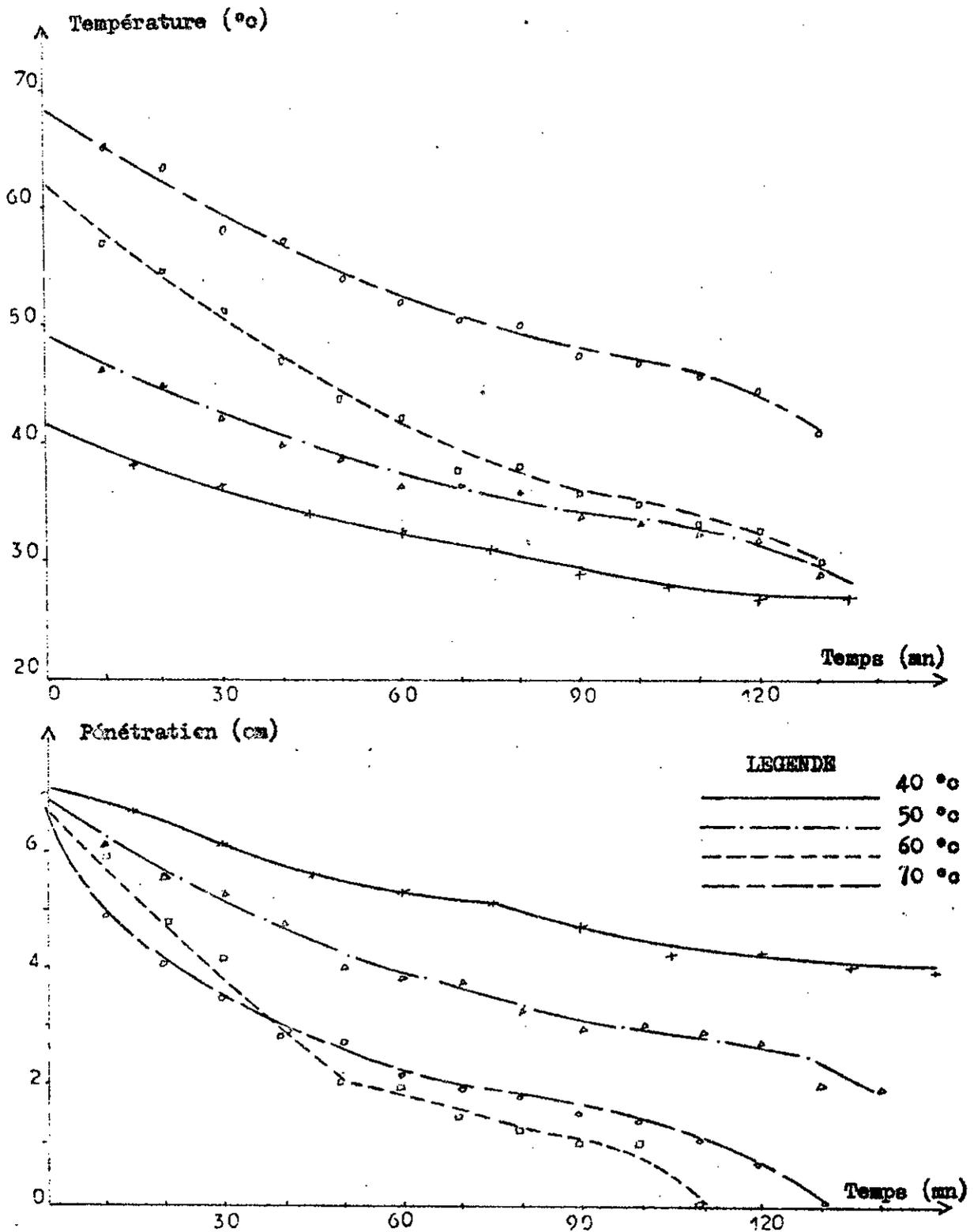


fig 4.5 - Variation de la consistance et de la température du béton en fonction du temps. Ciment CRS 400 - Profondeur initiale ($h_i = 7$ cm).

Pour un béton initialement mou ($A > 8$ cm), on obtient un béton plastique ($3 < A < 7$) au bout de 25 minutes pour une température de préchauffage de 50°C .

Par contre on obtient ce résultat au bout de 10 minutes pour une température de 60°C .

A ces instants, la température interne du béton est de 45°C pour le premier et 58°C pour le second (fig 4.3).

Les températures de 40 et 50°C facilitent la mise en oeuvre du béton puisque ce dernier garde sa plasticité au moins 120 minutes. Quant aux bétons traités à 60 et 70°C la plasticité disparaît au bout de 106 minutes pour le premier et 60 minutes pour le second, la consistance initiale étant molle. Le béton initialement plastique perd cette propriété au bout de 65 minutes pour un traitement à 40°C , à 50 minutes pour 50°C , 48 minutes pour 60°C et à 20 minutes pour 70°C .

Les résultats obtenus montrent que le béton dosé au ciment CPA perd sa consistance plus rapidement que celui dosé au ciment CRS et ce dans les mêmes conditions de traitement et de composition.

4.4 DELAIS DE PRISE ET DE DURCISSEMENT

4.4.1 Phénomène de prise et de durcissement

La prise est un phénomène artificiellement défini, qui indique le moment où la pâte de ciment acquiert une certaine con-

sistance la rendant impropre à la mise en oeuvre. C'est aussi le moment où apparaît une augmentation relativement brusque de la cohésion accompagnée d'une élévation de température de la pâte: C'est le début de prise (de 3 à 7 heures pour un ciment portland à 20°C).

Quelques heures après, la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un bloc rigide. C'est la fin de prise.

Les résistances mécaniques de ce bloc croissent régulièrement avec le temps: C'est le durcissement.

La prise et le durcissement sont les conséquences de l'hydratation de la pâte de ciment mais vues à des périodes différentes. Le temps de prise du béton peut être divisé en trois parties qualitativement distinctes.

La première période est celle de l'interaction du ciment et de l'eau. La réaction qui dure 30 à 40 minutes se caractérise par un fort dégagement de chaleur qui est de l'ordre de 120 calories/gramme. C'est la période d'hydratation des composés C3 S et C3 A.

La deuxième étape est la période inductive.

Le dégagement de chaleur est très faible, la durée variant de 2 à 4 heures est fonction du ciment utilisé. Ce phénomène s'explique par le fait que les composants hydratés du ciment forment un gel qui bloque la pénétration de l'eau au sein des

grains de clinker non encore hydratés.

Sur la courbe exprimant la variation de la résistance électrique volumique du béton en fonction du temps, ce processus apparaît sous forme d'une augmentation de la résistance, d'où un brusque changement sur les représentations graphiques des figures (4.8 à 4.12). La présence d'une solution saturée d'oxyde de chaux Ca(OH)_2 , ainsi que d'autres composants chimiques dans le gel formé crée des conditions favorisant l'apparition d'un courant de diffusion de l'eau provenant de l'espace entre les particules de gel où la concentration des composants chimiques est beaucoup plus faible.

La pression osmotique dans les pellicules enrobant les grains de ciment anhydre augmente. Dès que la valeur critique de cette pression est atteinte, les pellicules sont déchirées.

Il y a alors accès direct de l'eau vers les surfaces fraîches (non réagies) des grains de ciment. Par conséquent l'hydratation recommence. Ce qui fait baisser la résistance électrique volumique du mélange de béton puisque les minéraux nouvellement créés se transforment en ions. Ce moment correspond au maximum sur les figures (4.8 à 4.12).

La réaction exothermique reprend de nouveau avec cette troisième période en raison de la vitesse accrue de l'hydratation. A la fin de cette étape la plus grande partie des minéraux de

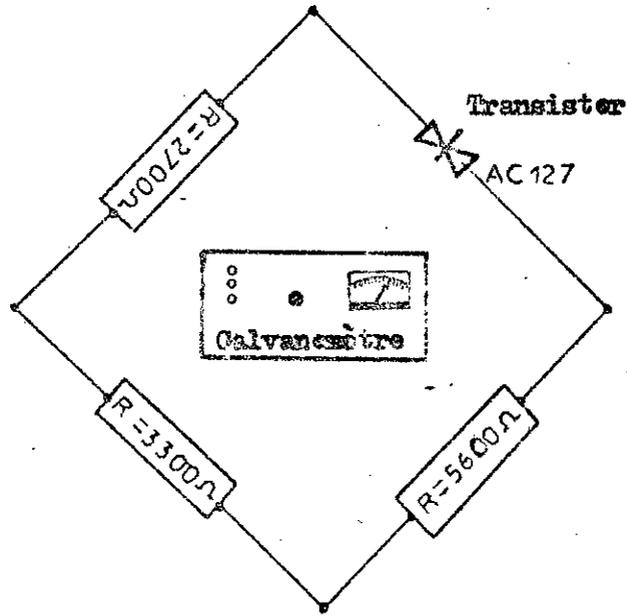


fig 46 - Schéma électrique du thermomètre électronique

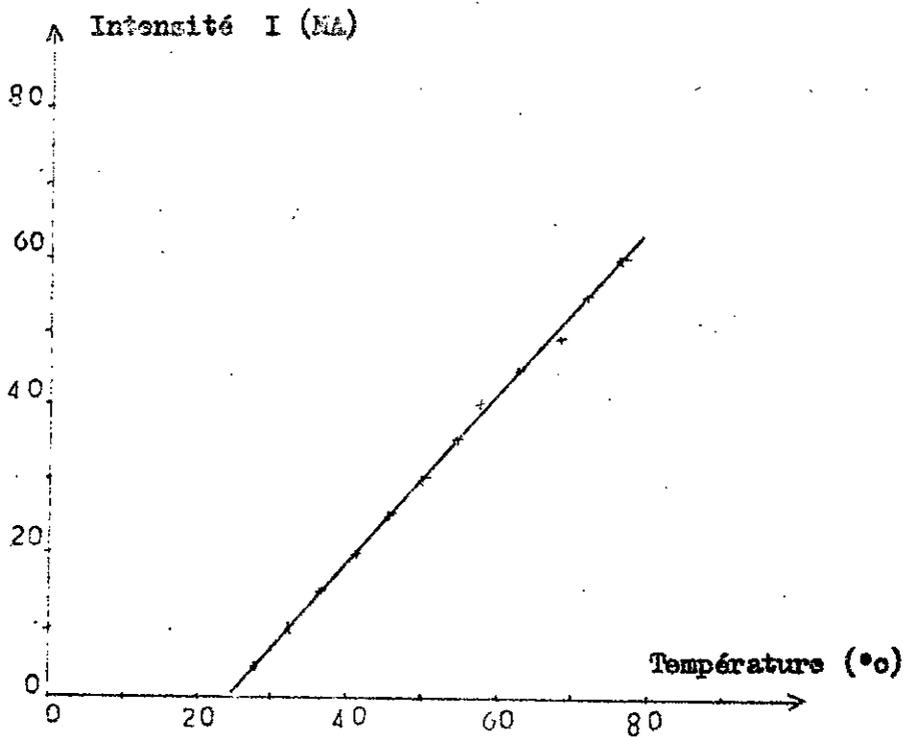


fig 47 - Courbe d'étalonnage d'un thermocouple.

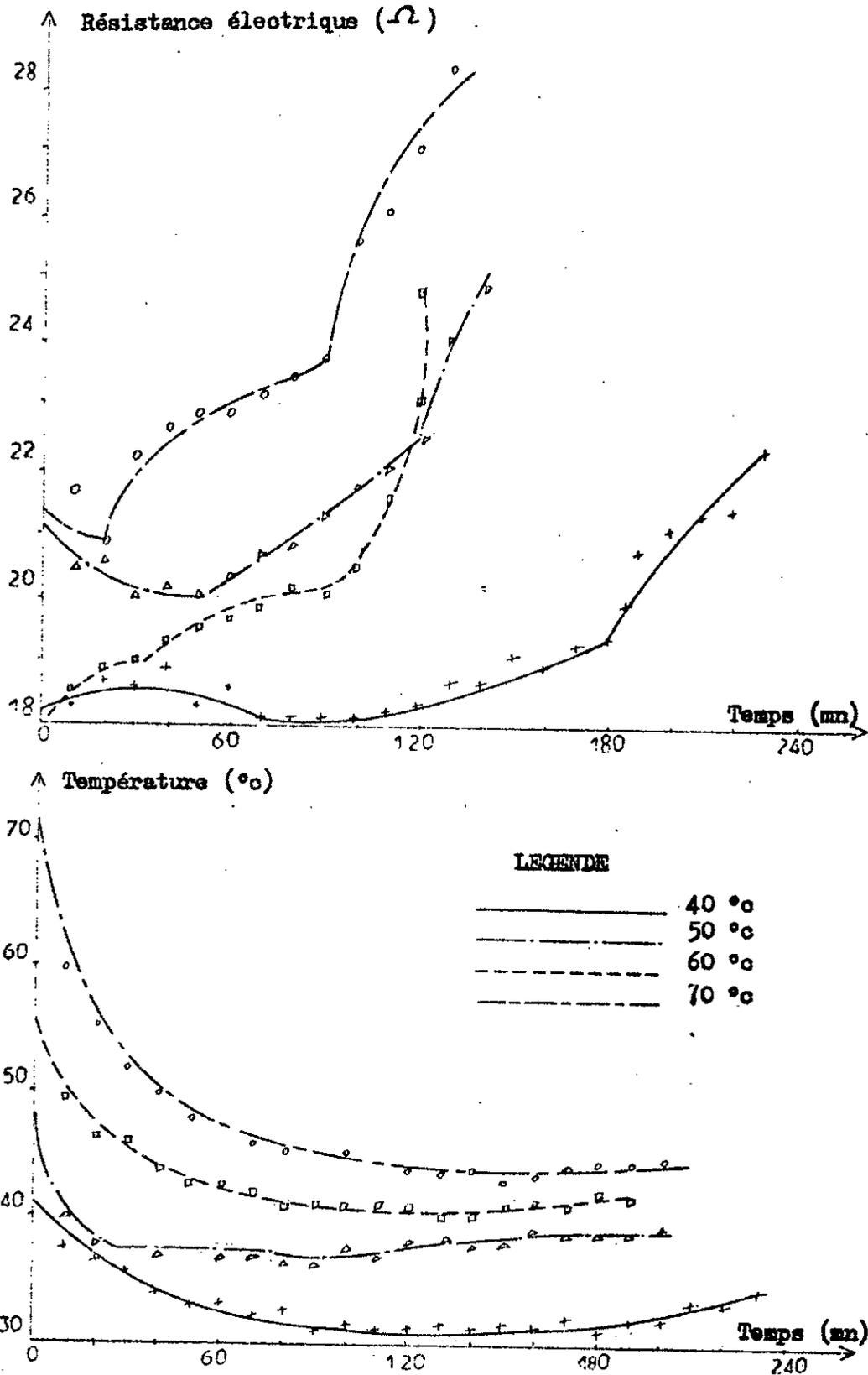


fig 4.8 - Détermination des délais de prise et de durcissement du béton.

Ciment CPA 325, $E/c = 0,45$ pour différentes températures initiales.

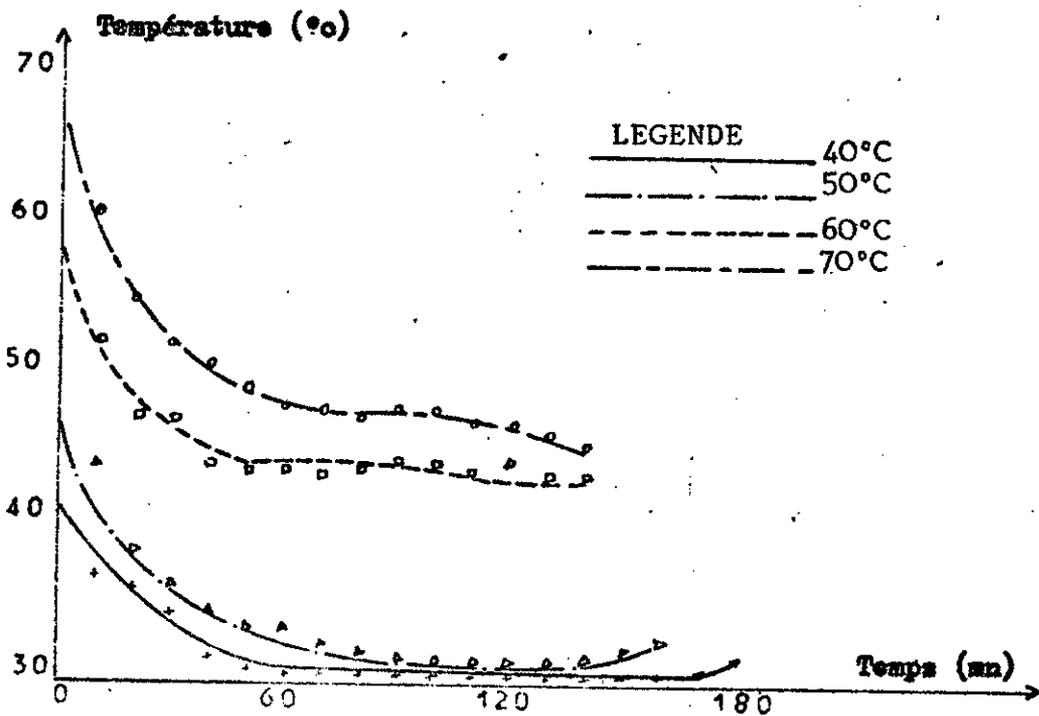
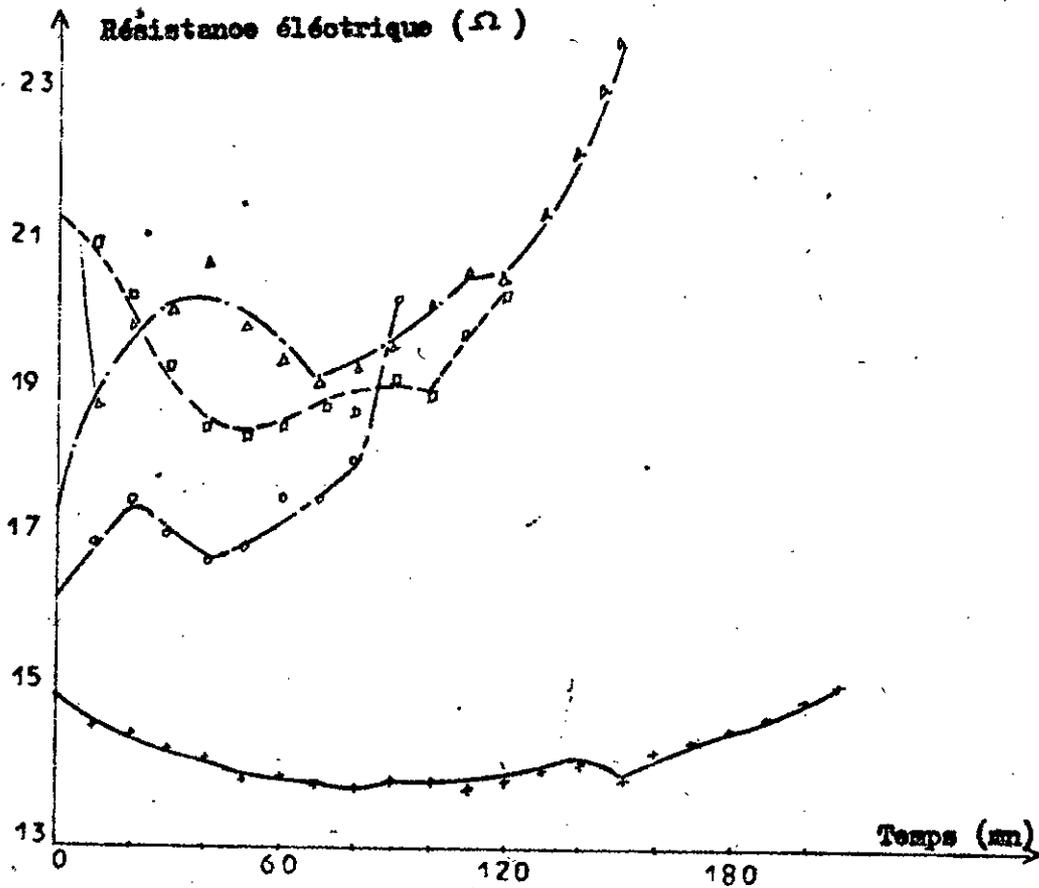


fig 4.9 - Détermination des délais de prise et de durcissement du béton.
Ciment CPA, E/c = 0,50, pour différentes températures initiales.

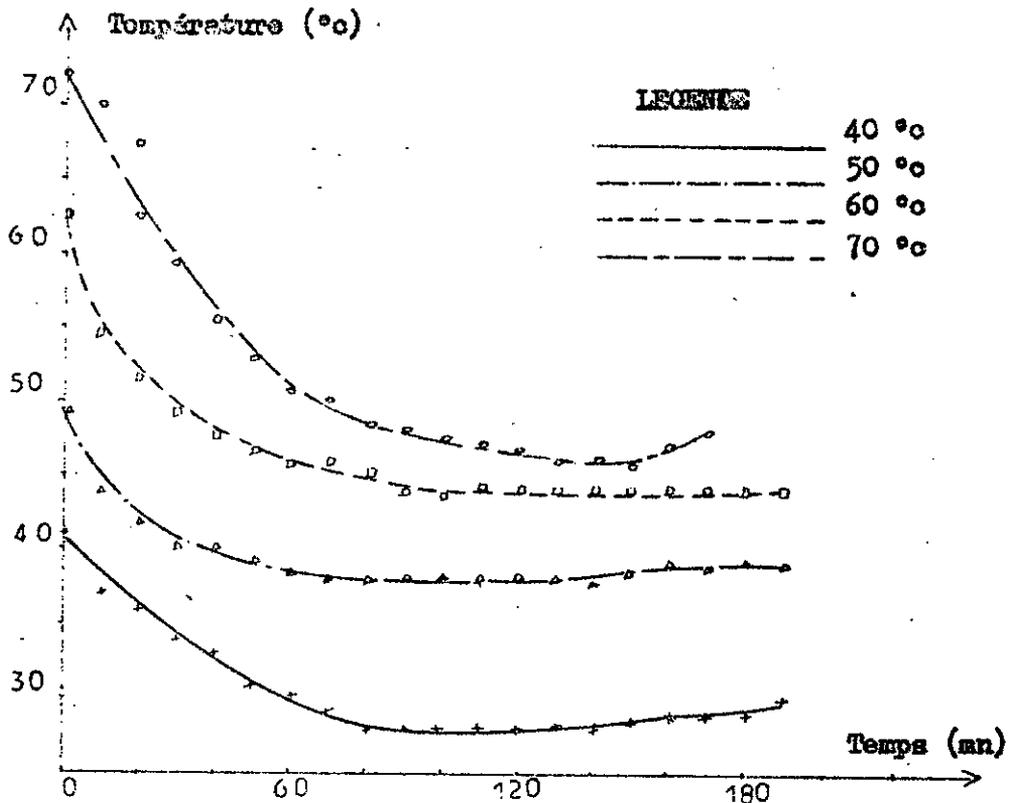
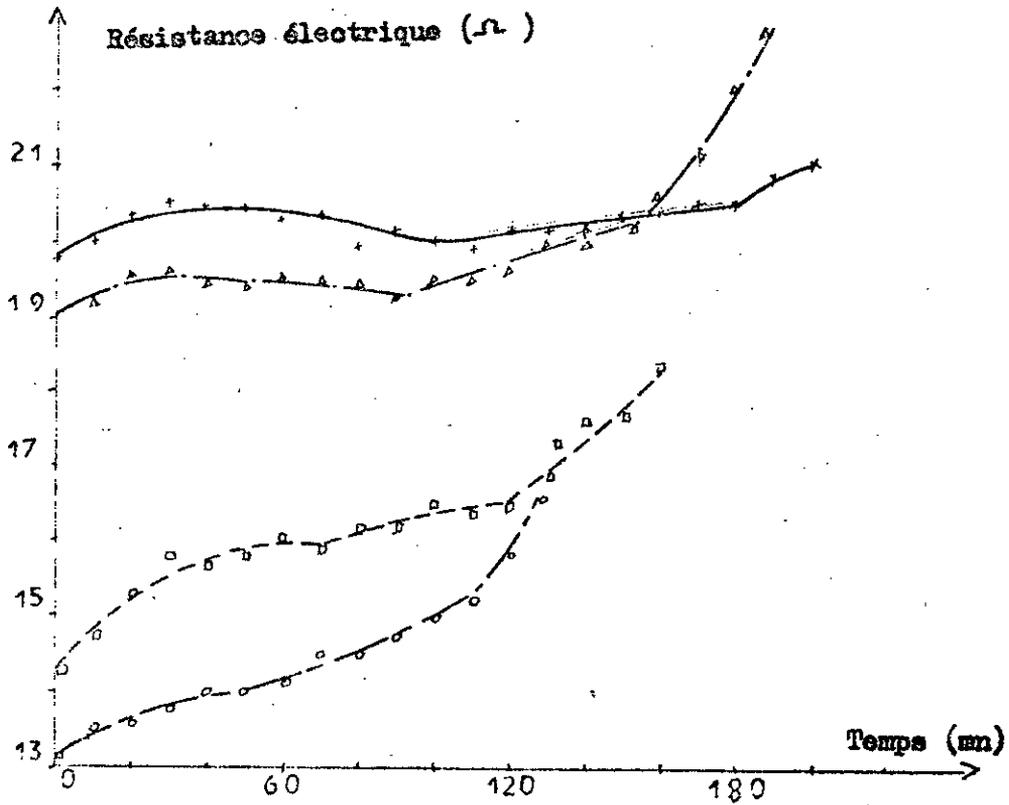


fig 4.10 - Détermination des délais de prise et de durcissement du béton. Ciment CPA 325, E/c = 0,60 pour différentes températures initiales.

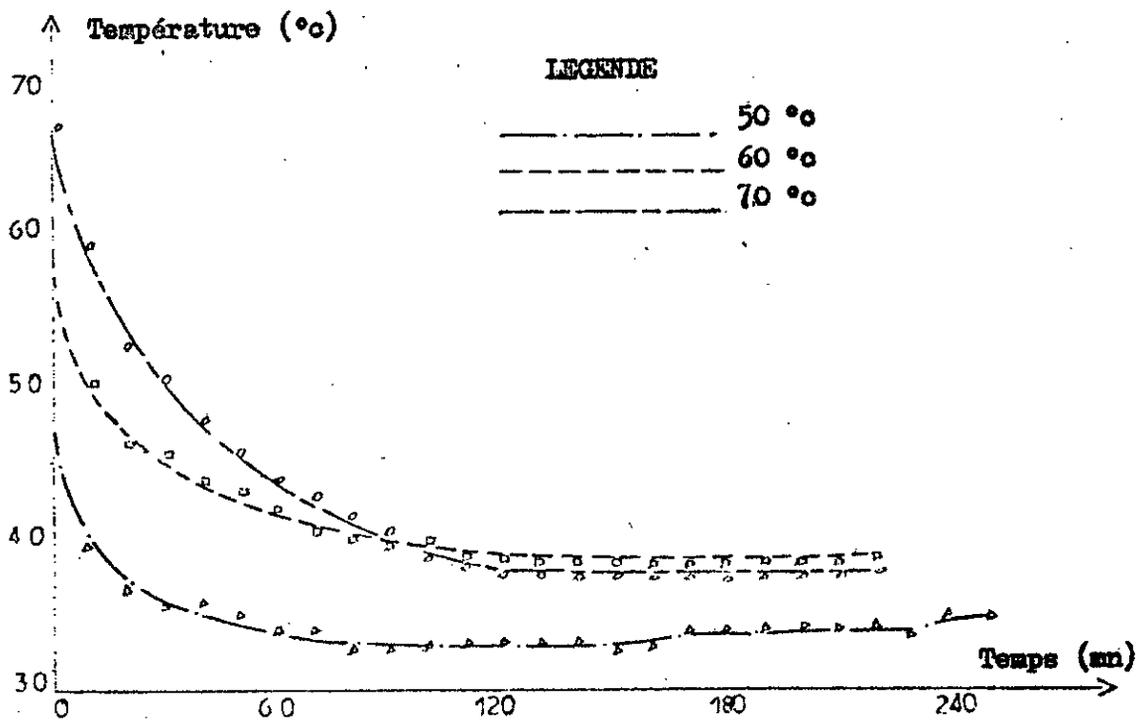
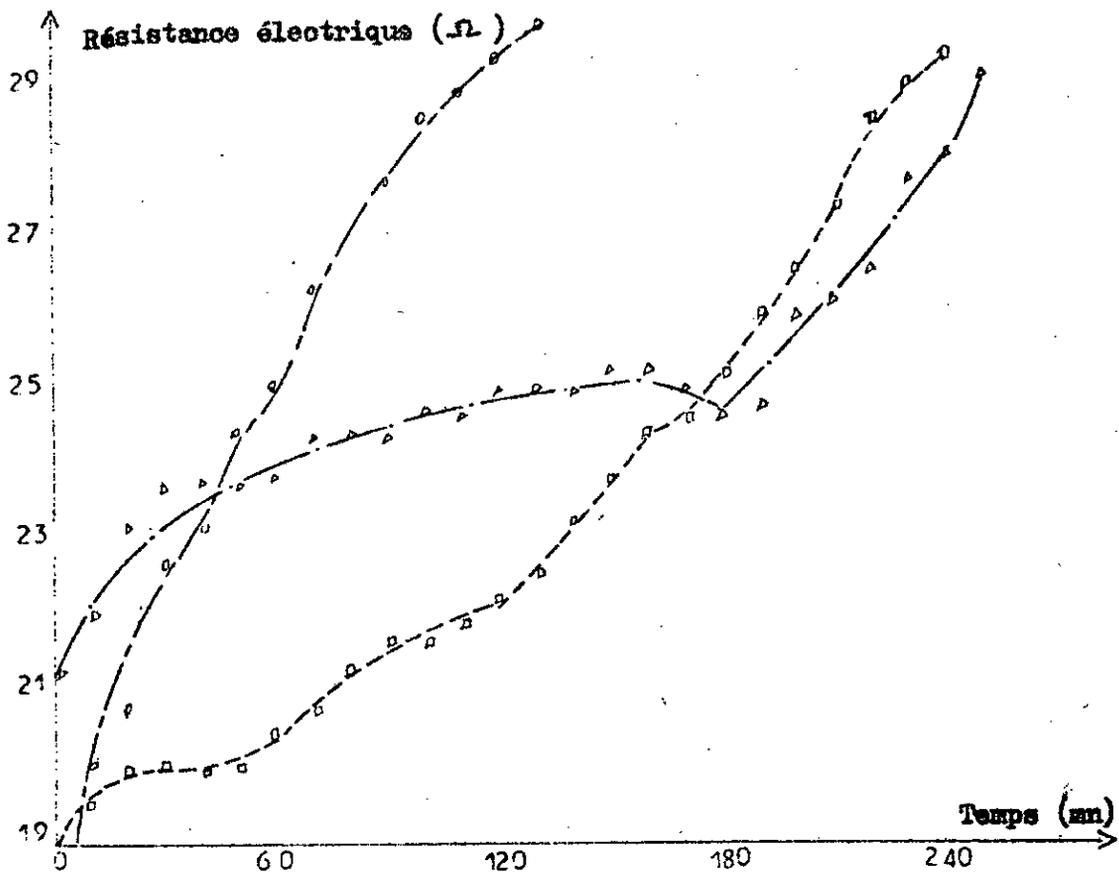


fig 4.11 - Détermination des délais de prise et de durcissement du béton.
Ciment CPA 325, E/c = 0,50. Adjuvant : plastifiant "BV40" dosé à 0,3 % du poids de ciment, à différentes températures initiales.

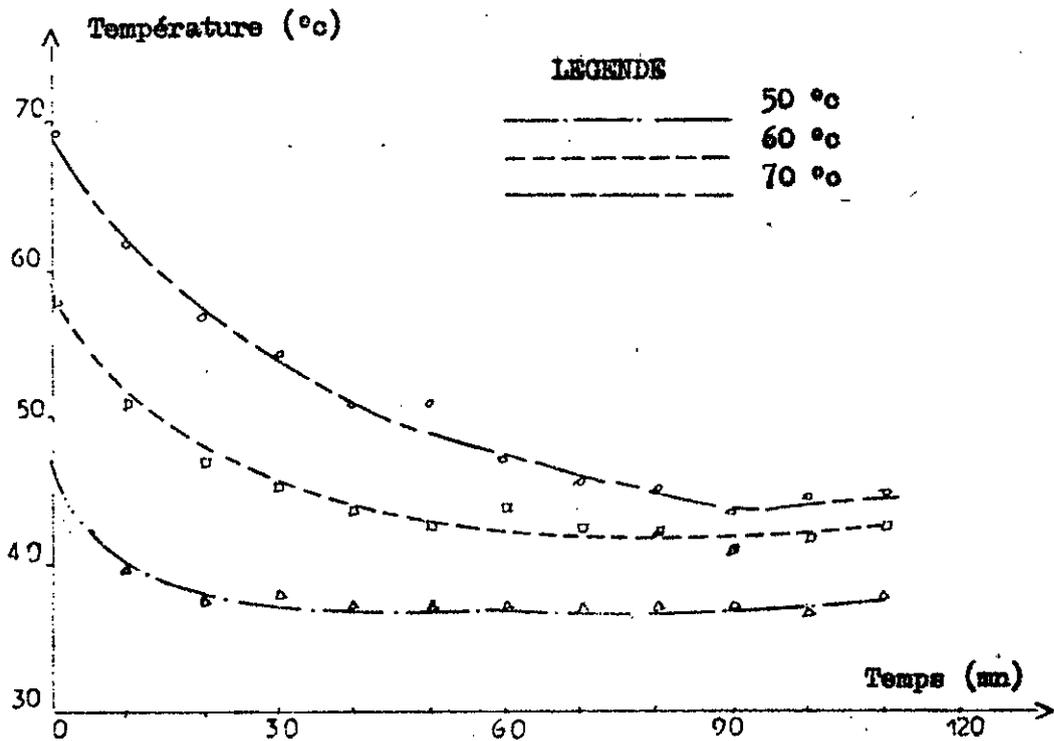
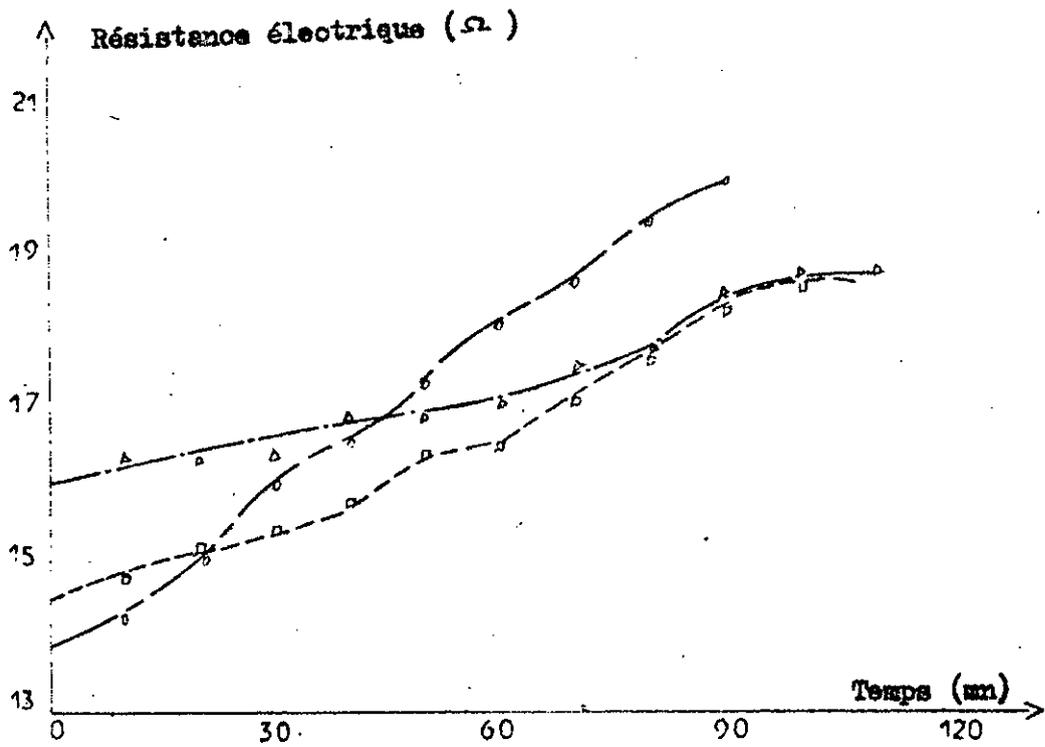


fig 4.12 - Détermination des délais de prise et de durcissement du béton. Ciment CPA 325, E/c = 0,60. Adjuvant : accélérateur "SIKA RAPIDE" dosé à 0,8 % du poids de ciment. A différentes températures initiales.

clinker a réagi et commence ainsi le phénomène de prise.

La fin de cette période s'exprime par un minimum sur les représentations graphiques: c'est le début de prise (D.P).

La vitesse de déchirement des pellicules de gel peut être obtenue par l'apparition d'impulsions mécaniques telles que la revibration ou thermiques sur la pâte de ciment. La température augmente sensiblement la pénétration osmotique de l'eau vers les grains de ciment. Le moment où la vitesse d'hydratation diminue fortement représente la fin de prise (F.P) ou le début du durcissement. La résistance électrique volumique augmente alors brusquement [8].

4.4.2 Mesure du temps de prise

4.4.2.1 Principe :

On mesure généralement le temps de prise à l'aide de l'aiguille de VICAT [NFP 15-414]. Ces essais sont applicables, soit sur un mortier soit sur une pâte pure.

Il est parfois nécessaire de connaître l'ensemble du phénomène, depuis l'instant de gâchage jusqu'à une certaine période du durcissement du béton.

La méthode utilisée dans cette étude pour illustrer ce phénomène est celle du chauffage électrique.

Ce procédé repose sur le fait que le béton frais est un semi-conducteur, c'est à dire que sa résistivité (500 à 2000 ohms

/cm/cm²) est comprise entre celle des métaux et des isolants.

Si l'on applique aux extrémités d'une éprouvette de mortier une différence de potentiel de E volts, il s'établit un courant dont l'intensité I est donnée par la loi d'OHM : $I=E/R$, R étant la résistance de l'éprouvette.

Ce courant va dégager une certaine quantité de chaleur. La loi de JOULE indique, en effet, que le nombre de calories dégagées par heure sera: $Q=864 E^2/R$. Ce sont ces calories qui serviront au chauffage du béton [12].

4.4.2.2 Dispositif expérimental

Le mélange de béton est chauffé par un courant électrique dans un moule en plexiglas (photo 4.2) pendant 1 à 2 minutes. Pour éviter les pertes de chaleur et d'eau, la surface du béton est recouverte d'une plaque de verre. Le moule est ensuite mis dans une boîte calorifugée (thermos) composée d'une double paroi en bois avec du polystyrène intercalé.

La température instantanée du béton est indiquée par un thermomètre électronique qui est basé sur un pont de Wheatstone (fig 4.6). Des transistors du type AC 127 sont plongés dans la masse de béton. Ces derniers ont pour caractéristique de transformer la chaleur qu'ils reçoivent en courant électrique.

Afin de connaître la correspondance entre le courant traversant les transistors et la température du milieu, on a étalonné ces

derniers et on a tracé pour chacun d'eux la relation entre l'intensité lue sur l'ampèremètre et la température correspondante fig(4.7). La précision qui est de l'ordre de 0,001°C ainsi que la faible inertie (0,1s) de ces thermocouples permettent d'obtenir la température instantanée du béton.

Avec cette méthode on peut obtenir l'image physique à tout instant du phénomène de prise et de durcissement du béton. Pour lire l'intensité qui traverse la masse de béton on dispose d'un galvanomètre alimenté par une source de tension stabilisée de 10 V. En faisant le rapport de cette tension (U) sur l'intensité (I) lue, on obtient la résistance électrique (R).

On a ainsi $R=U/I$ (photo 4.2).

La valeur absolue de cette résistance électrique importe peu. C'est sa variation en fonction du temps qui exprime le processus de la formation de la structure de béton.

Les essais ont porté sur trois compositions différentes pour le ciment CPA sans adjuvants avec quatre températures différentes de préchauffage.

Les résultats sont représentés sur les figures (4.8) à (4.11).

On a aussi étudié l'influence des accélérateurs et des plastifiants sur les précédents bétons. Les résultats sont représentés sur les figures (4.11) et (4.12).

Seul le ciment CPA a été employé avec les cinq compositions simples et adjuvantées C1 à C5 décrites au paragraphe (4.2).

- LEGENDE -

- (1) Meule et éprouvettes plus "le thermes"
- (2) Alimentation stabilisée.
- (3) Milliampérimètre.
- (4) Boite de branchement.
- (5) Thermomètre électronique.

Photo 4.2 - Mesure de la résistance électrique volumique du béton.

4.4.2.3 Observations

Les temps de prise de tous les bétons étudiés sont diminués lorsque la température de préchauffage s'élève.

On voit sur la figure (4.8) pour un ciment CPA, E/C=0,45, le début de prise à 70 minutes à 40°C, 50 minutes à 50°C, 30 minutes à 60°C et 20 minutes à 70°C. La fin de prise à 180 mn à 40°C, 120 mn à 50°C, 100 mn à 60°C et 90 mn à 70°C. On constate que le rapport E/C =0,50 est l'optimum pour obtenir un temps de prise minimum quelque soit la température de préchauffage. Cette période est de 50 mn pour une température de 40, 50, et 60°C, 40 mn pour 70°C.

Quand aux séries traitées avec des adjuvants on a utilisé les mêmes températures de préchauffage.

Le plastifiant "BV 40" [11] retarde le début et la fin de prise. Par contre l'accélérateur provoque un début de prise minimum. Ce dernier est de 30 minutes pour une température de préchauffage de 50 et 60°C. Il est de 20 minutes pour 70°C.

4.5 GONFLEMENT DU BETON FRAIS

4.5.1 Principe :

Les mortiers et bétons gonflent en présence d'eau. Inversement, ils prennent un retrait d'autant plus important qu'ils sont conservés dans un air plus sec. Le phénomène est observable même en présence d'un ciment parfaitement stable. Cepen-

dant, le gonflement dans l'eau, dû à la nature colloïdale de certains composés hydratés est très limité. Certains gonflements excessifs entraînent des désordres dans les ouvrages (baisse de résistance mécanique, fissures, défauts d'étanchéité, accès possible à des agents agressifs extérieurs, désagrégation complète du béton...) [1].

On se propose d'examiner dans ce paragraphe les causes des gonflements parfois observés sur les mortiers ou des bétons et leur conséquence pratique.

4.5.2 Principales causes du gonflement à froid

On examinera successivement l'influence des expansifs du ciment (gypse, chaux et magnésie libre).

4.5.2.1 Le gypse ($\text{So}_4\text{Ca}_2\text{H}_2\text{O}$)

Un excès de gypse dans les ciments (par exemple plus de 4% compté en trioxyde de soufre (So_3)) soit de 8,6% en gypse provoque un gonflement rapide qui commence à se manifester dès les premiers jours. Il est dû à la formation d'un trisulfo-aluminate de chaux de formule $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 3\text{CaSo}_4 32\text{H}_2\text{O}$ (appelé étringite) [1].

Le contrôle de la teneur en gypse peut stabiliser rapidement le gonflement. Les teneurs respectives pour les ciments étudiés sont de 2,58% de (So_3) pour le CPA et 1,64% pour le CRS.

Remarque: Les eaux sulfatées peuvent attaquer le ciment des

bétons en contact par formation de trisulfoaluminate de chaux. En fait, le sulfate de ces eaux agressives réagit sur l'aluminate tétracalcique hydraté formé lors de la prise et du durcissement du ciment.

C'est la raison pour laquelle il est recommandé de choisir un ciment à faible teneur en aluminat tricalcique dans le cas de l'attaque prévisible par des eaux contenant une quantité dangereuse de sulfates.

La destruction du béton a lieu par gonflement: il devient mou et se présente sous la forme d'une bouteille blanchâtre caractéristique [1].

4.5.2.2 La chaux libre (CaO)

La chaux libre peut être la cause de gonflements excessifs si elle est en trop grande quantité dans le clinker c'est à dire au delà de 1 à 2% , mais, suivant sa répartition et son état de division, elle peut être plus ou moins dangereuse. Par exemple, si elle se trouve à la périphérie d'un grain de clinker, une partie aura le temps de s'hydrater avant la fin de prise et ne provoquera pas de gonflements ultérieurs.

L'hydratation de la chaux située à l'intérieur d'un grain de clinker se fait lentement et peut commencer plusieurs semaines, voire plusieurs mois après le coulage du béton. L'augmentation de volume apparent peut atteindre 97% lors de la transformation

de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1].

Les teneurs en CaO pour les ciments considérés dans cette étude sont de 0,39% pour le CPA et le CRS.

4.5.2.3 La magnésie libre (MgO)

La magnésie éventuellement présente dans les clinkers est cuite à température élevée (1450°C). Si le refroidissement de ce clinker a été effectué très rapidement une partie seulement de cette magnésie est cristallisée sous forme de périclase MgO (l'autre partie se trouve à l'état vitreux et forme des solutions solides avec les aluminates et les silicates).

L'hydratation du périclase a lieu souvent encore plus lentement que pour la chaux libre. Il se forme de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume apparent de l'ordre 120 pourcent. C'est pourquoi les normes limitent la teneur en MgO à 5% [1].

Elle est de 1,05% pour le CPA étudié

4.4.3 Comment éviter les gonflements

En principe, les ciments commerciaux actuels sont stables: Leur teneur en gypse, en chaux et en magnésie libre est telle que les gonflements ultérieurs, à une conservation dans l'eau, sont faibles.

Cependant les essais d'expansion aux aiguilles de LE CHATELIER, suivant la norme NF P15-432 [10] effectués sur pâte pure ou sur

mortier donnent la limite admissible de l'augmentation en millimètres de l'écartement des extrémités des deux aiguilles.

Après traitement (7 jours à 20°C ou 3 heures à 100°C pour l'essai à chaud) cette augmentation doit être inférieure à 10 mm pour la pâte pure et de 3 mm pour le mortier [1].

Elle est de 1,45 mm pour les mortiers de CPA et CRS étudiés.

4.5.4 Dilatation thermique du béton

Les variations dimensionnelles du béton libre sont de deux sortes:

La dilatation qui est un phénomène purement thermique, le retrait et le gonflement qui sont de caractère hygrométrique.

Le retrait est caractéristique du ciment hydraté et l'eau retenue dans les capillaires dépendent essentiellement de la désorption de l'eau contenue dans le matériau. Par contre la dilatation est liée au comportement conjugué des agrégats et du ciment hydraté pour un état thermodynamique stable.

Lorsqu'on sollicite le matériau pour une augmentation positive de la température et que celui-ci est libre de désorber l'eau qui gêne sa mise en équilibre avec l'environnement, les variations dimensionnelles que l'on mesure sont la somme de deux mouvements de signes contraires: La dilatation et le retrait. Si l'on procède à une élévation de température suffisamment lente pour permettre la diffusion correcte de l'eau libé-

rée par le changement d'état, on mesure la variation dimensionnelle de changement d'état du béton en fonction de la température. Si après une certaine élévation de température on maintient cette dernière à une valeur donnée et que l'équilibre de désorption est obtenu, le matériau se trouve à un état déterminé de transformation.

Un abaissement de la température n'engendrera plus qu'un phénomène thermique qui dépendra du coefficient de dilatation du matériau pour l'état considéré [13].

4.5.4.1 Matériel utilisé

Afin de mesurer les déformations dues au gonflement du béton on a confectionné une étuve représentée sur la figure (4.13). La vapeur est produite par évaporation de l'eau chauffée par les résistances électriques fixées au fond de l'étuve.

Les déformations sont indiquées par des comparateurs reliés au béton par des tiges métalliques (soupapes) reposant sur une plaque de verre. La déformation du béton provoque le déplacement vertical de la plaque de verre qui transmet le mouvement aux soupapes. Ces dernières agissent sur les comparateurs pour indiquer les valeurs des déplacements. On utilise deux comparateurs par éprouvette puis on fait la moyenne des deux mesures pour trouver la valeur de la déformation recherchée photo (4.3)

Avant de procéder à l'élévation de température à l'intérieur

de l'étuve et donc du béton on maintient ce dernier dans l'étuve afin d'obtenir un équilibre thermique. Ce qui favorisera une préprise du béton.

On peut également éviter cette attente par préchauffage du béton à la température ambiante dans l'étuve avant de l'y introduire.

4.5.4.2 Etude du régime d'étuvage.

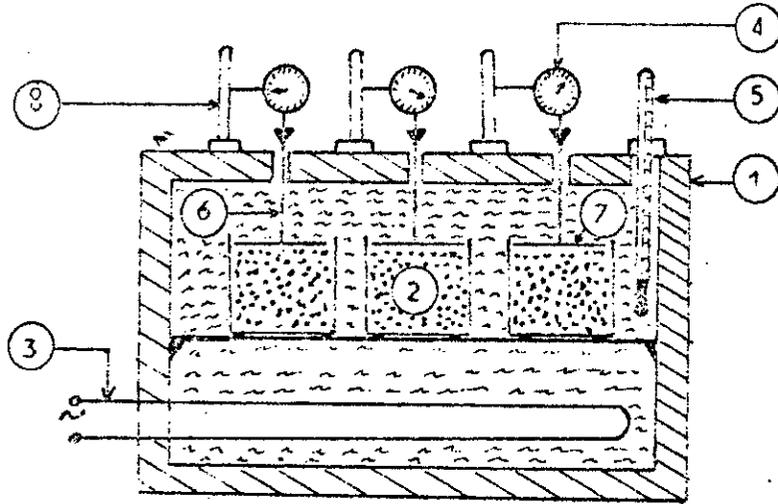
Le régime de traitement thermique dans l'étuve peut se décomposer en 4 étapes distinctes:

-La première est la période Z0 de maintien de la température initiale du béton afin de l'équilibrer avec celle de l'ambiance qui reigné à l'intérieur de l'étuve.

-La deuxième période Z1 est celle de l'élevation de la température. Z2 représente la période de maintien de la température maximale et enfin la quatrième période Z3 de refroidissement (fig 4.14). La période Z0 est nécessaire pour obtenir une résistance initiale d'environ 5 à 10 bars pour que le béton puisse lutter contre la dilatation thermique prématurée.

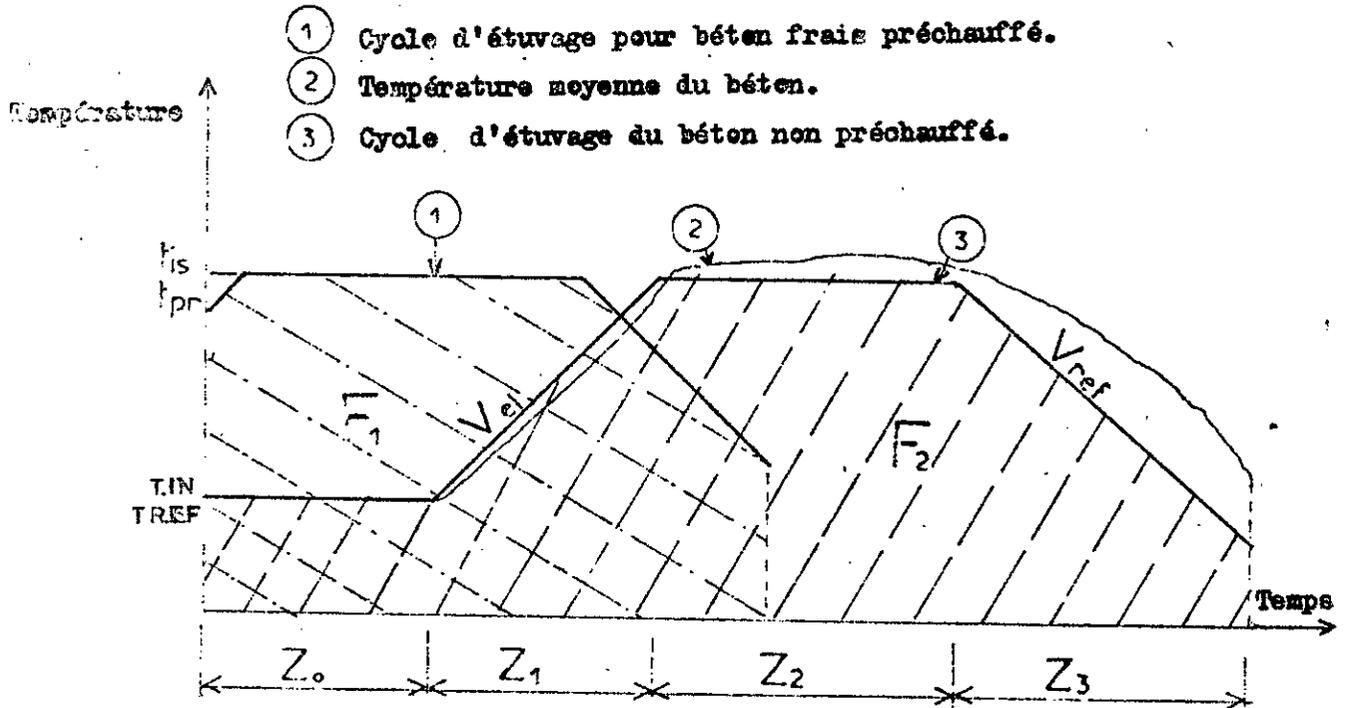
La vitesse d'élevation de température doit être limitée pour éviter la destruction de la structure du béton due au gradient thermique.

Le refroidissement brusque est également préjudiciable et peut provoquer des fissures dans le béton durci.



- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| ① Etuve | ⑤ Thermomètre à mercure |
| ② Epreuve de béton | ⑥ Tige métallique |
| ③ Resistance chauffante | ⑦ Plaque de verre |
| ④ Comparateur | ⑧ Support pour comparateur |

fig 4.13 - Chambre d'étuvage.



- T_{is} Température isothermique.
 T_{ref} " de refroidissement.
 T_{in} " initiale
 T_{pr} " de préchauffage
- fig 4.14 - Cycles d'étuvage.

- LEGENDE -

- (1) Meule et chambre d'étuvage.
- (2) Compensateurs.
- (3) Thermomètre à mercure.
- (4) Alimentation stabilisée.
- (5) Thermomètre électronique.

Photo 4.3 - Mesure du gonflement du béton.

Le préchauffage du béton avant la mise à l'étuve est beaucoup plus avantageux que l'étuvage direct.

La figure (4.16) représente l'estimation qualitative des cycles d'étuvage.

La grandeur F de la surface au dessous du diagramme détermine le degré de durcissement du béton à condition que les déformations soient dans les limites admissibles .

Si on veut obtenir les memes résistances mécaniques après étuvage d'un béton préchauffé et d'un béton non préchauffé il faut que les surfaces F_1 et F_2 soient égales.

Le temps d'étuvage est ainsi réduit pour un béton préchauffé.

La température isotherme (T_{is}) influe sur la durée du traitement thermique ainsi que sur la valeur de la résistance mécanique du béton. Il faut donc rechercher une température optimale pour réduire ce temps d'étuvage et augmenter la résistance mécanique du béton.

En ce qui concerne la période (Z_2) de maintien de la température isotherme elle est déterminée en fonction de la résistance de décoffrage du béton.

La résistance du béton requise pour être décoffré quelque soit la forme et l'épaisseur de la pièce doit être de 70% de sa résistance à 28jours [14].

Les expériences faites dans le cadre de cette étude montrent

que la température de refroidissement $T_{ref}=50^{\circ}C$ ne présente pas de danger pour le béton au moment du décoffrage.

4.5.4.3 Détermination de la température optimale de préchauffage du béton.

Pour un même cycle d'étuvage on a préchauffé électriquement le béton à quatre températures différentes. Un échantillon témoin est conservé dans l'eau à $20^{\circ}C$.

On a ensuite procédé à l'écrasement des éprouvettes à 1 et 28 jours en compression simple. On peut ainsi comparer les résultats obtenus à ceux du béton témoin. Les résultats sont représentés sur la figure (4.15).

On voit que la résistance mécanique du béton préchauffé est plus faible que celle du béton témoin à 28 jours.

Ceci est dû à la présence de microfissures dans le béton étuvé.

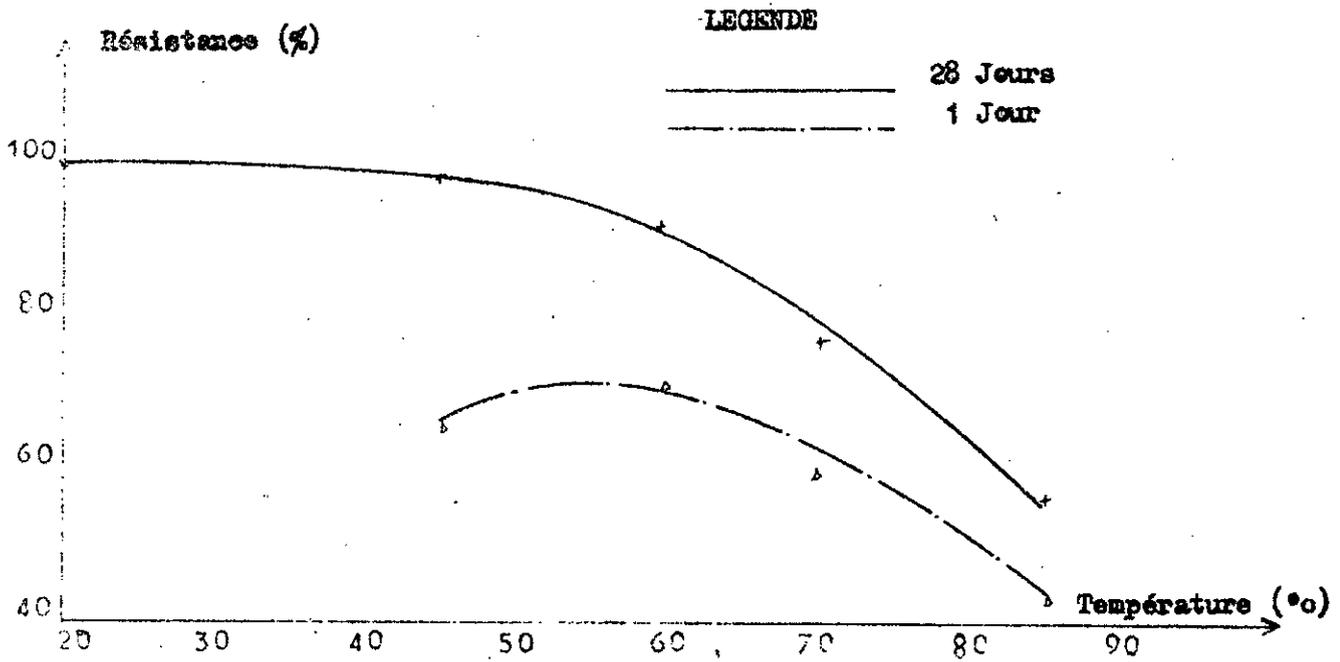
On constate ainsi que jusqu'à la température de $60^{\circ}C$, le rapport ne varie pas beaucoup.

Par contre, au delà, une baisse sensible est constatée.

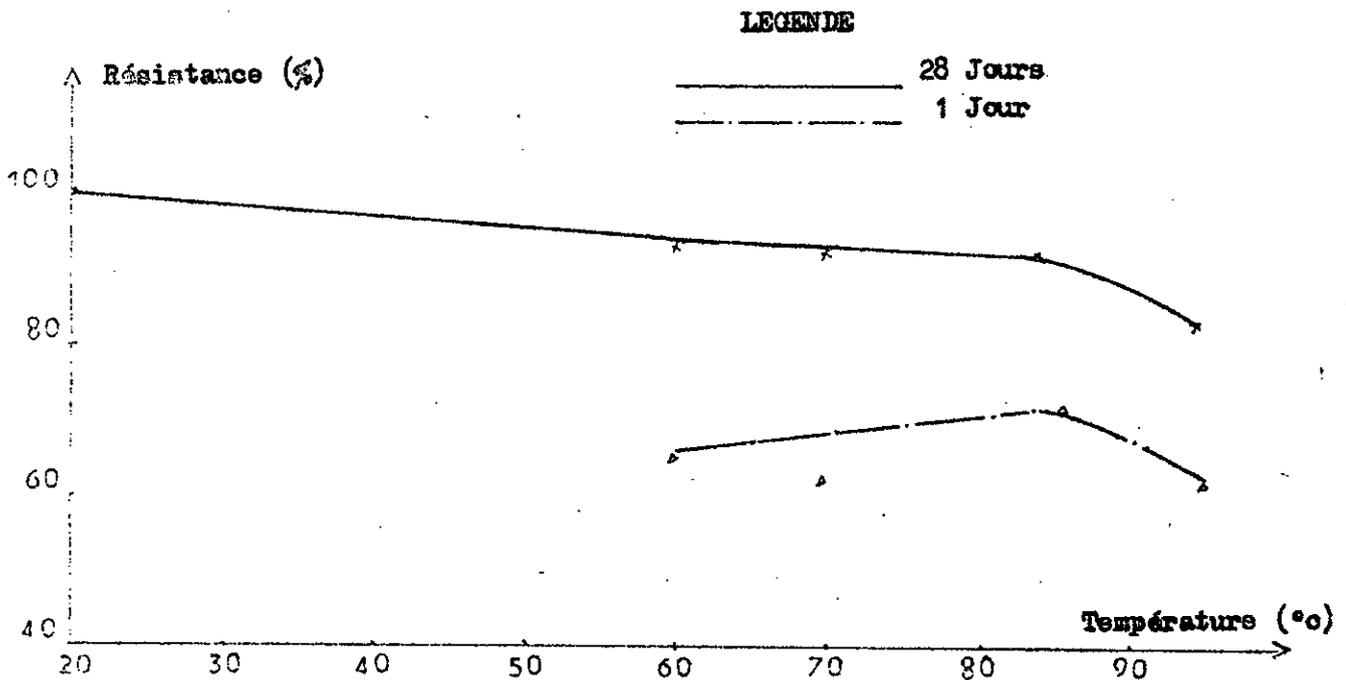
On peut conclure que la température de $60^{\circ}C$ pour le préchauffage du béton est optimale pour avoir de bonnes résistances mécaniques.

4.5.4.4 Détermination de la température isotherme.

La température isotherme est définie comme étant la température maximale dans un cycle d'étuvage. Le traitement thermique



4.15 - Résistance mécanique du béton préchauffé par rapport au même béton non préchauffé.



4.16 - Variation de la résistance du béton traité aux différents cycles d'étuvage.

à haute température (100 à 200°C) provoque une accélération accrue du processus de durcissement accompagnée d'un changement de la structure par la création de nouveaux composés hydratés.

Les hydrosilicates de calcium formés à 20°C possèdent 2,5 à 4 molécules d'eau, tandis que ceux formés à 80°C en possèdent 0,5 à 1 molécule seulement. Les hydroaluminates de calcium contenant 12 à 19 molécules d'eau à 20°C possèdent 6 molécules à 80°C.

Cette diminution d'eau engendre une augmentation de la compacité des composés hydratés. Ce qui entraîne une diminution de la résistance mécanique et une grande porosité du béton durci.

La recherche d'une température optimale pour avoir un cycle qui donnerait la meilleure résistance nous a conduit à tester un béton préchauffé à 60°C (résultat du paragraphe précédent) à différents cycles d'étuvage.

Les températures maximales choisies pour les différents cycles sont: 60,70,85 et 90°C.

Les éprouvettes étuvées sont écrasées en compression simple à 1 et 28 jours. Les résistances obtenues sont comparées à celles du béton témoin durci pendant 28 jours dans l'eau à 20°C.

La figure (4.16) représente la variation du rapport de résistance à la compression du béton traité et du béton témoin.

On déduit de cette expérience qu'à la température isother-

me de 85°C on obtient la résistance maximale du béton traité à 1 jour.

Le rapport de cette résistance et celle du béton témoin à 28 jours est de 91 pourcent. Ce qui montre que la structure du béton durci n'est pas très affectée par le traitement thermique.

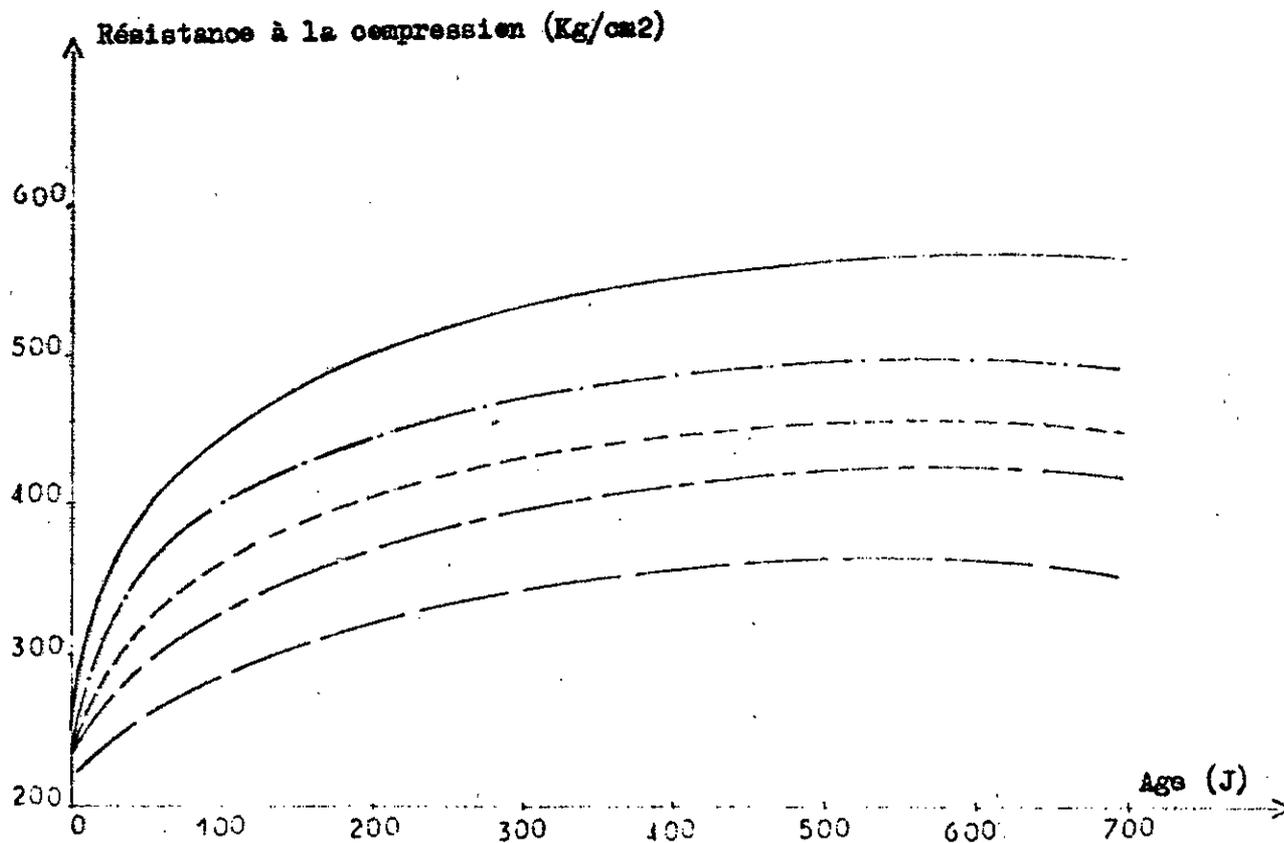
4.5.4.5 Détermination de la vitesse optimale d'élévation de température

Plus la vitesse de montée est rapide et plus les résistances finales sont affaiblies sans doute à cause des contraintes différentielles qui apparaissent dans le béton et qui sont d'autant plus importantes que les pièces traitées sont plus massives [1].

La figure (4.17) donne un exemple réel de cette influence.

On voit nettement que la vitesse d'élévation de température trop rapide est le paramètre qui atténue le phénomène et occasionne l'altération du béton.

Dans cette étude on s'est d'abord intéressé aux déformations d'origine thermique du béton pendant la période d'élévation de température. Pendant le maintien de cette dernière, les déformations diminuent jusqu'à une certaine valeur Δ def qui reste dans le béton durci (la limite admissible étant de 2 à 3 mm/m) ref [14.]. La vitesse d'élévation de température correspondant à cette déformation est appelée vitesse critique ($V_{el,cr}$).



LEGENDE

Temoin

Traitement à 70 °c (9h)

Vitesse d'élévation 10 °/h

Traitement à 90 °c (6h)

Traitement à 70 °c (9h)

Vitesse d'élévation 30 °/h

Traitement à 90 °c (6h)

fig 4.17 - Influence de la vitesse d'élévation de la température sur la résistance d'un béton chauffé à 70 °c et à 90 °c (rapport E/c = 0.50) (d'après Mamillan Annales ITBTP Février 73).

La valeur de la déformation maximale dépend de plusieurs paramètres qui sont :

le genre de ciment, les adjuvants, la température de préchauffage, la température isothermique ainsi que la vitesse d'élévation de cette température.

Les adjuvants utilisés dans le cadre de cette étude sont :

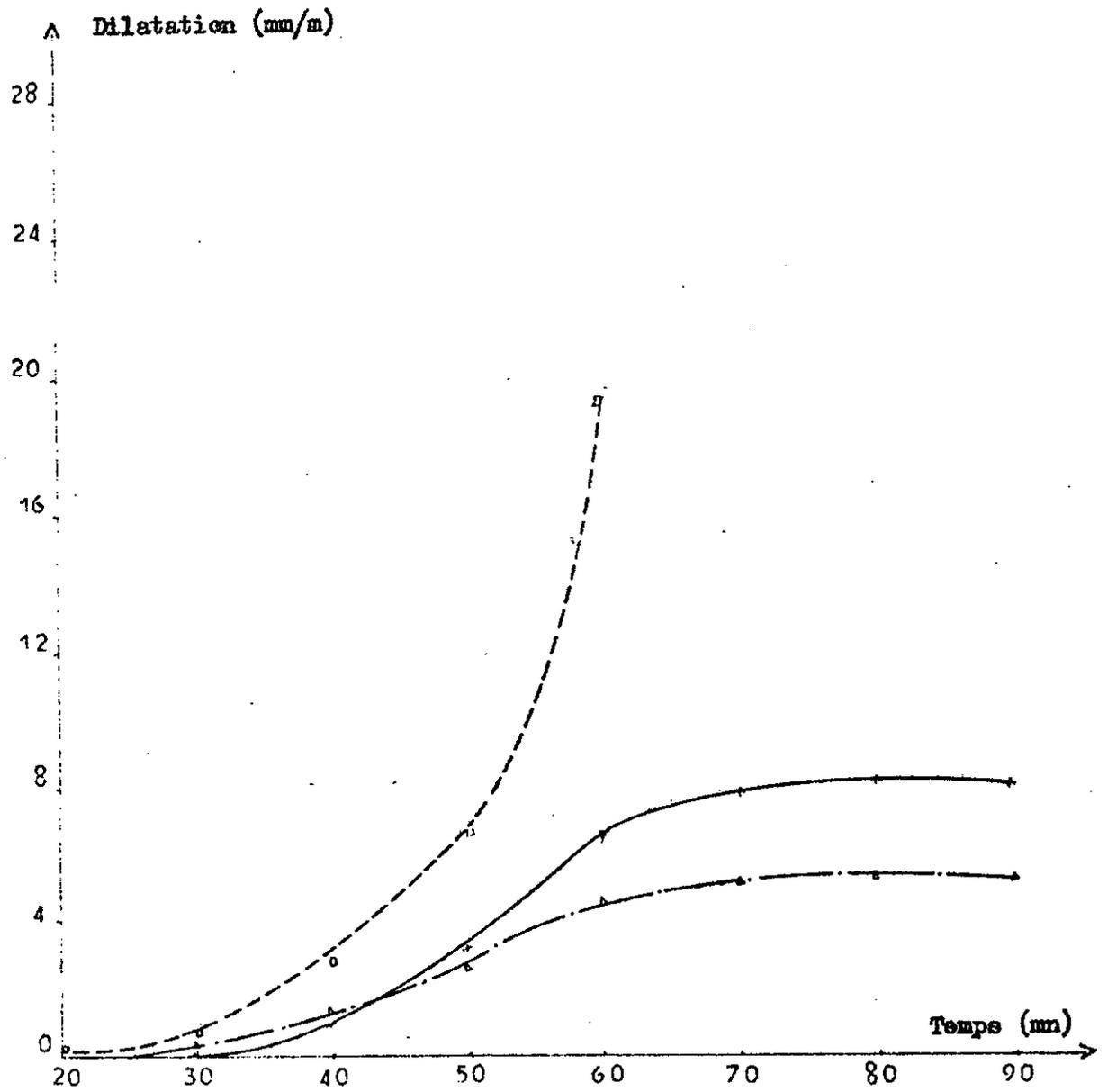
- 'SIKA RAPIDE' comme accélérateur de prise
- 'BV 40' comme plastifiant.

La figure (4.18) montre l'influence des adjuvants sur la déformation du béton pour une même vitesse d'élévation de température qui est de 24°C/heure.

On voit que le plastifiant qui est retardateur de prise accentue les déformations.

Par contre le béton avec le 'SIKA RAPIDE' qui accélère la prise et le béton témoin ont leurs déformations respectives qui tendent vers une asymptote.

Sur la figure (4.19) on a représenté la variation des déformations pour le même béton mais à une température de préchauffage de 60°C. Dans ce cas on voit bien que les déformations sont inférieures aux limites admissibles pour les bétons sans adjuvants ainsi que le béton avec accélérateur. Par contre avec le plastifiant le béton doit avoir un cycle plus long. Le traitement thermique doit avoir une prolongation de la période de



LEGENDE

- Béton sans adjuvant
- · — · — · Béton avec accélérateur
- Béton avec plastifiant

fig 4.18 - Mesure des déformations du béton frais non préchauffé.

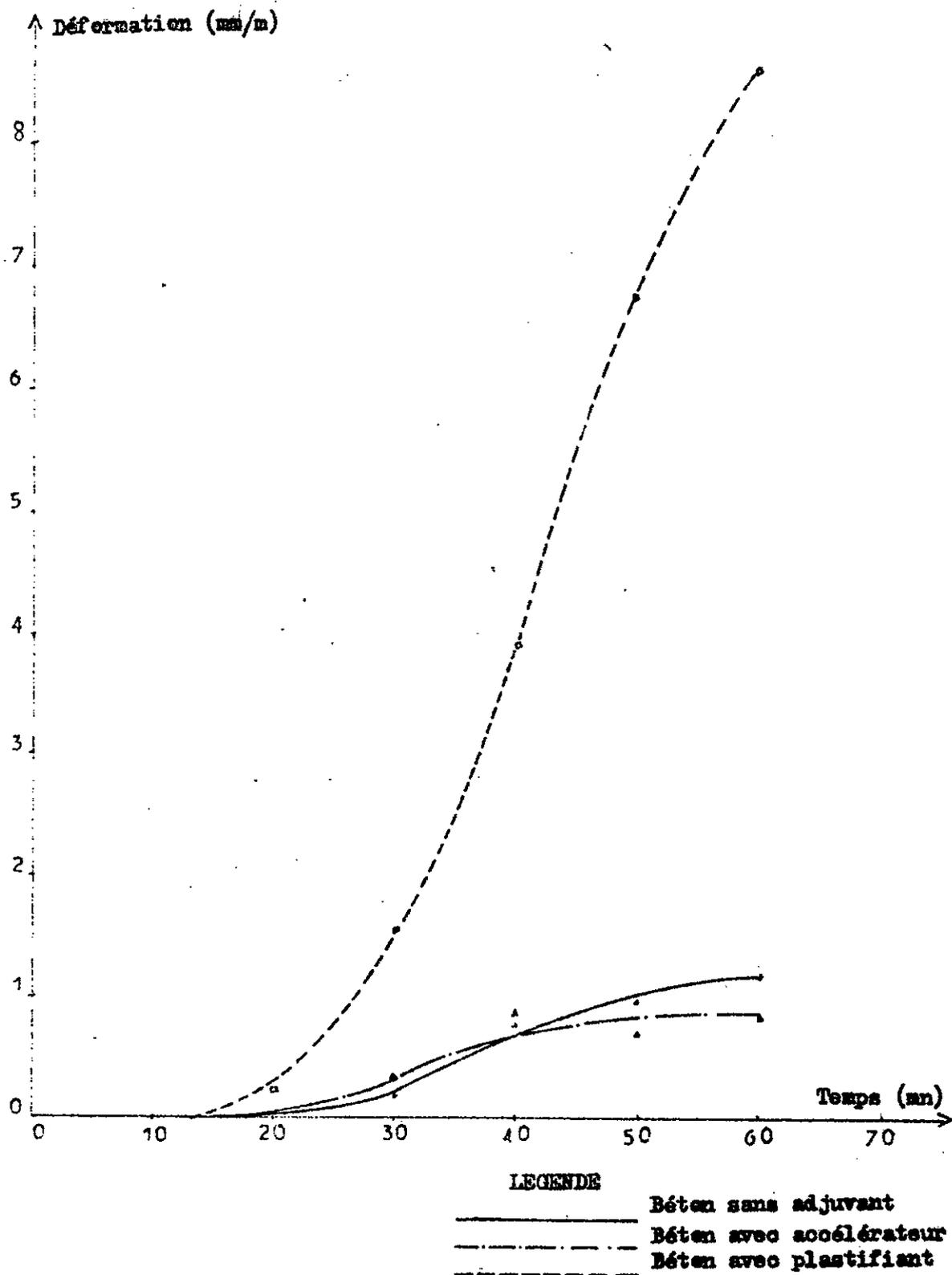


fig 4.19 - Déformation du béton frais préchauffé à 60 °c .

maintien de la température initiale.

La figure (4.20) montre la variation des déformations pour un béton préchauffé à 70°C.

Malgré la réduction de la vitesse d'élevation de température, les déformations demeurent préjudiciables pour la structure de béton. Avec cette température les déformations admissibles sont dépassées.

4.5.4.6 Observations

- Le plastifiant est défavorable au traitement thermique du béton par étuvage. Car les déformations deviennent préjudiciables

- La température de 60°C et la vitesse de 24°/h sont optimales pour assurer les déformations admissibles pour la composition donnée dans cette étude.

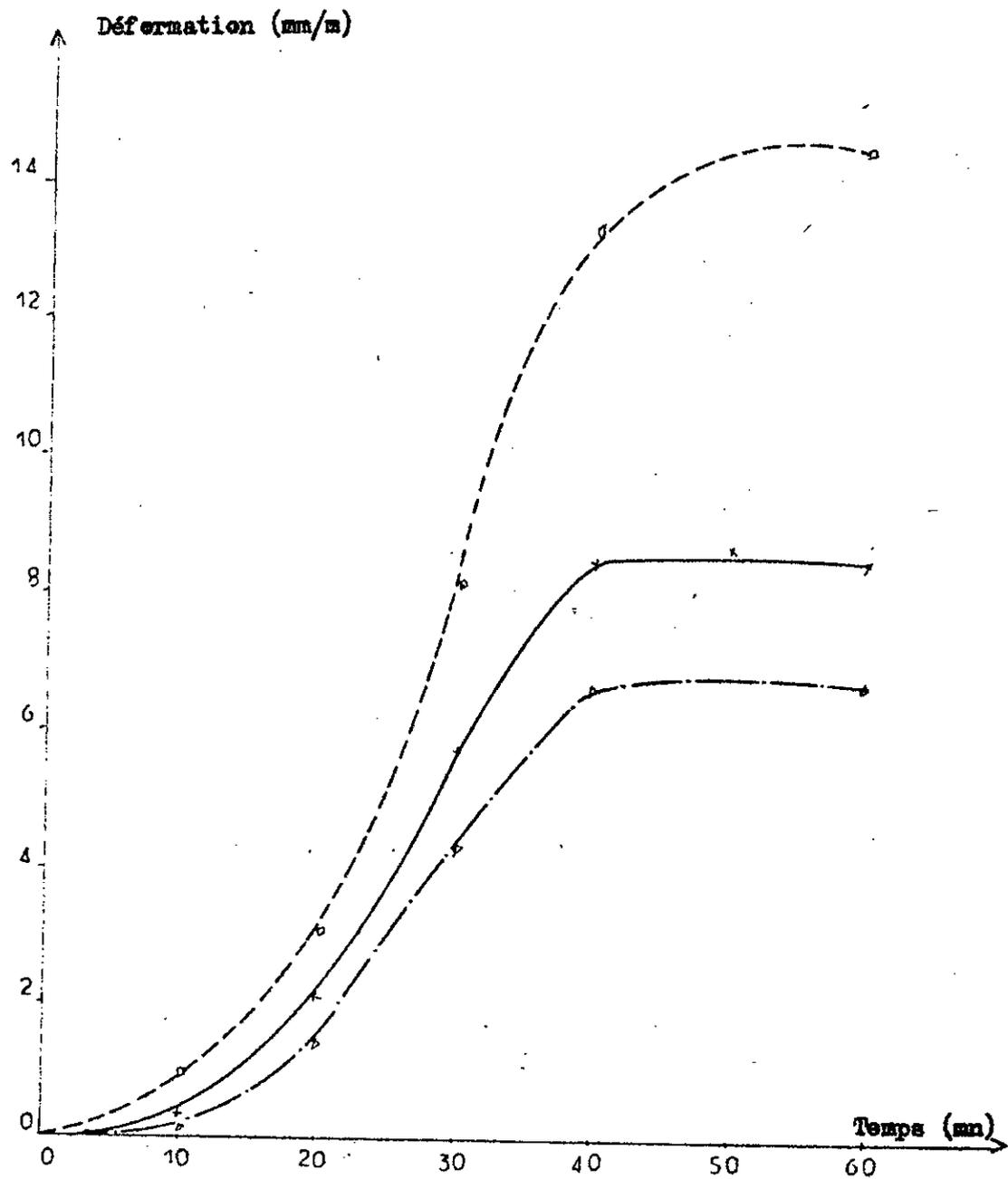
- Les premières déformations apparaissent plus rapidement à une température de préchauffage de 70°C plutôt qu'à 60°C.

4.5.4.7 Détermination de la durée minimale de maintien

de la température isotherme

Afin d'obtenir un béton dont la résistance mécanique soit de 70% de celle à 28 jours d'un béton durci dans l'eau à 20°C, on a effectué plusieurs essais où l'on a prolongé les périodes de maintien de la température isotherme.

Pour la même composition de béton on a préchauffé ce dernier à trois températures qui sont : 50,60 et 70°C.



LEGENDE

- Béton sans adjuvant
- · — · — · Béton avec accélérateur
- Béton avec plastifiant

fig 4.20 - Déformation du béton frais préchauffé à 70 °c .

Pour chaque température on a confectonné trois éprouvettes dont les cycles d'étuvages sont différents.

- La première a une période de maintien de la température isotherme de 1 heure.

- La deuxième a une période de 2 heures

- La troisième a une période de 3 heures

Tous les autres paramètres sont constants :

Zo = 3 heures, Vel = 24°/h, ciment CPA, E/C = 0,40

Les résultats figurent dans le tableau (4.1)

! Température de préchauffage (°c) !	! Cycle N1 !	! Cycle N2 !	! Cycle N3 !
	! Résistance à la compression Rc (en kg/cm ²) !	! Rc (kg/cm ²) !	! Rc (kg/cm ²) !
! 50 !	! 102 !	! 111 !	! 128 !
! 60 !	! 118 !	! 132 !	! 142 !
! 70 !	! 130,5 !	! 133,5 !	! 139 !

Tableau 4.1 : Résultats de la résistance à la compression

Résistance mécanique du béton en fonction du cycle d'étuvage

On constate que la résistance mécanique est proportionnelle au temps de maintien de cette température.

Pour avoir une bonne résistance au décoffrage il faut que la durée de maintien minimale soit de 3 heures quel que soit la température de préchauffage et le cycle considéré.

4.7 CONCLUSIONS

La température influe beaucoup sur la consistance du béton. Dans les mêmes conditions d'application, le ciment CPA perd son ouvrabilité plus rapidement que le ciment CRS.

La température permet de réduire les délais de prise et de durcissement. Le plastifiant, bien qu'il réduise la quantité d'eau de gâchage retarde le temps de prise et de durcissement du béton et est préjudiciable pour le gonflement.

Les expériences effectuées sur le gonflement du béton ont montré que les paramètres optimums pour avoir une limite admissible de l'allongement linéaire sont les suivants:

- Température de préchauffage 60°C
- Température maximale 85°C
- Vitesse de montée de température 24°C /heure
- Durée minimale de maintien de la température maximale

trois heures.

Pour la mesure de la consistance du béton, seules les compositions simples C1 à C3 avec des rapports $E/C = 0,45$ et $E/C = 0,60$ ont été utilisées pour le ciment CPA ainsi que la composition C1 pour le ciment CRS.

Pour les déformations du béton seul le ciment CPA a été pratiqué avec les compositions C3, C4 et C5 décrites au paragraphe (4.2).

CHAPITRE 5

PROPRIÉTÉS DES BETONS DURCIS

5.1 INTRODUCTION

La résistance à la compression est la caractéristique essentielle d'un béton. Les utilisateurs ont besoin de béton à hautes résistances mécaniques surtout dans le cas d'éléments précontraints, pièces préfabriquées (pieux ...) ou pour certaines éléments ou parties des structures (voutes minces, reprise en sous oeuvre, dalles industrielles ...).

Les bétons à hautes résistances initiales permettent un dé-moulage rapide ainsi qu'un stockage réduit sur parc dans le cas des pièces préfabriquées et, par suite, un montage immédiat de celles-ci sur le chantier. De plus, le chauffage du béton est nécessaire par temps froid.

Les résistances et l'homogénéité des bétons confectionnés n'ont pas cessé de s'accroître grâce à l'utilisation de ciments plus performants, à une meilleure connaissance des règles de bonne composition des bétons, à un compactage plus énergique, à l'addition d'adjuvants bien adaptés [1].

Dans ce chapitre on se propose d'étudier l'évolution des résistances à la compression des bétons en fonction du temps sous l'influence des différents paramètres tels que l'âge du béton, la température de préchauffage ainsi que les adjuvants choisis. On s'est limité à la résistance à la compression car les autres

propriétés peuvent être déduites par des formules empiriques.

La résistance à la compression du béton varie en fonction de la température. L'importance de cette variation dépend de l'âge du béton. Toutefois l'influence de l'âge n'est visible que pour des températures inférieures à 130°C.

La figure (5.1) montre les résultats obtenus pour tous les essais.

A 28 et 90 jours la formation des hydrates du ciment contenus dans le béton n'est pas complète, mais à mesure qu'on chauffe le béton, à condition que le processus soit lent, il se produit vraisemblablement une catalyse de l'hydratation qui permet d'augmenter la proportion d'hydrates formés à 20°C à l'âge considéré. Mais la désorption contrarie également ce phénomène puisqu'on enlève de l'eau au squelette, limitant ainsi la formation normale des produits hydratés.

Par contre un béton, d'un an et complètement hydraté, présente une variation à peu près continue de la résistance à la compression en fonction de la température [13].

A titre indicatif mentionnons qu'il faut des résistances en compression de l'ordre de :

- 50 Kg/cm² pour démouler, déplacer des pièces relativement

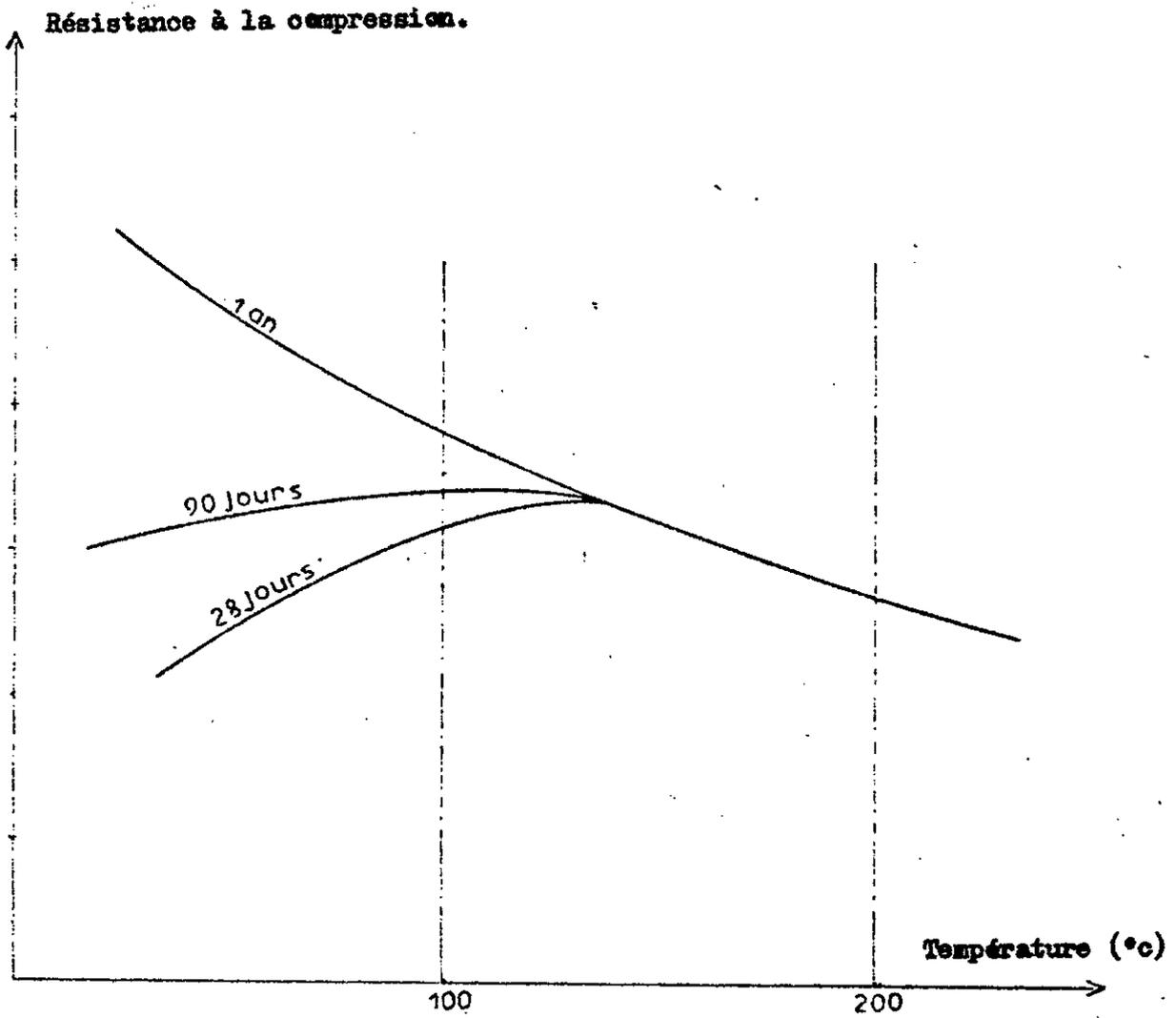


fig 5.1 - Variation de la résistance à la compression en fonction de la température. (D'après J.G MARSCHAL, Annales de l'I.T.B.T.P Octobre 1970)

petites en béton ou pour que ce dernier résiste bien au froid (cas du bétonnage en hiver).

- 150 Kg/cm² pour manipuler de grosses pièces en béton.

- 300 Kg/cm² pour mettre en tension les fils de précontrainte ou pour assembler sur le chantier des pièces préfabriquées.[1]

5.2 MATERIEL UTILISE

Pour la confection des éprouvettes en béton on a utilisé des moules cubiques en bois de 20 cm d'arête à cause de la hauteur de la presse. Cette dernière est une machine hydraulique automatique avec une vitesse de chargement en contraintes réglable. Quant au préchauffage, il est obtenu par effet Joule par l'intermédiaire du courant électrique comme décrit au paragraphe (4.2) du chapitre précédent. Le béton est mélangé dans un malaxeur à axe vertical. Les moules remplis de béton sont conservés pendant 24 heures dans une caisse calorifugée (thermos) pour éviter les gradients de température avant de les plonger dans l'eau à 20°C.

Seul le ciment CPA a été utilisé avec les compositions C3, C4 et C5 décrites au paragraphe (4.2).

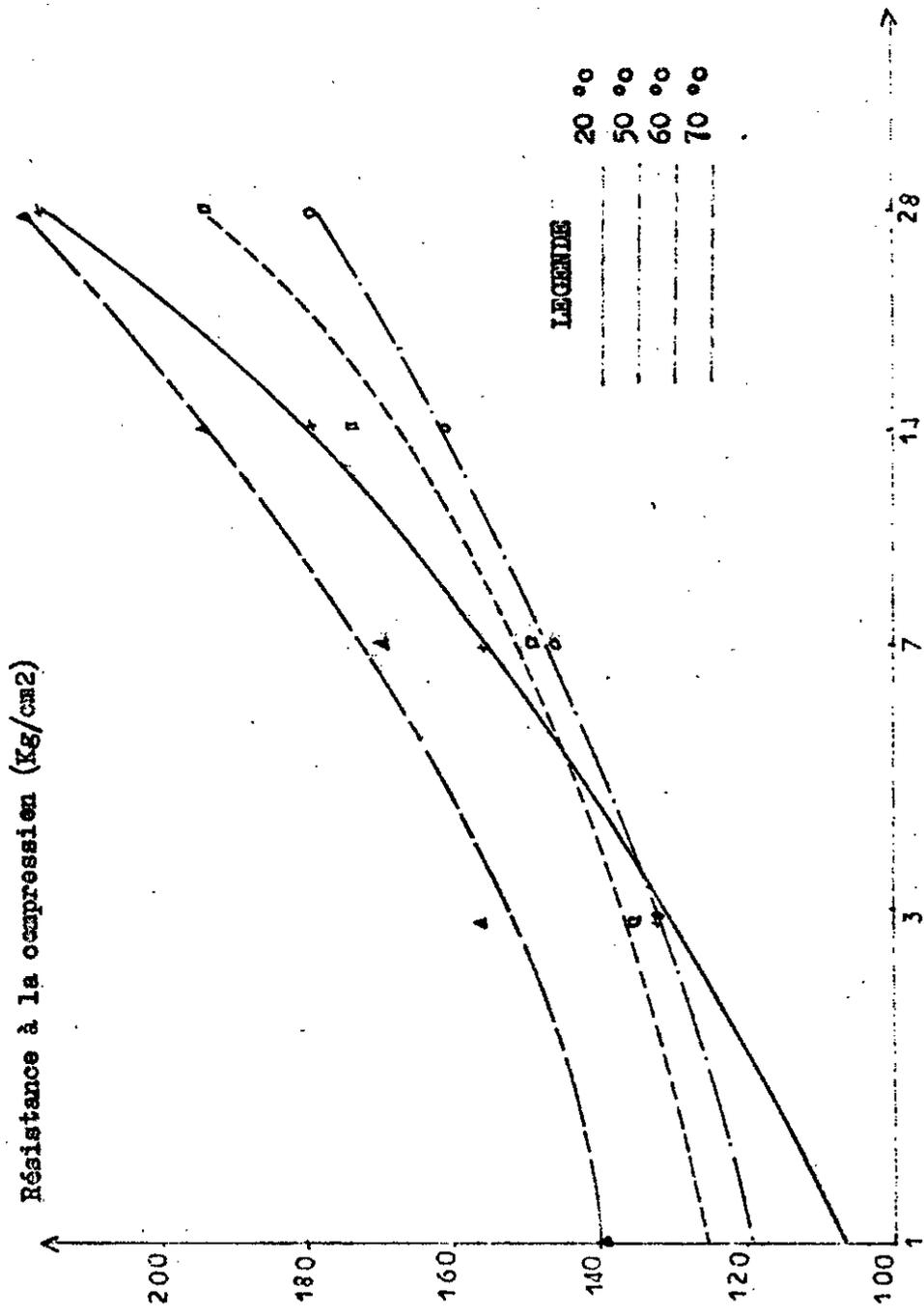


FIG 5.2 - Evolution de la résistance à la compression du béton préchauffé à 50, 60 et 70 °° en fonction de l'âge.

5.3 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION DU

BETON EN FONCTION DE L'AGE ET DU TRAITEMENT

Le béton ainsi confectionné est versé dans les moules. Ces derniers sont entreposés ensuite dans le "thermos" pendant 24 heures. Au bout de 24 heures on procède à l'écrasement des premiers échantillons pour avoir la résistance à 1 jour. Les autres sont immergés dans un bassin. Les périodes suivantes pour les écrasements sont à: 3, 7, 14 et 28 jours. Les températures choisies sont: 50, 60 et 70°C. La composition du béton est la même pour tous les essais. La consistance initiale correspond à 8 cm mesurée à l'aide du cône de KELLY. Chaque valeur représente la moyenne de 3 à 5 essais. La figure 5.2 montre l'allure de cette variation. On peut constater que la résistance est directement proportionnelle à la température de préchauffage. Pour les températures de préchauffage choisies, les résistances sont améliorées par rapport au béton témoin non préchauffé pendant les trois premiers jours. Par contre à 28 jours, ces résistances sont diminuées pour les températures de 50 et 60°C et restent presque identiques pour 70°C à celle du béton témoin.

5.4 VARIATION DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE L'AGE ET LES ADJUVANTS INTRODUITS.

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés pour améliorer les propriétés des bétons, soit à l'état frais, soit à l'état durci. Deux types ont été utilisés pour le traitement thermique qui sont: l'accélérateur de prise et le plastifiant.

5.4.1 L'accélérateur de prise

Le produit utilisé est commercialisé sous le nom "SIKA RAPIDE" avec un dosage de 0,8 % de la quantité d'eau de gâchage [11].

Les résultats obtenus avec cet adjuvant ont montré que pour une même température de préchauffage, les résistances mécaniques des séries adjuvantées sont supérieures à celles des séries seulement étuvées et ceci pour les premiers jours de durcissement du béton. Par contre à 28 jours ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur. La figure (5.3) montre la variation de ces résistances pour un béton préchauffé à 70°C. Cette température a donné de meilleures résistances mécaniques.

On peut conclure que l'accélération considérée permet d'acti-

Résistance à la compression (kg/cm²)

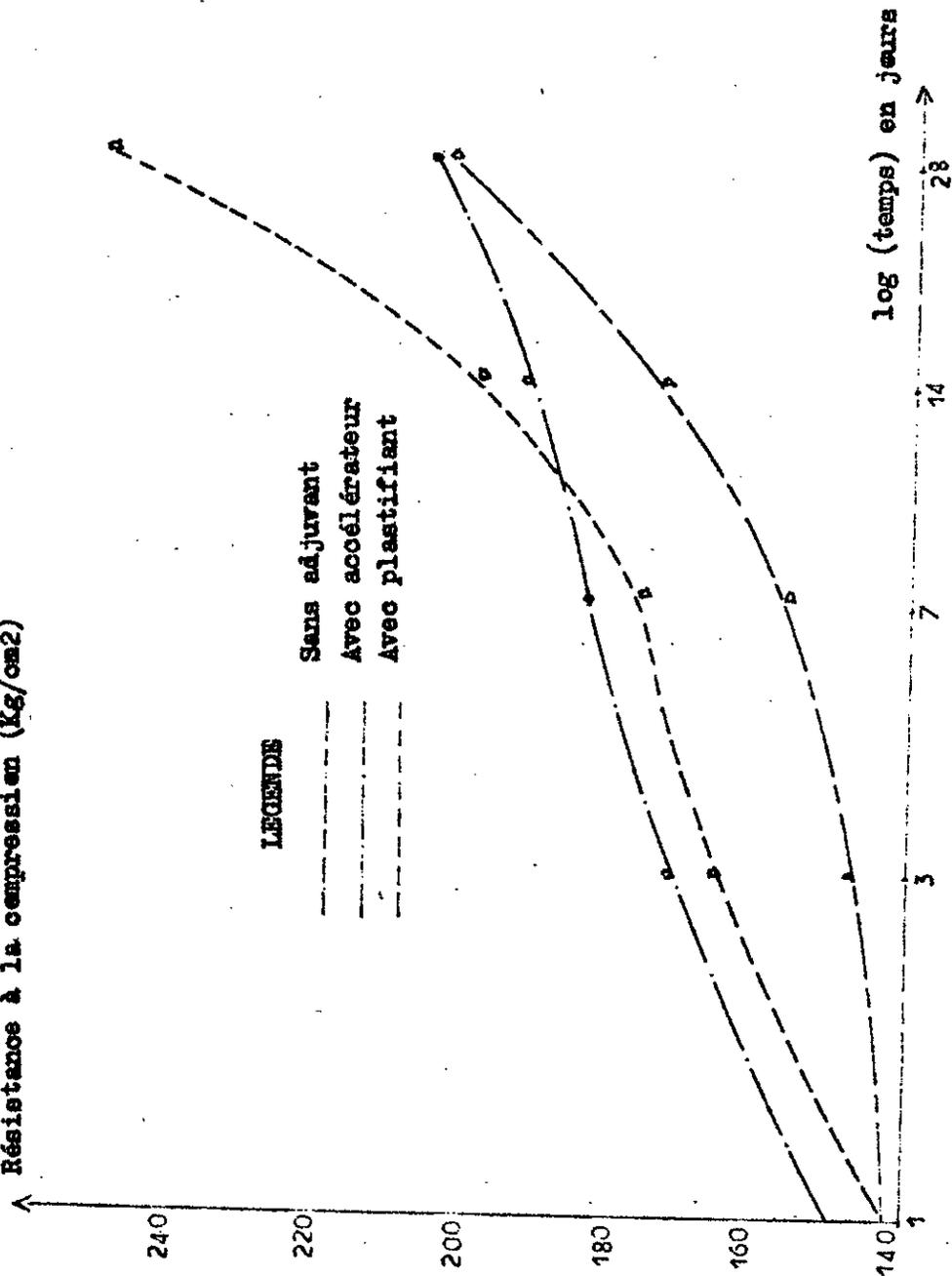


fig 5.3 - Evolution de la résistance à la compression du béton préchauffé à 70 °c avec ajouts en fonction de l'âge.

ver le démoulage et la manutention aux premiers jours mais n'améliore pas la classe du béton durci.

5.4.2 Le plastifiant:

Le produit tensio-actif utilisé est le "PLASTIMENT BV 40" dosé à 0,3% de la quantité d'eau de gâchage [11].

Il permet, à plasticité égale d'accroître les résistances initiales et souvent dans des proportions intéressantes. L'amélioration est due en grande partie (sinon en totalité) au fait que l'adjuvant a permis une diminution de la quantité d'eau de gâchage .

Contrairement à l'accélérateur, le plastifiant permet d'obtenir des résistances mécaniques des séries adjuvantées du même ordre de grandeur que les séries simplement étuvées pour le premier jour. Par contre à 28 jours la résistance a nettement augmenté pour les premières séries. Les résultats sont représentés sur la figure(5.3).

On peut conclure que le plastifiant est favorable au traitement thermique du point de vue résistance mécanique à condition que les déformations restent dans les limites admissibles.

5.5 OBSERVATIONS.

Les températures de préchauffage choisies sont toutes intéressantes pour le démoulage rapide c'est à dire à 1 jour puisque toutes les résistances dépassent 50 Kg/cm².

Par contre la manipulation de grosses pièces qui nécessite une résistance mécanique de 150 Kg/cm² peut se faire à 4 jours pour une température de 50°C.

Il faut maintenir le béton toujours très humide, la dessiccation provoquant des chutes sensibles de résistance aux longues durées.

Quant aux adjuvants:

- Les accélérateurs: ne seraient à préconiser que pour des décoffrages rapides. On pourrait penser qu'en jumelant l'utilisation de la chaleur avec celle de l'accélérateur on additionnerait leurs effets.

Les résultats obtenus ont montré qu'à 28 jours les résistances mécaniques à la compression avec des séries adjuvantées et étuvées étaient du même ordre de grandeur que celles des séries seulement étuvées.

- Les plastifiants réducteurs d'eau: grâce à la diminution du rapport E/C, le temps de prise est raccourci et les résistan-

ces augmentées. Il est même possible que ces produits, en améliorant la répartition du ciment, l'homogénéité du béton et en limitant la ségrégation jouent un rôle complémentaire bénéfique. Les chaleurs se répartissent mieux et d'une façon plus uniforme dans le béton chaud.

Les résistances mécaniques du béton étudiées sont relativement faibles à cause du rapport E/C = 0,60 élevé ainsi qu'un fort dosage en sable.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS

6.1 LIMITATIONS DE L'ETUDE

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse sont valables uniquement pour les matériaux et conditions utilisés mais donnent quand même une indication qualitative sur les améliorations des propriétés des bétons par préchauffage.

- Les différentes compositions de béton ne varient que par le rapport E/C d'où l'influence des différents dosages n'est pas considérée. L'âge du béton est limité à 28 jours.
- Les dimensions des éléments étudiés sont réduites. Pour extrapoler les résultats sur des dimensions réelles, il faut tenter ces expériences à l'échelle considérée.

6.2 CONCLUSIONS GENERALES

Les conclusions suivantes ne sont valables que dans le cadre des limitations précédentes et sont tirées des conclusions détaillées dans les différents chapitres.

- On peut préchauffer du béton plastique à différentes températures. Ce dernier peut être mis en oeuvre en gardant sa plasticité pendant les temps suivants: 65 minutes s'il est préchauffé à 40°C, 50 minutes pour 60°C et 20 minutes pour 70°C.

- Le béton dosé au ciment CPA perd sa consistance plus rapidement que celui dosé au ciment CRS dans les mêmes conditions de traitement et de composition.
 - Les temps de prise de tous les bétons sont diminués lorsque la température de préchauffage est augmentée.
 - Pour un rapport E/C donné, les délais de prise sont inversement proportionnels à la température de préchauffage.
- E/C = 0,50 est un optimum pour obtenir un temps de prise (fin de prise - début de prise) minimum quelque soit la température de préchauffage. Cette période est de 50 minutes pour une température de 40, 50 et 60°C, 40 minutes pour 70°C.
- La température optimale de préchauffage du béton ayant été étudiée est de 60°C.
 - La température isotherme optimale du cycle d'étuvage étudié est de 85°C. Pour cette valeur on obtient de meilleures résistances mécaniques.
 - La vitesse de 24°/heure est optimale pour éviter des déformations préjudiciables du béton frais.
 - La durée de maintien de la température maximale est de 3 heures quelque soit la température de préchauffage pour obtenir de bonnes résistances mécaniques au décoffrage.
 - Pour les températures de préchauffage de 50,60 et 70°C, les résistances sont améliorées par rapport à celles du béton té-

moins non préchauffé pendant les trois premiers jours. Par contre à 28 jours ces résistances sont diminuées pour les températures de 50 et 60°C et restent presque identiques pour 70°C à celle du béton témoin.

- L'addition d'accélérateur de prise n'améliore pas la qualité finale du béton préchauffé. Les deux effets ne sont pas additionnés comme on pourrait le croire.

↳ Le plastifiant, grâce à la diminution du rapport E/C améliore la résistance finale du béton chaud. Il reste moins efficace que l'accélérateur pour le démoulage rapide mais il réduit le temps de prise mieux que le béton sans adjuvant.

6.3 RECOMMANDATIONS

L'influence de la chaleur ainsi que les propriétés des bétons et l'optimisation des différents paramètres nécessite de nombreuses recherches et un intérêt spécial devrait être accordé aux domaines suivants:

- Traitement thermique des éléments de dimensions réelles. Comparaison avec les modèles réduits.
- Etudes d'autres compositions de béton.
- Etude dans les conditions réelles telles que les entreprises de préfabrication.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. VENUAT
"LA PRATIQUE DES CIMENTS ET DES BETONS."
Editions du MONITEUR 1976
- [2] M.J.BROCARD
"LES DIVERS PROCEDES D'ACCELERATION DE LA PRISE ET DU
DURCISSEMENT DES BETONS APPLICABLES A LA PREFABRICATION."
Annales de l'I.T.B.T.P N° 103-104
serie: Béton Armé N°38 Juillet Aout 1956.
- [3] M.J.BROCARD
"ACCELERATION DE LA PRISE ET DU DURCISSEMENT DES LIANTS
HYDRAULIQUES PAR LA CHALEUR."
Annales de l'I.T.B.T.P N°54
serie:LIANTS HYDRAULIQUES, N°4 Decembre 1948
- [4] M.DURIEZ et R.LEZY
"POSSIBILITES NOUVELLES DANS LE DURCISSEMENT RAPIDE DES
CIMENTS, MORTIERS ET BETONS."
Annales de l'I.T.B.T.P N°98
serie:LIANTS HYDRAULIQUES, N°14 Fevrier 1956
- [5] R.JAY et CAUMETTE
"L'ELECTRICITE DANS LE TRAITEMENT THERMIQUE DU BETON."
Revue technique du batiment et des constructions industri-
elles N°86 Septembre 1981
- [6] M.MAMILLAN
"RECHERCHES EXPERIMENTALES SUR L'ACCELERATION DU DURCIS-
SEMENT DU BETON PAR LE CHAUFFAGE."
Annales de l'I.T.B.T.P N° 267-268
serie: Béton Armé N°110 Mars-Avril 1970
- [7] M.VENUAT
"CIMENTS ET BETONS"
Editions Presses Universitaires de FRANCE 1973
- [8] CIMENTERIES DE MEFTAH et D'ECH-CHLEFF
"COMMUNICATIONS PRIVEES"
- [9] G.DREUX
"GUIDE PRATIQUE DU BETON."
Editions EYROLLES 1985

- [10] J. BRARD
 "NORME FRANCAISE HOMOLOGUEE."
- [11] DOCUMENTS TECHNIQUES SIKA
- [12] S.A. MIRONOV
 "LE CHAUFFAGE ELECTRICIQUE DANS LE BETONNAGE EN HIVER."
 Annales de l'I.T.B.T.P N°225
 serie: Béton Armé N°87 Septembre 1966.
- [13] J.G. MARCHAL
 "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES THERMIQUES DU
 BETON."
- [14] K. TCHOUKANDV
 "COURS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION."
 E.N.P 1982
- [15] M. MAMILLAN, J. SIMONNET et R. CUENDET
 "ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA PRISE ET
 LE DURCISSEMENT DU BETON."
 Annales de l'I.T.B.T.P N°282
 serie: Essais et Mesures N°130 Juin 1971 § 5 à 12
- [16] M. MAMILLAN
 "L'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON, ECONOMIE
 D'ENERGIE PAR UN SYSTEME RATIONNEL DE CHAUFFAGE
 ELECTRIQUE."
 Revue technique du bâtiment et des constructions indus-
 trielles N°89 Mars-Avril 1982.
- [17] J. SCHUMACHER
 "QUELQUES RECHERCHES EFFECTUEES AU C.S.T.B SUR LES TRAI-
 TEMENTS D'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON PAR LA
 CHALEUR."
 Annales de l'I.T.B.T.P N°302
 serie: Béton N°126 § 354 à 45 Février 1973
- [18] M. VENUAT
 "INFLUENCE DE LA NATURE DU LIANT ET DE CERTAINS ADJUVANTS
 SUR L'ACCELERATION DU DURCISSEMENT PAR LA CHALEUR."
 Annales de l'I.T.B.T.P N°302
 serie: Béton N°126 Février 1973 § 5 à 15
- [19] M. MAMILLAN
 "INFLUENCE DES CONDITIONS DE TRAITEMENT ET DE LA COMPOSI-
 TION SUR LA QUALITE DU BETON."
 Annales de l'I.T.B.T.P N°302
 serie: Béton N°126 Février 1973 § 16 à 28

- [20] M.PAPADAKIS
''TECHNIQUE DE DURCISSEMENT ACCELERE UTILISEE DANS L'INDUS-
TRIE DU BETON MANUFACTURE.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 71 à 75
- [21] M.ADAMS
''QUELQUES REFLEXIONS SUR LE ROLE DES COFFRAGES ET DES PRO-
DUITS DE DEMOULAGE SUR LES BETONS CHAUFFE AINSI QUE SUR LA
CONFECTION ET LA CURE.''
Annales de de l'I.T.B.T.P N°126 Février 1973 § 76 à 82
- [22] C.PAREY
''ETUVAGE DES OUVRAGES D'ART EN BETON PAR LA VAPEUR BASSE
PRESSION.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 46 à 47
- [23] J.SIMMONET
''MODE D'INTERVENTION DU C.E.B.T.P SUR LES CHANTIERS DU
BETON CHAUD.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 29 à 34
- [24] M.POTTIER
''DURCISSEMENT ACCELERE DU BETON PAR LA CHALEUR APPLICA-
TION AUX OUVRAGES D'ART.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 48 à 53
- [25] M.HUTIN
''APPLICATION DE L'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON
PAR LA CHALEUR DANS LES USINES DE PREFABRICATION.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 54 à 62
- [26] J.L.LAUZANNE
''APPLICATION DE L'ACCELERATION DU DURCISSEMENT DU BETON
PAR LA CHALEUR AUX CHANTIERS INDUSTRIALISES.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Béton N°126 Février 1973 § 63 à 66
- [27] P.ACKER
''CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES EPROUVETTES
DE BETON.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°302
série: Essais et Mesures N°79 Février 1965

- [28] R.L'HERMITE
''IDEES ACTUELLES SUR LA TECHNOLOGIE DU BETON.''
Document Technique du Batiment et des Travaux
Publiques 1955
- [29] R.L'HERMITE
''EXPERIENCES ET THEORIES SUR LA TECHNOLOGIE DU BETON.''
(Première Partie: Composition, Fabrication et mise en
Oeuvre du Béton)
Annales de l'I.T.B.T.P N°374.
série: Béton N°189 Juillet Aout 1979
- [30] R.L'HERMITE
''EXPERIENCES ET THEORIES SUR LA TECHNOLOGIE DU BETON.''
(Deuxième Partie: Déformation du Béton sans Charges;
Retrait et Gonflement).
Annales de l'I.T.B.T.P N°375
série: Béton N°190 Septembre 1979
- [31] M.J.BROCHARD
''QUELQUES ASPECTS DE LA RECHERCHE SUR LES MATERIAUX ET
LES CONSTRUCTIONS AUX ETAS UNIS.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°69
série: Essais et Mesures N° 27 Septembre 1953
- [32] M.Y.SAILLARD
''TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN EUROPE ORIENTALE.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°105
série: Béton Armé N°39 Septembre 1956
- [33] COLLECTION U.T.I-I.T.B.T.P
''GUIDE PRATIQUE POUR L'EMPLOI DES CIMENTS.''
Editions EYROLLES 1976
- [34] P.SERRE, R.GARCIA et J.L.SORS
''QUALITE ET GARANTIES DU BETON PRET A L'EMPLOI.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°370
série: Béton N°184 Mars 1979
- [35] MANUEL CEB.FIP
''BETON DE GRANULATS LEGERS.''
Annales de l'I.T.B.T.P N°362
série: Béton N°192 Janvier 1980

- [36] R.P.BENNETT, R.FURGEAUD et PALJAK
"LE BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE."
(Propriétés et utilisations)
Annales de l'I.T.B.T.P N°376
série: Matériaux N° 55 Octobre 1979
- [37] L.VIRONNAUD
"LE PREMIER AGE DU BETON."
Annales de l'I.T.B.T.P N°154
série: Liants Hydrauliques N°18 Octobre 1969
- [38] F.GORISSE
"ESSAIS ET CONTROLE DES BETONS."
Editions EYROLLES 1978
- [39] G.DREUX
"CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES EPROUVETTES
DE BETON."
Annales de l'I.T.B.T.P N°206
série: Essais et Mesures N°79 Février 1965
- [40] M.MAMILLAN
"EVOLUTION DU FLUAGE ET DES PROPRIETES DU BETON."
Annales de l'I.T.B.T.P N°154
série: Liants Hydrauliques N°18 Octobre 1969
- [41] M.K.THIEL
"INFLUENCE DE LA DIMENSION DE L'EPROUVETTE SUR LE RETRAIT
LE FLUAGE ET LE MODULE D'ELASTICITE DU BETON."
Annales de l'I.T.B.T.P N°154
série: Liants Hydrauliques N°18 Octobre 1969
- [42] РЪКОВОДСТВО ЗАУПРАЖНЕНИЯ ПО СТРОИТЕЛНИ МАТЕРИАЛИ
СОФИЯ, 1977