

Thèse

M0007/94B

Présentée par

Nasser-Eddine ATTARI

(Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'ENP)

Pour l'Obtention du Diplôme de **MAGISTER**
DE L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Spécialité: GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Contribution à l'Etude du Traitement Thermique des Bétons

Date de Soutenance: **07 Juillet 1994**

Président du Jury: **C. CHARIF** *Professeur (Université de Batna)*
Rapporteur: **A. BALI** *Professeur (ENP)*
Examineurs: **M.T. ABADLIA** *Maître de Conférence (INMC)*
T. MESSAFER *Maître Assistant (ENP)*
A. LARIBI *Maître Assistant (ENP)*

Thèse

Présentée par

Nasser-Eddine ATTARI

(Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'ENP)

Pour l'Obtention du Diplôme de **MAGISTER**
DE L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Spécialité: GENIE CIVIL

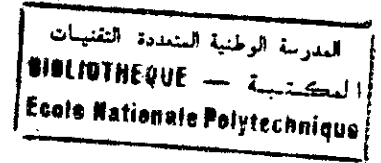


Contribution à l'Etude du Traitement Thermique des Bétons

Date de Soutenance: 07 Juillet 1994

Président du Jury: **C. CHARIF** *Professeur (Université de Batna)*
Rapporteur: **A. BALI** *Professeur (ENP)*
Examineurs: **M.T. ABADLIA** *Maître de Conférence (INMC)*
T. MESSAFER *Maître Assistant (ENP)*
A. LARIBI *Maître Assistant (ENP)*

Remerciements



Ce travail a été réalisé à l'Ecole Nationale Polytechnique et au Laboratoire du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrés en Bâtiment.

Monsieur BALI Abderrahim, Professeur à l'ENP, qui a dirigé mes travaux de recherche, veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance, pour son suivi pédagogique et le soutien qu'il m'a apporté durant tout ce travail.

Monsieur Z. MEROUANI, cadre au CNERIB, a été généreux en nombreux conseils pratiques et sa disponibilité. Qu'il soit chaleureusement remercié.

Que Monsieur C. CHARIF, Professeur à l'université de Batna, trouve ici l'expression de mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de cette thèse.

Monsieur M.T. ABADLIA, Maître de conférence à l'INMC de Boumerdes, a mobilisé une partie de son temps pour juger ce travail. Je le prie de recevoir l'expression de ma vive reconnaissance.

J'adresse mes remerciements sincères à Messieurs MESSAFER et LARIBI, Maîtres assistants à l'ENP, qui ont bien voulu s'intéresser à ce travail en acceptant de participer à ce jury.

Je tiens à remercier mon frère Mokhtar pour son aide à la mise en forme de cette thèse.

Enfin, je me permet de remercier collectivement tous les membres du Laboratoire du CNERIB qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



Sommaire

Chapitre.1

Introduction, 1

Chapitre.2

Synthèse Bibliographique, 3

- 2.1 Généralités sur le durcissement accéléré, 3
- 2.2 Les moyens utilisés pour accélérer le durcissement des bétons, 3
- 2.3 Les traitements thermiques internes, 5
- 2.4 Le traitement thermique externe, 8
- 2.5 Influence du traitement thermique sur les propriétés du béton, 12
- 2.6 Comportement physico-chimique des ciments et des bétons soumis à un durcissement accéléré, 19

Chapitre.3

Essais au Laboratoire, 30

- 3.1 Introduction, 30
- 3.2 Matériaux utilisés et leurs caractéristiques, 30
- 3.3 Matériels utilisés, 34
- 3.4 Essais, 36

Chapitre.4

Résultats et Discussions, 38

- 4.1 La résistance en compression du béton témoin, 38

Chapitre.5

La Chaleur d'Hydratation et l'Effet de la température, 49

- 5.1 Introduction, 49
- 5.2 Essai de calcul de la chaleur d'hydratation, 49
- 5.3 Résultats, 59
- 5.4 Discussion des résultats, 60

Chapitre.6

Essais en Usines, 62

6.1 Introduction, 62

6.2 Essais à l'unité ECSM, 62

6.3 Essais à l'unité SAPTA, 70

Chapitre.7

Conclusion, 77

Références Bibliographiques, 80

Annexe, 84

Chapitre

1

Introduction

L'importance et l'urgence des programmes de reconstruction en matière de logements et d'infrastructure dans les pays d'Europe après la dernière guerre mondiale, ont conduit au développement de l'industrialisation du bâtiment. Particulièrement dans l'ex-URSS, les usines se sont naturellement orientées vers la réalisation d'éléments préfabriqués lourds. Cette préfabrication est basée sur l'accélération du durcissement du béton, qui procure des avantages économiques évidents, tels que la rapidité dans les délais d'exécution, échapper à l'influence des variations climatiques, une meilleure qualité dans la fabrication du béton. En bref, accélérer le durcissement d'un béton, c'est lui donner en quelques heures, une résistance mécanique appropriée, pour pouvoir le manipuler et le stocker.

Ce durcissement accéléré peut s'obtenir par plusieurs moyens. Il existe des moyens chimiques ainsi que des moyens physiques ou le plus couramment utilisé est la chaleur, qui en règle générale accélère le développement des réactions chimiques.

Dans le cadre de notre travail, nous sommes intéressés à ce mode de traitement qui est le plus répandu dans l'industrie du béton, et particulièrement en Algérie; il s'agit du traitement thermique à la pression atmosphérique.

Dans notre pays, les rares usines de préfabrication ont été construites durant les années soixante dix, afin de régler les problèmes de logement. Malheureusement, dix années plus tard, l'objectif escompté et le rendement de ces usines n'ont pas été atteints et cela pour divers raisons, tel que la non-qualification des ouvriers, le manque de logistique, le manque de matériaux et particulièrement le manque de moyens de transports pour acheminer les produits préfabriqués de l'usine vers le chantier, l'adaptation de la construction vis à vis du règlement

parasismique Algérien; toutes ces raisons ainsi que d'autres qu'on verra plus loin ont arrêté le développement de la préfabrication en Algérie.

Une série d'expériences a été effectuée au laboratoire du CNERIB¹, où de nombreuses éprouvettes ont été confectionnées et testées afin d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le béton traité par la chaleur.

Parmi ces paramètres, on peut citer le dosage en ciment, la consistance du béton, le cycle de traitement, la chaleur d'hydratation.

Après l'étude du béton durci par la chaleur au laboratoire et l'analyse des résultats obtenus, une série de mesures a été faite sur site à des éléments de construction porteurs.

L'entreprise de construction de Sidi-Moussa (ECSM), et l'unité de préfabrication de poutres précontraintes de la société Algérienne des ponts et travaux d'art (SAPTA) située à Rouiba (Boumerdès), sont les unités de préfabrication où les essais ont eu lieu. Dans ce mémoire, le but était de donner une explication aux phénomènes du durcissement des bétons par la chaleur et éventuellement trouver des solutions simples à des problèmes de préfabrication.

Le travail est présenté en trois parties:

- la première consiste en une étude bibliographiques,
- la deuxième est consacrée aux essais en laboratoire,
- et la troisième est l'examen des essais in-situ,
- une conclusion et des recommandations sont également présentes.

¹ Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées en Batiment

Chapitre

2

Synthèse Bibliographique

2.1 GENERALITES SUR LE DURCISSEMENT ACCELERE

L'accélération du durcissement des bétons est de plus en plus employée dans le cas de la fabrication d'éléments en grande série. Cette accélération du durcissement permet:

- a) un décoffrage rapide et une rotation accélérée des coffrages, c'est un facteur d'économie important en raison de l'abaissement des frais généraux d'encadrement des chantiers, d'une meilleure utilisation du matériel et d'un amortissement plus rapide des coffrages.
- b) une préfabrication aisée en usine ou sur chantier permettant de réduire le coût des dépenses de main-d'oeuvre.
- c) d'échapper aux contraintes climatiques.

2.2 LES MOYENS UTILISES POUR ACCELERER LE DURCISSEMENT DES BETONS

Il sont de quatre ordres:

- a. le surdosage en ciment
- b. le recours à des adjuvants de béton
- c. le recours à des ciments plus performants
- d. le traitement thermique

2.2.1 Le surdosage en ciment

Le surdosage en ciment est un moyen onéreux, un surdosage de 50 kg/m³ de béton n'amènera qu'une augmentation d'environ 10% (à tout âge). Au delà de 400 kg de ciment/m³ le surdosage devient d'ailleurs préjudiciable du point de vue retrait du béton [1].

2.2.2 Le recours à des adjuvants de béton

Le recours à des adjuvants de béton est en général limité car pour les chlorures de calcium, les interdictions ou restrictions de dosage en limitent l'efficacité. Pour les réducteurs d'eau (plastifiants). En effet une réduction du rapport E/C de 0,50 à 0,40 conduit à une majoration de 30% de la résistance en 24 h [1].

2.2.3 Le recours à des ciments plus performants

Ce procédé reste un des moyens les plus usuels, l'analyse des performances normalisées (résistance sur mortier ISO) donnent une bonne idée des résultats sur béton [1].

2.2.4 Le traitement thermique

Ce traitement, reste le moyen le plus efficace pour obtenir un durcissement accéléré du béton. On distingue deux sortes de traitement thermique:

- a) le traitement thermique à l'autoclave sous pression (comprise entre 8 et 16 bars).
- b) le traitement thermique par élévation de température et à la pression atmosphérique.

2.2.4.1 Le traitement à l'autoclave sous pression

Il a été proposé par l'Allemand Michaelis en 1880 qu'il a utilisé sur des matériaux silico-calcaire. On obtient encore des résultats intéressants en traitant par un procédé thermique les pièces dans des moules à l'aide de vapeur surchauffée à 250-350°C sous une pression de 2 à 8 bars. En URSS, cette technique est couramment utilisée. Un tel traitement permet d'obtenir les résistances suivantes [2]:

- après 1 heure 40% de la résistance à 28j,
- après 3 heures 100% de la résistance à 28j.

Cette méthode à l'autoclave est utilisée en Algérie (à Bousaada) pour la production de la brique silico-calcaire.

2.2.4.2 Le traitement thermique à la pression atmosphérique

Ce traitement se décompose en deux:

- a) le traitement thermique interne,
- b) le traitement thermique externe.

2.3 LES TRAITEMENTS THERMIQUES INTERNES

2.3.1 L'auto-étuvage

Cette méthode consiste à mettre dans un coffrage soigneusement calorifugé, un béton constitué d'un ciment à fort dégagement de chaleur d'hydratation.

La température interne de l'élément ainsi réalisé va croître seulement sous l'effet de ce dégagement de chaleur [3].

L'auto-étuvage est particulièrement recommandé pour le bétonnage de pièces massives ; car ce procédé possède deux atouts :

- a) il est économique en énergie, ce qui le rend très compétitif par rapport à tous les autres procédés,
- b) il n'altère pas la structure interne du béton durcit puisque la répartition des températures se fait naturellement dans la pièce, sans risque de gradients thermiques trop importants qui entraîneraient des micro fissures.

Les résistances obtenues à 24 heures sont souvent intéressantes si l'on a pris la précaution de choisir un ciment adéquat. Il est courant d'obtenir des résistances supérieures à 150 bars à 24 heures, ce qui est généralement suffisant pour manipuler des pièces [3].

2.3.2 Le préchauffage des composants du béton.

On chauffe principalement l'eau de gâchage à une température comprise entre 60°C et 100°C, car elle possède la chaleur spécifique la plus importante. On obtient facilement des élévations de température du mélange frais de 20°C pour une température de l'eau de 70°C [3].

Pour obtenir des augmentations de température de béton frais plus importantes, il est indispensable de chauffer aussi les granulats, le chauffage des granulats peut se faire soit dans le silo de stockage soit directement dans le malaxeur [4].

Le préchauffage présente cependant quelques inconvénients. En effet, dès que le béton est préchauffé, on observe une forte évaporation de l'eau de gâchage. Le départ de l'eau est d'autant plus grand que l'écart de température entre l'atmosphère environnante et le béton est grand. Avec cette évaporation d'eau, la dissolution des sels de ciment est fortement accélérée, ceci a pour conséquence une forte diminution de l'ouvrabilité du béton par rapport à un béton témoin conservé à température ambiante.

On compense ce phénomène en rajoutant de l'eau de gâchage mais le volume en surdosage est difficile à maîtriser. Cependant Mamillan [5] propose, l'augmentation du dosage en eau pour conserver au béton la même plasticité. Comme on peut le voir sur la Fig.2.1.

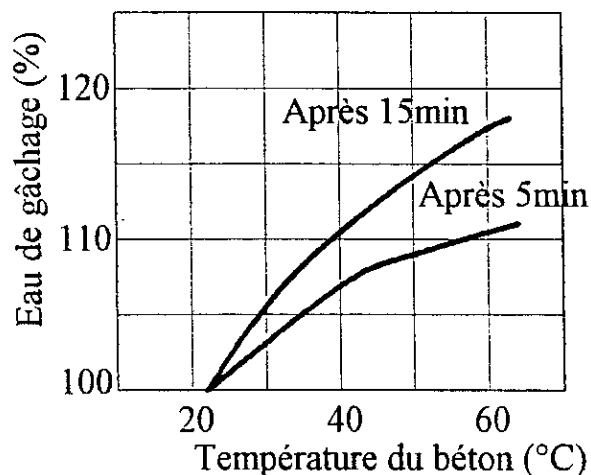


Fig 2.1 Augmentation de l'eau de gâchage pour conserver au béton la même plasticité [5]

D'après Mamillan, l'un des principaux avantages de l'utilisation du préchauffage du béton est d'éviter les moindres résistances à long terme des bétons traités thermiquement par rapport aux mêmes bétons non traités ou simplement préchauffés comme le montrent les courbes de la Fig.2.2.

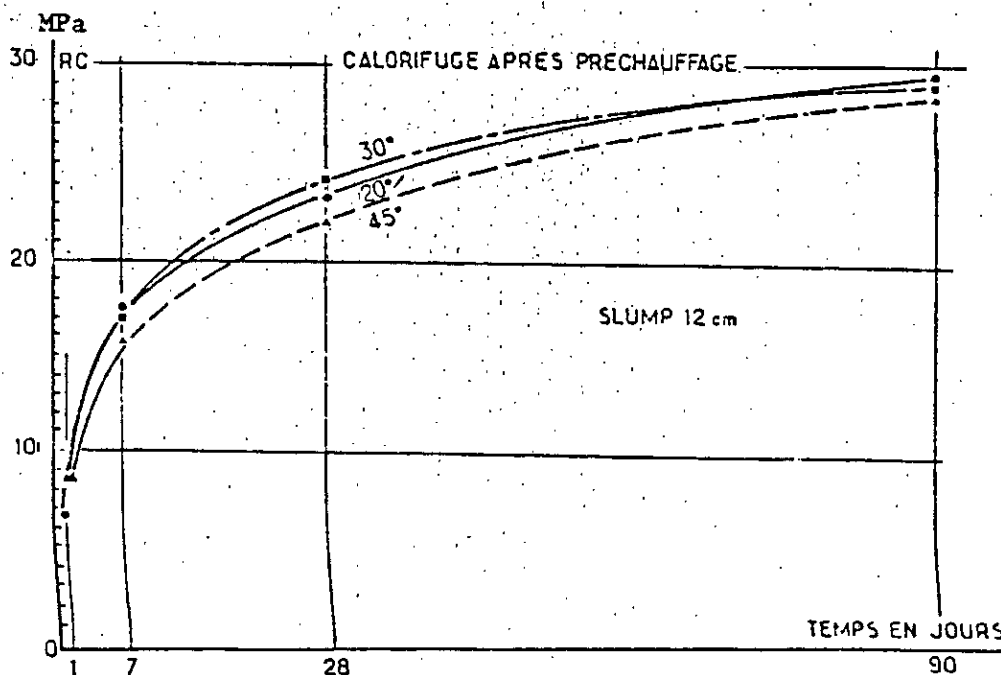


Fig 2.2 Evolution des résistance à la compression en fonction du temps pour trois temps de préchauffage avec le même cycle

2.3.3 Le chauffage électrique du béton frais par effet joules

En 1930, Brund et Bohlim (Stockholm) avaient fait un essai expérimental sur le chauffage du béton par un courant électrique.

En effet, la masse du béton était supposée comme une résistance électrique qui chauffe par effet Joule si elle est soumise à une tension alternative de grande puissance.

En URSS vers 1940, Mironov a repris industriellement le procédé en l'appliquant à des bennes chauffantes à électrodes plongeantes. En France, EDF a mis au point un tuyau chauffant. Ce tuyau s'intercale dans les éléments de conduite des pompes en béton et permet d'élever la température de 28°C avec un débit de 16m³/h [8].

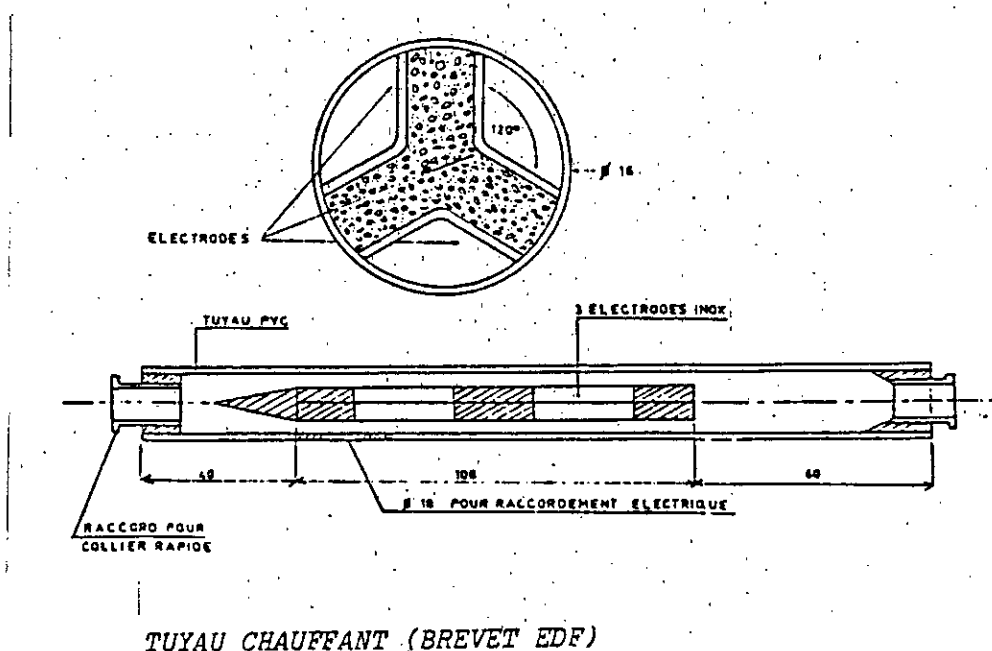


Fig.2.3 Tuyau Chauffant (Brevet EDF) [6]

2.3.4 Le chauffage interne du béton par résistance électrique intégrée dans la masse

Cette méthode utilise soit les armatures comme résistances électriques, soit des résistances noyées dans le béton et à usage perdu. Le procédé d'utilisation des armatures comme résistance électrique est limité à la précontrainte par fils adhérents (pré-tension). Dans ce cas l'intensité du courant doit être soigneusement calculée afin d'éviter un chauffage trop rapide du béton autour, l'armature, ce qui serait nuisible à l'adhérence [3].

2.4 LE TRAITEMENT THERMIQUE EXTERNE

Le traitement externe peut être directe, ou indirecte. Lorsque le chauffage du béton est direct, il n'y a aucun obstacle qui s'oppose à l'absorption de la chaleur émise par la source. C'est le cas du chauffage par un air chaud ou par vapeur, la forme la plus simple de cette méthode appelée "étuvage", consiste à recouvrir les éléments d'une bâche isotherme et à injecter de la vapeur sous cette bâche avec une atmosphère saturée d'humidité [7].

Le chauffage indirecte est celui qui est assuré par l'intermédiaire d'un fluide colporteur. la chaleur est restituée par des éléments de chauffage, par exemple des tuyaux à ailettes qui chauffent par convection la surface de coffrage. L'eau chaude, la vapeur, ou l'huile sont ramenées en circuit fermé au dispositif de réchauffement, et la chaleur sera de façon continue.

Les traitements thermiques externes sont caractérisés par un cycle de traitement; qui comporte généralement quatre étapes successives:

- 1) phase de conservation initiale, appelée aussi pré-prise
- 2) phase de montée en température
- 3) phase de conservation isotherme (ou palier isotherme)
- 4) phase de refroidissement.

Ces opérations sont présentées sur la Fig.2.4.

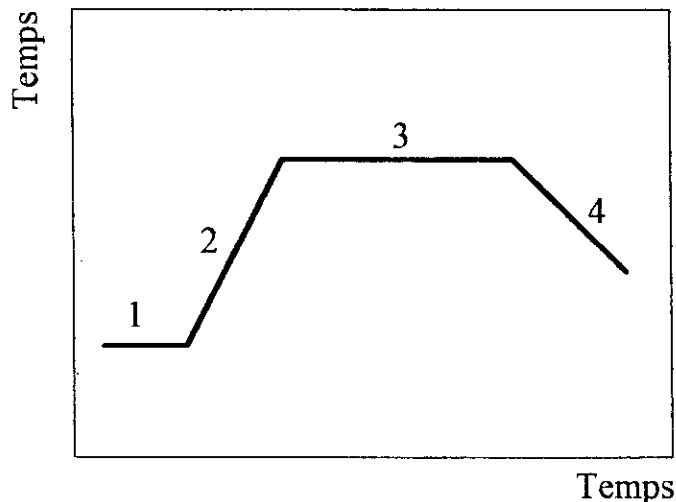


Fig 2.4 Cycle de traitement thermique [7]

Ces opérations s'effectuent toujours dans l'ordre indiqué d'une manière cyclique, d'où l'appellation de cycle d'étuvage. On rencontre généralement trois sortes de cycles d'étuvage :

- a) des cycles rapides : associés à une température élevée (80 ° à 90° c) dont la durée totale varié de 2 h 30 à 4 h.

b) des cycles moyens : avec des temps de pré-prise de 3 h environ, associés à une température de palier de 70°C.

c) les cycles lents, avec un temps d'attente allongé, une température de palier assez faible, de l'ordre de 40 à 50° C, le temps de traitement est en principe de l'ordre de 24 h.

2.4.1 Caractéristique générales du cycle d'étuvage

2.4.1.1 Phase de conservation initiale ou pré-prise

Par définition, c'est la période durant laquelle on assurera par le système de chauffage un maintien à une température constante ou légèrement progressive (compte tenu de l'exothermie, la température est toujours progressive dans le béton).

Ainsi la mise en chauffe d'un béton frais provoque l'apparition de phénomènes d'ordre physique et chimique. Les phénomènes d'ordre physique sont essentiellement liés à la dilatation des divers constituants du béton sous l'effet de l'élévation de température, or ces divers constituants ont des coefficients de dilatation linéaire très différents (exprimés en $\frac{m}{m}/^{\circ}C$). Quelques uns d'entre eux [7]:

calcaire :		5 ~ 5,6	$\times 10^{-6}$	$\frac{m}{m}/^{\circ}C$
eau :	à 20°C	2	$\times 10^{-5}$	$\frac{m}{m}/^{\circ}C$
eau :	à 60°C	52	$\times 10^{-5}$	$\frac{m}{m}/^{\circ}C$
pâte durcie:		11 à 14	$\times 10^{-6}$	$\frac{m}{m}/^{\circ}C$

dans le béton frais, l'eau n'est pas liée et intervient par conséquent largement du fait de son coefficient de dilatation élevé. L'élévation de la température provoque une expansion du matériau qui se traduit, par l'apparition de nombreux pores dont la présence nuit aux qualités ultérieures du béton.

Ces pores subsistent, en effet, après consolidation de la structure du béton et fixation de la partie de l'eau qui doit être physiquement ou chimiquement liée. Etant donné l'importance du rôle de l'eau dans une mise en chauffe brutale, il est évident que la conservation initiale se justifie d'autant plus que le E/C du béton est élevé.

Les phénomènes d'ordre chimique, issus d'une chauffe trop brutale du béton frais apparaissent également. Ils sont liés à l'apparition de films d'hydrates insolubles, et compacts qui s'opposent à la pénétration ultérieure de l'eau et isolent, en quelque sorte, les grains de ciment.

Ces grains qui ne sont alors que partiellement hydratés participent assez peu à la résistance du béton, qui reste faible quels que soient les traitements ultérieurs appliqués [7].

On peut conclure que conservation initiale se justifie d'autant plus que la compacité du béton est faible, elle est particulièrement recommandée dans le cas du traitement des produits en béton à démoulage immédiat.

2.4.1.2 Phase de montée en température

C'est la période durant laquelle le système de chauffage aura à fournir le maximum d'énergie [2]. La vitesse de montée en température influence les propriétés physiques du béton car les contraintes issues des gradients thermiques qui apparaissent dans la masse, en modifient la structure et la densité, pour cette raison, la vitesse de montée en température doit être limitée. Une vitesse de montée élevée provoque des désordres dans la structure qui peuvent entraîner la formation de micro-fissures ou de décollements de granulats. Il en résulte évidemment une baisse de la résistance mécanique ultérieure.

Au cours de la montée en température de l'atmosphère de l'étuve, la température interne de l'élément du béton reste inférieure à celle de sa surface, c'est à dire à celle du milieu ambiant.

L'écart entre température de masse et température de surface est d'autant plus grand que:

- a) l'élément est épais
- b) l'accroissement de la température de l'étuve est rapide
- c) le dosage en ciment est faible
- d) la chaleur d'hydratation de ce ciment est faible.

Pour les éléments dont l'épaisseur est supérieure à 30 ou 40cm, on constate que l'écart de température entre la masse et la surface subsiste pendant toute la phase de montée en température, cet écart peut être encore de 30 à 40°C après 6 à 7 heures de traitement. Dans le cas d'emploi de ciment à chaleur d'hydratation élevée, cet écart peut être réduit de 5° à 10°C.

Dans tous les cas, un écart de 30 à 40°C pourrait être le maximum tolérable. Un écart supérieur risque en effet de provoquer des modifications irréversibles dans la structure du béton [10].

On peut conclure que:

- a) les éléments épais doivent subir une vitesse de montée assez lente (environ 15°C / h). Le béton de ces éléments peut renfermer sans inconvénient un fort dosage en ciment d'où une exothermie importante. La dissociation en étuve des éléments n'est généralement pas à craindre, car le gradient thermique élevé qui règne dans la masse du béton favorise la condensation de la vapeur à leur surface.

b) pour les éléments à faibles épaisseurs (exemple des prédalles) l'écart de température entre surface n'excède pas 10 à 15°C; à la fin de la phase de montée en température l'écart est pratiquement nul. Donc pour ces éléments, il faut:

- maintenir soigneusement l'humidité du milieu ambiant
- éviter les fort dosages en ciment
- utiliser un liant à chaleur d'hydratation modérée.

2.4.1.3 Phase de maintien de la température maximale

Cette étape est aussi appelée (régime isotherme) ou palier. Au cours de la phase de chauffage, le béton est le siège d'un certain nombre de phénomènes complexes essentiellement dus à l'accélération des réactions sous l'effet de la chaleur. Par ailleurs, l'élévation de température accroît la pression interne des plus grosses bulles d'air toujours présentes dans le béton, et accélère les réactions d'hydratation du liant. Ces réactions sont exothermiques et conduisent à installer une structure rigide qui est la raison d'être du ciment.

Cette étape est essentiellement définie par une température θ_i dite "température de régime isotherme" et une durée T_i . Ces deux facteurs sont étroitement liés. Le choix de T_i et θ_i dépend de la résistance désirée à la fin du traitement. D'autres facteurs interviennent tels que:

- l'épaisseur de l'élément: e en cm.
- le produit $Q = C \cdot ch$

(C : dosage du ciment kg / M3, ch : chaleur d'hydratation à 7 jours).

La Fig.2.5 montre bien comment e et Q peuvent intervenir sur T_i [7].

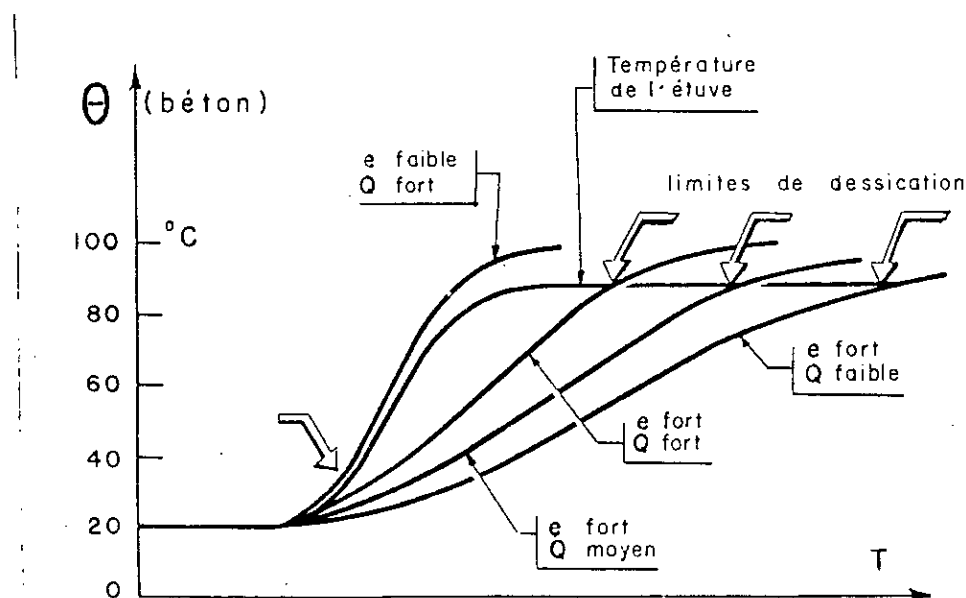


Fig.2.5 Evolution de la température du régime isotherme

La durée T_i doit donc logiquement se terminer à l'instant où la température de la masse du béton devient supérieure à celle de l'étuve. D'une manière générale, les ciments dont l'activité est élevée à température ordinaire exigent une durée T_i du palier isotherme assez courte. Au contraire, les liants moins actifs tels que les ciments renferment du laitier de haut fourneau ou de la Pouzzolane nécessitent une durée plus longue. Le danger de dessiccation ne semble d'ailleurs exister que pour des valeurs de e et Q respectueusement supérieures à 30cm et 35000 K.cal / M3 environ [7].

La température optimale et le temps T_i se déterminent le plus souvent par l'expérience, en observant les caractéristiques finales des éléments traités.

L'étude d'éprouvettes soumises au même traitement serait certes beaucoup plus commode. Elle ne peut malheureusement fournir des résultats parfaitement exploitables du fait que les éprouvettes n'ont généralement pas la même forme que les éléments, et que la forme joue un rôle important dans le processus.

2.4.1.4 Phase de refroidissement

Il convient de prendre certaines précautions lors de la baisse de température de la chambre d'étuvage, il apparaît en effet dans le béton des gradients thermiques qui provoquent des contraintes nuisibles et rappellent les effets de la montée en température.

D'après Kaiser-Rilem [8], l'écart maximal admissible est de 30°C environ entre la surface et la masse du béton, lors du refroidissement, sans que les qualités finales de résistance ne soient affectées.

Les pièces épaisses, dont le centre reste à température élevée après plusieurs heures de refroidissement doivent être soumises à une baisse de température d'étuve relativement faible (exemple: 10°C / h) et recevoir une humidification abondante, le cas échéant, ils subiraient du fait de l'écart important de température régnant entre le centre et la surface, une dessiccation préjudiciable à leurs qualités finales.

2.5 INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES PROPRIETES DU BETON

Lois thermo-physique du traitement thermiques, vont quelque peu modifier les qualités du béton. Cette modification pourra être très légère dans le cas d'un traitement modéré, jusqu'à devenir très importante, voir préjudiciable à la pérennité des ouvrages, dans le cas où le traitement devient très violent.

L'étendue des qualités que l'on peut obtenir après un traitement thermique est très grande, et il convient pour cela de bien spécifier ce que l'on attend d'une telle accélération de la prise et du durcissement.

2.5.1 Influence du cycle de traitement sur les résistances mécaniques

2.5.1.1 Influence de la pré-prise

L'objectif de la pré-prise, par un maintien du béton à température modérée, légèrement progressive, a pour but de limiter à une valeur admissible les phénomènes physiques et chimiques vu précédemment.

La valeur admissible sera atteinte lorsque la résistance en traction acquise par la pâte de ciment durcie sera suffisante pour s'opposer aux expansions de l'eau [2].

Plusieurs auteurs ont essayé de définir cette valeur admissible, d'après Mironov [9] tant que les déformations thermiques du béton chauffé ne dépassent pas la dilatation thermique du béton durci à la même température (Fig.2.6), le chauffage se fait sans endommager sa structure de façon appréciable.

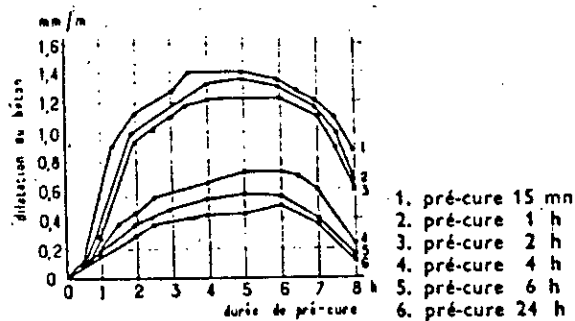


Fig 2.6 Effet de la pré-prise

Le respect d'un temps de pré-prise de plusieurs heures avant le chauffage du béton s'est montré, comme une mesure appropriée. Plus la température est élevée, plus longue doit être la durée de pré-cure pour obtenir les résultats les meilleurs. De nombreux essais de Hanson ont montré que la conservation initiale doit être aux alentours de 3h [3].

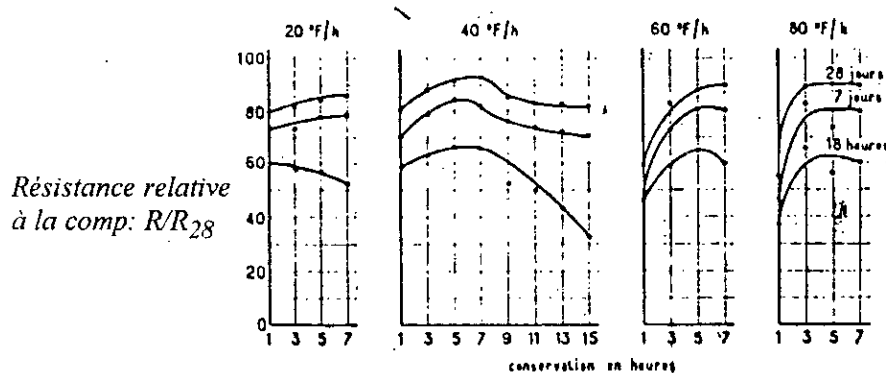


Fig.2.7 Influence de la durée de pré-prise sur les résistances au jeune âge en fonction de la température et de la durée du traitement [9]

Il est assez difficile de fixer avec précision la durée de conservation initiale à appliquer au béton, en raison des nombreux facteurs qui interviennent. Il est heureusement possible d'en connaître l'ordre de grandeur. Par des essais effectués sur des cubes de béton démoulés, après mise en place et ayant été soumis, avant étuvage à des conservations initiales s'échelonnant de 30 mn à 8h, Lewis [10] a montré qu'il y'a corrélation entre la durée de conservation initiale optimale et le gradient ultérieur de montée en température. Ses essais effectués, aussi bien sur des bétons lourds que légers, montrent que la résistance après 28 jours est maximale si, lors du traitement thermique, le béton atteint la température de 50°C et 5 à 6heurs après le malaxage. La durée de pré-prise serait alors de:

- 3 heures pour un gradient de 10°C / h
- 4.5 heures pour un gradient de 20°C / h
- 5 heures pour un gradient de 30°C / h

Ces résultats sont confirmés par Jarocki et Talbierski [11] qui prouvent la répercussion de la pré-prise sur les résistances du béton. Ainsi ils trouvent les baisses de résistances à 28 jours (exprimées en % de la résistance à 28 jours du témoin) comme le montre le Tableau 2.1.

Tableau 2.1

Durée de pré-prise (heures)	Baisse de résistance (%)
5 à 7	0
3	20 à 25
1.5	30 à 35
0	40 à 55

Ces résultats montrent l'importance et le sens de variation du phénomène. Un élément de béton frais, immédiatement démoulé et soumis aussitôt à un gradient thermique élevé, peut présenter un allongement de 2 à 4mm / m. Le même élément soumis aux mêmes conditions mais après une certaine durée de conservation, peut présenter un allongement de l'ordre de 0.5 à 1mm / m, qui se rapproche de la dilatation normale du béton durci et chauffé. Il est évident que le premier élément subit de graves altérations de structure qui seront par contre réduites dans le cas du second cas [11].

Il est par conséquent souhaitable de couler le béton à une température maximale comprise entre 20 et 25°C. Plus les qualités mécaniques ultérieure du béton devront être élevées, plus grande devra être la durée de pré-prise, sans dépasser 7heures.

2.5.1.2 Influence de la vitesse de montée en température

Mamilan [12] a étudié ce phénomène, et ses travaux, ont montré qu'au delà de 20°C / h, l'accroissement de la vitesse de chauffage n'entraîne plus qu'une augmentation de résistance relative modérée (Fig.2.8), ses résultats sont résumés sur les graphiques de la Fig2.9.

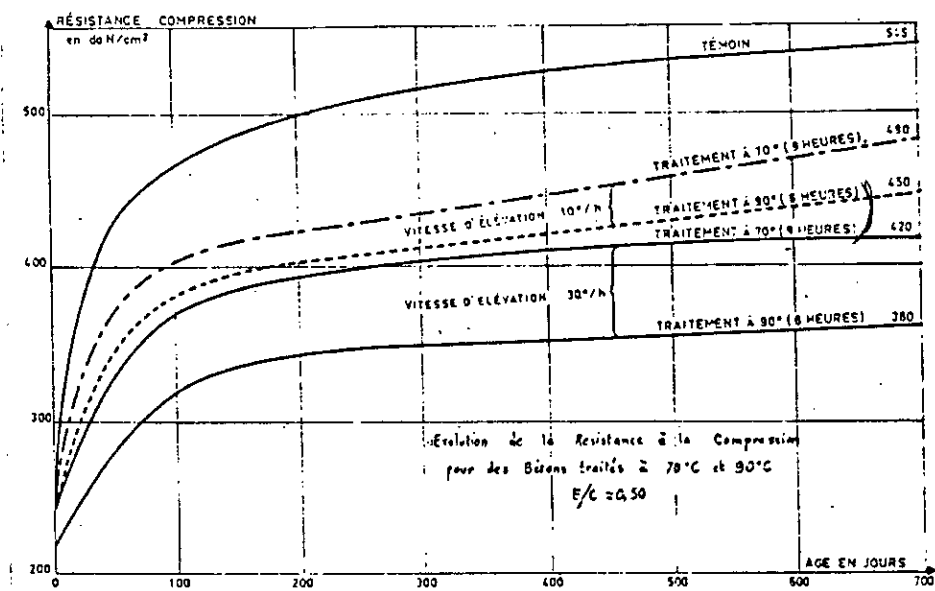


Fig 2.8 Evolution de la résistance à la compression pour des bétons traités à 70° et 90°C.

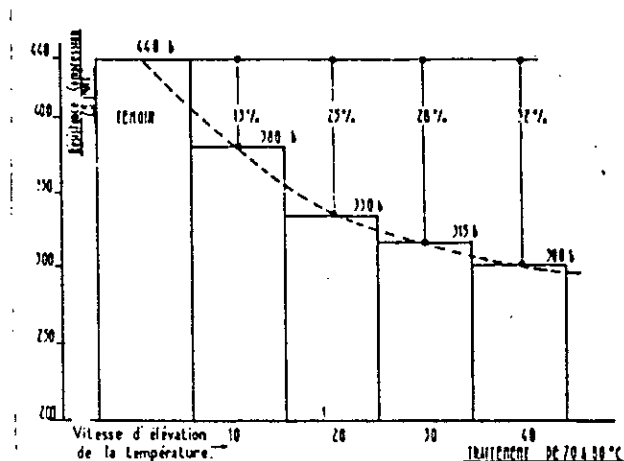


Fig 2.9 Evolution de la résistance en fonction du gradient thermique

On observe nettement que les meilleures résistances sont obtenues pour les bétons chauffés lentement ($10^{\circ}\text{C} / \text{h}$), mais dans tous les cas, la qualité du béton traité est plus faible que celle du témoin; à 700 jours la chute de résistance par rapport au béton témoin est de 10% pour le traitement à 70°C et de 20% pour le traitement à 90°C . On remarque qu'avec une vitesse de $40^{\circ}\text{C} / \text{h}$ une chute de 30% de la résistance est observé. Ainsi, plus la vitesse de chauffage est élevée et plus la résistance est réduite [12].

2.5.1.3 Influence du palier isotherme et de la température maximale

Le choix de la température et de la durée du palier dépendra de la résistance désirée à la fin du traitement. Plus la température du palier est élevée, plus grande est la résistance à la fin du traitement, au détriment de la résistance à 28 jours qui sera plus faible. Mamilan [12] a observé que la résistance diminue de 10% pour le béton traité à 40°C et de 20% pour le béton traité à 60°C et de 25% pour le traitement à 80°C , comme le montre la Fig. 2.10.

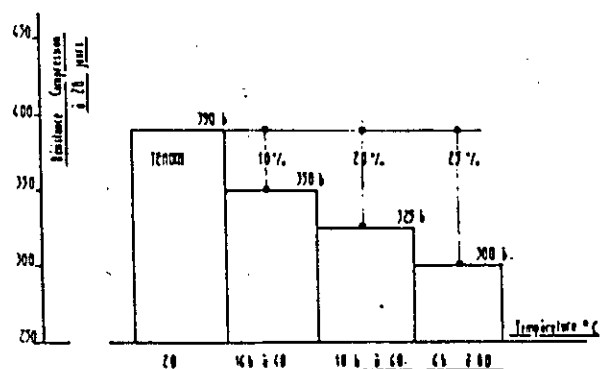


Fig.2.10 Evolution de la résistance en fonction de la durée et de la température du palier

2.5.1.4 Influence du refroidissement

La phase de refroidissement nécessite beaucoup de précautions, car c'est en général à cette période qu'apparaît la fissuration. Le refroidissement suppose une température du béton supérieure à celle de l'enceinte dans laquelle est maintenue le matériau. Il y'a donc départ d'eau du béton vers l'enceinte, et plus le refroidissement est brusque et plus le départ d'eau sera important [2].

Il convient surtout d'éviter le choc thermique créé par un refroidissement brusque en sortant le produit en béton de l'enceinte. D'après Reinsdorf [9], suivant la qualité du béton on peut tolérer comme différence de température par rapport à l'air extérieur, 60°C pour les bétons de résistance inférieure à 300bars et 75°C pour les bétons de résistance supérieure à 450bars (Fig. 2.11).

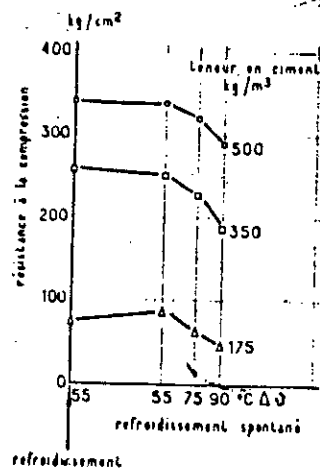


Fig. 2.11 Influence de la vitesse et de la température de refroidissement sur les résistances initiales des bétons traités

2.5.2 Influence de l'humidité

Mansfeild [2] écrivait en 1948: " on ne veut pas cuire le béton, mais le traité thermiquement".

Chaque fois qu'on fabrique un élément de béton fragile on peut conclure que le liant a été endommagé au cours du cycle de traitement. Si le liant est endommagé par l'étuvage à haute température, on peut en conclure qu'une quantité suffisante d'humidité n'a pas été au contact immédiat du ciment et que dans ces conditions les produits normaux d'hydratation n'ont pu se former. Il est donc essentiel que le ciment soit maintenu en présence d'une humidité suffisante pendant toute la durée du traitement [2].

Un béton est toujours malaxé avec un $E / C > 0.26$. Il contient toujours assez d'eau pour la réaction d'hydratation du ciment, et il n'est pas nécessaire de lui en apporter de l'extérieur pendant le traitement, il suffit de lui conserver son humidité initiale. Mais il n'est pas simple d'empêcher la déshydratation d'un béton au cours du chauffage. Une étuve peut être remplie de vapeur, cela ne signifie pas que le béton n'est pas en train de se déshydrater. L'humidité de l'étuve peut provenir du béton. Le problème est un problème d'échange entre le béton et l'atmosphère ambiante, ce problème est régi par les lois d'équilibre de la vapeur.

Si la vapeur entourant le béton est saturante pour une température plus élevée que celle du béton, l'échange se fera de l'extérieur vers l'intérieur, en conséquence il n'y aura pas de risque de déshydratation. Par contre si la vapeur est saturante pour une température plus basse que celle du béton, l'échange se fera du béton vers l'extérieur, et il y'aura déshydratation du béton comme le montre la Fig.2.12.

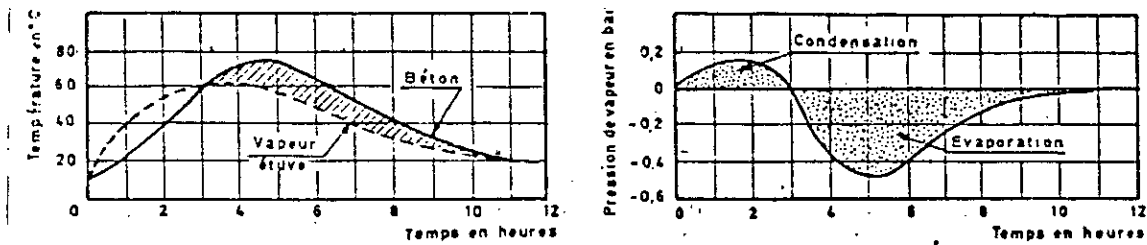


Fig.2.12 Influence de l'humidité sur le béton traité

2.5.3 Influence du traitement sur le retrait

D'après Reisdorf [9], le traitement à la vapeur doit diminuer le retrait à sec de 25 à 40% maximum (Fig.2.12), suivant le dosage en ciment du mélange, par rapport à celui d'éprouvettes maintenues humides. Si la température du traitement est élevée et si sa durée est prolongée, le retrait différé diminue. Pour les bétons légers, le retrait n'est pas essentiellement diminué.

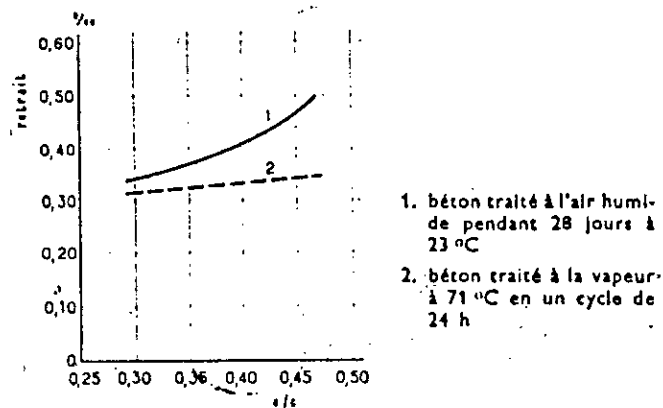


Fig.2.13 Diminution du retrait du béton après traitement

2.5.4 Influence sur le fluage

Le fluage est un phénomène de déformation différée sous charge indéfiniment appliquée. D'après Hanson [9], le fluage du béton traité thermiquement en fonction de l'âge du chargement peut être réduit de 30 à 50%. La diminution est moins marquée avec les bétons à haute résistance. La réduction du fluage est à mettre au compte de la perte d'humidité après le traitement (Fig.2.14).

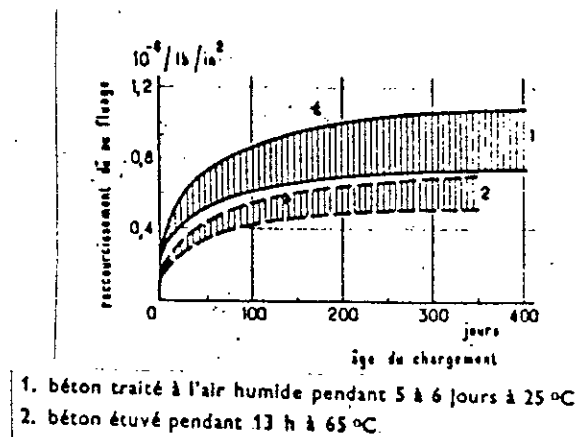


Fig.2.14 Diminution du fluage du béton traité à la vapeur en fonction de l'âge de chargement [9]

2.6 COMPORTEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DES CIMENTS ET DES BETONS SOUMIS A UN DURCISSEMENT ACCELERE

2.6.1 Rappels sur la composition chimique des ciments

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (~1450°C) et le broyage d'un mélange minérale (calcaire, argile, ajouts éventuels). Ils sont formés d'un constituant de base: le CLINKER, auquel on peut adjoindre des composants secondaires (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes.). Cependant, certains ciments peuvent présenter des pourcentages de constituants secondaires supérieurs à ceux du clinker [13].

2.6.2.1 Le clinker

Le Clinker est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle du mélange calcaire-argile qui, par broyage et en présence de gypse, jouant le rôle de régulateur de prise et donne au ciment des propriétés hydrauliques (prise et durcissement par hydratation).

On admet que les principaux composés du clinker après cuisson sont:

- | | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| a. le silicate tricalcique | $3CaO SiO_2$ | noté C_3S (Alite) |
| b. le silicate bicalcique | $2CaO SiO_2$ | noté C_2S (Bélite) |
| c. l'aluminate tricalcique | $3CaO Al_2O_3$ | noté C_3A |
| d. le ferro-aluminate tetracalcique | $4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$ | noté C_4AF (Célite) |

Les constituants minéralogiques sont compris dans les limites suivantes [2]:

Constituants	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
%	45 ~ 65	15 ~ 30	4 ~ 16	10 ~ 20

Suivant les proportions de ces éléments, les ciments pourront avoir des propriétés très différentes.

Le silicate tricalcique (C_3S) développe des résistances initiales et une chaleur d'hydratation assez élevées.

Le silicate bicalcique (C_2S) contribue à augmenter les résistances à long terme.

L'aluminate tricalcique (C_3A) possède la prise la plus rapide et la chaleur d'hydratation la plus élevée.

Le ferro-aluminate (C_3AF) tetracalcique ne contribue pas aux résistances.

L'augmentation du rapport C_3S/C_2S donne un ciment à résistance initiale élevée.

2.6.2.2 Les constituants secondaires

Le ciment résulte du broyage du clinker additionné de 5% de gypse environ afin de régulariser la prise. On peut rajouter aussi au moment du broyage des constituants secondaire tels que:

1 Les laitiers granulés

Ce sont des produits industriels provenant de la fabrication de la fonte dans les haut-fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Ils sont fixés par refroidissement brusque et donnent un produit granulé. Ces granulés sont ajoutés en proportion variable au clinker afin d'être broyés finement avec lui. Les laitiers possèdent intrinsèquement des propriétés hydraulique, leur durcissement est plus long et leur exothermie plus faible par comparaison au clinker. Les laitiers contiennent 45% de chaux, 30% de silice (SiO_2) et 15% d'alumine (Al_2O_3) [2].

CaO: 42 ~ 48% SiO_2 : 27 ~ 32% Al_2O_3 : 13 ~ 18%

2 *Les cendres volantes*

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, résultant de la combustion en centrale thermique de combustibles minéraux solides (houille, lignite.). Elles rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable. Elles sont ajoutées au moment du broyage. Les cendres volantes contiennent 50% de silice (SiO_2) et 50% d'Alumine (Al_2O_3) [2].

3 *Les pouzzolanes*

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique, ou industrielle (résidus issus des centrales thermiques), composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique. Ils ont la propriété de fixer la chaux à la température ambiante.

2.6.2 Aptitude des ciments aux traitements thermiques

Les ciments confèrent au béton des propriétés de durcissement et de résistance, qui dépendent étroitement de leur nature, c'est à dire de leur finesse et de leur composition.

2.6.2.1 Cas des ciments Portlands purs

Kaiser [8] a effectué des essais d'étuvage sur des éprouvettes de mortier en forme de cubes de 7 cm d'arête. L'auteur a particulièrement étudié l'effet de l'aluminate tricalcique, il ressort de ses essais que:

- la vitesse de durcissement croit avec la teneur en C_3S
- la vitesse de durcissement est d'autant plus élevée que la teneur en C_3A est faible.

Kaiser a classé trois groupes de ciment, les résultats sont exposés au Tableau 2.2.

Tableau 2.2

% Groupe	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	R28 Témoin	Surface spécifique (cm ² /g)
I	57	25	2	14	400	3500
	51	25	2	18	360	
	48	34	1	15	350	
II	65	14	8	11	510	4000
	53	24	8	13	440	
	52	28	6	12	400	
III	55	22	11	11	380	3500
	48	27	12	11	400	
	41	33	11	13	380	

Ces résultats peuvent être résumés de la manière suivante:

- a) la teneur en C₃A d'un ciment Portland soumis à l'étuvage doit rester inférieure à 8%.
- b) les meilleurs ciments Portlands adaptés au traitement thermique appartiennent aux groupes I et II. Le groupe I convient pour les cycles longs. Ces ciments présentent un durcissement prolongé le long du traitement (C₃A faible). Le groupe II convient aux cycles court.
- c) les ciments du groupe III (C₃A > 8%) semblent peu aptes aux traitement thermiques.

Reinsdorf [9] a étudié l'influence de la composition du ciment Portland sur son aptitude au traitement thermique. Il est parvenu aux conclusions suivantes (Fig.2.15):

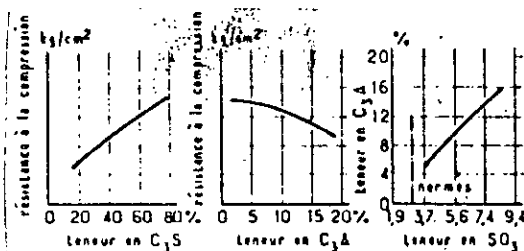


Fig. 2.15 Influence des propriétés du ciment sur la résistance à la compression de bétons traités à la chaleur

- a) les ciments qui ont une teneur élevée en C_3S , conviennent particulièrement à l'étuvage. Les meilleurs résultats étant obtenus lorsque le rapport $C_3S/C_2S \geq 3$.
- b) la différence de résistance constatée entre béton étuvé et béton témoin après un certain temps, provient souvent d'une trop faible teneur en SO_3 .

Les meilleurs résultats paraissent être obtenus avec une teneur en SO_3 supérieure à 3%. (Rappelons que la norme Française "N.F." limite SO_3 à 3.5%).

D'après Reinsdorf, il n'y a pas de risque à utiliser une teneur en sulfates élevée lors du traitement, car le gypse forme avec les aluminates du ciment et à la température de $70^\circ C$, des sulfo-aluminates de calcium hydraté absolument stables. ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$). La Fig.2.15 montre l'influence de SO_3 sur la résistance.

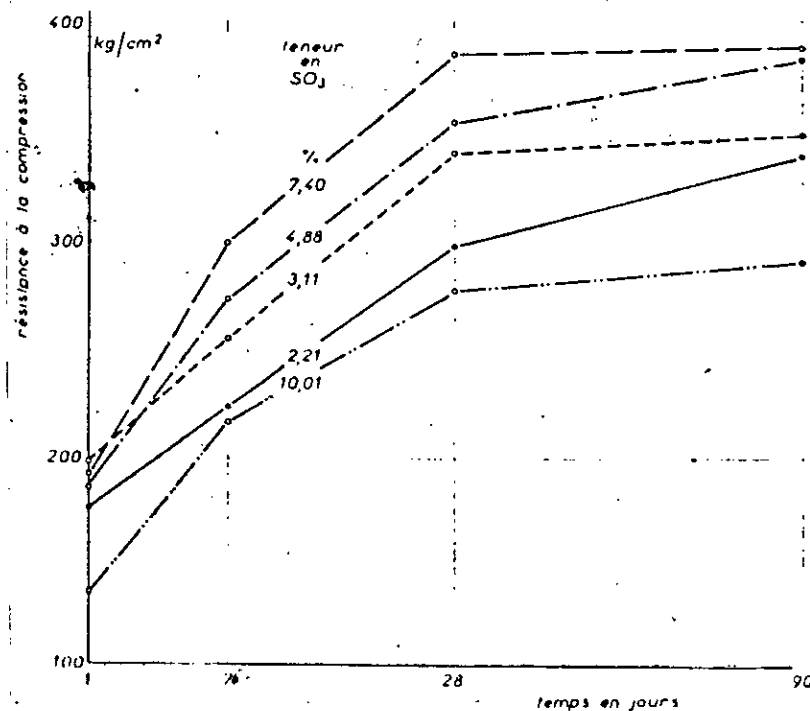
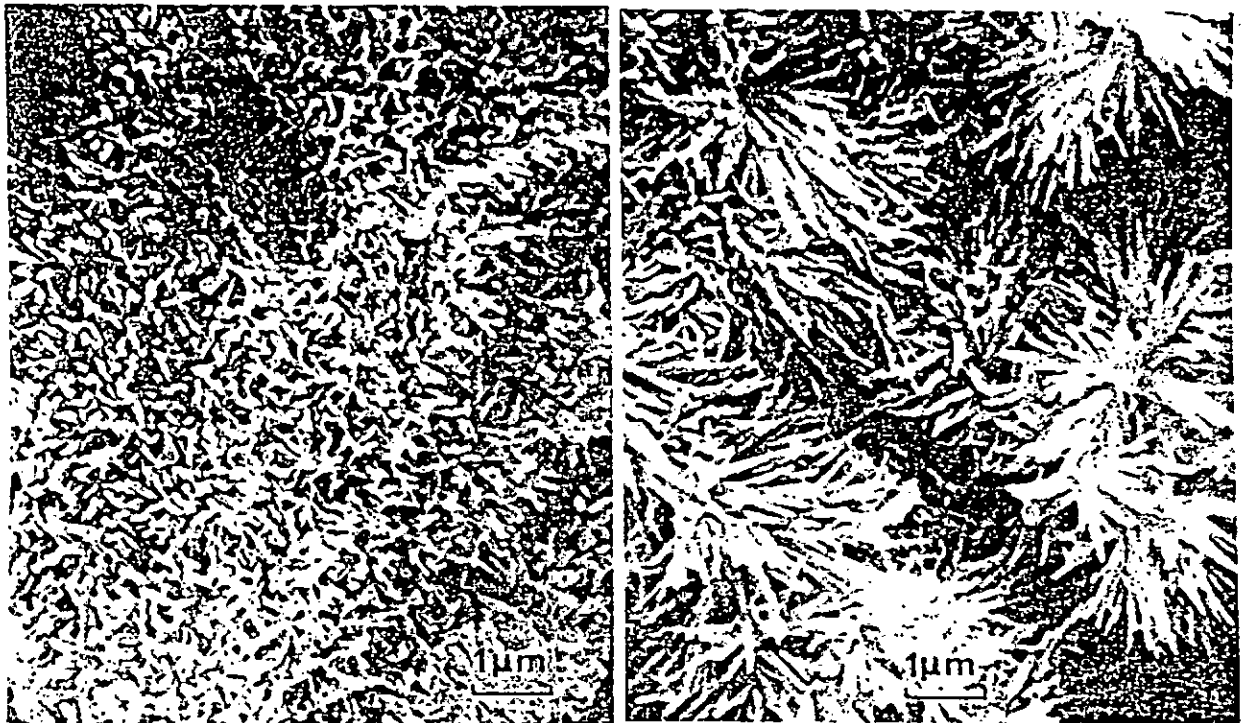


Fig. 2.16 Influence de SO_3 sur la résistance

Regourd et Gautier [18] dans une étude sur deux ciments Portland ont mis en évidence l'influence du C_3S et du C_3A .

Le ciment N°1 contient 73% de C_3S et 4% de C_3A à 28j, il y'a une chute de résistance de 20% du ciment traité à 80°C par rapport à celui conservé à 20°C (Fig.2.18.a), ce défaut de résistance est lié à la microstructure du matériau, c'est ainsi que les silicates hydratés cristallisent différemment à 20°C et à 80°C (Fig.3.17). Leurs morphologies est à fibres courtes et enchevêtrées à 20°C, elle est à fibres longues et dissociées à 80°C.



(a) à 20°C

(b) à 80°C

Fig.2.17 Comparaison des silicates hydratés du CPA N°1 [18]

Le ciment Portland N°2, il contient 62% de C_3S et 12% de C_3A , l'évolution de la résistance est plus faible par rapport au CPA N°1 (Fig.2.18.b).

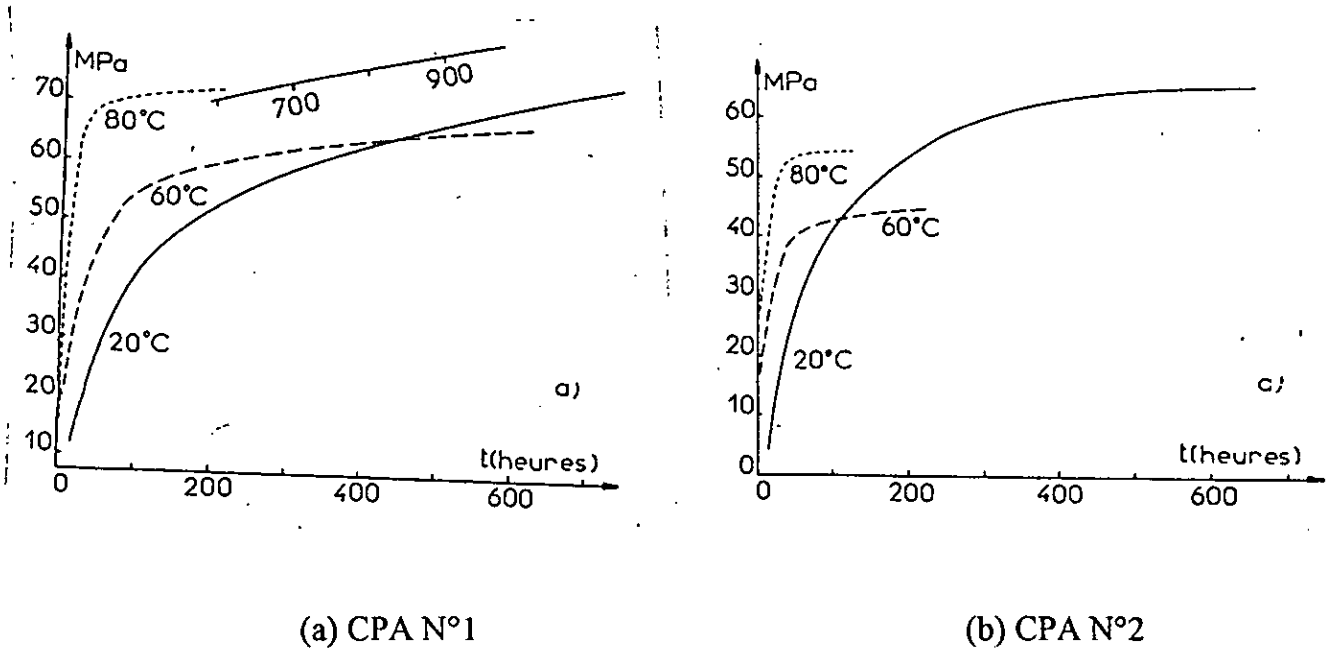


Fig.2.18 Evolution de la résistance

Pour le CPA N°2, le traitement à 80°C a entraîné une hydratation très rapide du C_3A qui ne s'est pas poursuivie au delà de 60°C, cela est dû au regroupement des aluminates sous forme de C_4AH_{13} en amas compacts de plaquettes hexagonales (Fig.2.19).



Fig.2.19 Cristallisation des aluminates, CPA N°2

Il convient de choisir en vue du traitement thermique des ciments Portlands [7]:

- assez riche en C₃S
- faible pourcentage de C₃A (10% ou moins).

Une teneur plus élevée doit être associée a une forte proportion de gypse.

Ainsi, l'aptitude des ciments aux traitements thermiques varie d'un pays a un autre. Aux Etats Unis (US) elle est déterminée suivant la composition chimique, C₃S de l'ordre de 45% et C₃A de 10%. En France elle est fixée par des essais de convenance, où la chaleur d'hydratation du ciment est bien fixée. Dans les pays de l'Europe de l'Est un essai sélectif basé sur un coefficient $K = \frac{R_4}{R_{28}} \cdot \frac{E}{C}$ où R₄ est la résistance du béton à 4 heures d'étuvage.

2.6.2.2 Cas des ciments Portlands avec constituants secondaires

Royak [14] et ses collaborateurs ont effectué des essais sur des ciments contenant du laitier de haut fourneau sur des éprouvettes de mortier de 4×4×16 cm, traitées suivant le programme (2+3+6+2) h (représentant les quatre phase du traitement). On représente sur le tableau 2.3, les resultats pour deux types de ciments:

E/C = 0.45 dosage en ciment : 400 kg/M3

Tableau 2.3 Résistance à la compression des ciments aux laitiers

ciment	R28	Rn	Rn28	% laitier
1	386	216	323	0
	289	234	338	70
2	460	368	446	0
	356	366	446	55

R28 résistance du témoin à 28j

Rn28 résistance du béton traité à 28j

Rn résistance après traitement.

Royak a conclu,

- a) qu'avec le Portland pur on a généralement $R_{n28} < R_{28}$ quelque soit sa composition.
- b) qu'avec les ciments aux laitiers on a $R_{n28} > R_{28}$.
- c) que R_{n28} (laitier) est toujours voisin de R_{n28} (Portland), alors que R_{28} (laitier) est toujours inférieur à R_{28} (Portland).

Ainsi les ciments contenant du laitier sont parfaitement aptes à recevoir un traitement thermique qui peut atteindre 90°C.

Stolnikov [15] a fait des essais sur du ciment contenant une cendre siliceuse, broyée à 5000 cm²/g puis mélangée à du ciment Portland dans des proportions de 30 à 40% (en poids) de la totalité du mélange.

Les éprouvettes âgées de 48h étaient chauffées à 85°C. Le tableau.2.4 montre les résistances relatives obtenues, exprimées en pour-cent de la résistance du béton témoin (sans addition et ayant subi le même traitement).

Tableau.2.4 Résistance à la compression

ciment cendré	sans traitement		avec traitement	
	7j	28j	3j	28j
70+30	80	70	84	71
60+40	69	93	87	83

résistance à la traction

ciment cendré	sans traitement		avec traitement	
	7j	28j	3j	28j
70+30	73	85	100	100
60+40	83	94	90	91

On voit que les ciments ayant les plus fortes teneurs en C_3A et C_3S possèdent les chaleurs d'hydratation les plus élevées en particulier aux premiers âges.

2.6.3.2 Influence de la finesse de mouture sur l'hydratation

Plus un ciment est broyé finement, et plus la chaleur d'hydratation est élevée notamment aux premiers âges, comme le montre le Tableau.2.6.

Tableau 2.6 Chaleur dégagée en cal/g

Finesse du ciment cm ² /g	Temps			
	12heures	1jours	3jours	7jours
5200	54	84	103	113
4290	49	81	104	115
3180	33	61	88	104
1740	17	61	73	88

2.6.3.3 Influence des adjuvants

Les adjuvants chimiques agissent en modifiant les vitesses de dissolution des différents constituants des ciments et l'hydratation des grains. Les accélérateurs augmentent les chaleurs dégagées aux premières heures, par contre elles sont très souvent diminuée à 7 jours. Les retardateurs modifient beaucoup les chaleurs dégagées, les tout premiers jours. Mais la chaleur obtenue après 7 jours peut être supérieure à celle du témoin sans produit [2].

Chapitre

3

Essais au Laboratoire

3.1 INTRODUCTION

L'importance de ces essais, est d'étudier le comportement des matériaux locaux, notamment le ciment, vis à vis du traitement thermique et de voir aussi l'effet des paramètres intervenant durant le traitement. Ces essais ont été effectués dans les laboratoires du centre national d'étude et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB).

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de ce projet, au traitement thermique à la pression atmosphérique. Ce genre de traitement est le plus souvent employé par les usines Algériennes.

Plus de cinq cents éprouvettes ont été confectionnées et testées. Notons que pour arriver à des résultats concluant, plusieurs essais ont été refaits afin d'écartier certains matériaux douteux.

3.2 MATERIAUX UTILISES ET LEURS CARACTERISTIQUES

3.2.1 Le ciment

Deux types de ciment Portland artificiel ont été utilisés. Le plus fréquemment utilisé provient de la cimenterie de Raïs-Hamidou à Alger et le second de la cimenterie de Sour-El-Ghozlane. Les caractéristiques physico-chimiques des ciments sont données sur les deux tableaux 3.1, 3.2.

Tableau.3.1 Caractéristiques physico-chimiques du ciment
(Cimenterie Raïs-Hammidou)

Ciment avec ajouts: classe 325

1. COMPOSITION CHIMIQUE		3. ESSAIS PHYSIQUES		
Elément	Teneurs, %			
SiO ₂	27,24	FINESSE DE MOUTURE	P.S g/Cm ³	2.91
Al ₂ O ₃	5,66		SSB Cm ² /g	4057
Fe ₂ O ₃	4,08	CONSISTANCE NORMALE	H ₂ O, %	25,5
CaO	51,87			
MgO	1,41	TEMPS DE PRISE	Début	1h22
SO ₃	3,00		Fin	3h27
K ₂ O	1,10	EXPANSION "LE CHATELIER"	CHAUD mm	0,0
Na ₂ O	0,74		FROID mm	
CaO. Libre	2,13	4. ESSAIS MECANQUES		
R. Ins.	1,97	RESISTANCE A LA FLEXION EN Kgf/Cm ²	02j	31,14
P.A.F	3,90		07j	52,5
2. COMPOSITION POTENTIELLE			28j	74,75
M.S		RESISTANCE A LA COMPRESSION EN Kgf/Cm ² .	02j	124,48
M.A.F			07j	262,29
K.S			28j	374,84
C.3.S		5. CLASSIFICATION: CIMENT AVEC AJOUTS		
C.2.S		CLASSE 325.		
C.3.A				
C.4AF				
Ca.SO ₄ .2H ₂ O				

Tableau.3.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment
(Cimenterie Sour-El-Ghouzlane)

Ciment avec ajouts: classe 325

ESSAIS SUR LE CIMENT

1. COMPOSITION CHIMIQUE		2. ESSAIS PHYSIQUES	
Element	Teneur, %	P.S g/Cm3	2.9767
SiO ₂	22.47	FINESSE DE MOUTURE	
Al ₂ O ₃	5.53	SSB Cm ² /g	3466.07
Fe ₂ O ₃	2.78	CONSISTANCE NORMALE	
CaO	60.44	H ₂ O, %	24.6
MgO	1.03	TEMPS DE PRISE	
SO ₃	1.54	Début	2h00
K ₂ O	0.68	Fin	3h50
Na ₂ O	0.36	3. ESSAIS MECANIQUES	
CaO.Libre	1.27	02 J	37.98
R. Ins	5.56	RESISTANCE A LA FLEXION EN Kgf/Cm ²	
P.A.F.	5.07	07 J	54.81
		28 J	69.23
		RESISTANCE A LA COMPRESSION EN Kgf/cm ²	
		02 J	179.21
		07 J	292.34
		28 J	384.79
4. CLASSIFICATION:			
CPA AVEC AJOUT CLASSE 350			

3.2.2 Agrégats

Le sable

C'est un sable d'oued provenant de sablière de Baba-Ali à Alger de dimension 0/5, il sera lavé et séché.

Le gravier

Il provient de la carrière Jobert d'Alger. Deux types de graviers ont été utilisés de dimensions 3/8 et 8/15 concassé, ces graviers seront lavés et séchés.

L'eau

C'est de l'eau de ville ordinaire, conforme aux normes AFNOR P18-303.

3.2.3 Composition du béton

Pour sa détermination, on a procédé à l'analyse granulométrique du sable et des graviers utilisés. Les résultats obtenus sont reportés sur les tableaux (Voir Annexe).

La composition du béton est obtenue par la méthode de Faury. La courbe optimale:

$$y = A + 17.5\sqrt{D} + \frac{B}{R/D + 0.75}$$

$$A = 30, \quad \frac{B}{R/D - 0.75} \rightarrow 0, \quad \text{avec } D^{\max} = 20\text{mm}$$

$$y = 62.4\%$$

d'après les courbes granulométriques on obtient graphiquement:

$$S + C = 46\%$$

$$G_{3/8} = 9\%$$

$$G_{5/15} = 45\%$$

on obtient pour 1 m² de béton:

$$C = 350\text{kg}$$

$$S = 650\text{kg}$$

$$G_{3/8} = 177.3\text{kg}$$

$$G_{5/15} = 886.5\text{kg}$$

$$E = 212\text{l}$$

3.3 MATERIELS UTILISES

3.3.1 La chambre climatique

C'est l'appareil essentiel de nos essais au laboratoire. C'est une sorte d'étuve à la pression atmosphérique avec une humidité variable. Elle est constituée essentiellement d'une armoire munie d'un ventilateur permettant la circulation de l'air humide et d'un cadran pour le réglage de la température et de l'humidité désirées. La Fig.3.1 représente ce type de matériel.

3.3.2 L'acquisition de données

C'est un système à 60 voies pour thermocouples, il est piloté par un micro-ordinateur HP85B en utilisant le logiciel de niveau 1 et 2 comme indiqué sur la Fig.3.2. Les résultats sont donnés sur un ruban imprimé.

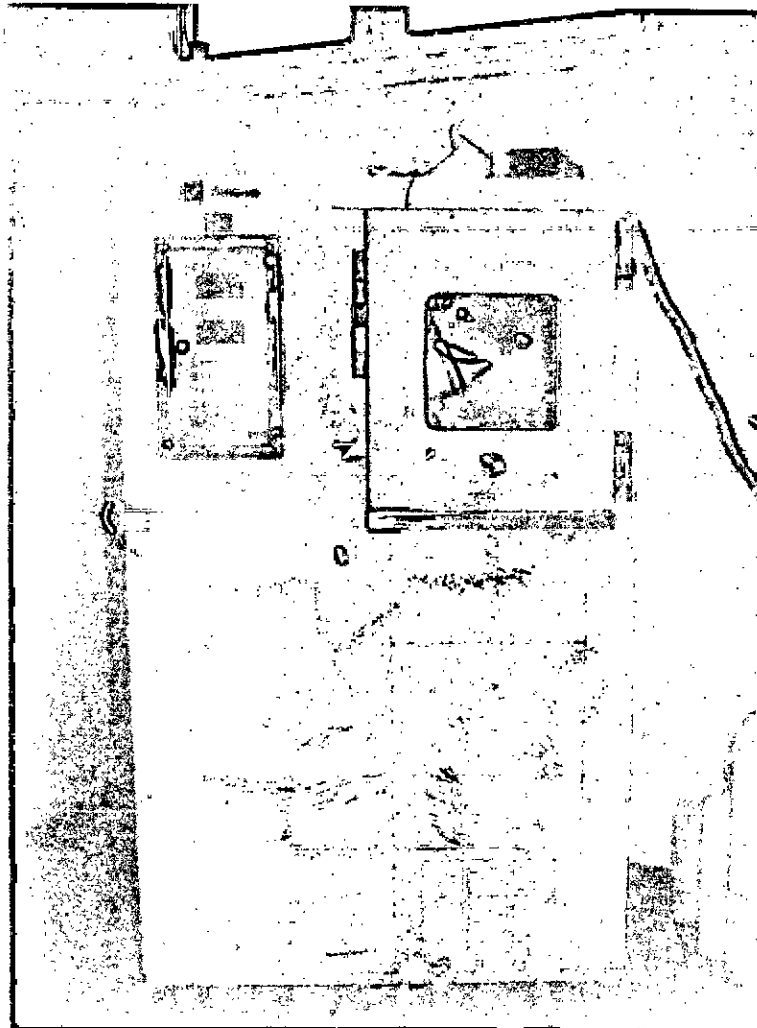


Fig.3.1 La chambre climatique

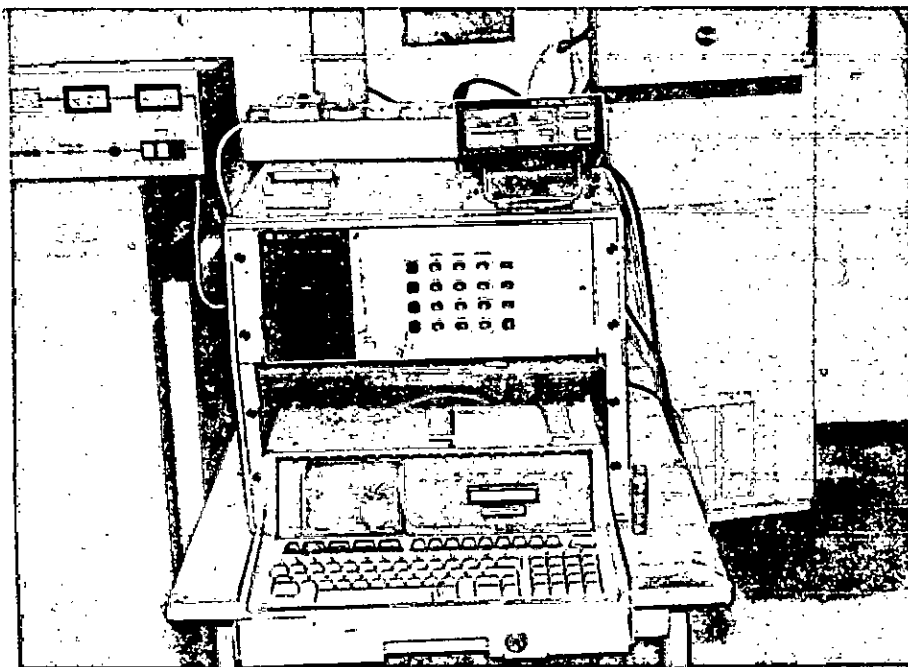


Fig.3.2 Système d'acquisition

3.3.3 Thermomètre digital

C'est un thermomètre à affichage numérique avec une précision de 1/100. Le capteur de température utilisé est un thermocouple (cuivre-constantin) dont la soudure chaude est noyée dans le béton en coulée.

3.3.4 Presse à béton

C'est une presse hydraulique avec un affichage numérique de la pression et dont la vitesse d'écrasement peut aller jusqu'à 9kN/s.

3.3.5 Bâche de conservation

Elle est utilisée pour une conservation des éprouvettes dans une eau ayant une température d'environ 20°C.

3.4 ESSAIS

Pour pouvoir étudier convenablement les effets du traitement thermique des essais, d'écrasement d'éprouvettes ont été effectués en compression ainsi qu'en traction. Les éprouvettes utilisées pour les essais de compression sont cubiques (7×7×7 cm) et le choix de cette dimension est d'avoir le maximum d'échantillons. De plus, des éprouvettes cylindriques (16×32 cm) pour le béton témoin ont été utilisées.

Le mode opératoire des essais est comme suit,

- *Première étape*

Quelques jours avant l'essai, les granulats sont lavés convenablement et séchés dans une étuve. Il sont ensuite retirés avant l'essai pour une utilisation à froid. Les moules sont nettoyés et huilés.

- *Deuxième étape*

Le jour de l'essai, une gâchée de béton, est préparée. Le sable, le gravier et le ciment, sont placés dans un malaxeur à axe vertical après les avoir pesés, tout en veillant à mettre le ciment au milieu pour un meilleur malaxage. La quantité d'eau mesurée est versée progressivement. La plasticité du béton est alors mesurée en utilisant le cône d'Abrams (pour un béton plastique, l'affaissement varie entre 6 et 8cm).

- *Troisième étape*

La mise en place du béton dans les moules, s'effectue en utilisant un vibreur adéquat. Mais vu les petites dimensions du moule, la vibration se fait généralement sur les parois du moule. Pour le béton témoin, une éprouvette cylindrique prévue.

- *Quatrième étape*

Elle consiste à prendre les moules et les mettre à l'intérieur de la chambre climatique tout en veillant à relever la température du béton frais à l'aide d'un thermomètre électronique. La mise en place des thermocouples dans les moules est effectuée afin de suivre l'évolution des températures dans le béton ainsi que dans l'enceinte climatique à l'aide du système d'acquisition de données. La chambre climatique est mise en marche avec un réglage approprié pour le cycle désiré avec une humidité proche de la saturation. Le système d'acquisition est réglé de manière à ce qu'il nous donne des résultats à des intervalles réguliers. Il faut veiller à surveiller le cycle de traitement jusqu'à sa fin.

- *Cinquième étape*

A la fin du traitement, la chambre climatique est éteinte et laissée refroidir pendant 30 minutes avant l'ouverture de la porte de l'enceinte pour atteindre une température de 20°C. A ce moment là, le coffrage est enlevé (Fig.3.3), et un écrasement en compression de trois éprouvettes est effectué.

Les autres éprouvettes sont maintenues 24 heures dans la chambre d'essai. Le lendemain, elles sont placées dans un bassin à conservation à 20°C jusqu'au jour de leurs écrasement. Les écrasements du béton traité sont effectués en fin de traitement, à 1, 3, 14, 28 et 90 jours, la vitesse d'écrasement est de 0.4kN/s.

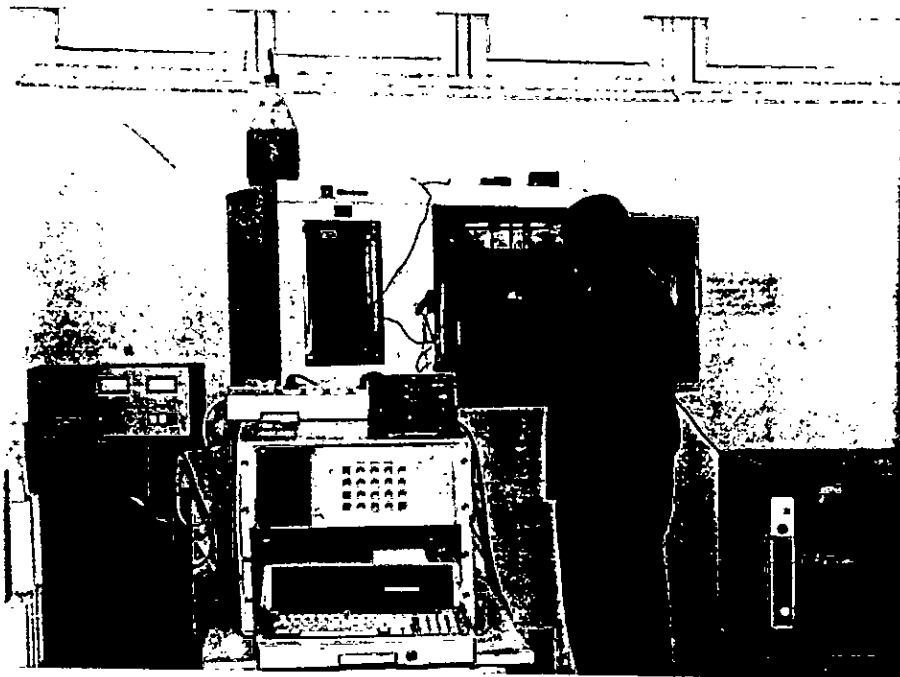


Fig.3.3 Expérience en cours

Chapitre

4

Résultats et Discussions

4.1 LA RESISTANCE DES BETONS EN COMPRESSION

4.1.1 Résistance en compression du béton témoin

D'après le règlement (CCBA68), la résistance prévue à 28 jours et pour un dosage de 350kg/cm^3 est de 270bars. Pour le béton témoin conservé à 20°C , confectionné à base du ciment de Raïs-Hamidou, les résultats obtenues sont données au Tableau.4.1:

Tableau.4.1 Valeurs des résistances en compression du béton témoin

Age	1	7	14	28	90
résistance	72.3	183	215	266	279.6
σ_j (bars)					

D'après le règlement, environ 70% de la résistance à 28j est atteinte au bout du 7ème jour. La résistance à long terme peut être majorée de 10%.

4.1.2 Justification de la conservation initiale

Trois cycle de traitement ont été choisi, où on fait varier uniquement la durée de pré-prise qui varie de 0 à 3 heures. Les cycles seront caractérisés par trois chiffres:

Le premier: durée de pré-prise.

Le deuxième: durée de montée en température.

Le troisième: durée du palier.

Les résultats sont portés sur le Tableau.4.2:

Tableau.4.2. La résistance en compression en fonction de la durée de conservation initiale

N° essai	cycle étudié	R(0j)	R(3j)	R(7j)	R(14j)	R(28j)	R(90j)
1	0-2-4	46	83.2	147.5	168.4	187	217.5
2	1-2-4	53.76	74	158.3	175.8	221	238
3	3-2-4	67.9	121	169.2	195.12	237.4	253.6

R_j est la moyenne arithmétique de l'écrasement des trois éprouvettes. La température du palier isotherme est de 80°C. Les chutes de résistance par rapport au béton témoin sont données au Tableau.4.3:

Tableau.4.3. Chute des résistances par rapport au béton témoin (Ciment de Rais Hammidou)

durée de pré-prise (h)	R28(traité)/R28(témoin)	chute de résistance
0	70%	30%
1	83%	17%
3	89%	11%

D'après ces résultats, on remarque que la résistance en fin de traitement R(0j) et après 28jours sont minimales pour une conservation initiale nulle. Les chutes de résistance sont importantes pour une pré-prise nulle, elles sont, cependant moindres (11%) pour une pré-prise de 3h.

D'après les résultats des essais (Fig.4.1), on remarque que la phase de conservation initiale se justifie nettement, surtout pour un gradient élevé de température. Dans le béton frais sortant du malaxeur, l'eau est à l'état libre, c'est à dire non combinée au ciment.

Au fur et à mesure que l'hydratation s'effectue, l'eau se combine au ciment mais il restera toujours de l'eau libre. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue à l'intérieur du béton a tendance à s'évaporer, et la pression de vapeur qui en résulte, à fissurer le béton. Même si elle ne s'évapore pas, l'eau va créer une poussée à l'intérieur de la pâte de ciment car sa dilatation volumique est dix fois supérieure.

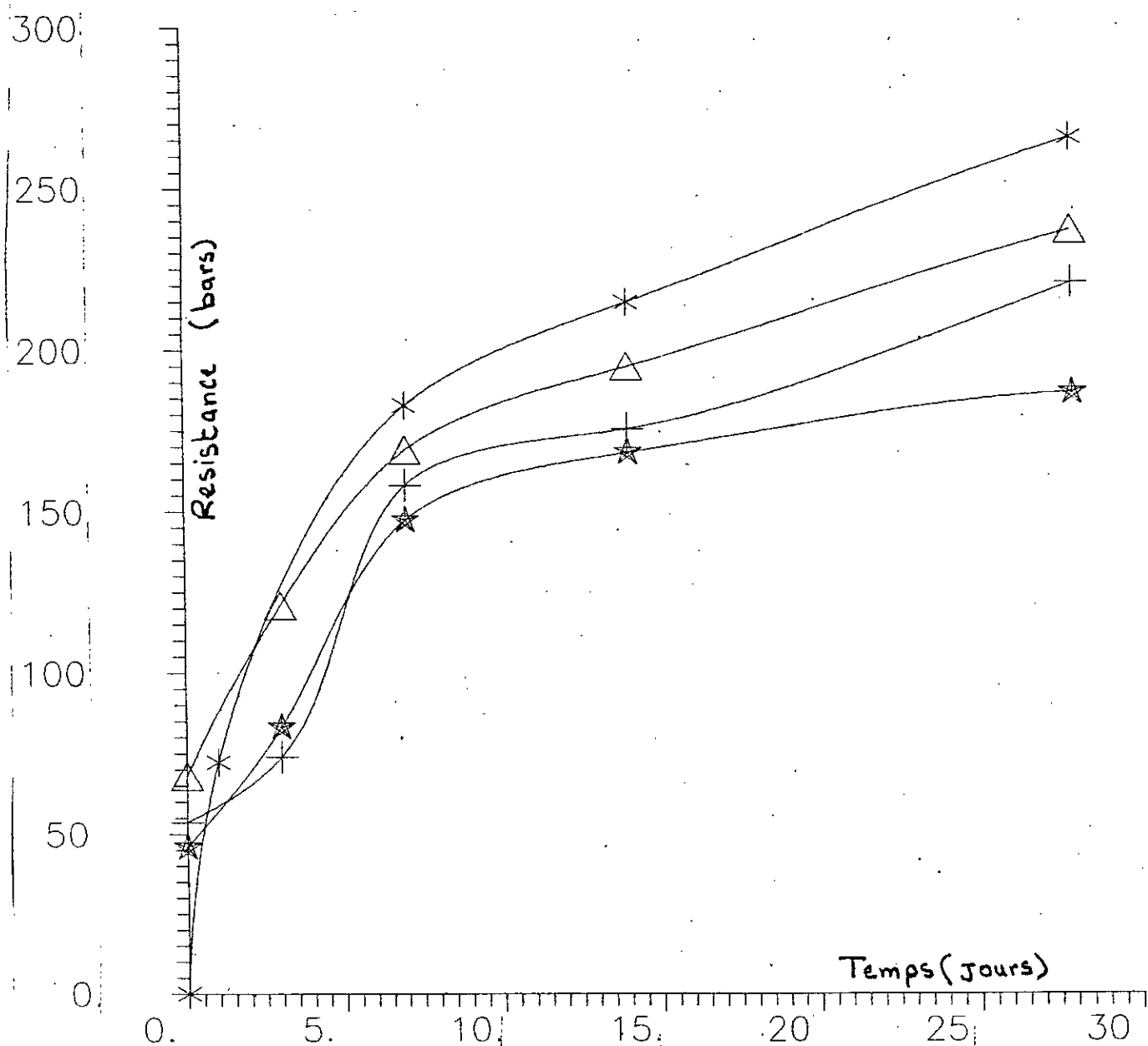
Donc le rôle de la pré-prise, par un maintien du béton à température modérée, légèrement progressive, a donc pour but de limiter à une valeur admissible les phénomènes précédents. La valeur admissible sera atteinte lorsque la résistance en traction acquise par la pâte sera suffisante pour s'opposer aux expansions de l'eau et de l'air.

Ces résultats sont dans l'ensemble confirmés par l'étude menée par Jarocki [11] qui donne les baisses de résistances à 28 jours exprimées en % de R28j du témoin conservé dans des conditions normales (Fig.4.4).

Les essais portent sur un ciment Portland de caractéristique moyenne.

Tableau.4.4. Chute de résistance en fonction de la durée de pré-prise [11]

durée de pré-prise (h)	chute de résistances (%)
0	40 à 50
1.5	30 à 35
3	20 à 25
5 à 7	0



- ★ Pré-prise: 0 heure
- + Pré-prise: 1 heure
- Δ Pré-prise: 3 heures
- * Béton témoin

Fig.4.1. Influence de la durée de conservation initiale sur les résistances à long terme .

4.1.3 Influence de la vitesse d'élévation de température sur la résistance

L'influence de la vitesse d'élévation de la température sur la résistance a été étudiée en choisissant deux vitesses de montée en température. Les durées de pré-prise et du palier isotherme restent fixes. La température du palier isotherme est de 80°C. Les résultats sont donnés par le Tableau.4.4 suivant:

Tableau.4.4 Résistance du béton traité pour deux vitesses d'élévation de température

N° essai	cycle	vitesse de montée (°C/h)	résistance Roj	R28j	baisse par rapport au témoin
4	2/2/3	27.5	56.3	196	26%
5	2/4/3	14	59.5	27.8	15%

Il est à noter qu'un chauffage brutal du béton entraîne une qualité et une résistance plus faible par rapport au béton non traité. Dans notre cas, une chute de 26% de la résistance a été enregistrée pour une vitesse de montée de 27.5°C/h. Par contre, pour une vitesse plus lente la chute n'est que de 15% pour un béton à 28jours, comme indiqué sur les courbes de la Fig.4.2.

Ceci nous amène à conclure que la phase de montée en température est d'une importance capitale pour le traitement thermique, donc plus le gradient thermique du chauffage est lent meilleure est la résistance.

Même après une période de pré-prise correspondant à la durée de prise du ciment le béton possède une structure peu résistante, cependant un chauffage brutal lui modifie les propriétés physiques, car les contraintes issues des gradients thermiques dues à l'expansion très importante de l'eau et l'air, qui apparaissent dans la masse modifient la structure et la densité.

Une vitesse élevée de montée en température provoque des désordres dans la structure du béton induisant la formation de micro-fissures ou de décollements de granulats.

Mamillan [12] confirme ces résultats et il constate qu'au delà de 20°C l'accroissement de la vitesse de chauffage n'entraîne plus qu'une augmentation modérée de la résistance relative. Il a comparé l'évolution des résistances en compression pour deux vitesses d'élévation.

Vitesse lente: 10°C/h

monté de 20°C à 70°C, il obtient une chute de 10% de la résistance à 700jours.

Vitesse rapide: 30°C/h

montée de 20°C à 70°C, il obtient une chute de 23%.

D'après Papadakis [7], la liaison peut être faite entre le gradient de la vitesse de montée G_m et l'épaisseur de la pièce à traiter, pour cela, la vitesse sera inversement proportionnelle par rapport à l'épaisseur.

D'après Darcement [CERIB],

$$G_m = \frac{8}{e + 0.25}$$

ce qui nous donne: 14.5°C/h pour $e = 30\text{cm}$

et: 23°C/h pour $e = 10\text{cm}$

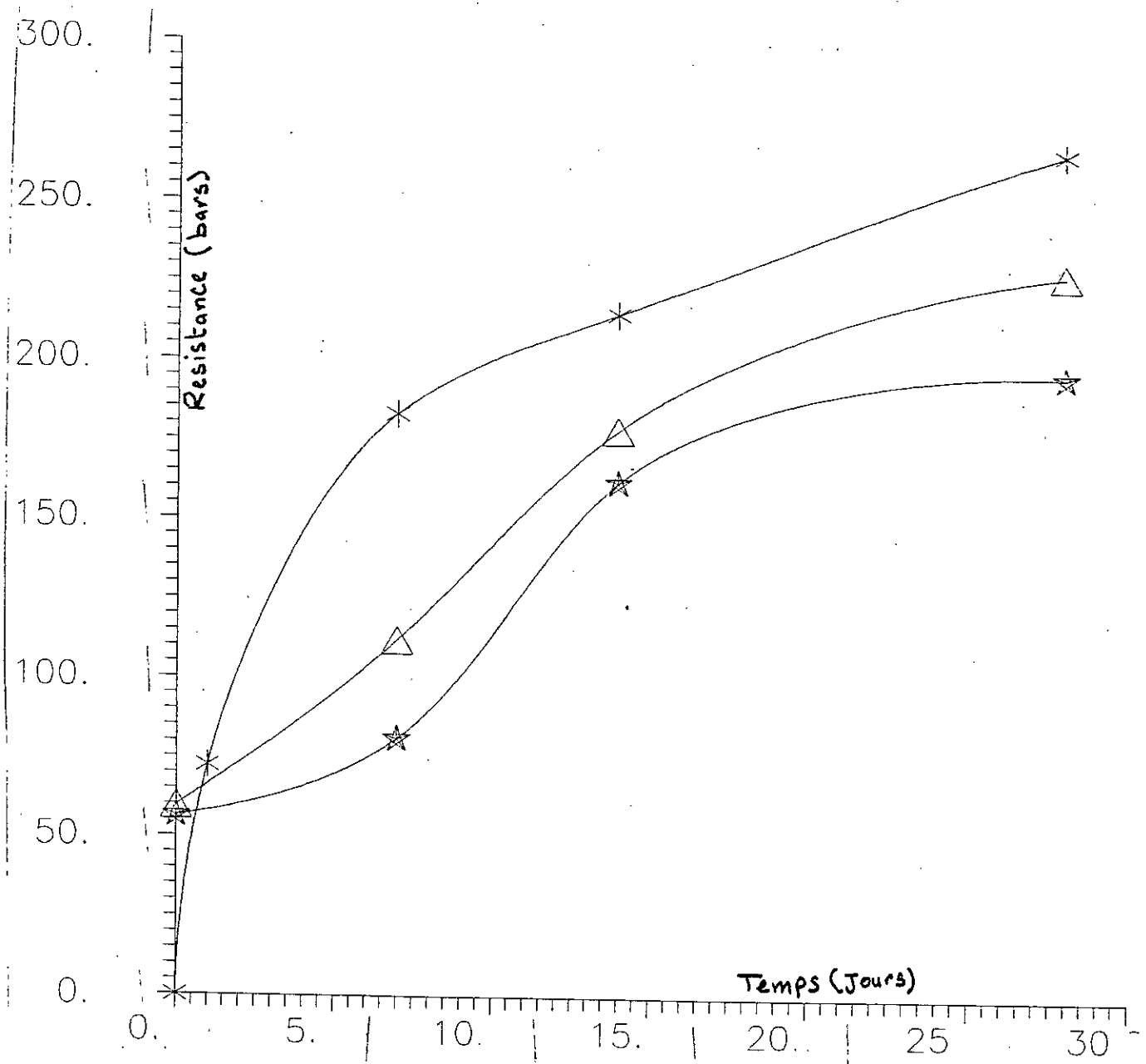
Il est à noter que la vitesse de montée en température n'exerce pas une grande influence sur le traitement des éléments minces, puisque le gradient thermique interne y reste toujours faible.

4.1.4 Effet du palier isotherme

Pour pouvoir étudier cette phase, trois essais ont été réalisés avec des durées de température de maintien différentes. Les résultats sont présentés dans le Tableau.4.5, ainsi que la Fig.4.3 nous donne un aperçu de l'allure des courbes obtenues sur l'influence du palier isotherme.

Tableau. 4.5 Résultats des résistances avec la variation du palier isotherme

N° essai	cycle	Roj (bars), fin de traitement	R90j	Chute par rapport au témoin à 90j
9	2/3/4	62	244.2	12%
7	2/3/2	47	208.8	25%
8	2/3/0	13	186	34%
9	2/3/6	Non réalisé	251.4	10%



- ★ Béton traité à $G_m = 27.5^\circ\text{C/h}$
- Δ Béton traité à $G_m = 14^\circ\text{C/h}$
- * Béton témoin

Fig.4.2. Influence de la vitesse d'élévation de la température sur la résistance

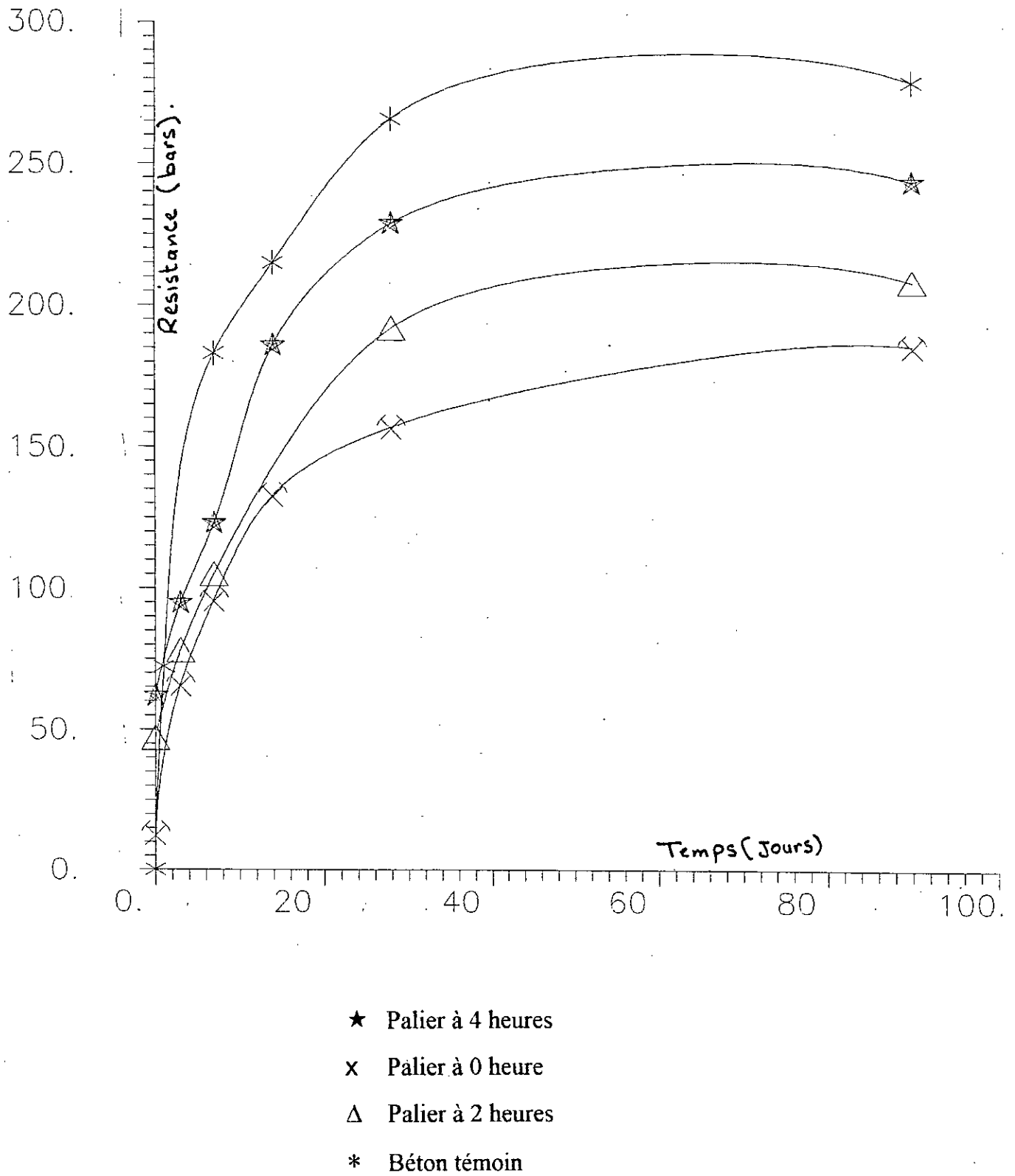


Fig.4.3. Influence de la durée du palier isotherme

D'après ces résultats, on constate que la résistance en compression augmente avec la durée du palier isotherme, la chute est faible pour un béton traité pendant 4h à 80°C, elle est de 12% par rapport au même béton non traité, par contre elle est très importante pour un palier nul, ceci explique que la durée de maintien en température isotherme est obligatoire, parce que avec une résistance de 13bars en fin de traitement l'élément ne peut être manipulé, et le traitement thermique perd toute son utilité.

Néanmoins, les essais avec un palier isotherme de 6h à 80°C, n'ont pas augmenté la résistance d'une manière sensible, cela nous a conduit à conclure que la durée du palier isotherme ne peut être maintenu indéfiniment, et qu'après une certaine durée de traitement, l'accroissement de la résistance en fonction du temps ($\Delta R/\Delta t$) diminue. De la , il n'est plus intéressant au point de vue économique de fournir autant d'énergie au béton.

4.1.5 L'effet de la température du palier isotherme sur la résistance

Pour étudier l'effet de la température, on a réalisé un essai avec un palier d'une température de 60°C. Le cycle choisi était de 2-3-4 pour pouvoir le comparer à celui de 80°C, les résultats sont donnés au Tableau.4.6 et à la Fig.4.4.

Tableau. 4.6 Effet de la température du palier isotherme

essai	cycle	T (°C)	Roj	R90j	R28j
6	2-3-4	80	62	244.2	225.6
11	2-3-4	60°C	49	237.6	204

D'après les résultats, on constate que plus la température du palier est élevée plus grande sera la résistance en fin de traitement. Néanmoins, ces deux résistances sont proches à longue durée. Mais ce qui intéresse l'industrie c'est la résistance en fin de traitement qui est plus grande à 80°C cela est du à l'accélération du phénomène d'hydratation du ciment.

Il faut noter que le ciment Portland, ne peut être chauffé au delà de 80°C si on veut éviter des pertes de résistances exagérées.

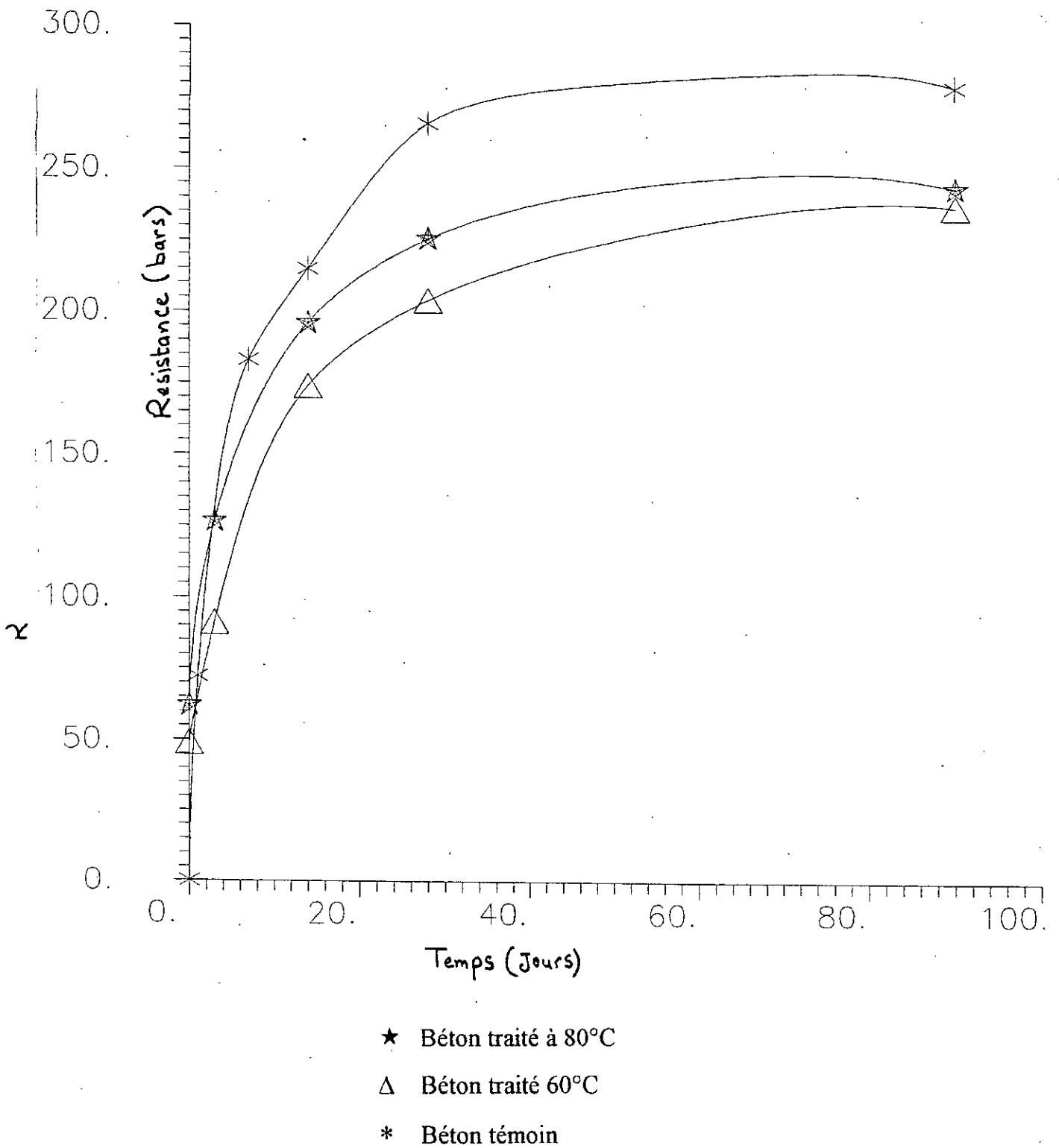


Fig.4.4. Influence de la température maximale sur la résistance

4.1.6 Préchauffage du béton

Ce procédé est peu utilisé en Algérie, par contre il est souvent utilisé dans les pays froids. Le procédé comme on la vu consiste à la mise en place dans l'étuve d'un béton chaud, dans le but d'accélérer d'avantage le durcissement ou de faire une économie d'énergie en réduisant la température de chauffage.

Au laboratoire, deux essais de préchauffage ont été effectués. Le premier essai le béton chauffé à 32°C en utilisant une eau de gâchage chaude à 65°C, avec le deuxième essai il était impossible d'obtenir du béton préchauffé au delà de 30°C uniquement en utilisant l'eau chaude de gâchage, pour cela un chauffage des granulats, à 60°C était indispensable. Le béton obtenu avait une température de 41°C.

Le seul problème rencontré durant cet essai était l'ouvrabilité du béton, qui devient ferme avec la chaleur. Les résultats des essais sont donnés par le tableau suivant,

essai	cycle	préchauffage	Roj	R28j	R90j
11	1-2-4	32°C	67.6	—	257.0
12	1-2-4	41	78.4	—	248.6

D'après les résultats on constate que les résistances des deux bétons préchauffés sont proches à 90j, ceci nous conduit à affirmer que: la température de préchauffage n'a pas d'influence sur l'évolution de la résistance à long terme. Par contre, les résultats en fin de traitement sont meilleurs que pour un béton non préchauffé. On peut déduire qu'en préchauffant le béton, on réduit la durée de traitement, et éviter la phase de conservation initiale.

Le procédé du préchauffage dans l'industrie pose un certain problème à l'ouvrabilité. Cette situation engendre la nécessité d'un contrôle stricte sur le système utilisé pour le préchauffage, sur le transport et la mise en oeuvre du béton.

Chapitre

5

La Chaleur d'Hydratation et l'Effet de la Température

5.1 INTRODUCTION

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables, s'hydratent. Il se produit une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables, la formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produit la prise.

La réaction d'hydratation des constituants du ciment est exothermique. A un instant donné, la quantité de chaleur dégagée est donc une image de l'état d'avancement des différentes réactions chimiques. Or, avec le traitement thermique, la température joue un rôle à la fois thermodynamique et cinétique.

- Thermodynamique parce qu'elle change la nature et la stabilité des hydrates.
- Cinétique parce qu'elle accélère les réactions d'hydratation.

5.2 ESSAI DE CALCUL DE LA CHALEUR D'HYDRATATION

5.2.1 But de l'essai

Le but du test est de mesurer la chaleur d'hydratation d'un ciment de Soul-El-Ghouzlane à la température normale de 23°C, et voir l'effet de la température à 60°C sur la chaleur d'hydratation.

L'essai de la chaleur d'hydratation est assez délicat, parce qu'il nécessite une grande précision. Pour les mesures de cette chaleur, la méthode du calorimètre à

dissolution est utilisé conformément à la norme ASTM.186-86 [16], qui est destinée particulièrement aux ciments Portlands.

La Fig.5.1 montre une représentation schématique du calorimètre.

5.2.2 Principe de la méthode de dissolution

Elle s'effectue selon les étapes suivantes:

1° dissolution du ciment anhydre par l'acide contenue dans le calorimètre, dont la capacité calorifique est C. La dissolution est exothermique et provoque un échauffement égale à θ .

2° hydratation puis dissolution d'une quantité de ciment, après conservation pendant une durée t à température constante.

3° en s'aidant du principe de l'état initial et de l'état final on écrit que la chaleur Q dégagée par l'hydratation pendant une durée t est: $Q = q_i - q_f$.

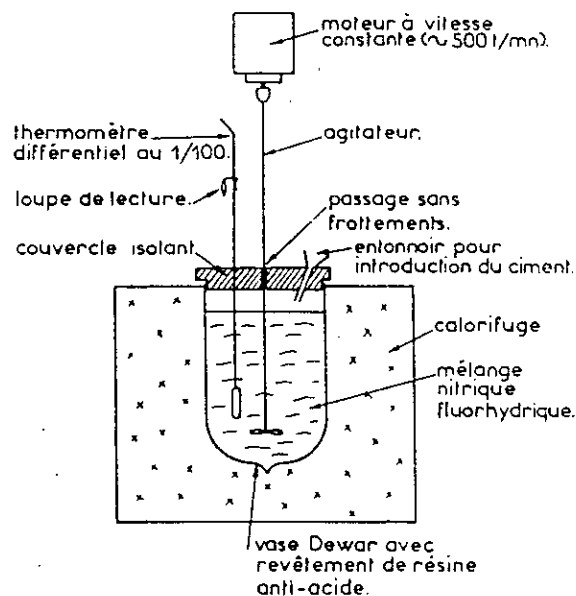


Fig. 5.1 Principe du calorimètre

5.2.3 Mode opératoire

5.2.3.1 Réactifs

Les réactifs utilisés sont:

- a. l'acide fluorhydrique (F.H) pur
- b. l'acide nitrique 2N (préparé en grande quantité)
- c. une protection (paraffine)
- d. l'oxyde de zinc (ZnO).

L'oxyde de zinc avant sa conservation sera chauffé à 900-950°C pendant une heure, puis refroidi dans un dessiccateur, avant de faire passer à travers un tamis de 150 μ m. Immédiatement avant la détermination de la capacité calorifique, 7 grammes du ZnO préparé seront chauffés pendant 5min à 900-950°C, refroidis à la température ambiante dans un dessiccateur, et pesés avec précision avant d'être introduits dans le calorimètre.

5.2.3.2 Capacité calorifique de l'appareillage

C'est le nombre de calories ou joules nécessaire pour augmenter la température du calorimètre avec le contenu, de 1°C.

- *Principe*

Pour déterminer la capacité calorifique du système, on mesure l'augmentation de la température corrigée, obtenu par la dissolution de 7g de ZnO dans le mélange d'acide spécifié.

- *Première étape*

On transfère approximativement 400g de HNO₃ (2N) dans le vase et on laisse refroidir à la plage de température inférieure du thermomètre de Beckman (*environ 5°C au dessous de la température ambiante*) on ajoute 8ml d'acide FH (d=1.15), après on doit rajouter suffisamment de HNO₃ (2n) pour ramener le poids total de la solution à 425g.

On assemble ensuite le calorimètre et on met le moteur en marche. On doit s'assurer que les lames et la tige du malaxeur ne touchent pas le thermomètre, les parois ou le fond du vase, ou le bouchon de liège. La partie inférieure de la tige de l'entonnoir doit se trouver à environ 6mm au dessus de la surface inférieure du bouchon de liège et au moins à 12mm au dessus de la surface du liquide.

La partie supérieur du thermomètre de Beckman doit être au moins à 38mm au-dessous de la surface du liquide. On place le thermomètre à la même position durant toute l'expérience. Après une période initiale de malaxage de 20minutes afin de permettre au système d'avoir une répartition uniforme de la température, on relève ensuite la température ambiante à 0.1°C près, la température de l'acide à 0.001°C près, le temps, et tout de suite après, on introduit le ZnO préparé précédemment à travers l'entonnoir avec un débit constant. Le temps d'introduction du ZnO doit être compris entre un et deux minutes.

- *Deuxième étape*

La température, à 0.001°C près, est relevée à 20min et 40min après avoir commencé l'introduction de l'échantillon. La période des vingts premières minutes correspond à l'augmentation de la température non corrigée, durant la période de dissolution. La période des 20min suivantes est la période de variation, et la différence de température entre 20 et 40min est la correction à rajouter ou à retrancher à l'élévation de la température non corrigée, selon que la température du calorimètre augmentée ou diminué dans cette période de variation.

- *Troisième étape*

On corrige l'élévation de la température comme suit:

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20})$$

où

R_0 est l'élévation de la température observée (en °C)

θ_{20} est la température du calorimètre à la fin de la période de dissolution

θ_0 est la température du calorimètre lors de l'introduction de l'échantillon

R est l'élévation de la température corrigée

θ_{40} est la température du calorimètre à la fin de la période de variation.

- *Quatrième étape*

La capacité calorifique du calorimètre est calculée par la formule suivante:

$$C = \{W [256.1 + 0.1(30 - t) + 0.12(T - t)]\} / R$$

où

C est la capacité calorifique (cal/°C)

W est le poids de ZnO (g)

t est la température finale du calorimètre θ_{20} plus la température correspondante au zéro du thermomètre de Beckman (°C)}

T est la température de ZnO (température ambiante) lorsqu'il est introduit dans le calorimètre

R est l'élévation de la température non corrigée.

- *Cinquième étape*

On doit veiller à ce que les parois de l'entonnoir ne contiennent plus de poudre de ZnO autrement le test sera refait.

- *Sixième étape*

On détermine de nouveau la capacité calorifique du calorimètre dans les cas suivants:

- lorsque le thermomètre de Beckman est ré initialisé
- lorsque l'enduit (protection) est refait au thermomètre, au malaxeur ou au vase
- lorsqu'un nouveau thermomètre, malaxeur ou vase est utilisé
- lorsqu'une nouvelle préparation d'acide est utilisée
- lorsque, selon le jugement de l'opérateur, le besoin est ressenti.

5.2.3.3 Procédé de détermination de la chaleur d'hydratation

- *Préparation de la pâte de ciment*

Avant la préparation de la pâte, le ciment et l'eau de gâchage sont portés à une température ambiante constante (23°C à 1.7°C près). On mélange avec un malaxeur pendant 5min 150g de ciment avec 60ml d'eau distillée. On partage des portions plus ou moins égales de la pâte dans 4 fioles en plastiques, remplit jusqu'à

environ 13mm du sommet, puis les conserver à $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'heure de l'expérience.

- *Chaleur de dissolution du ciment sec*

On détermine la chaleur de dissolution de l'échantillon de ciment sec de la même manière que pour la détermination de la capacité calorifique, mais on utilise un échantillon de 3g (à 0.001g près) de ciment sec (la température de l'échantillon sera identique à celle de l'ambiance quand l'échantillon est introduit dans le calorimètre). On prend un échantillon de ciment représentatif.

Le résultats est calculé sur la base du poids brûlé. Le test de la chaleur de dissolution sur le ciment sec est fait juste avant celui de l'échantillon partiellement hydraté à 7jours.

- *Préparation de l'échantillon partiellement hydraté pour le test de la chaleur de dissolution*

A l'âge spécifique du test, on prend une fiole de l'échantillon partiellement hydraté pendant la période initiale de malaxage du calorimètre. L'échantillon est retirée de la fiole (en déchirant cette dernière) et moulu à l'aide d'un pilon jusqu'à ce que tout le matériau passe à travers un tamis de $850\mu\text{m}$, puis on le met rapidement dans une bouteille bien fermée, afin de minimiser l'action de CO_2 ou la perte d'humidité de l'échantillon.

- *Chaleur de dissolution du ciment partiellement hydraté*

Pour la chaleur de dissolution de l'échantillon partiellement hydraté, on suit le même procédé que pour le ciment sec en utilisant un échantillon calorimétrique de $4.18 \pm 0.05\text{g}$ du ciment partiellement hydraté, pesé à 0.001g près.

- *Perte au feu*

Immédiatement avant et après que l'échantillon calorimétrique ne soit pesé, on pèse un échantillon de quantité similaire dans un pot en platine pour la détermination de la perte au feu, la valeur à utiliser sera la moyenne des deux tests.

On brûle le ciment sec à $900-950^{\circ}\text{C}$ pendant au moins une heure et demi. On place immédiatement le pot contenant l'échantillon dans un dessiccateur et on laisse refroidir à la température ambiante; ensuite on pèse rapidement le pot. Pour

la détermination de la perte au feu du ciment hydraté, d'abord on sèche l'échantillon dans un four à 100-110°C pendant une heure; ensuite on le met dans un four à 900-950°C pendant la nuit, ou sur un brûleur adéquat pendant au moins cinq heures.

Réduire le poids de l'échantillon de ciment qui a été introduit dans le calorimètre à la base du poids brûlé pour servir au calcul final comme suit:

$$W_i = W.A/B$$

où

W_i est le poids de l'échantillon calorimétrique, sur la base du poids brûlé (g)

A est le poids de l'échantillon similaire brûlé (g)

B est le poids de l'échantillon similaire avant d'être brûlé (g)

W est le poids de l'échantillon calorimétrique (g).

5.2.4 Résultats des calculs

5.2.4.1 Mesure de la capacité calorifique de l'appareillage

Poids de l'échantillon ZnO:	7.0001g
Poids de ZnO calciné:	6.9665g
Température ambiante:	T = 26°C.
Lecture sur le thermomètre Beckman	$\theta_0 = 0.820^\circ\text{C}$
	$\theta_{20} = 5.055^\circ\text{C}$
	$\theta_{40} = 5.075^\circ\text{C}$

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 = 4.235^\circ\text{C}$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) = 4.215^\circ\text{C}$$

$$W_i = 6.9665\text{g et } t = 25.055^\circ\text{C}$$

d'où:

$$C = \{W_i [256.1 + 0.1(30 - t) + 0.12(T - t)]\} / R$$

$$C = 424.28 \text{ cal}/^\circ\text{C}$$

- *Chaleur de dissolution du ciment sec*

Elle est donnée par la formule suivante:

$$H_1 = R.C/W_i - 0.2 (T - t_d)$$

où

H_1 est la chaleur de dissolution du ciment sec (cal/g)

R est l'élévation de la température corrigée

C est la capacité calorifique (cal/°C)

W_i est le poids de l'échantillon sur la base de poids brûlé (g)

T est la température ambiante lorsque l'échantillon est introduit (°C)

t_d est la température finale du calorimètre à la fin du test sur le ciment sec (°C).

Poids de l'échantillon:	3.0006g
Poids brûlé:	2.8913g
$W_i = W.(A/B) = 3.0006.(2.8913/3.0006) =$	2.8913g
Température ambiante:	$T_a = 27^\circ\text{C}$
Lectures:	$\theta_0 = 0.64^\circ\text{C}$
	$\theta_{20} = 4.220^\circ\text{C}$
	$\theta_{40} = 4.263^\circ\text{C}$

$$H_1 = (R.C/W_i) - 0.2 (T - t_0)$$

$$R = 3.53^\circ\text{C}$$

$$t_d = 25.22^\circ\text{C}$$

d'où

$$H_1 = 517.65 \text{ cal/g}$$

5.2.4.3 Chaleur de dissolution du ciment partiellement hydraté

Elle est donnée par la formule suivante:

$$H_2 = RC/W_i - 0.4 (T - t_h) - 0.3 (t_d - t_h)$$

où

H_2 est la chaleur de dissolution du ciment partiellement hydraté (cal/g)

R , C , W_i , T , t_h ont les mêmes définitions que précédemment, mais pour le ciment partiellement hydraté,

t_h est la température finale du calorimètre à la fin du test sur le ciment partiellement hydraté ($^{\circ}\text{C}$).

- Conservation des fioles à 23°C

— Essai à 1 jour:

$$T_a = 27.5^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Lectures: } \theta_0 = 0.612^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{20} = 3.976^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{40} = 4.280^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Poids de l'échantillon: } W = 4.18\text{g}$$

$$\text{Poids de l'échantillon brûlé: } 2.6186\text{g}$$

$$H_2 = (R.C/W_i) - 0.4 (T - t_h) - 0.3 (t_d - t_h)$$

$$R = 3.06^{\circ}\text{C}$$

$$t_d = 25.22^{\circ}\text{C}$$

$$t_h = 25.47^{\circ}\text{C}$$

d'où

$$H_2 (1j) = 495.05 \text{ cal/g}$$

— Essai à 28 jours:

$$T_a = 26^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Poids } W_i = 3.006\text{g}$$

$$\text{Lectures: } \theta_0 = 0.843^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{20} = 4.126^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{40} = 4.230^{\circ}\text{C}$$

$$R = 3.173^{\circ}\text{C}$$

$$t_d = 25.22$$

$$t_h = 24.12^{\circ}\text{C}$$

$$\text{d'où } H_2 (28j) = 446.77 \text{ cal/g}$$

- *Conservation des fioles à 60°C*

Pour voir l'effet de la température sur la chaleur d'hydratation nous avons conservé les fioles dans un bain à une température de 60°C. Puis, on effectue les essais à un jour et 28 jours et on obtient les résultats suivants:

— Essai à 1 jour:

$$T_a = 25^\circ\text{C}$$

$$\text{Poids de l'échantillon hydraté: } 4.18\text{g}$$

$$\text{Poids brûlé: } 2.82\text{g}$$

$$\text{Lectures: } \theta_0 = 0.640^\circ\text{C}$$

$$\theta_{20} = 4.015\text{g}$$

$$\theta_{40} = 4.214^\circ\text{C}$$

$$R_0 = 3.375^\circ\text{C}$$

$$\text{L'échauffement corrigé: } R = 3.176^\circ\text{C}$$

$$t_d = 25.22^\circ\text{C}$$

$$t_h = 23.01^\circ\text{C}$$

d'où,

$$H_2 (1j) = (R.C/W_i) - 0.4(T - t_h) - 0.3(t_d - t_h) = 477.85 - 0.796 - 0.663$$

$$\text{soit } H_2 (1j) = 476.38 \text{ cal/g}$$

— Essai à 28 jours:

$$T_a = 27^\circ\text{C}$$

$$\text{Poids de l'échantillon brûlé: } 3.017\text{g}$$

$$\text{Lectures: } \theta_0 = 0.682^\circ\text{C}$$

$$\theta_{20} = 3.994^\circ\text{C}$$

$$\theta_{40} = 4.160^\circ\text{C}$$

$$t_h = 25.23^\circ\text{C}$$

$$t_d = 25.22^\circ\text{C}$$

$$R = 3.146^\circ\text{C}$$

d'où,

$$H_2 (28j) = 441.71 \text{ cal/g}$$

5.2.4.4 Calcul de la chaleur d'hydratation

Elle est donnée par [16]:

$$H = H_1 - H_2 - 0.1 (t_n - 25.0)$$

où

H est la chaleur d'hydratation du ciment brûlé (cal/g)

H_1 est la chaleur de dissolution du ciment sec

H_2 est la chaleur de dissolution du ciment partiellement hydraté

t_h est la température du calorimètre à la fin du test sur le ciment partiellement hydraté (°C).

5.3 RESULTATS

Le ciment utilisé est celui de Sour-El-Ghozlane. Le calorimètre est protégé par de la paraffine ainsi que le zéro du thermomètre (Beckman) était réglé à environ 6°C au-dessous de l'ambiante.

$$H = H_1 - H_2 - 0.1(t_h - 25)$$

Pour le ciment conservé à 23°C et à 28 jours on a:

$$H = 517.65 - 446.77 - 0.1(24.12 - 25)$$

on obtient:

$$H (28j) = 70.96 \text{ cal/g}$$

Le reste des résultats nous le résumons dans le tableau suivant:

Echéance	Ciment de Sour-El-Ghozlane	
	23°C	60°C
1j	22.55	41.46
28j	70.96 cal/g	75.91

5.4 DISCUSSION DES RESULTATS

Nous venons de constater qu'une température de conservation élevée accélère les réactions d'hydratation, donc augmente la chaleur dégagée, surtout aux courtes échéances. Néanmoins, on ne doit pas en conclure pour autant que la chaleur totale, c'est à dire celle dégagée au bout d'un temps très long, et elle aussi, nécessairement augmentée.

Ceci est vrai, puisqu'on a vu que les résistances en compression à long terme des bétons chauffés sont moindres par rapport au béton témoin. D'après Allègre [17], la thermodynamique donne un moyen détourné pour savoir qu'elle est l'influence de la température sur la chaleur d'hydratation. En effet, les équations de Kirchhoff relient les variations de la chaleur de réaction q en fonction de la température T , à celles de la capacité calorifique C des corps en réaction:

$$\frac{dq}{dT} = C_f - C_i$$

C_i et C_f désignent respectivement la capacité calorifique de la pâte à ciment en fin d'hydratation et avant l'hydratation. Or il semble bien que la chaleur spécifique des produits hydratés soit plus faible que la somme des chaleurs spécifiques du ciment et de l'eau qui les composent, il en résulte que:

$$C_f - C_i < 0 \Rightarrow \frac{dq}{dT} < 0$$

La chaleur totale d'hydratation doit donc diminuer quand la température s'élève. Cette influence a été étudié par Gautier, avec un CPA400, placé dans un calorimètre à trois températures différentes, on voit que le dégagement de chaleur est très influencé par la température (Fig.5.1).

à 40°C	soit	5cal/g.h	après cinq heures
à 20°C	soit	2cal/g.h	après dix heures
à 10°C	soit	1cal/g.h	après vingt heures

On vérifie sensiblement que la vitesse de réaction est multipliée par deux chaque fois que la température augmente de 10°C.

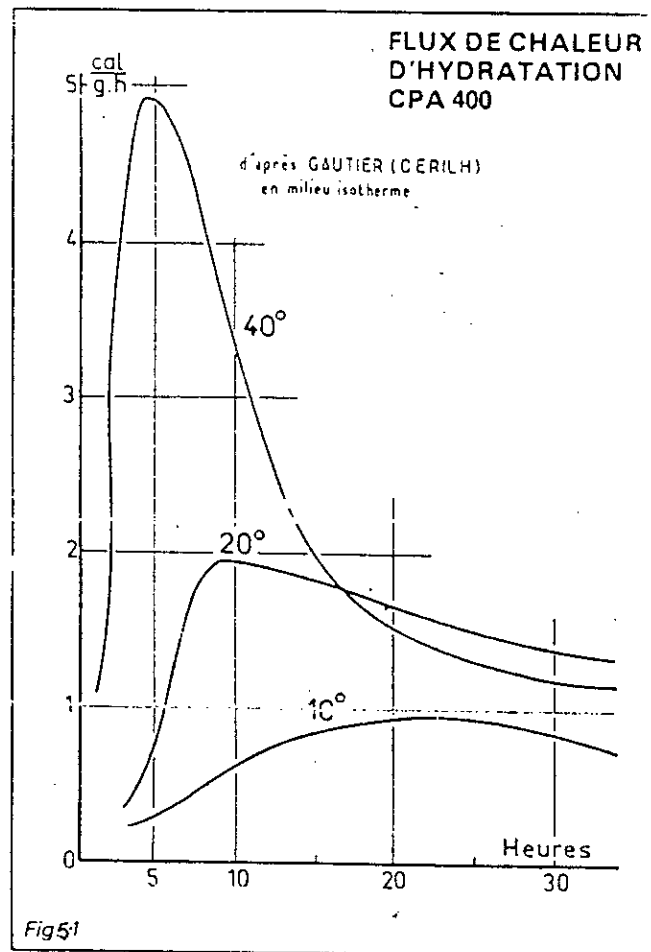


Fig.5.1. Flux de chaleur d'hydratation

On peut conclure que la température accélère la réaction d'hydratation et de ce fait elle augmente le dégagement de chaleur à court terme, par contre à long terme on peut remarquer une légère baisse de la chaleur totale d'hydratation, ce qui s'explique par une baisse de la résistance.

Chapitre

6

Essais en Usines

6.1 INTRODUCTION

Quel que soit l'intérêt que présente un travail de recherche systématique sur éprouvette, il existe un certain nombre de facteurs dont l'étude ne peut se faire que sur élément réels. Il s'agit notamment:

- du temps de moulage d'un élément (mise en place du béton, vibration, lissage).
- de la résistance minimale du béton nécessaire au démoulage.
- de l'aspect des pièces au démoulage (homogénéité, absence de gauchissement ou de fissuration, fragilité des arrêtes, etc.).
- les problèmes thermiques et techniques liés à la dimension des pièces, importance de la distance à la source de chaleur, isolation, etc.).

Pour cela, nous avons opté pour des essais sur panneaux réels, les essais réalisés n'avaient pas pour but d'étudier de façon systématique l'influence de tous les paramètres, car il se déroulaient dans une usine en fonctionnement, et en aucune manière in ne fallait gêner la marche de la fabrication. D'où on s'est limité à des essais d'analyse et de constatation.

6.2 ESSAIS A L'UNITE ECSM

6.2.1 Fiche technique de l'usine

Entreprise de construction de Sidi-Moussa.

Type de l'usine: préfabrication lourde (matériels Danois).

Date de construction: fin de l'année 1975.

Capacité de production: 10 logement/jour (en 2 postes).

Production effective: 4 logements/jour.

Procédé de chauffage: par conduction de vapeur.

Etats des équipements: défectueux.

Dimensions des panneaux: de 3 à 15 m².

6.2.2 Matériels utilisé

1. Prélèvement des températures par le système d'acquisition de données au moyen de thermocouples, l'appareil à été décrit précédemment (Chap.3).
2. Mesures des résistances au moyen d'un séleromètre.

6.2.3 Composition du béton (en usine)

La composition pour 1 m³ de béton est donnée comme suit:

- sable 0/3 → 760 kg.
- gravier 5/25 → 1110 kg.
- ciment CPA325 → 350 kg.
- eau → 140 l.

6.2.4 Mode opératoire

Notre essai a été effectué sur un panneau de dimension 3.00x350, le travail est limité dans la moitié du panneau. Dans cette moitié, une cinquantaine de thermocouples ont été placés régulièrement espacés pour pouvoir suivre l'évolution de la température dans le béton.

Cette moitié a été divisée en deux, le 1/4 a été recouvert par une feuille de polystyrène et une bâche, l'autre 1/4 restant nu, comme indiqué sur la Fig.6.12.

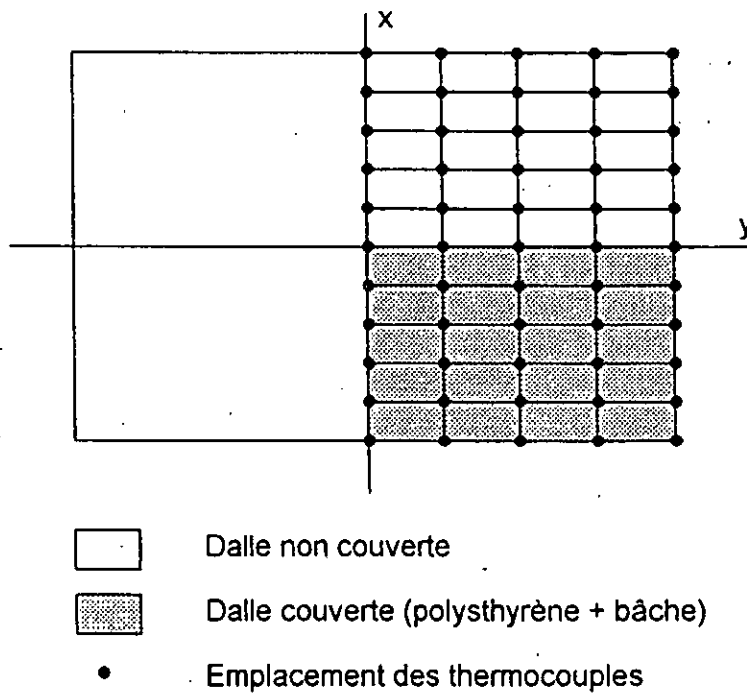


Fig.6.1 Schéma de la dalle

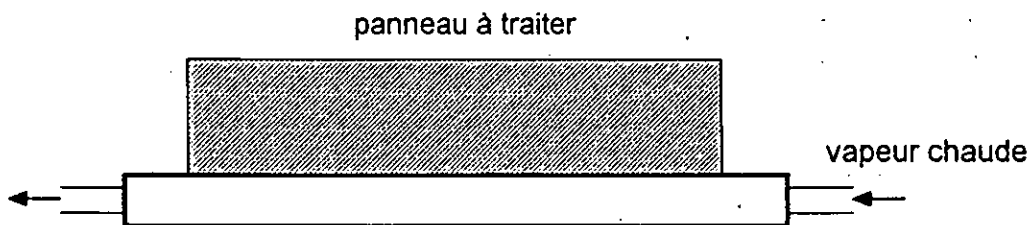


Fig.6.2 Coupe globale de la table du moule

La table est préchauffée à 50°C, la durée de pré-prise est réduite de ce fait à zéro, le chauffage s'effectue sur la face inférieure uniquement (Fig.6.2), le cycle de traitement a un palier de maintien à 90°C.

Le béton est mis en place par deux ouvriers, sa résistance est plastique. La mise en place et la vibration du béton dure environ 15 mm.

Pour la détermination du cycle de traitement effectif utilisé par l'usine, des thermocouples ont été placés sur le moule. Les mesures de résistance ont été effectuées à l'aide d'un séleromètre pendant et après traitement qui a duré 8 heures.

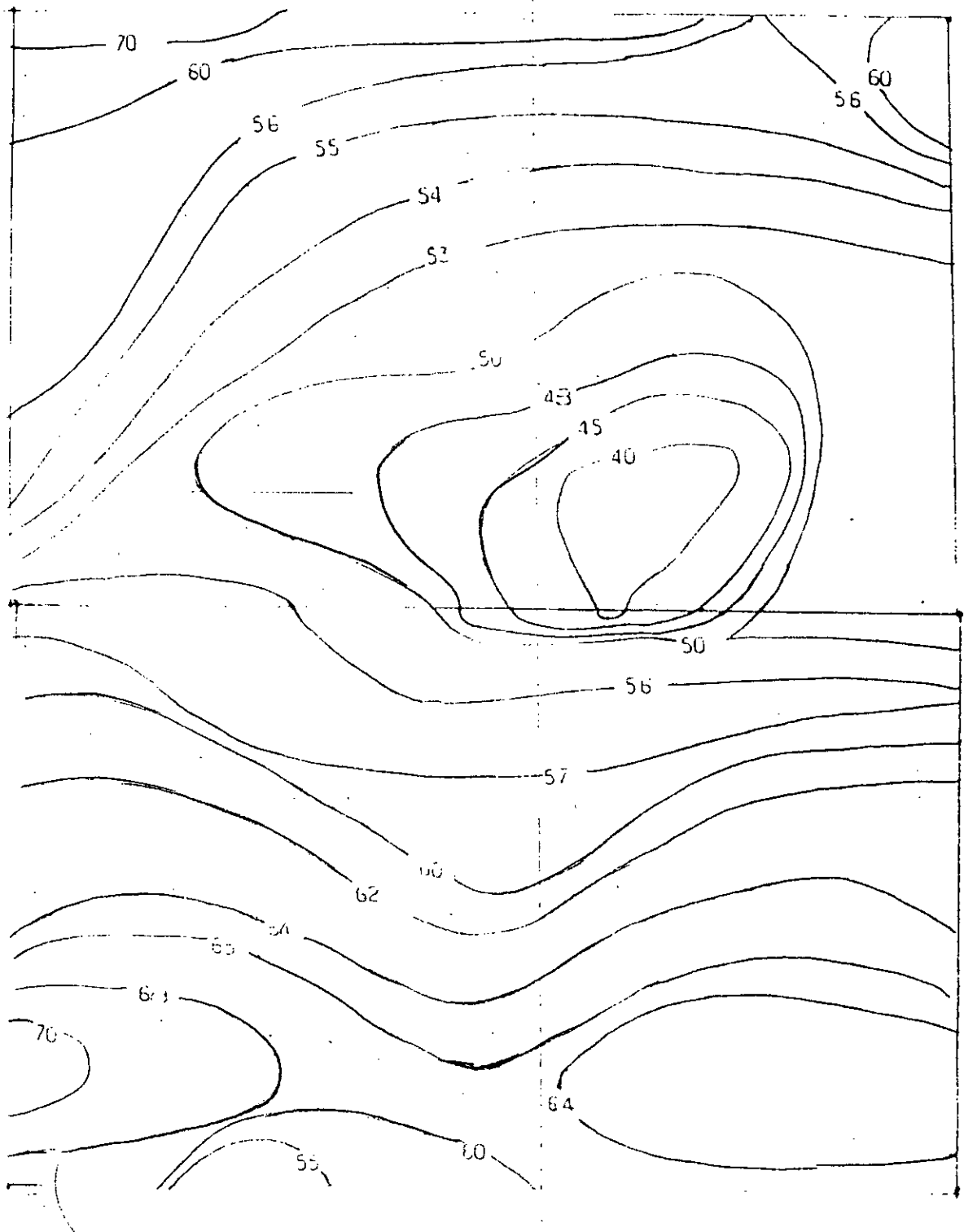


Fig.6.3 Isothermes dans la dalle après 5h de traitement

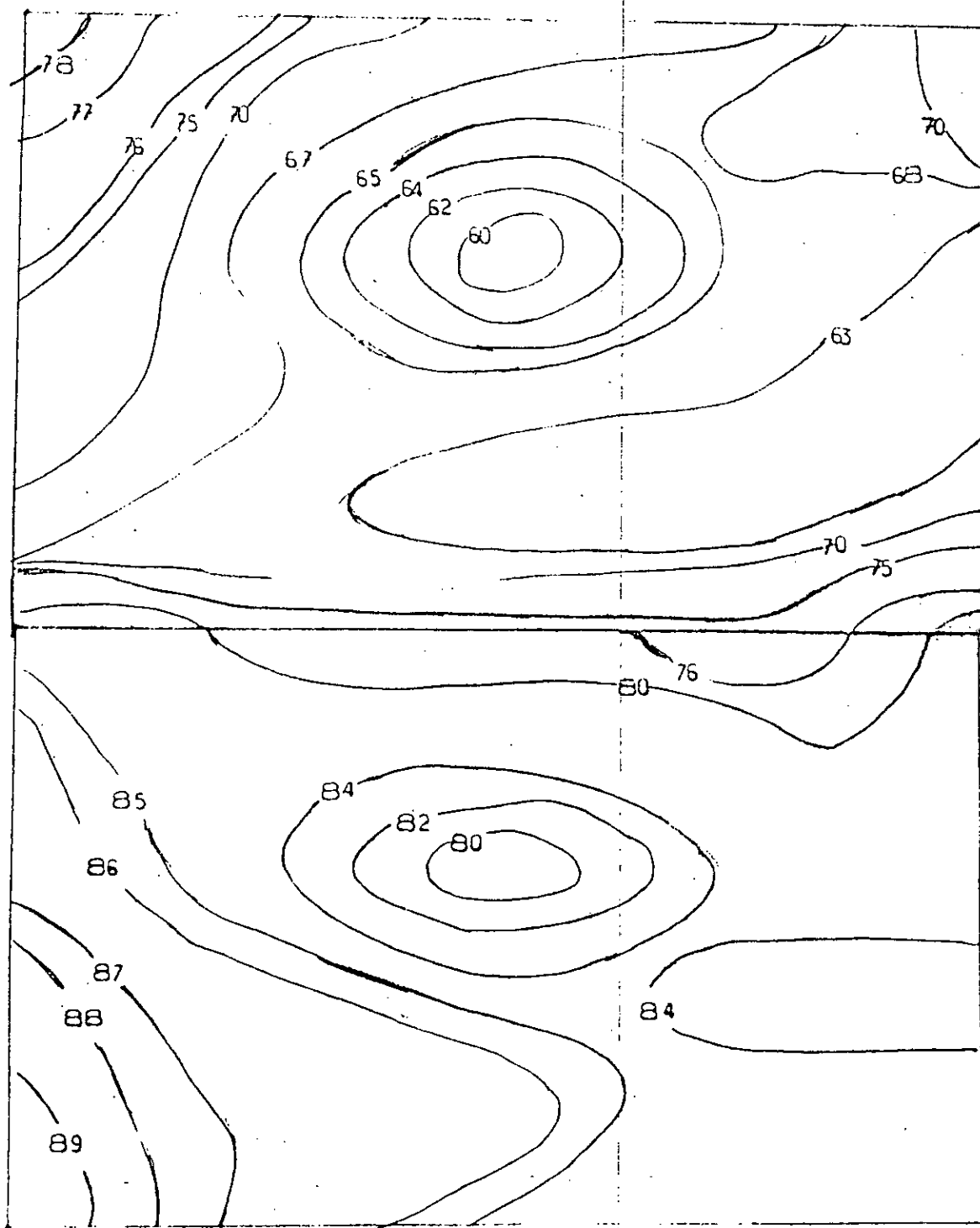


Fig.6.4 Isotherme dans la dalle après 8h45 de traitement

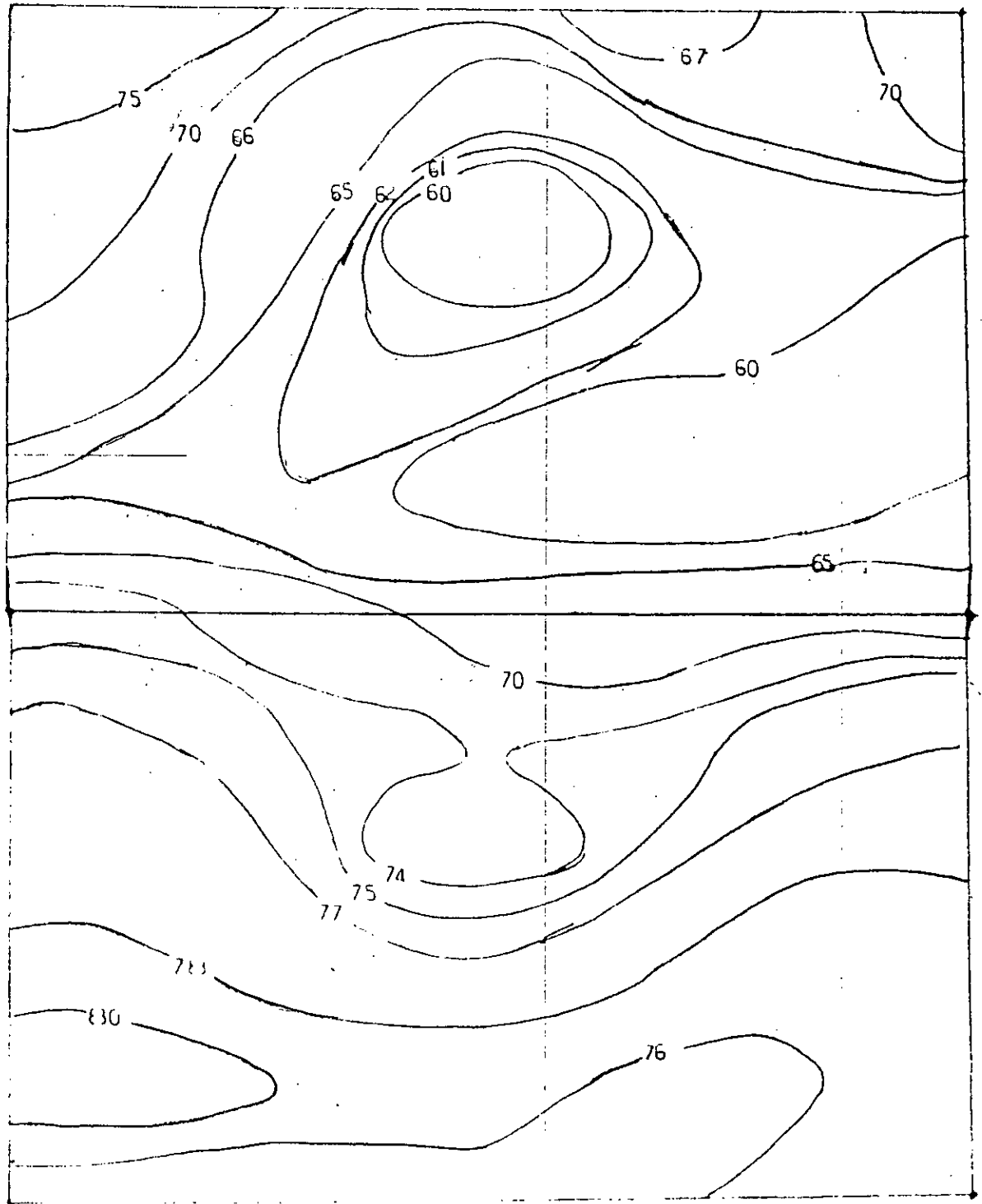


Fig.6.3 Isotherme dans la dalle après 6h45 de traitement

6.2.5 Résultats et discussions

A partir des mesures de températures prélevées (voir annexe) les isothermes qui traduisent réellement la répartition de la température au milieu de la dalle ont été tracées. Les remarques observées sont les suivantes:

A. l'écart de température entre le fond du moule et le coeur de la dalle est assez important, sur le côté non-couvert de la dalle, ce phénomène a pour effet de développer un gradient thermique, susceptible de provoquer des désordres irréversibles dans le panneau et notamment une fissuration plus ou moins développée des éléments.

Il faut noter que la couverture des panneaux n'est pas utilisée par l'usine.

B. Les températures au bord de la dalle sont plus importantes qu'au milieu, cette différence provoque une dilatation ou retrait différentiel du béton qui peuvent entraîner une micro-fissuration de la pièce.

Ces déformations sont dues au fait, que le coefficient de dilatation du béton varie au cours du durcissement; la dilatation pour les bétons frais étant deux à trois fois plus importante que celle du béton durci pour une même variation de température.

C. La température initiale de mise en place du béton est de l'ordre de 12°C, ceci ne favorise pas une bonne préprise d'autant plus qu'on sait qu'un début de préprise pour un ciment Portland à 5°C avait bien environ 7h30mm après malaxage; à 10°C ce temps est de 5h, ces temps sont incompatibles avec les objectifs de rentabilité. Par contre, si la température du béton est voisine de 25°C, la réaction d'hydratation démarre rapidement et la température du béton s'élève par exothermie.

Donc, par souci de rendement, il est souhaitable de couler le béton à une température initiale comprise entre 20° et 25°C, pour atteindre cette température et surtout en hiver, il est nécessaire soit de chauffer rapidement les moules soit de couler avec un béton préchauffé.

D. Les résistances obtenues en fin de traitement sont de l'ordre de 80bars pour la dalle concernée, pour les autres panneaux elle varie entre 70 et 80bars.

Cette résistance à notre avis est suffisante pour pouvoir manipuler les pièces et les stocker à l'air libre; néanmoins on constate des désordres sur certains éléments, comme l'apparition de fissures sur certains éléments, cassures d'angles dues à une mauvaise manutention.

6.2.6 Commentaire

Il faut noter qu'une telle usine, comme l'ECSM doit avoir des chantiers de montage en parallèle très performant, ceci a pour but, de donner un maximum de rendement a l'unité. Mais malheureusement ce n'est pas le cas dans notre pays, les chantiers de montages souffrent de nombreux problèmes, d'où la répercussion sur l'usine de préfabrication, et la chute de son rendement de production, qui a baissé de 80%. Ce qui fait perdre l'intérêt du durcissement accéléré.

6.3 ESSAIS A L'UNITE SAPTA

6.3.1 Fiche technique de l'usine

- Société Algérienne des ponts et travaux d'art.
- Unité de préfabrication.
- Lieu: zone industrielle, Rouiba
- Type de fabrication: poutres précontraintes (fils adhérents).
pré-dales.
poteaux (type scoop).
- Date de mise en service: 1985.
- Capacité de production: 1^e banc 2 poutres en l/jour.
2^e banc 2 poutres rectang/jour.
3^e banc environ 50 ml de prédalles/jour.
- Procédé de chauffage: injection de vapeur chaude sous bâche.
- Etats des équipements: Bon.

6.3.2 Matériels utilisés

- a. Le prélèvement des températures se fait à l'aide du systèmes d'acquisition de données au moyen de thermocouples.
- b. Les mesures des résistances ont été faites par écrasement d'éprouvettes cubique au laboratoire de l'unité.

6.3.3 Composition du béton

ciment:	450	kg/m ³
sable:	650	kg
Gravier:	5/15: 675	kg
	15/25: 450	kg

- a. Le béton est fourni par une centrale, commandée par un système électronique programmable.
- b. Les agrégats sont lavés minutieusement; le béton n'est pas préchauffé.

6.3.4 Type de fabrication

L'usine utilise le système de précontraint par fils adhérents, ce qui nécessite une résistance convenable après traitement (au environ de 250Bar).

1^e Type: La poutre en I, précontrainte utilisée pour les ponts.

2^e Type: a. La poutre rectangulaire (précontrainte), pour les constructions préfabriquées de grande dimensions, tels que Parking, Hangar.

b. Poutres et poteaux en béton armé, système scoop.

3^e Type: Prédalles précontraintes d'une épaisseur de 8 cm, sur une longueur qui peut atteindre 5 cm.

En dehors de la fabrication des poutres en I pour les ouvrages d'Arts, l'usine utilise le système Français de montage appelé Scoope pour la réalisation dans le bâtiment, tels que écoles, parking, bâtiment, etc.

Le système est basé sur deux phase (Fig.6.1):

Première phase: Préparation en usine des poteaux, poutres (BA et précontraintes), prédalles, et autres éléments.

Deuxième phase: Assemblage des éléments sur chantier avec le coulage du béton des noeuds et de la dalle de compression sur site. Néanmoins, ce système a fait l'objet d'une adaptation vis à vis du règlement parasismique Algérien par le CTC.

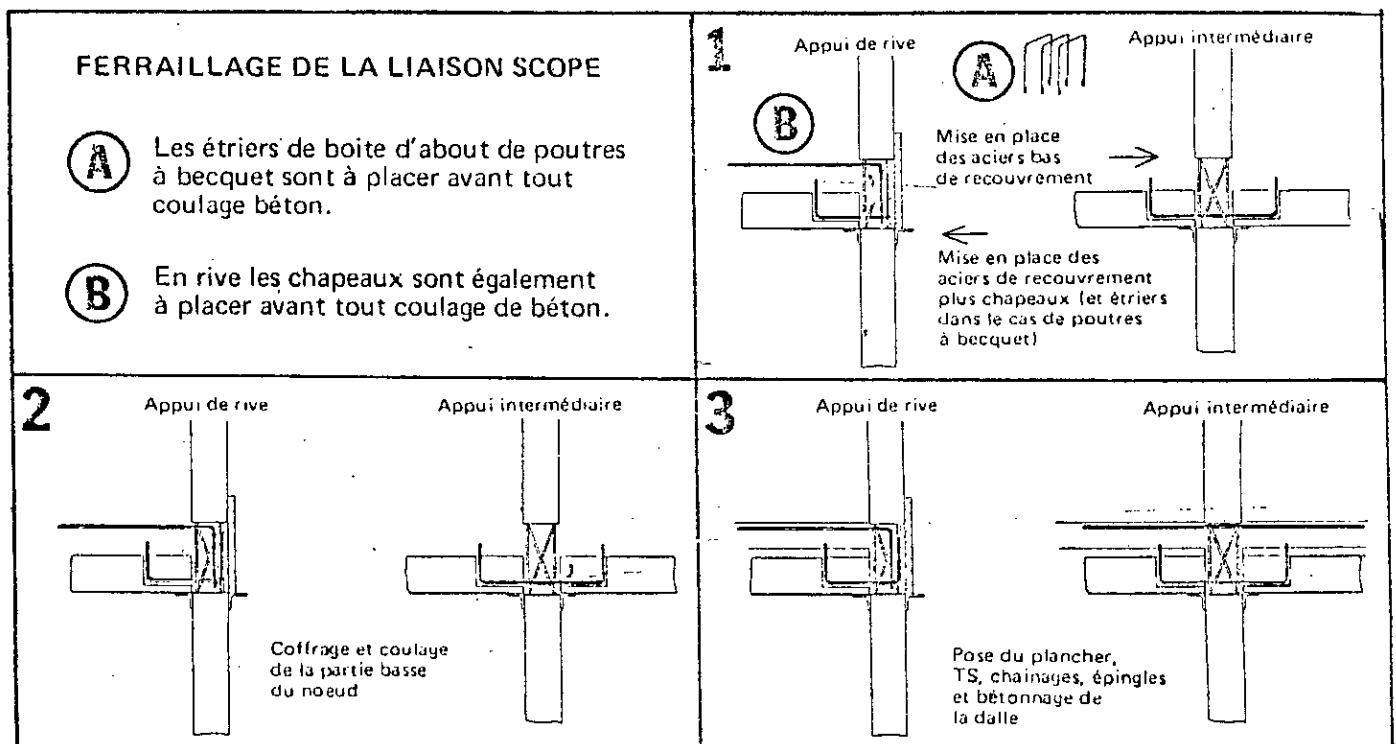


Fig.6.1 Schéma d'assemblage système Scoope

6.3.5 Mode opératoire

Deux essais ont effectués, l'un sur le banc des prédalles, le second sur le banc de la poutre en I. L'essai dure un peu plus de 24h. Sur le banc de la poutre en I, en première phase l'essai commence par le nettoyage et le huilage du moule, une fois fermé à l'aide de vérin, le ferrailage est déposé dans le moule à l'aide d'un pont roulant, nos thermocouples sont placés à l'intérieur comme le montre le Fig.6.18. En deuxième phase les ouvriers, continuent à mettre en place les câbles de la pré-tension, cette phase nécessite un effort physique considérable, les câbles doivent passer à travers un ferrailage dense, sur une longueur de 50m environ, elle dure environ 4h pour les deux poutres.

La troisième phase, c'est la mise en tension des câbles de précontrainte à l'aide d'un vérin hydraulique. La quatrième phase, le béton est mis en place (Fig.6.6) une fois la vibration et la mise en place du béton terminé, on couvre le moule avec une bâche (Fig.6.7). L'injection de vapeur ne sera entamée qu'après 4 heures de préprise..

6.3.6 Le cycle du traitement thermique

L'usine est conçue pour un coulage par jour et par banc. Le cycle du traitement thermique dure toute une nuit, l'ouverture et la fermeture des vanne de vapeur se fait automatiquement.

Le cycle complet pour le banc de la poutre en I varie entre 12 et 14h, avec une pré-prise de 2 heures et une montée en température de 3heures avec un palier de 4heures et une température maximale à la sortie de la chaudière de 90°C. La période de refroidissement dure jusqu'au décoffrage de la poutre.

Il est à noter que juste après le coulage du béton, on confectionnent trois éprouvettes cubiques sont confectionnées et introduit sous la bâche pendant tout le cycle du traitement, leurs écrasement s'effectue juste avant le décoffrage, pour contrôler la résistance du béton après le traitement, qui ne doit pas être inférieur à 250bars, pour permettre de relâcher les câbles de la pré-tension.



Fig.6.6 Phase de mise en place du béton



Fig.6.7 Traitement en cours

6.3.7 Résultats et discussions

Huit thermocouples ont été placés (Fig.6.8) dans le moule dont un sert à mesurer la température ambiante.

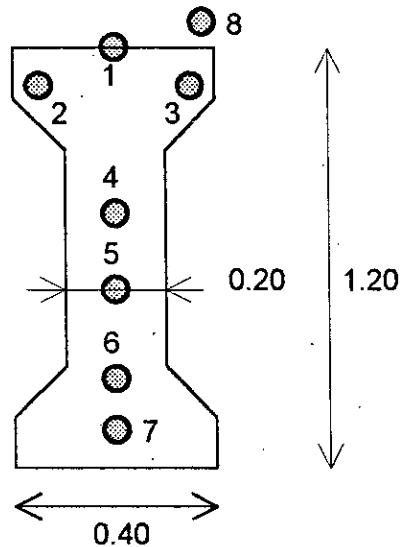


Fig.6.8 Emplacement des thermocouple

Cet essai a été refait trois fois, cela est dû à la déconnexion de certains thermocouples, la cause du problème était due à l'adjuvant (plastifiant) d'une part, et parfois cela est dû au contact du thermocouple avec le ferrailage de la poutre. Malgré cela on a pu avoir le développement des températures dans la pièce durant le cycle du traitement thermique (voir annexe).

On remarque que pendant la durée de pré-prise, la température du béton passe de 25°C à 35°C de façon uniforme dans toute les parties de la poutre et cela avant la mise en chauffe. Par contre, après l'ouverture des vannes de vapeur, on remarque que la température de l'âme (5) croit très vite, compte tenu de la faible épaisseur, en cinq heures elle passe de 25°C à 72°C alors que la température sous le bâche est de 81°C. Le point de mesure du Talon (6) ou celui du milieu de la table (4) présente une élévation moins rapide de l'ordre de 50°C après cinq heures.

Les courbes isotherme tracés après 5h nous donnent un aperçu sur l'évolution de la température.

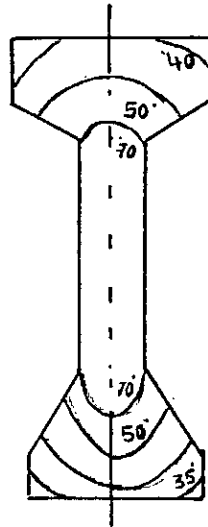


Fig.6.9 Isothermes après 5h de chauffage

Ces relevés de températures montrent qu'il est très difficile de réaliser un chauffage homogène par l'extérieur sur des pièces de formes compliquées. Si les épaisseurs varient, le chauffage par l'extérieur conduit à des températures internes présentant des écarts importants en valeurs absolues et à des vitesses d'élévation de température très variables qui sont préjudiciables à la qualité du béton. Ces raisons associées à d'autres, comme la pression hydrostatique; la qualité du ciment, provoquent une différence de la résistance entre certains points de la poutre.

Une estimation des résistances à l'aide du scléromètre atteintes à la fin du traitement, sur trois points choisis sur la poutre. Ainsi que sur une poutre en I stockée à l'air libre depuis 13 jours. Les résultats obtenus sont donnés par le Tableau.6.1.

Tableau.6.1 Résistance en compression sur la poutre en I

Points	24h	13j
Table	170	230
Ame	220	240
Talon	260	300

A partir de ces résultats, on peut dire que l'épaisseur de l'élément est proportionnelle à l'accélération de sa chaleur d'hydratation, ainsi d'après le Tableau, on remarque que la résistance du talon qui est en bas de la pointe, a une résistance supérieur, cela est du à sa chaleur d'hydratation, ainsi qu'à la compacité du béton.

Il faut noter que la compacité du béton dans la hauteur de la poutre, coulée par la partie supérieur est due à la charge hydrostatique qu'exerce la masse du béton sur la partie inférieure. Le béton situé à la base de la poutre est donc plus compact. Il en résulte de ce phénomène une différence de qualité entre le haut et le bas de la poutre, qui influe sur les résistances mécaniques.

Chapitre

7

Conclusion

Notre travail nous a permis de rassembler un certain nombre de remarques qui sont d'une importance capitale pour l'élaboration d'un cycle de traitement thermique; il faut noter:

1. que la durée de conservation initiale se justifie d'autant plus que la compacité du béton est faible. Les résistances sont meilleurs en fin de traitement pour une pré-prise plus longue.
2. • La vitesse d'élévation de la température est un facteur primordial; les meilleurs résultats sont obtenus avec une montée de $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$.
 - Pour les éléments minces, la phase de montée en température n'a pas une grande influence, néanmoins pour ces éléments il faut:
 - éviter les forts dosages en ciments,
 - maintenir une forte hygrométrie,
 - utiliser un ciment à faible chaleur d'hydratation.

Plus la vitesse de montée en température est grande plus sera la durée de pré-prise.

3. La durée et la température du palier isotherme déterminent la résistance en fin du traitement.
 - La durée du palier doit se terminer une fois la température de la masse du béton devient supérieure à celle de l'étuve.
 - La durée du palier est réduite pour les liants à forte chaleur d'hydratation.
 - Il n'est pas conseillé de chauffer les ciments Portlands à plus de 80°C .

- Les ciments Portland aux laitiers sont aptes à recevoir un traitement supérieur à 95°C.
4. Le préchauffage du béton, réduit la durée de pré-prise.
 5. Les températures de traitements dépassent 70°C ne sont pas conseillées pour les cycles courts.
 6. Pour les pièces massives il faut utiliser un ciment à forte chaleur d'hydratation.
 - Utiliser des cycles long.
 - Eviter le choc thermique en prolongeant la période de refroidissement.

Recommandation

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 la plus favorable, il convient, de trouver un compromis entre le point de vue économique et le point de vue technique.

Les deux essais in-situ nous ont permis de conclure que l'essentiel dans une unité de production, était le contrôle. Il doit s'effectuer les stades, en amont et en aval de la production, on peut citer:

- le contrôle des granulats, et leur teneur en eau,
- le contrôle du dosage en eau,
- le contrôle du cycle de chauffage, et le choix d'un optimum pour un type de produit,
- le contrôle de la résistance, et particulièrement dans le cas du béton précontraint, il faut veiller à ce que les éprouvettes de béton subissent le même traitement que la partie du talon qui contient les câbles de pré-tension.

Il faut noter que si les câbles de tensions sont relâchés avant que le béton n'atteigne la résistance voulue, le risque d'éclatement du béton, et de fissuration préjudiciable sont majeurs.

Un autre élément, à prendre en considération est la maintenance des équipements de production en général. Il a été remarqué à l'unité SAPTA par exemple, que malgré la récente mise en marche de l'usine, les équipement tombent souvent en pannes par manque d'entretien.

Cela se répercute sur la qualité de production. Il a été constaté que le contrôle automatique du cycle était en panne; dans ce cas l'ouverture des vannes se fait manuellement par un ouvrier, d'où une perturbation dans le cycle de chauffage, entraînant une chute de résistance.

Auparavant, l'importance de la chaleur d'hydratation du ciment dans le traitement thermique a été examinée au niveau de la production et compte tenu de l'irrégularité du ciment, il est impossible d'avoir une idée exacte sur sa chaleur d'hydratation, vu la diversification de l'approvisionnement. De ce fait il faut établir un procédé de contrôle rapide du comportement du ciment, si on veut éviter des accidents de productions, et adapter le cycle de chauffage, si une différence notable de la résistance a été enregistrée.

Perspectives

L'établissement d'un cycle de traitement thermique implique la connaissance de répartition de la température dans la pièce, et des paramètres influents. Néanmoins, ce travail est fastidieux du point de vue expérimental, il peut être remplacé par un programme de simulation mathématique donnant l'évolution des températures en tout point du béton; il nécessite la connaissance des paramètres vus précédemment ainsi que les coefficients d'échanges thermiques.

Références Bibliographiques

- [1] F. JOLIVET, "Traitement thermique, domaine des chantiers de travaux publics", *Annales ITBTP*, N°387, Oct.1980.
- [2] SARET, *Cours du traitement du béton*, Nov.1979.
- [3] P. LAPERNA, Durcissement accéléré des bétons, *Revue de Matériaux de Constructions*, Mai.1982.
- [4] J. VASCAUX, Les Procédés modernes de thermo-maturation du béton, *Revue de Construction*, Juin.74.
- [5] M. MAMILLAN, Accélération du durcissement du béton, *Annales ITBTP*, N°267, 1970.
- [6] M. JACQ, Le Tuyau chauffant EDF, *Annales ITBTP*, N°387, Oct.1980.
- [7] M. PAPADAKIS, L'étuvage des produits en béton, *Revue des Bétons Industriels*, CERIB, Pub. N°1, 1967.
- [8] KAISER, Durcissement accéléré du béton, *Colloque Rilem Moscou*, 1964, Page 59.
- [9] REINSDORF, MIRONOV et HANSSON, L'influence de la composition du ciment sur l'étuvage, *Colloque Rilem Moscou*, 1964, Page 91.
- [10] LEWIS, Optimum steam curing treatment of concrete, *Colloque Rilem*, July.1964.
- [11] JAROCKI and TALBIERSKI, Steam consumption for steam - curing process of concrete elements.
- [12] M. MAMILLAN, Influence des conditions de traitement sur la qualité du béton, *Annales ITBTP*, Février.1973.
- [13] A. KOMAR, *Matériaux et éléments de construction*, Edition Moscou.
- [14] ROYAK, *Influence of hydro-thermal curing on hardening of Portland - slag cement*.

- [15] STOLNIKOV, Cements and concretes with fly ash and methods for accelerating their hardening, *Rilem-Moscou*.
- [16] ASTM. C186-86
Standard test method for heat of hydration of hydraulic cement.
- [17] R. ALEGRE, La calorimétrie des ciments, CERILH, *Revue des matériaux de construction*, N°549.
- [18] REGOUD et GAUTIER, Comportement des ciments soumis au durcissement accéléré, *Annales ITBTP*, N°387, Oct. 1980.

Enregistrements système d'acquisition:

SAPTA I

16:25

0
+ 37
+ 30
+ 07
+ 35 36

AT 03 27 17 25 61

+ 01
+ 05
+ 00
+ 00
34
overload
overload
+ 06 06
0 52

AT 03 27 17 25 00

000
006
012
018
009
002
018
017
014

AT 03 27 17 55

000
006
012
018
009
002
018
017
014

SETUP SAPTA , AT 03 27 17 25 00

SCAN #5

000 +39 76
006 +37 13
012 +39 95
018 +38 59
009 +29 90
002 overload
018 overload
017 +39 49
014 +38 13

SETUP SAPTA , AT 03 27 18 55 37

SCAN #6

000 +37
006 +36
012 +37 30
018 +36 76
009 +30 63
002 overload
018 overload
017 +30 15
014 +30 22

AT 03 27 19 55

000 +32 1
006 +31 16
012 +31 10
018 +31 5
009 +3 0
002 overload 14
018 overload
017 +31 33
014 +31 49

SETUP SAPTA , AT 03 27 19 55

SCAN #8

000 +34 23
006 +33 32
012 +34 80
018 +35 76
009 +33 63
002 overload
018 overload
017 +32 35
014 +32 95

SETUP SAPTA , AT 03 27 20 20 00

SCAN #4

000 +31 20
006 +35 10
012 +36 85
018 +36 4
009 +36 61
002 overload
018 overload
017 +33 35
014 +34 26

SETUP SAPTA , AT 03:27:20:55:00

SCAN : #10

000:	+39.17	des C
006:	+37.39	des C
012:	+42.84	des C
010:	+51.56	des C
009:	+50.92	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+4.12	des C
014:	+38.01	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:22:25:00

SCAN : #13

000:	+72.00	des C
006:	+64.32	des C
012:	+76.57	des C
010:	+82.72	des C
009:	+87.58	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+83.73	des C
014:	+65.27	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:23:55:00

SCAN : #16

000:	+75.50	des C
006:	+73.42	des C
012:	+78.66	des C
010:	+83.43	des C
009:	+89.31	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+85.72	des C
014:	+64.93	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:21:25:00

SCAN : #11

000:	+50.47	des C
006:	+47.58	des C
012:		des C
010:		des C
009:	+8.	des C
013:	+13. ?	des C <i>Hon. Service</i>
017:		des C
014:	+48	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:22:55:00

SCAN : #14

000:	+74.24	des C
006:	+71.61	des C
012:	+77.63	des C
010:	+82.91	des C
009:	+87.91	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+84.85	des C
014:	+66.92	des C

SETUP SAPTA , AT 03:28:00:25:00

SCAN : #17

000:	+77.68	des C
006:	+73.15	des C
012:	+80.23	des C
010:	+86.46	des C
009:	+89.24	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+86.19	des C
014:	+64.55	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:21:55:00

SCAN : #12

000:	+65.27	des C
006:	+61.65	des C
012:	+71.89	des C
010:	+80.37	des C
009:	+87.48	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+79.67	des C
014:	+59.61	des C

SETUP SAPTA , AT 03:27:23:25:00

SCAN : #15

000:	+74.62	des C
006:	+72.62	des C
012:	+77.61	des C
010:	+83.75	des C
009:	+88.56	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+64.74	des C
014:	+66.49	des C

SETUP SAPTA , AT 03:28:00:55:00

SCAN : #18

000:	+76.82	des C
006:	+74.36	des C
012:	+79.95	des C
010:	+82.92	des C
009:	+85.15	des C
002:	overload	des C
018:	overload	des C
017:	+81.28	des C
014:	+64.27	des C

SETUP SAPTA , AT 03:28:05:51 00

SCAN : #28

000:	+49.44	deg C
005:	+47.59	deg C
012:	+50.37	deg C
010:	+50.01	deg C
009:	+49.00	deg C
002:	overload	deg C
018:	overload	deg C
017:	+47.08	deg C
014:	+44.97	deg C

SETUP SAPTA , AT 03:28:06:25:00

SCAN : #29

000:	+48.65	deg C
005:	+47.13	deg C
012:	+49.42	deg C
010:	+49.00	deg C
009:	+48.26	deg C
002:	overload	deg C
018:	overload	deg C
017:	+46.68	deg C
014:	+44.67	deg C

SETUP SAPTA , AT 03:28:06:55:00

SCAN : #30

000:	+47.76	deg C
005:	+46.26	deg C
012:	+48.53	deg C
010:	+48.90	deg C
009:	+47.24	deg C
002:	overload	deg C
018:	overload	deg C
017:	+47.46	deg C
014:	+43.39	deg C

SETUP SAPTA , AT 03:28:07:25:00

SCAN : #31

000:	+46.96	deg C
005:	+47.00	deg C
012:	+47.59	deg C
010:	+48.03	deg C
009:	+46.49	deg C
002:	overload	deg C
018:	overload	deg C
017:	+44.72	deg C
014:	+43.05	deg C

SETUP SAPTA , AT 03:28:07:55:00

SCAN : #32

000:	+46.13	deg C
005:	+44.08	deg C
012:	+46.77	deg C
010:	+47.05	deg C
009:	+47.64	deg C
002:	overload	deg C
018:	overload	deg C
017:	+43.55	deg C
014:	+43.44	deg C

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES GRANULATS

Norme NF P 18-304

TAMIS

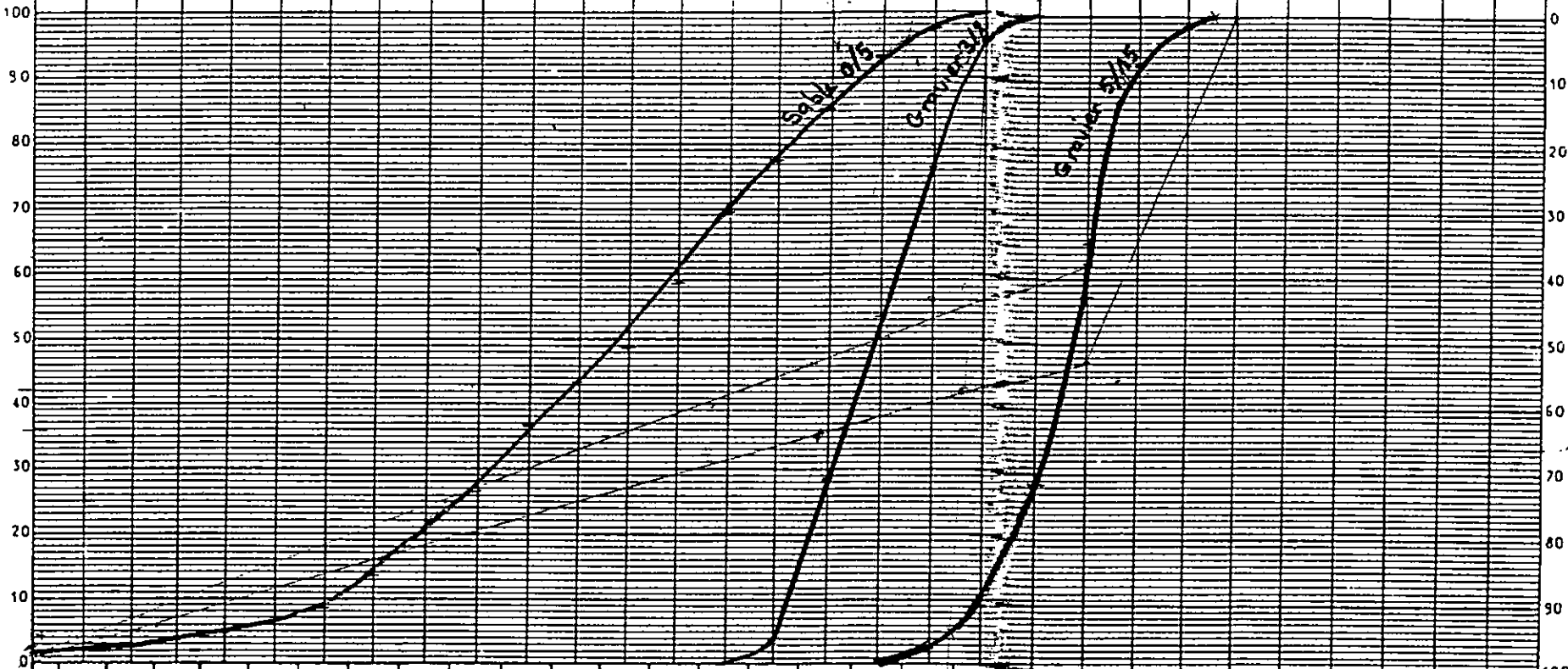
Série supplémentaire

Quantité élémentaire en %

Quantité cumulée en %

0,090	0,112	0,40	0,180	0,224	0,280	0,355	0,45	0,56	0,71	0,90	1,12	1,40	1,80	2,24	2,80	3,55	4,50	5,60	7,10	9	11,2	14	18	22,4	28	35,5	45	56	71
-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---	------	----	----	------	----	------	----	----	----

TAMISATS EN %



TAMIS

Série principale

Quantité élémentaire en %

Quantité cumulée en %

0,08	0,10	0,25	0,16	0,2	0,25	0,315	0,4	0,5	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
------	------	------	------	-----	------	-------	-----	-----	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	---	----	------	----	----	----	------	----	----	----	----

SCAN #7

000:	+29.60	des	000:
001:	+22.15	des	001:
002:	+12.52	des	002:
003:	+20.50	des	003:
004:	+26.42	des	004:
005:	+35.68	des	005:
006:	+23.50	des	006:
007:	+24.32	des	007:
008:	+28.20	des	008:
009:	+27.99	des	009:
010:	+25.33	des	010:
011:	+25.99	des	011:
012:	+20.93	des	012:
013:	+22.33	des	013:
014:	+15.83	des	014:
015:	+17.79	des	015:
016:	+24.11	des	016:
017:	overload	des	017:
018:	overload	des	018:
020:	+22.92	des	020:
021:	+29.15	des	021:
022:	+24.10	des	022:
023:	+20.96	des	023:
024:	+27.00	des	024:
025:	+22.75	des	025:
026:	+21.55	des	026:
027:	+19.24	des	027:
028:	+25.35	des	028:
029:	+26.24	des	029:
030:	+18.12	des	030:
031:	+20.42	des	031:
032:	+15.92	des	032:
033:	+18.99	des	033:
034:	+17.11	des	034:
035:	+22.75	des	035:
036:	+35.23	des	036:
037:	+31.51	des	037:
038:	+27.22	des	038:
040:	+25.12	des	040:
041:	+19.01	des	041:
042:	+23.51	des	042:
043:	+22.14	des	043:
044:	+23.17	des	044:
045:	+22.12	des	045:
047:	+22.56	des	047:
048:	+22.56	des	048:
049:	+20.20	des	049:
050:	+16.86	des	050:

SCAN #8

000:	+21.69	des	000:
001:	+21.94	des	001:
002:	+21.30	des	002:
003:	+21.54	des	003:
004:	+21.51	des	004:
005:	+27.16	des	005:
006:	+21.64	des	006:
007:	+21.79	des	007:
008:	+21.62	des	008:
009:	+21.59	des	009:
010:	+21.76	des	010:
011:	+21.47	des	011:
012:	+21.71	des	012:
013:	+21.76	des	013:
014:	+21.76	des	014:
015:	+21.44	des	015:
016:	+21.64	des	016:
017:	overload	des	017:
018:	overload	des	018:
020:	+21.51	des	020:
021:	+22.45	des	021:
022:	+23.27	des	022:
023:	+15.51	des	023:
024:	+24.99	des	024:
025:	+21.25	des	025:
026:	+19.89	des	026:
027:	+15.71	des	027:
028:	+28.92	des	028:
029:	+18.11	des	029:
030:	+18.81	des	030:
031:	+18.14	des	031:
032:	+16.62	des	032:
033:	+20.17	des	033:
034:	+17.19	des	034:
035:	+21.47	des	035:
036:	+21.52	des	036:
037:	+12.82	des	037:
040:	+20.22	des	040:
041:	+20.46	des	041:
042:	+15.94	des	042:
043:	+15.94	des	043:
044:	+23.14	des	044:
045:	+23.72	des	045:
046:	+19.60	des	046:
047:	+17.50	des	047:
048:	+21.06	des	048:
049:	+13.38	des	049:
050:	+16.34	des	050:

SCAN #9

000:	+23.27	des	000:
001:	+22.33	des	001:
002:	+22.75	des	002:
003:	+26.37	des	003:
004:	+23.27	des	004:
005:	+23.81	des	005:
006:	+23.84	des	006:
007:	+23.80	des	007:
008:	+21.77	des	008:
009:	+24.24	des	009:
010:	+21.82	des	010:
011:	+22.61	des	011:
012:	+21.82	des	012:
013:	+22.39	des	013:
014:	+23.44	des	014:
015:	+22.93	des	015:
016:	+22.34	des	016:
017:	overload	des	017:
018:	overload	des	018:
020:	+23.84	des	020:
021:	+23.67	des	021:
022:	+22.92	des	022:
023:	+22.75	des	023:
024:	+23.00	des	024:
025:	+20.34	des	025:
026:	+20.51	des	026:
027:	+22.70	des	027:
028:	+24.17	des	028:
029:	+23.38	des	029:
030:	+23.12	des	030:
031:	+23.80	des	031:
032:	+23.24	des	032:
033:	+23.66	des	033:
034:	+22.24	des	034:
035:	overload	des	035:
036:	+22.07	des	036:
037:	+22.51	des	037:
038:	+24.74	des	038:
040:	+20.53	des	040:
041:	+21.79	des	041:
042:	+21.42	des	042:
043:	+21.45	des	043:
044:	+21.55	des	044:
045:	+22.27	des	045:
046:	+21.83	des	046:
047:	+22.48	des	047:
048:	+21.62	des	048:
049:	+22.16	des	049:
050:	+17.88	des	050:

SCAN : #13

000:	+41.72	de9 C
001:	+39.21	de9 C
002:	+39.26	de9 C
003:	+49.96	de9 C
004:	+38.90	de9 C
005:	+57.63	de9 C
006:	+33.65	de9 C
007:	+41.53	de9 C
008:	+32.59	de9 C
009:	+46.32	de9 C
010:	+31.48	de9 C
011:	+38.31	de9 C
012:	+32.16	de9 C
013:	+37.14	de9 C
014:	+42.34	de9 C
015:	+39.07	de9 C
016:	+37.09	de9 C
017:	overload	de9 C
018:	overload	de9 C
020:	+34.04	de9 C
021:	+42.56	de9 C
022:	+39.57	de9 C
023:	+33.06	de9 C
024:	+52.09	de9 C
025:	+26.77	de9 C
026:	+24.02	de9 C
027:	+36.72	de9 C
028:	+58.70	de9 C
029:	+33.42	de9 C
030:	+38.58	de9 C
031:	+38.82	de9 C
032:	+34.41	de9 C
033:	+31.96	de9 C
034:	+42.90	de9 C
035:	overload	de9 C
036:	+34.00	de9 C
037:	+39.27	de9 C
038:	+53.28	de9 C
040:	+27.12	de9 C
041:	+94.79	de9 C
042:	+30.39	de9 C
043:	+26.83	de9 C
044:	+28.04	de9 C
045:	+36.61	de9 C
046:	+26.83	de9 C
047:	+31.24	de9 C
048:	+32.46	de9 C
049:	+26.88	de9 C
050:	+19.41	de9 C

SCAN : #14

000:	+46.73	de9 C
001:	+42.01	de9 C
002:	+41.77	de9 C
003:	+54.05	de9 C
004:	+42.67	de9 C
005:	+51.00	de9 C
006:	+35.97	de9 C
007:	+45.64	de9 C
008:	+35.88	de9 C
009:	+53.46	de9 C
010:	+34.68	de9 C
011:	+42.15	de9 C
012:	+35.49	de9 C
013:	+48.85	de9 C
014:	+46.23	de9 C
015:	+42.79	de9 C
016:	+40.80	de9 C
017:	overload	de9 C
018:	overload	de9 C
020:	+37.40	de9 C
021:	+46.67	de9 C
022:	+33.58	de9 C
023:	+36.31	de9 C
024:	+56.99	de9 C
025:	+29.48	de9 C
026:	+23.87	de9 C
027:	+49.31	de9 C
028:	+63.38	de9 C
029:	+36.64	de9 C
030:	+42.25	de9 C
031:	+33.63	de9 C
032:	+37.57	de9 C
033:	+35.16	de9 C
034:	+46.95	de9 C
035:	overload	de9 C
036:	+37.67	de9 C
037:	+43.50	de9 C
038:	+57.41	de9 C
040:	+29.86	de9 C
041:	+94.75	de9 C
042:	+33.25	de9 C
043:	+29.23	de9 C
044:	+31.59	de9 C
045:	+48.70	de9 C
046:	+29.57	de9 C
047:	+34.33	de9 C
048:	+35.82	de9 C
049:	+29.23	de9 C
050:	+19.83	de9 C

SCAN : #15

000:	+49.66	de9 C
001:	+45.89	de9 C
002:	+45.30	de9 C
003:	+37.73	de9 C
004:	+46.45	de9 C
005:	+64.39	de9 C
006:	+40.46	de9 C
007:	+49.60	de9 C
008:	+39.25	de9 C
009:	+54.40	de9 C
010:	+38.02	de9 C
011:	+45.96	de9 C
012:	+38.97	de9 C
013:	+44.57	de9 C
014:	+50.01	de9 C
015:	+46.41	de9 C
016:	+44.51	de9 C
017:	overload	de9 C
018:	overload	de9 C
020:	+48.86	de9 C
021:	+58.56	de9 C
022:	+36.56	de9 C
023:	+39.50	de9 C
024:	+61.27	de9 C
025:	+32.56	de9 C
026:	+27.99	de9 C
027:	+43.60	de9 C
028:	+67.27	de9 C
029:	+39.77	de9 C
030:	+45.74	de9 C
031:	+36.50	de9 C
032:	+40.77	de9 C
033:	+38.46	de9 C
034:	+58.90	de9 C
035:	overload	de9 C
036:	+41.38	de9 C
037:	+47.60	de9 C
038:	+68.93	de9 C
040:	+32.73	de9 C
041:	+55.23	de9 C
042:	+38.18	de9 C
043:	+31.79	de9 C
044:	+34.24	de9 C
045:	+44.55	de9 C
046:	+32.37	de9 C
047:	+37.47	de9 C
048:	+39.30	de9 C
049:	+31.84	de9 C
050:	+18.64	de9 C

SCAN #3

000	+12.12	000
001	+12.15	000
002	+12.45	000
003	+12.92	000
004	+12.90	000
005	+32.44	000
006	+11.70	000
007	+12.15	000
008	+12.85	000
009	+13.97	000
010	+11.77	000
011	+12.27	000
012	+12.75	000
013	+12.82	000
014	+11.50	000
015	+13.45	000
016	+12.55	000
017	overload	000
018	overload	000
020	+12.79	000
021	+12.41	000
022	+12.66	000
023	+13.13	000
024	+12.98	000
025	+13.18	000
026	+13.33	000
027	+12.86	000
029	+12.99	000
029	+30.57	000
030	+12.33	000
031	+12.61	000
032	+12.98	000
033	+12.48	000
034	+12.96	000
035	+12.83	000
036	+12.48	000
037	+11.39	000
038	+30.19	000
040	+12.52	000
041	+28.69	000
042	+12.45	000
043	+17.28	000
044	+20.09	000
045	+30.88	000
046	+13.95	000
047	+21.79	000
048	+15.92	000
049	+19.57	000
050	+16.16	000

SCAN #2

000	+12.36	000
001	+12.37	000
002	+12.93	000
003	+12.93	000
004	+12.38	000
005	+22.40	000
006	+11.25	000
007	+11.95	000
008	+13.45	000
009	+12.18	000
010	+12.20	000
011	+12.80	000
012	+12.85	000
013	+12.95	000
014	+10.95	000
015	+13.23	000
016	+12.53	000
017	overload	000
018	overload	000
020	+12.41	000
021	+11.93	000
022	+12.11	000
023	+13.01	000
024	+12.49	000
025	+12.71	000
026	+12.29	000
027	+13.61	000
028	+12.74	000
029	+16.80	000
030	+12.43	000
031	+12.61	000
032	+12.45	000
033	+11.35	000
034	+12.93	000
035	+12.55	000
036	+12.93	000
037	+12.65	000
038	+22.97	000
040	+15.60	000
041	+12.95	000
042	+11.39	000
043	+10.87	000
045	+15.93	000
044	+11.99	000
045	+12.11	000
046	+10.18	000
047	+12.54	000
048	+15.29	000
049	overload	000
050	overload	000

000	+12.36	000
001	+12.37	000
002	+12.93	000
003	+12.93	000
004	+12.38	000
005	+22.40	000
006	+11.25	000
007	+11.95	000
008	+13.45	000
009	+12.18	000
010	+12.20	000
011	+12.80	000
012	+12.85	000
013	+12.95	000
014	+10.95	000
015	+13.23	000
016	+12.53	000
017	overload	000
018	overload	000
020	+12.41	000
021	+11.93	000
022	+12.11	000
023	+13.01	000
024	+12.49	000
025	+12.71	000
026	+12.29	000
027	+13.61	000
028	+12.74	000
029	+16.80	000
030	+12.43	000
031	+12.61	000
032	+12.45	000
033	+11.35	000
034	+12.93	000
035	+12.55	000
036	+12.93	000
037	+12.65	000
038	+22.97	000
040	+15.60	000
041	+12.95	000
042	+11.39	000
043	+10.87	000
044	+15.93	000
045	+11.99	000
046	+12.11	000
047	+10.18	000
048	+12.54	000
049	+15.29	000
050	overload	000