

THÈSE DE DOCTORAT D'ÉTAT  
ès Sciences Physiques

présentée

à L'UNIVERSITÉ PIERRE et MARIE CURIE

- Paris VI -

par Yves MALIER

pour obtenir le grade de DOCTEUR ès SCIENCES

Sujet de la thèse :

LA DEMOLITION DES STRUCTURES DE GENIE CIVIL  
PAR DECOUPAGE THERMIQUE

soutenue le 1.12.1978 devant le Jury composé de :

M. R. SIESTRUNCK      Président

M. J. FARRAN

Mme S. GUILLAUME

M. J. LEMAITRE      Examineurs

M. J.C. MASO

M. P. THUREAU

M. R. GUILLOT      Invité





Nous tenons à remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur R. SIESTRUNCK auquel nous devons déjà nos premières responsabilités d'enseignant et qui a bien voulu assurer la présidence de notre jury.

Nous souhaitons adresser toute notre reconnaissance à Monsieur le Professeur J. FARRAN tant il a contribué à développer notre profond attachement au Génie-Civil. Nous sommes profondément honoré qu'il ait accepté de participer au jury devant examiner notre travail.

C'est à Monsieur le Professeur J. LEMAITRE, que nous devons, essentiellement, la réalisation de notre thèse. Dans notre travail quotidien au sein de son équipe, au laboratoire de Mécanique et Technologie de l'E.N.S.E.T., son autorité et sa rigueur mais aussi ses conseils et ses encouragements furent des éléments essentiels à la conduite de cette étude. Qu'il reçoive maintenant le témoignage de notre profonde et sincère gratitude.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur le Professeur J. MASO. Ses observations, ses conseils, sa grande connaissance des problèmes du Génie-Civil nous apportèrent un concours précieux et déterminant lors de la réalisation de ce mémoire.

Nous souhaitons vivement remercier Monsieur le Professeur P. THUREAU des encouragements résultant de l'intérêt qu'il a bien voulu toujours porter à nos travaux et aux applications qui en résultèrent.

Nous sommes heureux d'exprimer toute notre gratitude à Madame le Professeur S. GUILLAUME et à Monsieur R. GUILLOT, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées, représentant la profession du Génie-Civil, d'avoir bien voulu accepter de participer à notre jury.

Enfin nous tenons à adresser nos remerciements, d'une part, à Madame M. BRACHET (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), à Monsieur J. BRANSIER (Laboratoire de thermique de l'Université P. et M. CURIE à PARIS), à Monsieur E. OSTEKIN (Université Technique de Trabzon), à Monsieur C. ROBIN (Laboratoire de Vulcanologie de l'Université de Clermont-Ferrand), pour leur précieuse collaboration, d'autre part à tous nos collègues, secrétaires, techniciens et chercheurs du Laboratoire de Mécanique et Technologie, et, enfin, à tous ceux qui ont contribué à la réalisation pratique de ce mémoire.



2.4 ..... LA PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE

2.7 ..... LA FUSION DES COMPOSES MINERALOGIQUES

2.8 ..... Existence d'une solution solide

2.8 ..... 1.1. Altitte-souritise

2.8 ..... 1.2. Foyaltite-foraxerite

2.8 ..... Existence d'un point eutectique

2.8 ..... 2.1. Altitte-souritise

2.10 ..... 2.2. Diopside-anorthite

2.10 ..... 2.3. Anorthite-silice

2.12 ..... 2.4. Diopside-silice

2.12 ..... Existence de valées eutectiques

2.12 ..... 2.1. Silice-silice-anorthite

2.12 ..... 2.2. Diopside-silice

2.12 ..... Existence des crâtes eutectiques

PRESENTATION.....0.9

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : LES APPROCHES ACTUELLES ET FUTURES DES PROBLEMES DE DEMOLITION

A. LA NATURE DES PROBLEMES DE DEMOLITION .....1.2

B. L'INFLUENCE DE L'EVOLUTION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES CONSTRUCTIONS  
SUR LES METHODES DE DEMOLITION.....1.7

1. Matériaux fragiles et matériaux non fragiles .....1.7

2. Le principe de la démolition d'une construction en matériau  
fragile.....1.8

3. Le principe de la démolition d'une construction en matériau  
non fragile.....1.8

C. CONCLUSION.....1.9

CHAPITRE 2 : LE DECOUPAGE THERMIQUE

A. LES PARAMETRES D'UN PROBLEME DE DECOUPAGE:.....2.2

2.1 Description sommaire.....

2.2 Le fonctionnement opérationnel.....

B. <u>LA PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE</u> .....	2.4
C. <u>LA FUSION DES COMPOSES MINERALOGIQUES</u> .....	2.5
1. Existence d'une solution solide.....	2.6
1.1. Albite-anorthite.....	2.6
1.2. Fayalite-forsterite.....	2.8
2. Existence d'un point eutectique.....	2.8
2.1. Albite-silice.....	2.8
2.2. Diopside-anorthite.....	2.10
2.3. Anorthite-silice.....	2.10
2.4. Diopside-silice.....	2.12
3. Existence de vallées thermiques.....	2.12
3.1. Silice-albite-anorthite.....	2.12
3.2. Diopside-albite-anorthite.....	2.12
4. Existence des crêtes thermiques.....	2.13
4.1. Silice-néphéline.....	2.15
4.2. Silice-oxyde de fer.....	2.15
5. Existence d'un puits thermique.....	2.15
6. Fusions de systèmes complexes constitués de composés minéralogiques et d'oxydes métalliques.....	2.18
6.1. Anorthite-forsterite-silice.....	2.18
6.2. Chaux-oxyde de fer-silice.....	2.20
D. <u>LE PRINCIPE DU DECOUPAGE THERMIQUE</u> .....	2.27
1. Notre idée directrice.....	2.27
2. L'organigramme du découpage thermique.....	2.28
2.1. Une phase thermique.....	2.28
2.2. Une phase thermo-chimique.....	2.29
2.3. Une phase cinétique.....	2.30
E. <u>LE PROCEDE TECHNOLOGIQUE</u> .....	2.31
1. Les conditions de la conception.....	2.31
2. La technologie.....	2.32
2.1 Description sommaire.....	2.32
2.2. Le fonctionnement opérationnel.....	2.34



3. Les performances et les rendements énergétiques.....	2.36
3.1. Les vitesses d'avance.....	2.36
3.2. Les domaines de validité.....	2.38
3.3. La précision du forage.....	2.40
3.4. Le rendement énergétique.....	2.40
3.5. Retour sur les justifications théoriques du procédé.....	2.43
F. <u>CONCLUSION</u> .....	2.44

CHAPITRE 3 : LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE THERMIQUE
--

A. <u>LES OBJECTIFS DE L'ETUDE</u> .....	3.2
B. <u>L'ELABORATION DU MODELE THERMOCINETIQUE DE LA CONDUCTION DANS UN MILIEU POREUX</u> .	
1. Le milieu solide homogène et isotrope.....	3.4
2. Cas d'un milieu poreux macroscopiquement homogène et isotrope : les bétons.....	3.9
2.1. Le modèle du milieu poreux.....	3.9
2.2. Les transferts thermiques dans un milieu poreux.....	3.10
2.2.1. Le bilan énergétique.....	3.10
2.2.2. Conductivité thermique équivalente du milieu étudié.....	3.11
2.2.3. Chaleur volumique équivalente .....	3.16
3. Les transferts de masse.....	3.17
3.1. Les processus de transfert de masse.....	3.17
3.2. L'eau dans les milieux poreux.....	3.17
3.3. Les transferts par diffusion moléculaire.....	3.19
3.4. Les transferts par capillarité.....	3.20
3.5. La thermomigration.....	3.20
4. Les propriétés thermophysiques des bétons.....	3.21
4.1. La nature de l'eau dans les bétons.....	3.21
4.2. La conductivité thermique des bétons.....	3.24

4.3. La chaleur volumique des bétons.....	3.26
C. <u>LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE DU BETON</u> .....	3.28
1. Etude théorique.....	3.29
1.1. Les hypothèses et les modèles thermocinétiques associés.....	3.29
1.1.1. La modélisation de la coupe thermique.....	3.29
1.1.2. La modélisation du béton.....	3.31
1.2. Equations générales et solutions.....	3.31
1.2.1. Modèle du mur semi-infini à lignes de flux parallèles.....	3.31
1.3. Le traitement du calcul et les résultats.....	3.39
1.3.1. Les paramètres du traitement.....	3.39
1.3.2. Les thermogrammes chronologiques.....	3.39
1.3.3. Les thermogrammes topologiques.....	3.41
2. Etude expérimentale.....	3.45
2.1. Les objectifs de cette étude.....	3.45
2.2. Les processus expérimentaux.....	3.46
2.2.1. Les corps d'épreuve.....	3.46
2.2.2. La coupe thermique.....	3.49
2.2.3. La mesure.....	3.49
2.3. L'étude du modèle semi-infini à lignes de flux parallèles ou radiales.....	3.56
2.4. L'étude de l'influence de l'action cinétique.....	3.59
2.5. L'étude de l'influence de l'âge du béton.....	3.61
2.6. L'étude de l'influence de l'effet de bord.....	3.63
2.7. L'étude de l'influence de l'orientation spatiale de la coupe.....	3.65
D. <u>LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE THERMIQUE DES BETONS ARME ET PRECON-</u> <u>TRAINT</u> .....	3.68
1. Etude théorique.....	3.68
1.1. Les hypothèses et les modèles thermocinétiques associés.....	3.69



1.1.1. La modélisation des coupes thermiques.....	3.69
1.1.2. La modélisation des corps d'épreuve.....	3.69
1.2. Equations générales et solutions analytiques.....	3.70
1.2.1. Dans le modèle du mur semi-infini.....	3.70
1.2.2. Dans le modèle de la barre semi-infinie non isolée latéralement.....	3.71
1.3. Les résultats.....	3.74
1.3.1. Les paramètres du traitement.....	3.74
1.3.2. Les thermogrammes chronologiques.....	3.74
1.3.3. Les thermogrammes topologiques.....	3.75
2. Etude expérimentale.....	3.78
2.1. Les objectifs de l'étude.....	3.78
2.2. Les processus expérimentaux.....	3.78
2.2.1. Les corps d'épreuve.....	3.78
2.2.2. Le montage des thermocouples.....	3.79
2.3. Les thermogrammes dans les armatures de direction perpendiculaire à la coupe thermique.....	3.80
2.3.1. Les thermogrammes chronologiques.....	3.80
2.3.2. Les thermogrammes topologiques.....	3.84
2.4. Réflexion sur l'isotropie du béton faiblement armé.....	3.84
2.5. Thermogrammes dans les armatures de direction parallèle à la coupe.....	3.86
<b>E. <u>CONCLUSIONS DE L'ETUDE THERMOCINETIQUE</u></b> .....	<b>3.88</b>
1. Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux..	3.88
1.1. Les thermogrammes dans le béton.....	3.88
1.2. Les thermogrammes dans les armatures.....	3.94
2. L'établissement des domaines critiques.....	3.95
2.1. La notion de critère d'état limite.....	3.95
2.2. Rappel des paramètres du découpage.....	3.96
2.3. La cartographie des domaines critiques.....	3.96
2.3.1. Le principe de cette cartographie.....	3.96
2.3.2. L'établissement du domaine critique.....	3.98

3. A propos de nécessaires prolongements .....	3.98
3.1. La détermination du champ de température dans les éléments de béton fortement armés.....	3.99
3.2. Vers une approche probabiliste des domaines critiques.....	3.99
3.3. L'étude de configurations insuffisamment explorées...	3.99

<p>CHAPITRE 4 : L'EVOLUTION DES PROPRIETES MECANQUES DU BETON ET DU BETON ARME SOUMIS A DECOUPAGE THERMIQUE</p>
---

A. <u>LES OBJECTIFS DE L'ETUDE</u> .....	4.2
B. <u>RETOUR SUR L'EVOLUTION DES PROPRIETES MECANQUES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE</u> .....	4.4
1. La dilatation thermique et le retrait du béton.....	4.4
2. Le module d'élasticité et le coefficient de Poisson.....	4.6
3. La résistance à la compression.....	4.8
4. Conclusion.....	4.8
C. <u>ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RESISTANCE MECANIQUE D'ELEMENTS DE BETON ET DE BETON ARME DECOUPES</u> .....	4.11
1. Préliminaire.....	4.11
2. Essais de résistance en traction (par flexion).....	4.12
3. L'adhérence acier-béton.....	4.14
4. Contraintes d'origine thermique.....	4.17
D. <u>CONCLUSION</u> .....	4.22



CHAPITRE 5 : LE DECOUPAGE THERMIQUE DES STRUCTURES

A. <u>PRELIMINAIRE</u> .....	5.2
1. L'origine.....	5.2
2. Les champs d'application.....	5.3
B. <u>LE DECOUPAGE DES OUVRAGES EN BETON ARME</u> .....	5.5
1. Analyse des différents types d'ouvrages (à partir d'études de cas).....	5.5
1.1. Démantèlements complets.....	5.5
1.1.1. Démolition d'un pont route sur voies de chemin de fer.....	5.6
1.1.2. Démolition d'une ossature d'immeuble.....	5.7
1.2. Démolition de structures provisoires.....	5.7
1.3. Modifications de constructions pour raisons fonctionnelles ou esthétiques.....	5.9
1.4. Modifications de constructions pour raisons de stabilité.....	5.14
1.5. Destruction de parties d'ouvrages sinistrés.....	5.16
2. Prospective à propos d'autres ouvrages particuliers.....	5.18
2.1. Les fûts de grande hauteur.....	5.18
2.1.1. Les relais hertziens.....	5.19
2.1.2. Les cheminées de centrales thermiques.....	5.21
2.2. Les centrales nucléaires en béton armé.....	5.21
C. <u>LA DEMOLITION DU BETON PRECONTRAINTE</u> .....	5.23
1. La nécessité d'une étude préliminaire.....	5.23
1.1. Le comportement d'un élément précontraint lors de sa coupe thermique.....	5.23
1.2. La modélisation de la liaison câble-béton avant et après découpage.....	5.25
1.2.1. Retour sur adhérence (type béton armé).....	5.25

1.2.2. L'adaptation au béton précontraint.....	5.27
1.2.3. Etude de la liaison : variation de contrainte dans l'armature.....	5.27
1.2.4. Définition de la longueur d'ancrage.....	5.31
1.2.5. Interprétation des résultats et conclusions....	5.36
1.3. L'étude expérimentale du comportement de la liaison lors du découpage.....	5.38
1.3.1. Le corps d'épreuve.....	5.38
1.3.2. Les moyens de mesure.....	5.38
1.3.3. Le processus de dépouillement.....	5.40
1.3.4. Les résultats.....	5.43
2. L'étude d'une opération de démolition.....	5.45
2.1. Présentation du problème.....	5.46
2.1.1. Description de l'ouvrage.....	5.46
2.1.2. Les contraintes de l'opération.....	5.48
2.2. La méthode et l'exécution.....	5.51
2.3. Le bilan de l'opération.....	5.52

**CHAPITRE VI : CONCLUSION ET PROSPECTIVE**

<u>CONCLUSION</u> .....	6.1
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u> .....	6.11



## PRESENTATION

Cette étude se partagera en cinq parties bien distinctes.

La première, très brève, s'attachera à présenter notre conception de la démolition. Inspirée de la préfabrication, et prenant le contre-pied de toutes les méthodes traditionnelles de démantèlement, nous avons la conviction qu'elle s'adapte bien aux conditions "écologiques" et économiques des futurs problèmes de démolition des ouvrages en béton armé et béton précontraint.

La seconde partie sera consacrée à notre principe de découpage thermique... Dans tous les procédés thermiques modernes de découpage (tétrène, plasma, laser,...) on recherche l'élévation maximale de température... Notre propos sera inverse, et nous nous efforcerons de montrer que c'est, selon nous, la "température minimale" qui sera, au contraire, la plus intéressante (du moins pour les matériaux composites).

Nous utiliserons, de façon certes peu conventionnelle, les travaux de grands vulcanologues, tels BOWEN et SCHAIRER, pour assurer notre démarche. Nous présenterons ensuite, rapidement, deux configurations de notre procédé, et nous en préciserons les performances et les rendements énergétiques.

Les troisième et quatrième parties nous permettront de nous interroger sur les conséquences du découpage thermique sur les propriétés des matériaux découpés.

Notre première approche (chapitre trois) s'intéressera à la thermocinétique du découpage thermique du béton et du béton armé. On y fera la synthèse de nos principaux résultats. Certains sont l'aboutissement d'interrogations personnelles, alors que beaucoup d'autres résultent de questions qui nous furent posées lors de réalisations industrielles.

Notre seconde approche (chapitre quatre), plus sommaire, et qui, dans notre esprit, mériterait une plus longue et plus complète étude que celle que nous avons jusqu'alors conduite, s'intéressera à l'évolution des propriétés mécaniques du béton et du béton armé découpés.

Notre objectif, dans ces deux chapitres, sera d'établir le plus rigoureusement possible des "domaines ultimes d'utilisation" du découpage thermique. Nous pensons que de telles études, conduites pour chacun des procédés de démolition, permettraient de dégager, plus scientifiquement, des critères de choix rigoureux.

Notre cinquième partie relatera nos "expériences en dimensions réelles". Nous y distinguerons le découpage thermique des structures en béton armé d'une part, et en béton précontraint d'autre part. Plus que de longues analyses, nous nous attacherons à y présenter des exemples précis qui, par leur nature, ont constitué des "premières" intéressantes,

au stade du projet, ou à celui de sa réalisation... Le caractère délicat des problèmes que posent maintenant certains grands ouvrages en béton précontraint dans différents pays nous a incité à traiter largement des recherches nécessitées par ce type de démolition. Par contre, nous avons volontairement omis certaines études qu'il nous a été donné de conduire, en raison de leurs caractères sensationnel (cathédrale de GUATEMALA, centrales thermiques de PEKIN), polémique (abattoirs de LA VILLETTE), ou confidentiel (ouvrages de la Défense Nationale).

Enfin, lors de notre conclusion, nous reviendrons sur notre conception de la démolition, pour dire combien le développement de techniques nouvelles nous paraît désormais indispensable dans le combat que l'Homme mène pour l'amélioration des conditions de travail, de la sécurité, et, plus généralement, pour la défense de la qualité de sa vie et de son environnement.



CHAPITRE I

---

LES APPROCHES ACTUELLES

ET FUTURES DES PROBLEMES DE DEMOLITION



## A.- LA NATURE DES PROBLEMES DE DEMOLITION

L'observateur de l'évolution des secteurs industriels du Bâtiment et des Travaux Publics ne manque pas de remarquer, depuis de longues années, l'amélioration de la qualité des constructions.

Ce phénomène est dû, pour l'essentiel, à différents facteurs tels que :

1°) l'accroissement de la connaissance des matériaux sous tous les aspects qui conditionnent leur comportement immédiat ou leur évolution dans le temps (physico-chimie, mécanique, thermique, etc...),

2°) le développement des méthodes d'analyse numérique des structures permettant (grâce aux ordinateurs) le dimensionnement du "modèle mécanique",

3°) la rationalisation systématique des méthodes d'organisation et de planification du travail,

4°) l'amélioration des performances et des rendements des matériels de chantier.

La conséquence des recherches conduites dans ces différents domaines est finalement de permettre à l'ingénieur d'assurer, dans le plus strict respect du parti architectural défini par le maître d'oeuvre, toutes les conditions de stabilité et de sécurité que le maître d'ouvrage est en droit d'exiger.

La contrepartie de ce considérable accroissement des qualités des constructions est de les rendre quasi-invulnérables le jour où, pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques, on souhaite les modifier ou les supprimer.

Le problème est rendu plus complexe encore dès qu'interviennent, outre les difficultés intrinsèques de la démolition (dues pour l'essentiel aux résistances mécaniques), d'autres préoccupations de plus en plus souvent déterminantes telles que la prise en compte :

- 1°) de la qualité de la vie des personnes habitant ou travaillant au voisinage du site,
- 2°) des conditions de fonctionnement normal des équipements ou des matériels dont le service doit être conservé et qui réagissent souvent désavantageusement aux vibrations et aux bruits (il en est ainsi par exemple, des centres de calcul, des locaux hospitaliers, des centraux téléphoniques, des locaux militaires opérationnels, etc...),
- 3°) de la nécessité de brefs délais de transformation d'un ouvrage compatibles avec le fonctionnement normal du service auquel il appartient (ainsi, par exemple, les réseaux de communications, les centres de production d'énergie, etc...).

En conséquence, si nous voulons conserver l'indispensable maîtrise de notre environnement, il nous paraît désormais nécessaire que s'élaborent et se développent de nouvelles méthodes de démolition capables de satisfaire à l'ensemble des problèmes tels qu'ils nous sont et nous seront désormais proposés.

Pendant longtemps, les opérations de démolition, sous l'influence, sans doute, des ingénieurs utilisant les méthodes des entreprises de terrassement plutôt que celles de construction, ont toujours été envisagées totalement sur le lieu de l'intervention et c'est par une réduction en gravats plus ou moins gros et leur évacuation qu'elles se terminaient.

Tant que le site et les conditions de l'opération le permettaient, une telle démarche, fort simple dans son principe, a fait la preuve, par des milliers d'exemples, de sa qualité et de sa réussite.

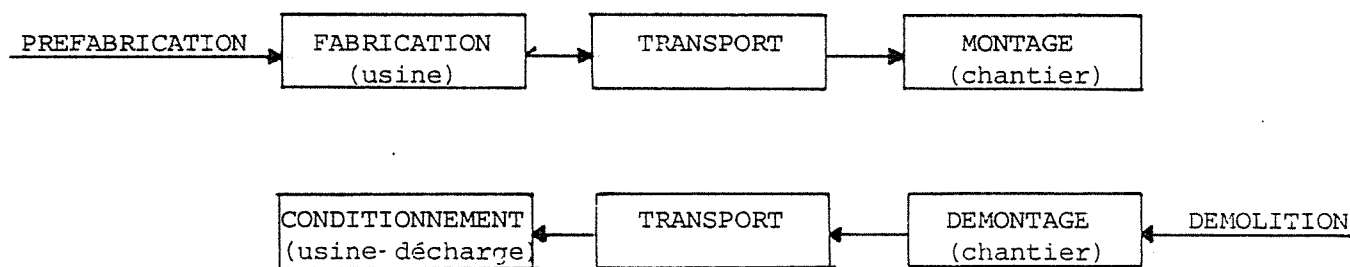
Parallèlement à cette observation, examinons, durant la même période, l'évolution de la construction ; nous constatons que, de plus en plus, face aux problèmes de délais d'exécution, de coût des investissements et de conditions de travail notamment, les entreprises ont adopté des solutions nouvelles, telles que la pré-fabrication qui, en quelque sorte, se réduit, si l'on schématise l'acte de construire, à trois opérations qui sont :

- 1°) l'exécution des éléments, en poste fixe, en usine, avec utilisation de matériels à fort rendement travaillant en continu pour en justifier l'investissement ;
- 2°) le transport de ces éléments ;
- 3°) le montage, qui reste l'opération de chantier qui, comparée à la méthode traditionnelle de construction, est brève et peu génératrice de nuisances.

Notre idée est que l'application "à l'envers" d'un tel schéma peut constituer, dans un grand nombre de cas, une solution satisfaisante du problème de démolition.

Nous retrouvons ainsi :

- 1°) une phase de démontage sur chantier ;
- 2°) une phase de transport identique à celle énoncée précédemment ;
- 3°) une phase de destruction conduisant à la mise en décharge ou à la récupération qui serait effectuée en poste fixe sur des lieux isolés, véritables "usines de démolition" où l'utilisation d'engins fixes de grande puissance permettrait un abaissement du prix de revient.



Un tel schéma sous-entend entre autres choses, l'existence de procédés de découpage des ouvrages, notamment en béton, suffisamment mobiles, simples, efficaces et non générateurs de nuisances pour être compatibles avec la vie de chantier certes, mais aussi avec le respect de toutes les exigences désormais rencontrées.

Cependant, toutes les raisons liées au respect de l'environnement, d'une part, ou à des objectifs d'organisation et de rentabilité d'autre part, ne sont pas les seules à justifier un tel schéma.

Il en est, en effet, une autre qui est, selon nous, tout aussi fondamentale : l'évolution des caractéristiques (et, notamment, du comportement mécanique) des matériaux de construction durant ces dernières décennies.



B.- L'INFLUENCE DE L'EVOLUTION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES  
CONSTRUCTIONS SUR LES DIFFERENTES METHODES DE DEMOLITION.

1) Matériaux fragiles et matériaux "non fragiles" (béton et béton armé)

Pendant longtemps, les constructions ont été réalisées à partir de minéraux naturels (roches). Une évolution a conduit à l'élaboration de matériaux consolidés obtenus à partir de minéraux concassés assemblés par des liants (les bétons, par exemple).

Outre leur bonne résistance à la compression, ces matériaux sont caractérisés, du point de vue de leur comportement mécanique, par une certaine fragilité rendant nulle toute possibilité d'adaptation plastique pour la structure les utilisant.

Ainsi, le caractère toujours brutal et spontané de la rupture d'un matériau fragile rend son emploi délicat et dangereux... Aussi, ces dernières années, s'est-on attaché, à travers, notamment les méthodes de calcul, à obtenir, indépendamment du niveau de résistance recherché, un comportement "non fragile" du "matériau". C'est désormais toujours le cas du béton armé et du béton précontraint utilisés pour la réalisation d'éléments de structures.

2) Le principe de la démolition d'une construction en matériau fragile.

Lors de la démolition d'un matériau fragile, on va évidemment chercher à exploiter cette propriété et, tout naturellement, c'est vers une méthode tendant à créer et à propager un endommagement mécanique

que l'on s'orientera. Les techniques seront nombreuses (pressions, chocs, cycles de charges, etc...) et toutes permettront avec, certes, une consommation d'énergie et des nuisances non négligeables, de conduire la démolition jusqu'à une réduction en éléments fins aisément évacuables.

3) Le principe de la démolition d'une construction en matériau "non fragile" : le béton armé.

Le niveau d'énergie nécessaire à l'endommagement d'un tel matériau est trop important, à cause de l'adaptation plastique, pour envisager économiquement une telle méthode.

D'un point de vue théorique, différents processus peuvent alors être envisagés. Parmi ceux-ci :

1°) On peut conduire localement, dans une première phase, un endommagement des zones essentiellement fragiles de l'ouvrage dans le but, lors de la seconde phase, d'atteindre les armatures ductiles pour les découper, ou de créer des rotules plastiques conduisant à la ruine.

2°) On peut aussi s'efforcer de retrouver le caractère fragile de l'un des matériaux de l'association (le béton) en réduisant le rôle de l'autre (l'acier). Ceci pourrait être atteint par un procédé qui détruirait l'adhérence (l'acier serait alors inefficace) ou qui détruirait l'armature proprement dite (dilatation et corrosion semblent pouvoir atteindre ces deux objectifs.)

On serait ensuite ramené à un problème de démolition de matériau fragile.

3°) On peut enfin préférer à la rupture du matériau son découpage. Deux grandes méthodes sont alors possibles : soit l'usinage (mais il est très difficile d'élaborer des angles de coupe de diamants industriels correspondant à des matériaux aussi distincts que le béton et l'acier.), soit la fusion locale.

C.- CONCLUSION.

L'analyse de la nature des problèmes futurs de démolition et l'observation de l'utilisation des matériaux de construction nous a confirmé dans notre conviction que l'évolution des méthodes de démolition conduit inéluctablement à la création et au développement de procédés de découpage des ouvrages.

Ainsi, pénétré de cette idée que nous croyons prospective, nous nous sommes attaché à adapter et à développer le découpage thermique.



## CHAPITRE II

----

### LE DECOUPAGE THERMIQUE



## A.- LES PARAMETRES DU PROBLEME.

Lorsque l'on se fixe comme objectif de découper un matériau par fusion, trois questions fondamentales se posent :

1. Quelle est la température de fusion de ce matériau ?
2. Comment produire et concentrer l'énergie thermique nécessaire à l'obtention de cette température ?
3. Est-ce que l'altération qui va résulter de la propagation d'une partie de cette énergie thermique dans le reste du matériau va conduire à des dommages graves ?

La plupart des techniques de découpage considèrent la réponse à la première question comme une caractéristique du matériau sur laquelle on ne peut pas agir et l'essentiel du processus consiste d'une part, à obtenir le niveau d'énergie correspondant et, éventuellement, d'autre part, à mesurer les dégradations en résultant.

Notre position est, à cet égard, fondamentalement différente... Puisque les conditions économiques tendent toujours à minimiser la dépense d'énergie (question 2) et que la recherche de la qualité tend toujours à réduire les dégradations du voisinage (question 3), nous pensons que la solution théorique réside dans la recherche d'une opération concomitante au découpage dont le résultat serait d'abaisser la température de fusion. Ainsi, s'en trouveraient d'autant réduits les

niveaux d'énergie et de dégradation.

C'est toujours dans cette direction que nous avons développé nos recherches.

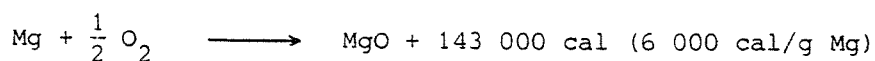
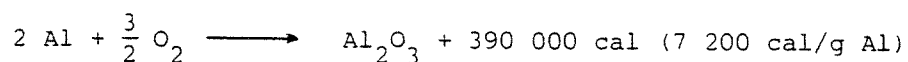
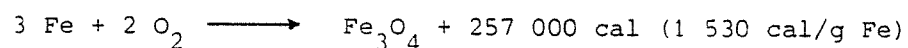
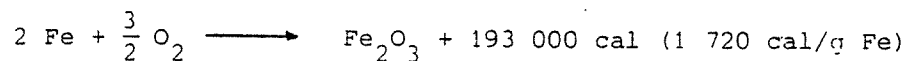
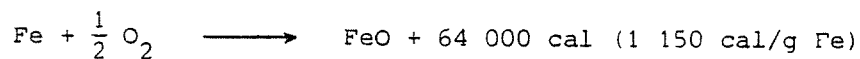
## B.- LA PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE.

Pour des raisons développées dans le paragraphe C de ce même chapitre, nous avons choisi d'utiliser, pour produire l'énergie thermique, les réactions exothermiques de combustion des métaux (préchauffés) dans l'oxygène.

Ainsi, par exemple, le comportement du fer dans l'oxygène -à des températures supérieures à 400°C- a fait l'objet de nombreuses études approfondies [1] tant du point de vue des oxydations du fer, [2] du protoxyde de fer et de la magnétite que du point de vue de la cinétique de ces oxydations et des niveaux d'énergie d'activation. [3] [4] [5]

Plus simplement, notre propos se limitera à rappeler, de façon très élémentaire, les quantités d'énergie calorifique résultant de la combustion des principaux métaux -fer, aluminium, magnésium-, préchauffés entre 400°C et 700°C, que nous envisageons d'utiliser dans la suite de notre étude :

Les réactions ci-après précisent la nature des oxydes métalliques obtenus et l'importance de la quantité de chaleur dégagée.



## C. - LA FUSION DES COMPOSES MINERALOGIQUES.

Tout composé minéralogique, cristallisé ou non, possède, à la pression  $p$ , une température de fusion  $T_p$  déterminée. Dans le cas d'un mélange (roche, sédiment naturel, béton) constitué de divers composés (essentiellement des silicates, des carbonates et des oxydes), la température de fusion -ou la température de solidification- de l'ensemble, sous des conditions de pression fixées, varie suivant :

- la nature et les propriétés de chacun des constituants du mélange ;
- leurs proportions relatives dans le mélange.

Nous allons donc, dans ce chapitre, étudier le processus de fusion -ou de solidification (les phénomènes étant réversibles)- de mélanges établis à partir des composés minéralogiques (entrant dans la constitution des roches et des bétons) et à partir des oxydes métalliques (résidus de la réaction exothermique).

Nous débuterons notre étude en présentant des compositions binaires puis ternaires simples pour aboutir ensuite à des systèmes plus complexes se rapprochant des modèles réels et permettant de déduire des conséquences importantes quant à la conception et la technologie de notre procédé.

1. EXISTENCE D'UNE SOLUTION SOLIDE.

1.1. Cas de deux composés pouvant se combiner entre eux : albite et anorthite. [6]

Ils peuvent constituer alors des solutions solides.

L'albite a pour composition  $\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$

$\frac{1}{2} \text{Na}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{Al}_2 \text{O}_3 + 2 \text{Si O}_2$ . Ce corps, seul, fond à 1118°C.

L'anorthite a pour composition  $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$

$\text{Ca O} + \text{Al}_2 \text{O}_3 + 2 \text{Si O}_2$ . Ce corps, seul, fond à 1553°C.

Si l'on effectue un mélange de ces deux corps, toutes les températures situées dans le domaine 1118°C, 1553°C peuvent être température de fusion :

Le diagramme d'équilibre présente deux courbes (voir fig. 2.7.a.) La courbe supérieure est celle du "liquidus" qui détermine les températures au-delà desquelles tout le bain est fondu quelle que soit sa composition. La courbe inférieure est appelée courbe de "solidus"; en dessous de cette courbe les mélanges (dont la composition est déterminée en masse par les abscisses) sont entièrement cristallisés.

Supposons la cristallisation d'un bain fondu de composition x (fig 2.7.a). La température baisse jusqu'à atteindre la courbe du liquidus en a. A cette température, des cristaux, correspondant à la composition b, (-soit dans cet exemple  $\text{ar}_{80} - \text{al}_{20}$ ) commencent à se former. La température du mélange continue de décroître, la composition du liquide restant va suivre la courbe ac alors que les cristaux correspondant qui réagissent, à chaque instant, avec le bain, vont avoir des compositions correspondant à la courbe bd. Au point e du liquidus, il



fig 2.7.a

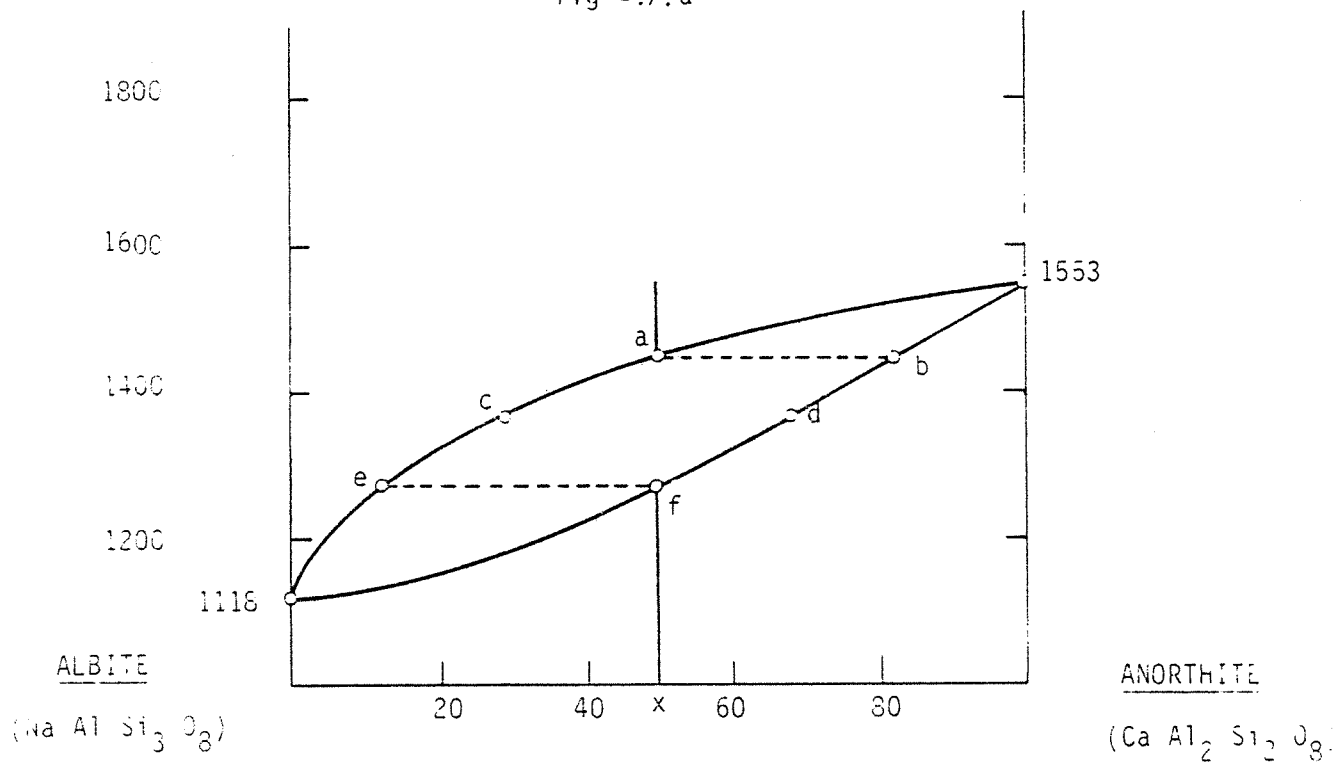
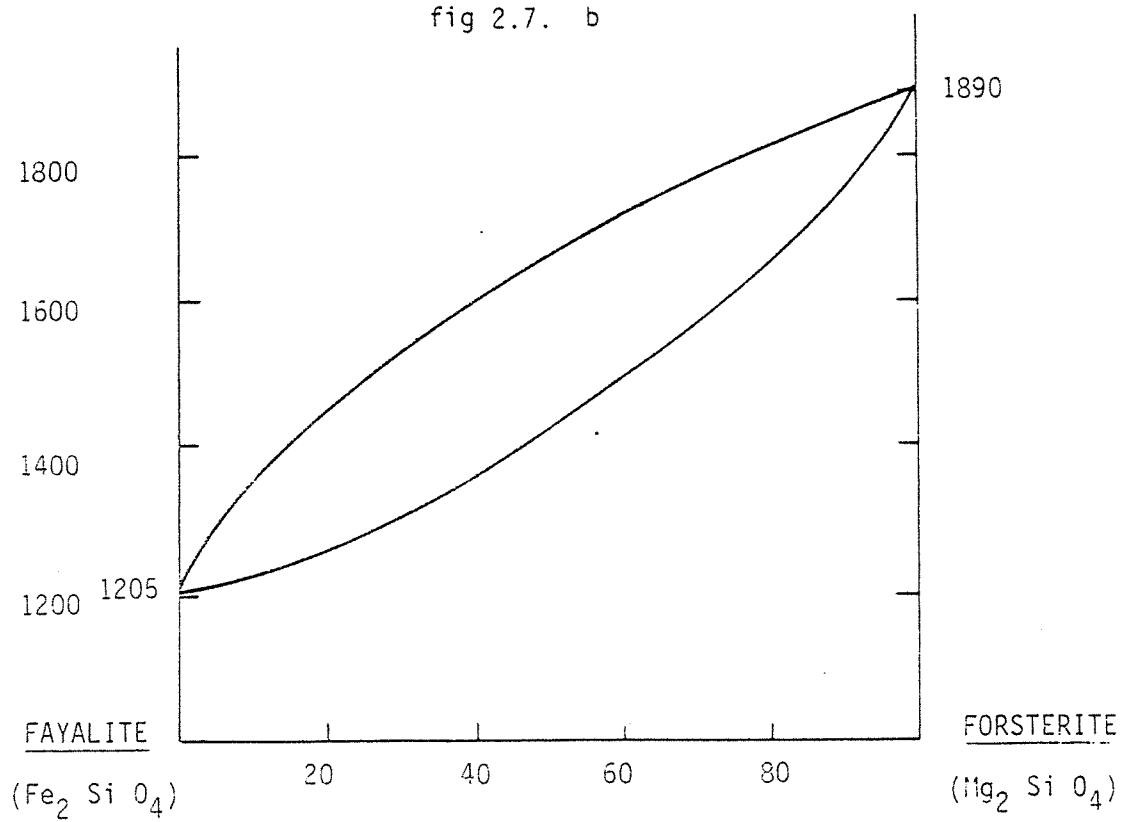


fig 2.7. b



ne reste plus de liquide et l'ensemble a cristallisé (point f) dans les mêmes proportions (x) d'albite et d'anorthite que celles du mélange initial fondu. A l'inverse, la fusion suit un processus identique.

### 1.2. Cas du système fayalite-forsterite. [7]

Un autre exemple mérite d'être observé pour l'intérêt qu'il présente dans la suite de notre étude. Les compositions initiales et les températures de fusion de chaque constituant, à l'état pur, sont respectivement  $\text{Fe}_2 \text{SiO}_4$  et  $\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$  d'une part, et  $1890^\circ\text{C}$  et  $1205^\circ\text{C}$ , d'autre part.

Nous trouvons fig. 2.7.b les courbes liquidus-solidus de ce mélange.

## 2. EXISTENCE D'UN POINT EUTECTIQUE.

### 2.1. Soit le mélange binaire albite-silice (fig. 2.9. a). [8]

Albite :  $\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$  -  $T_F = 1118^\circ\text{C}$

Silice :  $\text{SiO}_2$  -  $T_F = 1713^\circ\text{C}$

Pour un mélange fondu donné en composition, la courbe atteinte pendant le refroidissement est soit la courbe de cristallisation de la silice (sous la forme existant à haute température, la cristobalite, ou sous la forme existant à basse température, la tridymite) soit la courbe de cristallisation de l'albite.

Les deux courbes se rejoignent en un point E, point eutectique correspondant au mélange ( $\alpha$ ) qui aura la température de fusion la plus basse possible ( $1085^\circ\text{C}$ ).

Lorsqu'un mélange, à l'état liquide, de composition x se refroidit, le premier minéral à cristalliser est la silice. Toute la silice

fig. 2.9.a

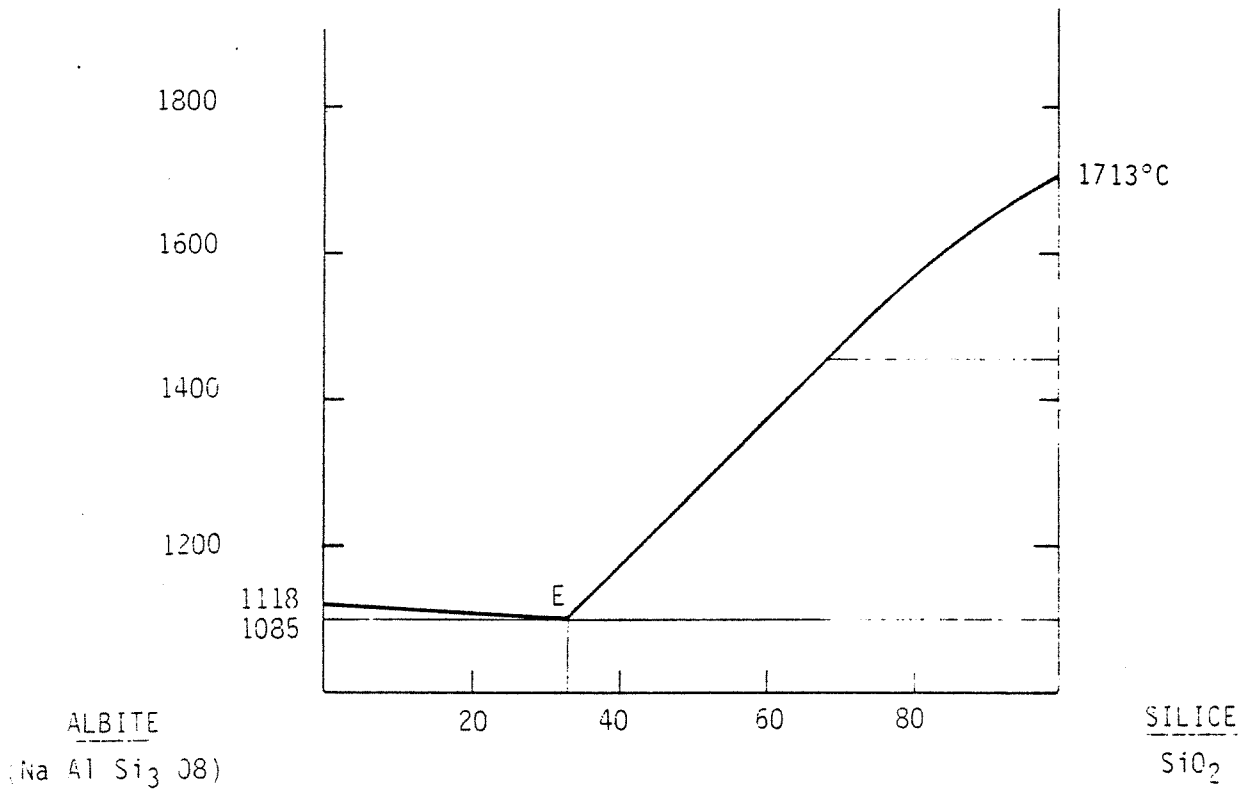
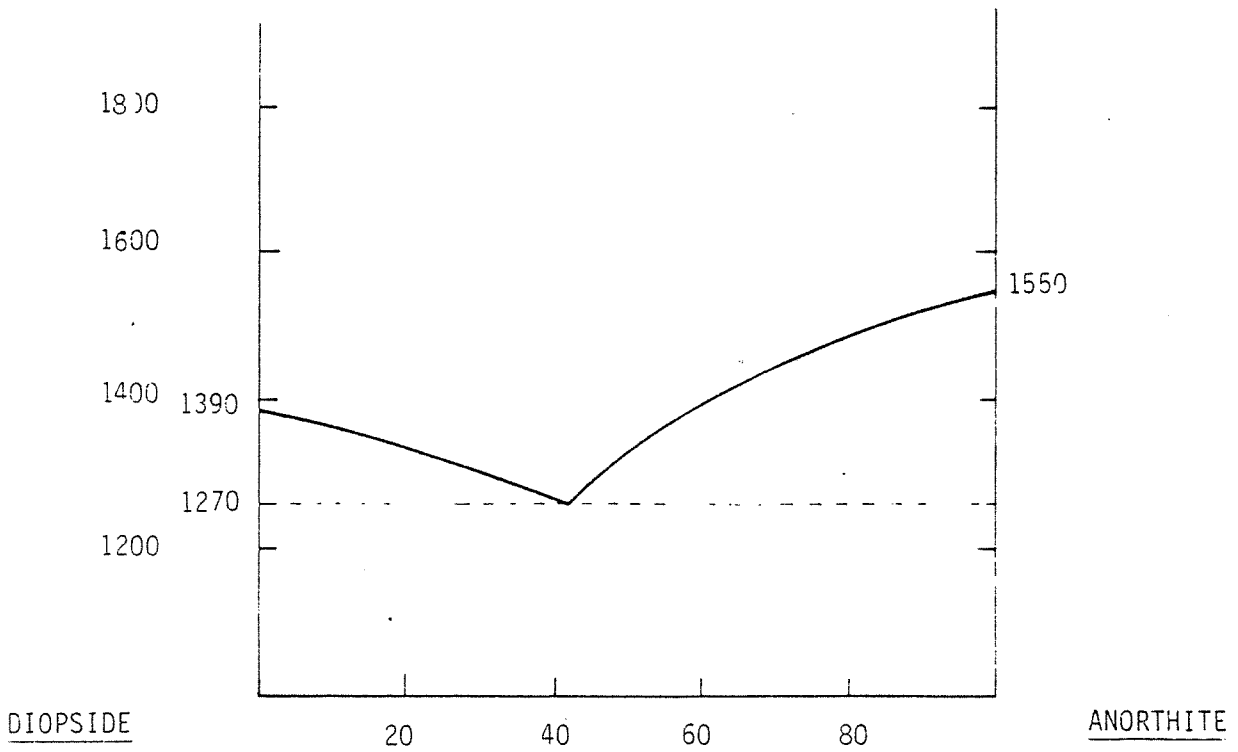


fig. 2.9.b



crystallise peu à peu. Pendant ce temps, le bain s'enrichit en albite. Cette évolution se poursuit jusqu'au point E où l'albite cristallise à son tour.

## 2.2. Soit le système binaire diopside-anorthite (fig .2.9.b). [9]

On a :

diopside :  $\text{Ca Mg Si}_2 \text{O}_6$  -  $T_F = 1390^\circ\text{C}$

anorthite :  $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$  -  $T_F = 1550^\circ\text{C}$

Le diopside nous intéressera particulièrement dans la suite de notre étude car il regroupe ( $\text{Ca O} + \text{Mg O} + 2 \text{Si O}_2$ ) de la silice, un oxyde métallique et de la chaux.

Le diagramme d'équilibre diopside-anorthite révèle un eutectique à  $1270^\circ\text{C}$  pour 42% d'anorthite et 58% de diopside.

Là encore, donc, suivant la composition initiale du bain fondu (déterminée par l'abscisse), il se formera soit du diopside soit de l'anorthite jusqu'à ce que la température de l'eutectique soit atteinte. Pendant cette cristallisation, la composition du liquide non encore cristallisé évolue constamment.

## 2.3. Soit le système binaire anorthite-silice (fig .2.11.a).

On a :

anorthite  $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$  -  $T_F = 1550^\circ\text{C}$

silice  $\text{Si O}_2$  -  $T_F = 1713^\circ\text{C}$

Le processus est, là encore, identique avec l'eutectique à  $1368^\circ\text{C}$  atteint pour 48% d'anorthite et 52% de silice.

fig- 2.11.a

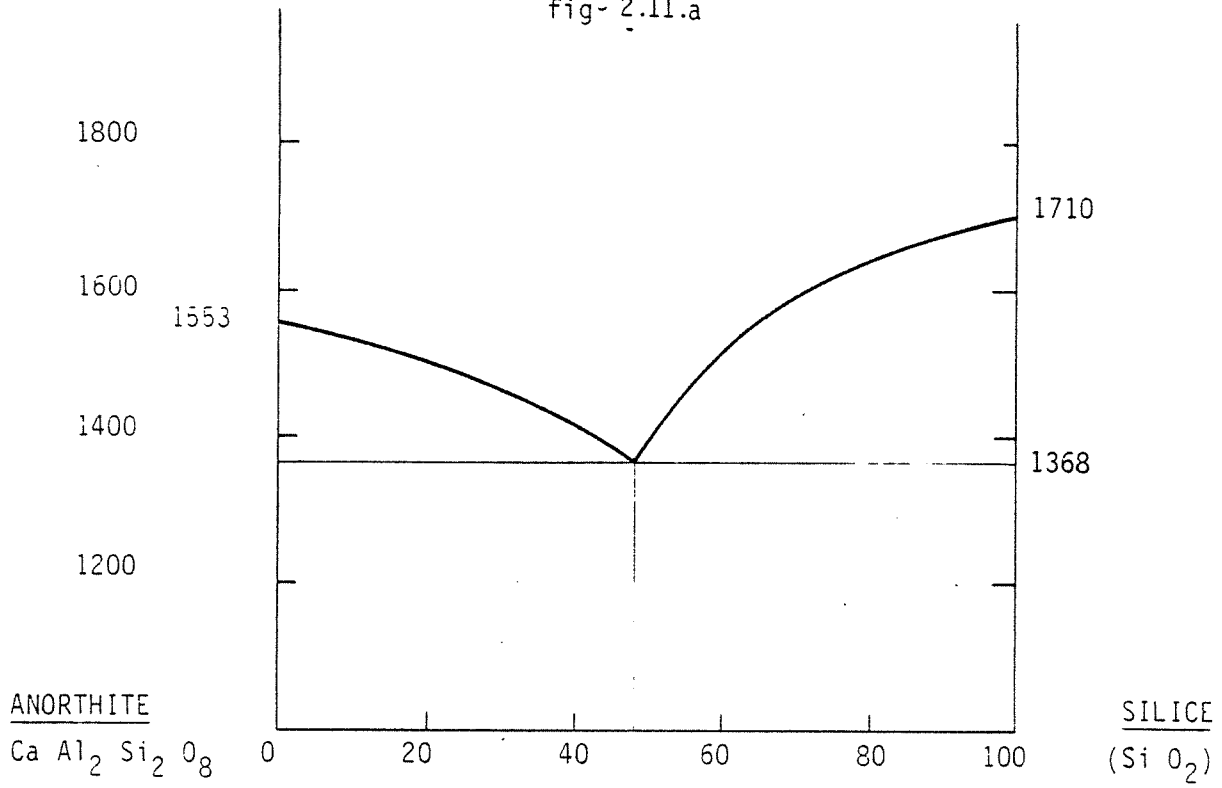
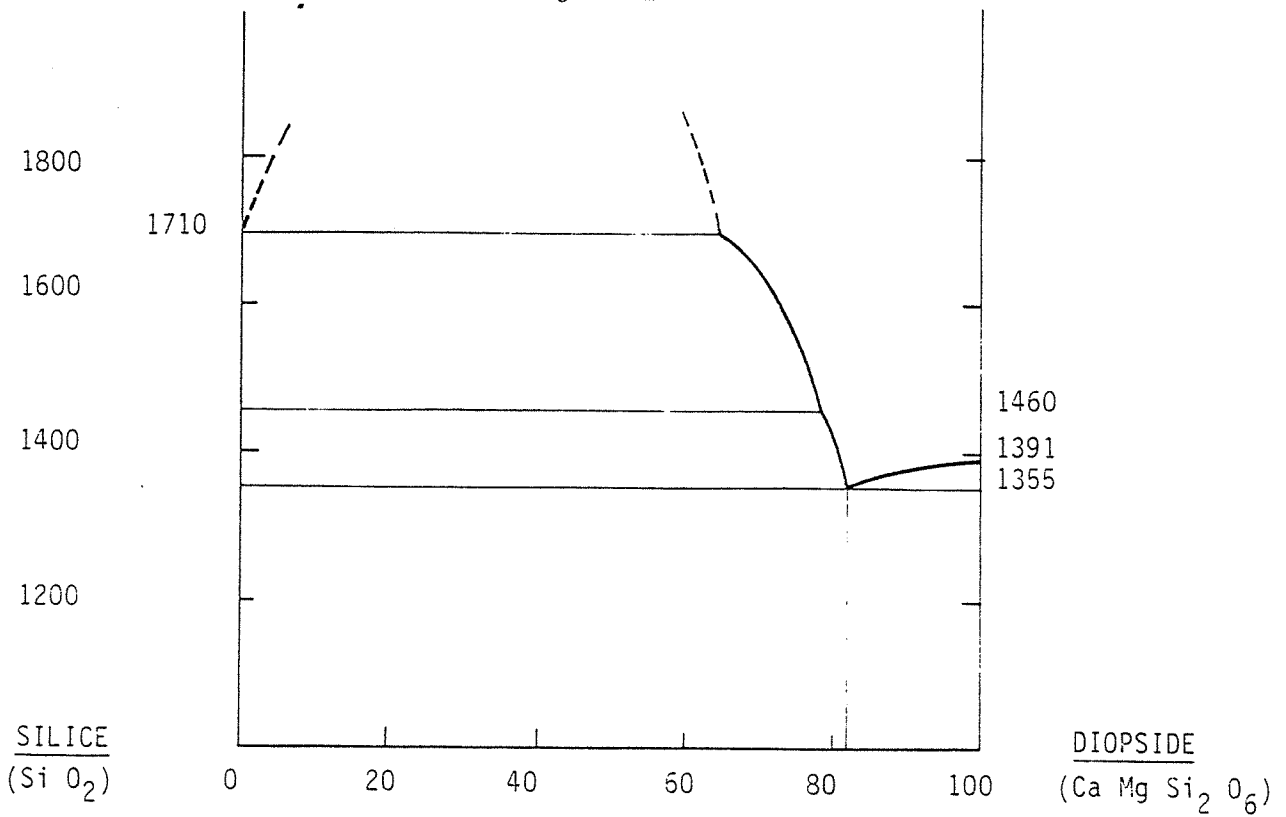


fig. 2.11 b



2.4. Soit, enfin, le système binaire diopside-silice (fig.2.11.b).

L'eutectique est, cette fois, atteint à 1360°C pour 82% de silice et 18% de diopside.

3. EXISTENCE D'UNE "VALLEE THERMIQUE".

3.1. Soit un système ternaire (sans composants intermédiaires entre deux quelconques des trois constituants de base) : le système silice, albite, anorthite (fig. 2.13). [10]

La combinaison des systèmes binaires silice - anorthite (avec eutectique à 1368°C), silice-albite (avec eutectique à 1118°C) et albite-anorthite (pas d'eutectique, solutions solides) conduit à la configuration de la fig.2.13 . Les deux points eutectiques  $E_1$  et  $E_2$  définissent les limites d'une vallée thermique.

3.2. Soit un autre système ternaire analogue : le système diopside-albite-anorthite (fig.2.14 ). Le processus est analogue ; les limites de la vallée thermique sont alors les points eutectiques :

$$E_1 = 1260^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad E_2 = 1118^\circ\text{C}$$

4. EXISTENCE D'UNE "CRETE THERMIQUE".

Il est des cas où deux corps en présence réagissent et se combinent partiellement pour constituer un composé intermédiaire. Ce composé réagit ensuite, simultanément, avec les deux composants primaires : le système binaire se dédouble donc. On peut noter l'apparition de deux points eutectiques  $E_1$  et  $E'_1$ .

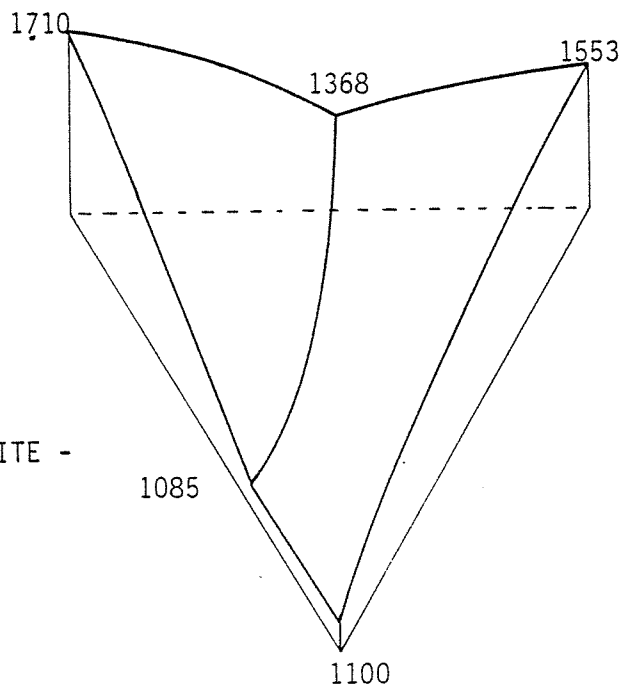
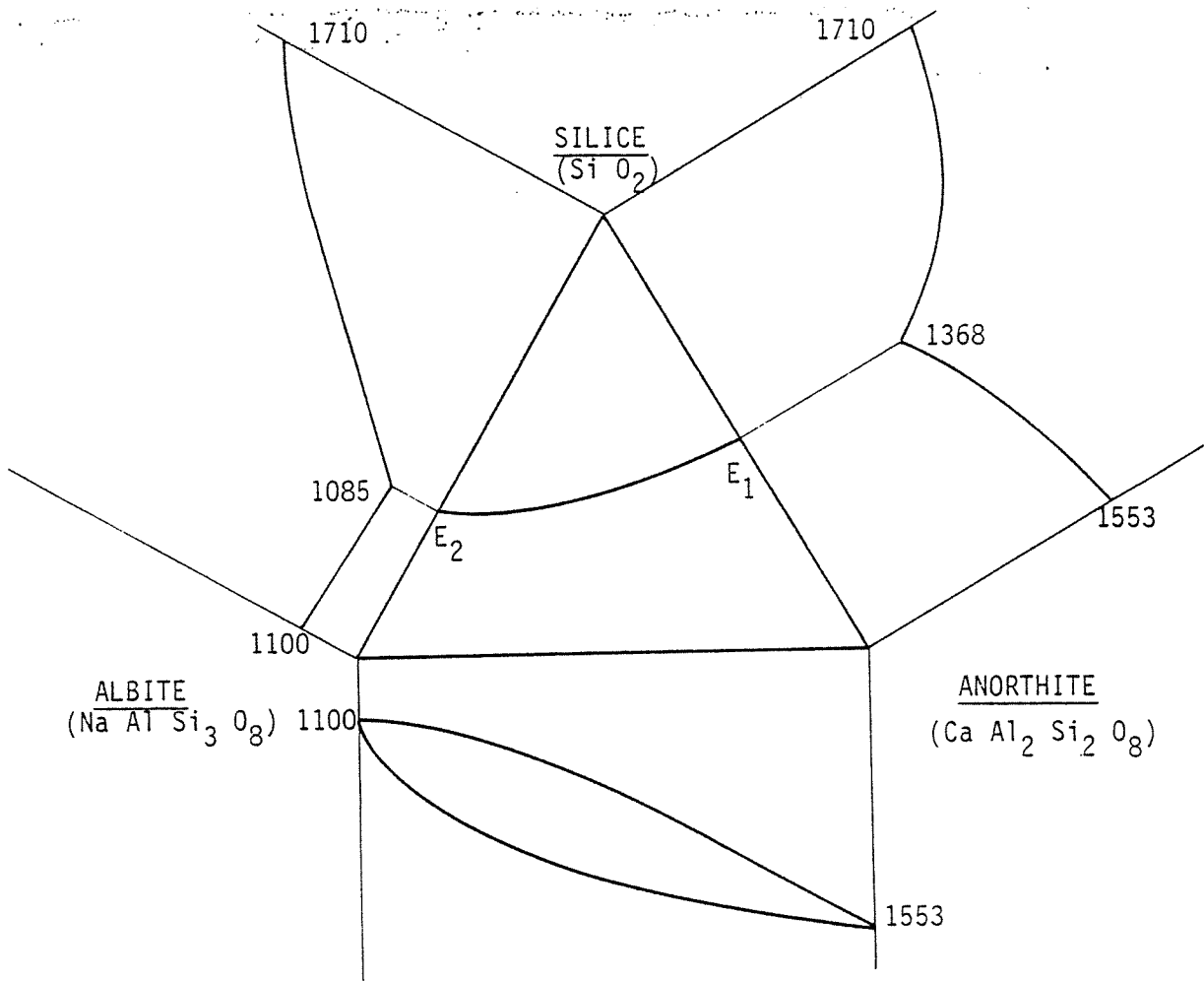


fig. 2.13

LE SYSTEME SILICE-ALBITE -  
ANORTHITE.

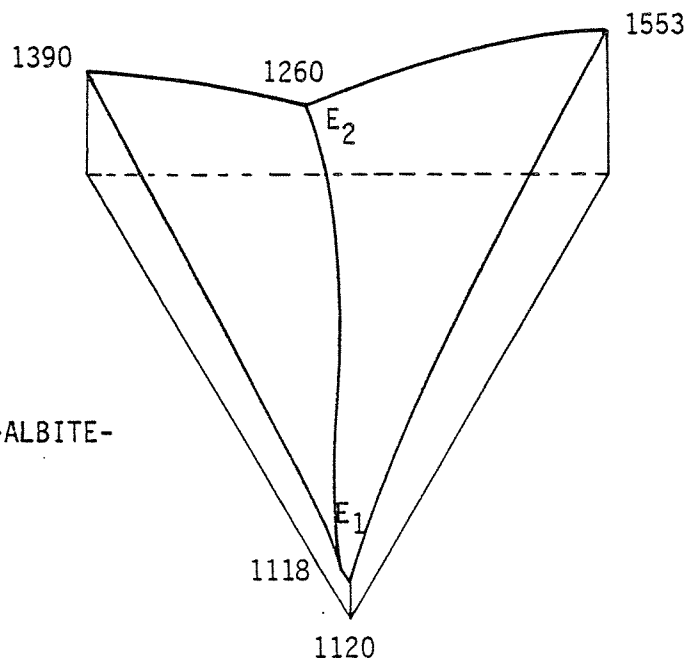
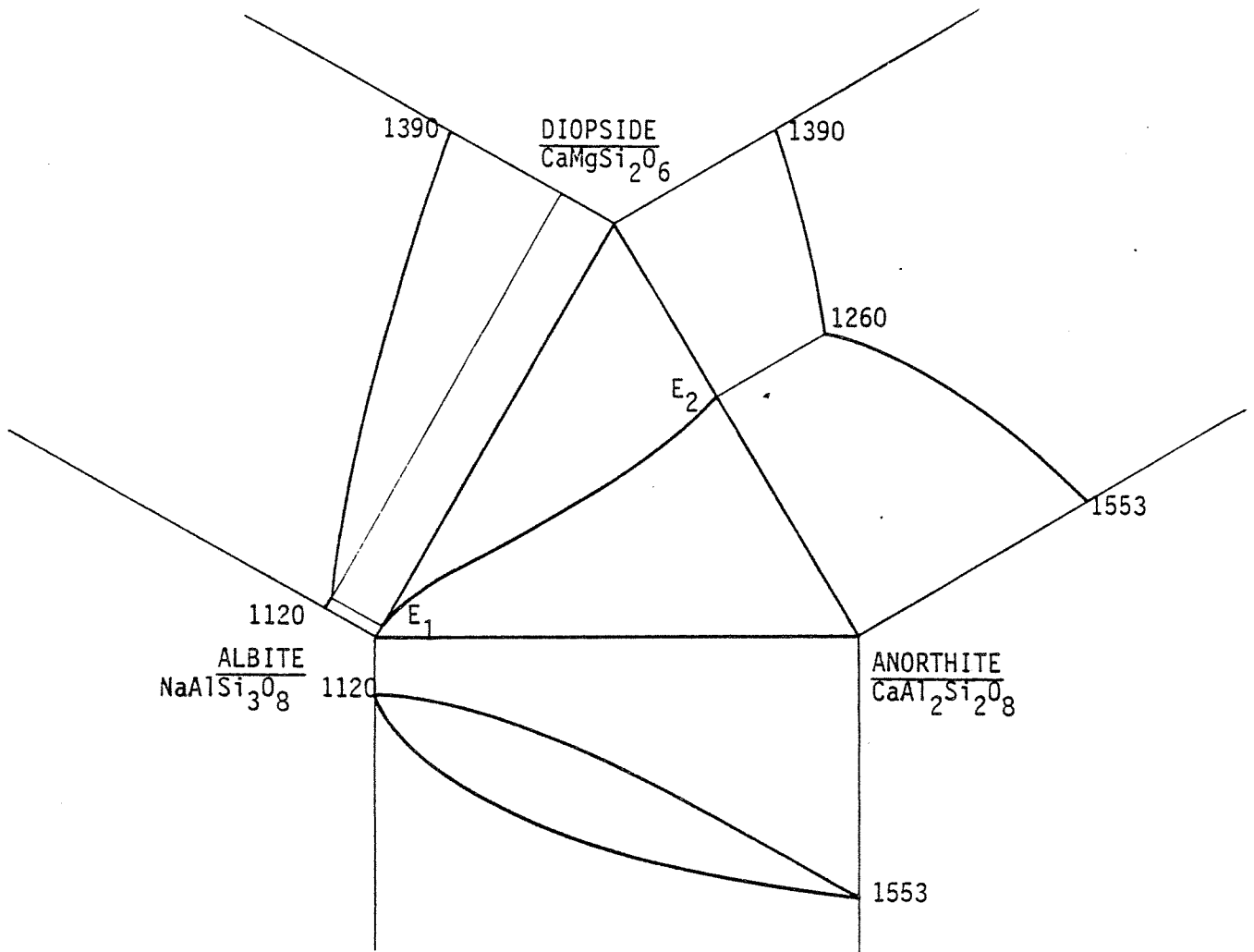


fig. 2.14

LE SYSTEME DIOPSIDE-ALBITE-ANORTHITE.



4.1. Soit, par exemple, le mélange silice-néphéline (fig.2.16.a)

( $\text{Si O}_2$  et  $\text{Na Al Si O}_4$ ) il conduit à un composé intermédiaire que nous avons déjà étudié : l'albite ( $\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$ ). Deux eutectiques sont alors possibles suivant la composition du mélange initial : un premier eutectique correspond au système albite-silice et un deuxième eutectique au système albite-néphéline.

Suivant la composition initiale du bain, on obtient lors du refroidissement, des cristaux albite-silice ou des cristaux albite-néphéline (mais jamais de cristaux de silice et de néphéline ensemble).

4.2. Soit, encore, le mélange silice-oxyde de fer (fig.2.16.b).

Il adopte un mélange intermédiaire stable  $\text{Fe}_2 \text{Si O}_4$ . On obtient alors, suivant la composition initiale du bain, les cristaux de la forme  $\text{Fe}_2 \text{Si O}_4$ ,  $\text{Si O}_2$  (tridymite) ou  $\text{Fe}_2 \text{Si O}_4$ ,  $\text{Fe O}$ .

4.3. Les lignes de séparation des deux systèmes albite-silice et albite-néphéline (dans 4.1.), et des deux systèmes  $\text{Fe O}$ ,  $\text{Fe}_2 \text{Si O}_4$  et  $\text{Si O}_2$ ,  $\text{Fe}_2 \text{Si O}_4$  (dans 4.2.) sont appelées des crêtes thermiques.

5. EXISTENCE D'UN "PUITS THERMIQUE" (fig.2.17 ) [11]

Soit un mélange ternaire (ABC) pour lequel il existe trois eutectiques  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  entre les trois composants A, B et C. Différentes configurations sont possibles et notamment le cas particulier où les trois vallées thermiques sont concourantes en un point (appelé puits thermique) qui est le point de fusion le plus faible possible du mélange. Il est facile de déterminer la composition lui correspondant.

fig.2. 15.a

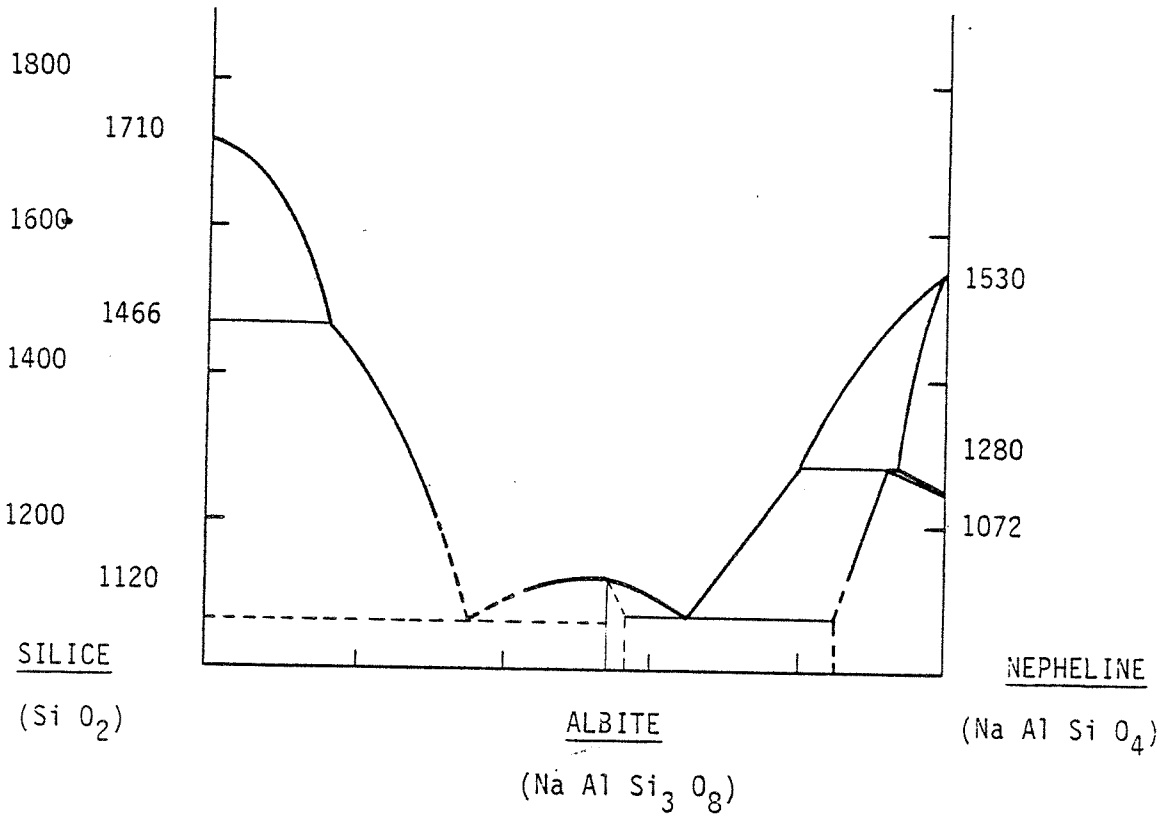


fig.2. 16. b

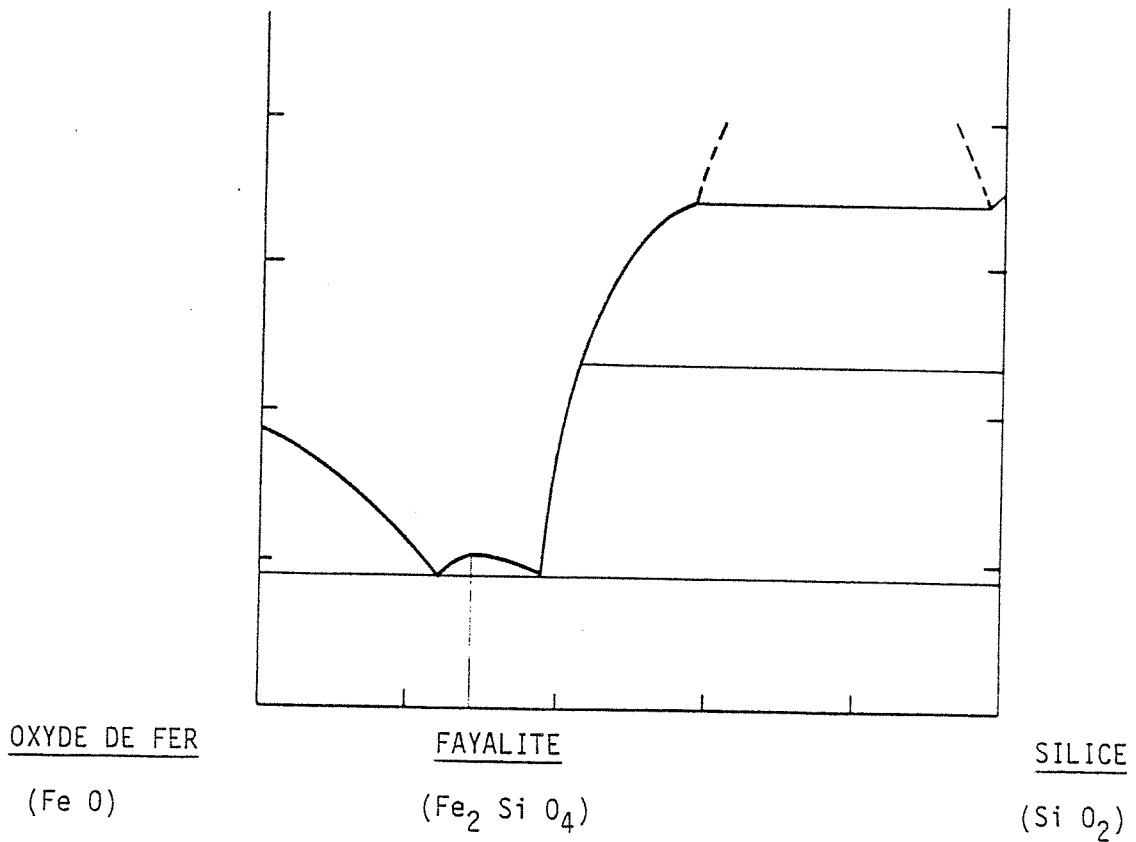
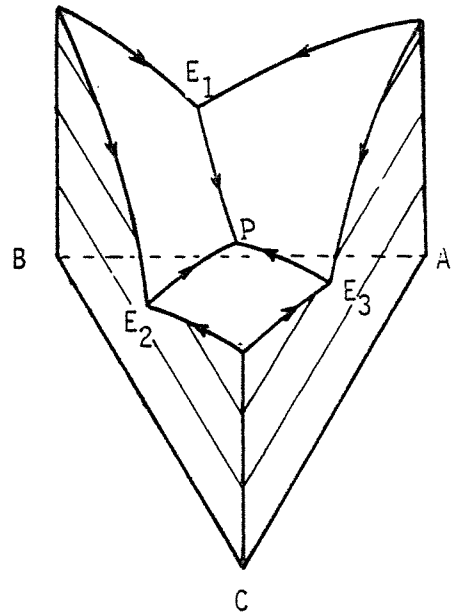
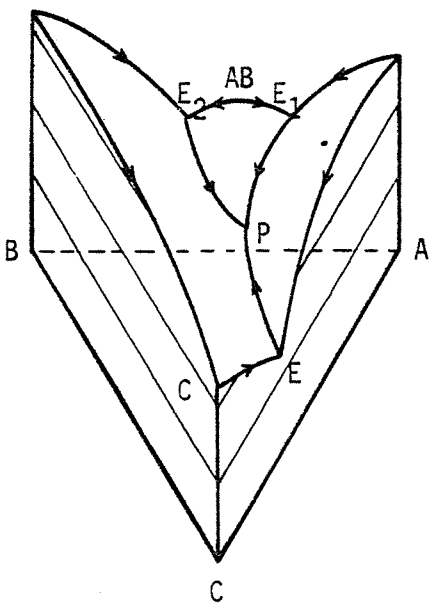
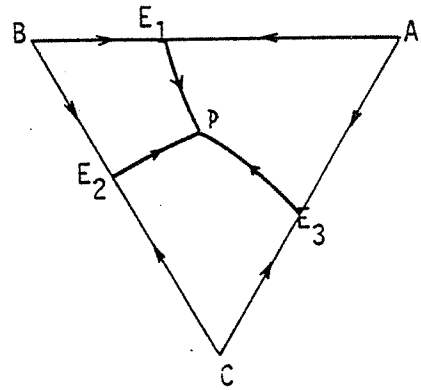
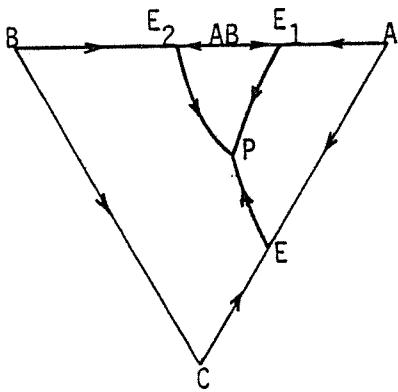


fig. 2.17 - Puits thermiques avec ou sans crêtes thermiques.



## 6. FUSION DE SYSTEMES COMPLEXES CONSTITUES DE COMPOSES MINERALOGIQUES ET D'OXYDES METALLIQUES.

Outre l'importance, pour la suite de notre étude, des informations qui résultent des exemples précédents, ceux-ci ont permis de caractériser les configurations et singularités que peuvent avoir les thermogrammes relatant les températures de fusion des corps composés.

Nous allons, maintenant, étudier deux mélanges plus complexes dans la composition desquels entrent les principaux constituants des roches et des bétons d'une part, et des oxydes métalliques (fer, magnésium, aluminium) d'autre part.

### 6.1. Le mélange anorthite-forsterite-silice. [12]

- anorthite :  $\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$  ( $\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$ ) -  $T_F = 1550^\circ\text{C}$
- forstérite :  $\text{Mg}_2 \text{Si O}_4$  ( $2\text{MgO}, \text{SiO}_2$ ) -  $T_F = 1890^\circ\text{C}$
- silice :  $\text{SiO}_2$  -  $T_F = 1700^\circ\text{C}$

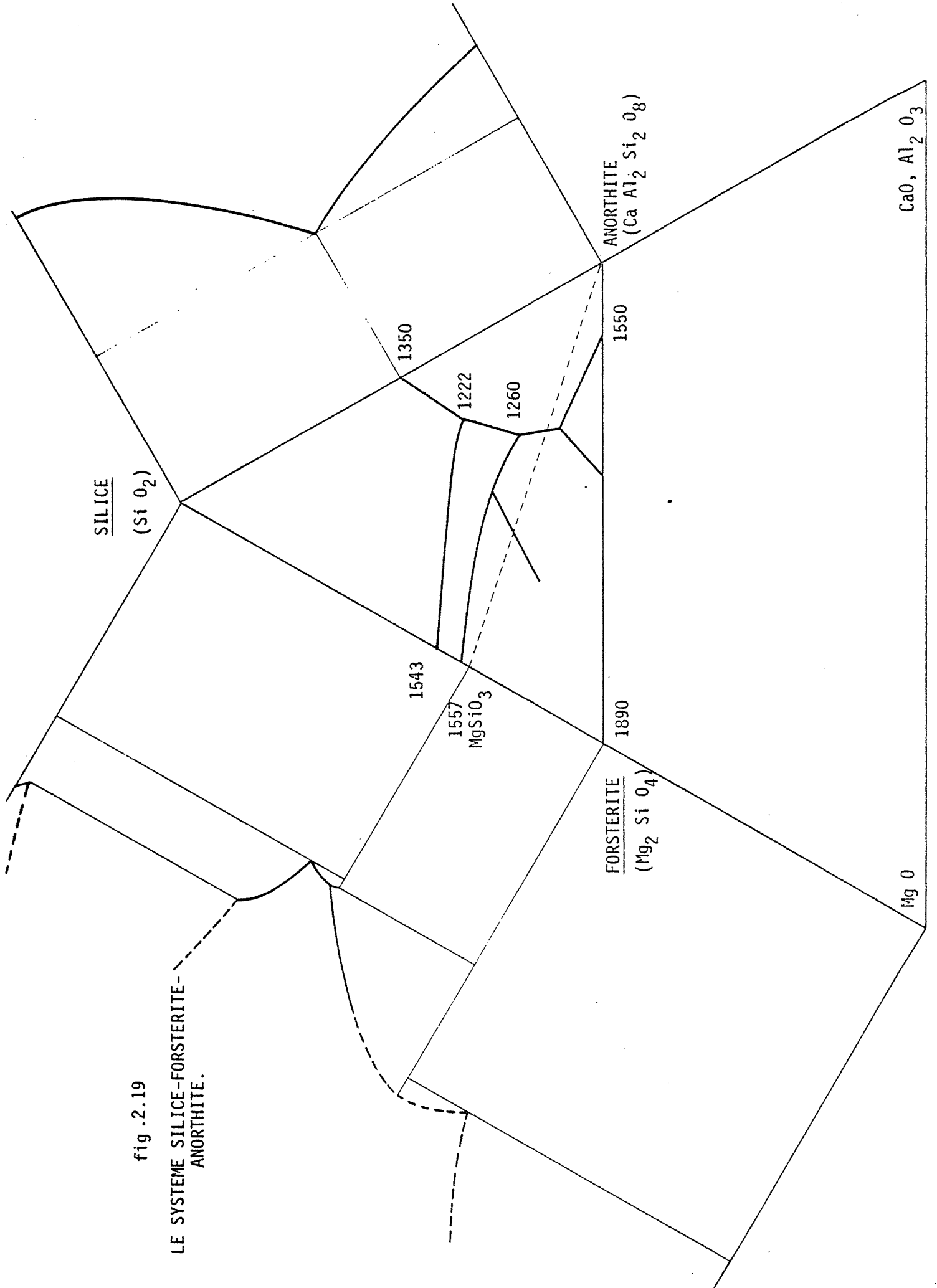
Les représentations des deux systèmes binaires  $\text{SiO}_2$  ;  $\text{MgO}$  et  $\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  ;  $\text{SiO}_2$  nous font apparaître (fig.2.19) des eutectiques intéressants qui engendrent dans la composition ternaire  $\text{MgO}$  ;  $\text{SiO}_2$  ;  $\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  des vallées thermiques dont les coïncidences déterminent une zone de puits où la température de fusion du mélange est particulièrement basse  $1222^\circ\text{C}$ - $1260^\circ\text{C}$  comparée à celle des trois composants initiaux.

Dans le cas de la recherche d'une fusion optimisée d'un mélange  $\alpha\text{SiO}_2, \beta\text{CaO}, \gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ , de tels résultats montrent que :

- a) le choix d'un ajout d'oxyde de magnésium (qui va résulter, pratique-

fig .2.19

LE SYSTEME SILICE-FORSTERITE-  
ANORTHITE.



ment, de la combustion vive du magnésium) comme troisième composant n'apporte pas un abaissement de la température de fusion très important.

b) il semble préférable de corriger la composition initiale  $\alpha, \beta, \gamma$  du mélange par ajout de silice  $\text{SiO}_2$  ou, mieux encore, d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  résultant de la combustion vive d'aluminium dans un jet d'oxygène. Ainsi, on pourra se rapprocher de l'eutectique  $E_1 = 1350^\circ\text{C}$ .

c) si, cependant, la solution faisant intervenir le magnésium doit être conservée, le dosage en métal devra être très soigné et combiné avec une correction du dosage en silice afin d'atteindre la zone de puits thermique. Celle-ci est caractérisée par les compositions suivantes (en poids),

$\text{SiO}_2$	→	17 à 37%
$\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{SiO}_2$	→	46 à 60%
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	→	11 à 30%

ou encore :

$\text{SiO}_2$	→	55 à 66%
$\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$	→	25 à 32%
$\text{MgO}$	→	6 à 16%

## 6.2. Le mélange ternaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ . [13] [14]

La combinaison de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de l'oxyde de fer ( $\text{FeO}$ ) conduit, comme on l'a vu en 4.2 (figure 16b) à la fayalite ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) et à deux eutectiques entre oxyde et fayalite d'une part, et silice et fayalite, d'autre part.

La combinaison de  $\text{CaO}$  et  $\text{SiO}_2$  conduit à différents composés intermédiaires (voir fig. 2.21. a) dont  $\text{CaSiO}_3$  et  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ . Nous trouvons

fig . 2.21. a

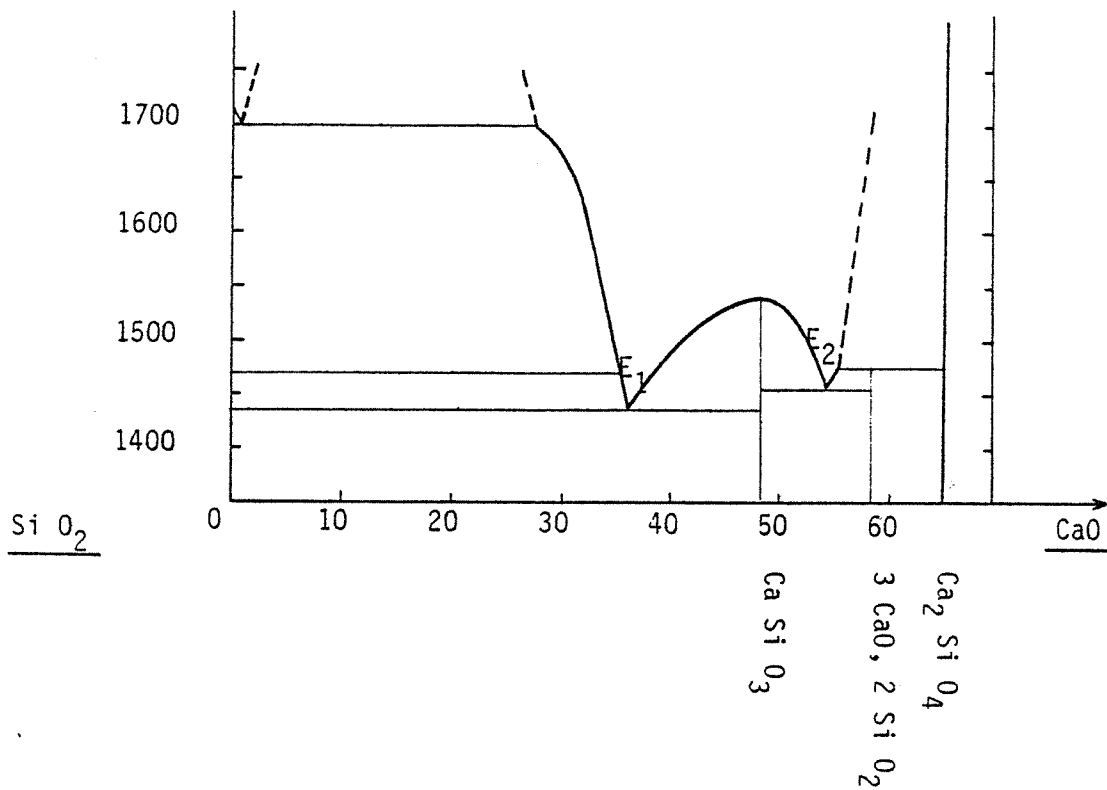
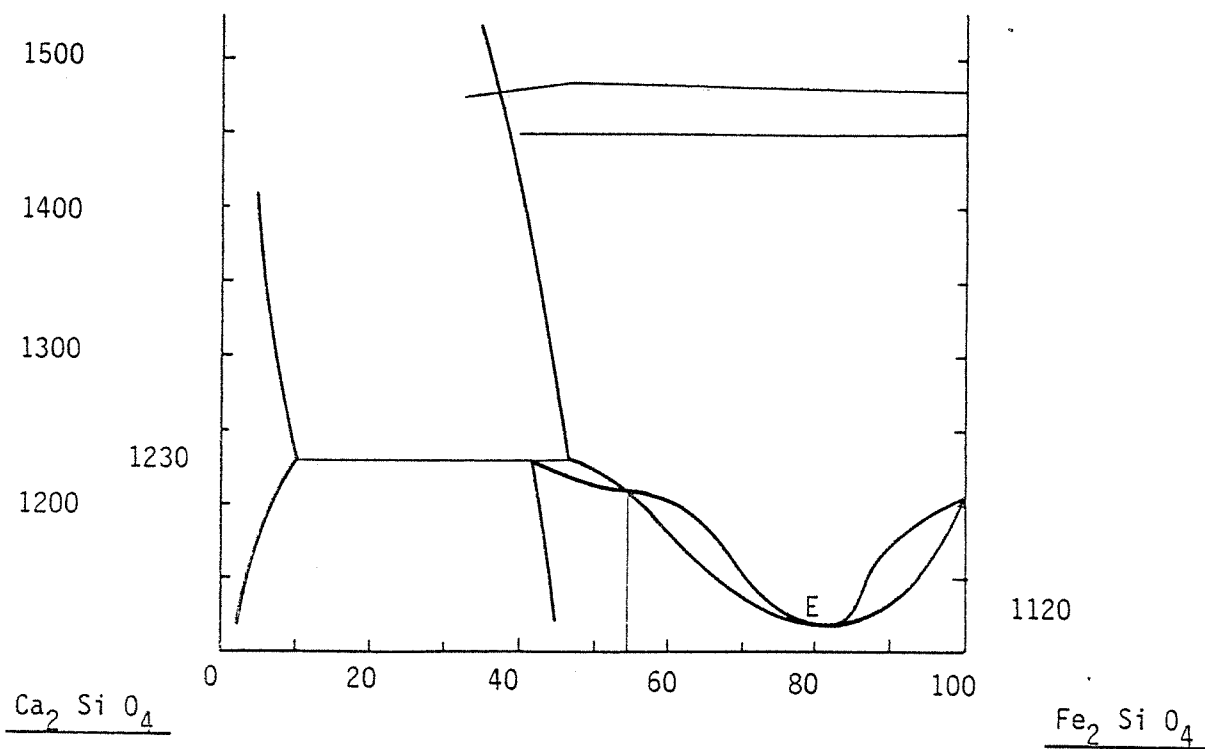


fig. 2.21.b



(voir fig.2.21.b), par ailleurs, les températures de fusion des mélanges réalisés à partir des deux composés importants  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  et  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  résultant des combinaisons binaires  $\text{SiO}_2\text{-FeO}$  et  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ .

Dans la représentation de la combinaison ternaire  $\text{CaO-FeO-SiO}_2$ , la portion du domaine triangulaire qui nous intéresse (zone de basses températures de fusion) est limitée par la droite  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  dans la direction des teneurs croissantes en  $\text{CaO}$  et  $\text{FeO}$ .

La figure 2.23 définit les diagrammes d'équilibre entre les phases liquide et cristallisée ; des crêtes, vallées et puits thermiques, on peut déduire les températures de fusion des mélanges ternaires constitués de  $\alpha\text{CaO}$ ,  $\beta\text{FeO}$ ,  $\gamma\text{SiO}_2$  (figure 2.24). On peut aussi pour une exploitation plus aisée, déterminer les courbes isothermes qui caractérisent l'ensemble des compositions ayant même température de fusion : on a représenté, sur la fig 2.26, les isothermes  $1285^\circ\text{C}$ ,  $1250^\circ\text{C}$ ,  $1220^\circ\text{C}$ ,  $1160^\circ\text{C}$ ,  $1130^\circ\text{C}$ ,  $1105^\circ\text{C}$ .

De ces différentes courbes, on peut déduire de nombreuses conclusions intéressantes par leurs retombées technologiques. Ainsi, par exemple, la fusion d'une roche siliceuse reste difficile. Par contre, un mélange roche-oxyde de fer convenablement dosé pour approcher l'eutectique nous conduit à une température de fusion beaucoup plus basse (ou, à température égale, à une phase liquide beaucoup moins visqueuse et dont l'écoulement sera facilité).

De la même façon, une roche calcaire (après la phase de décarbonatation  $\text{CO}_3\text{Ca} + \text{Q} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$  qui se situe vers  $1000^\circ\text{C}$  et qui déjà absorbe une partie de l'énergie fournie) aura donc une température de fusion très élevée et donc très difficile à atteindre et plus encore à maintenir jusqu'à l'écoulement de la matière lors d'un



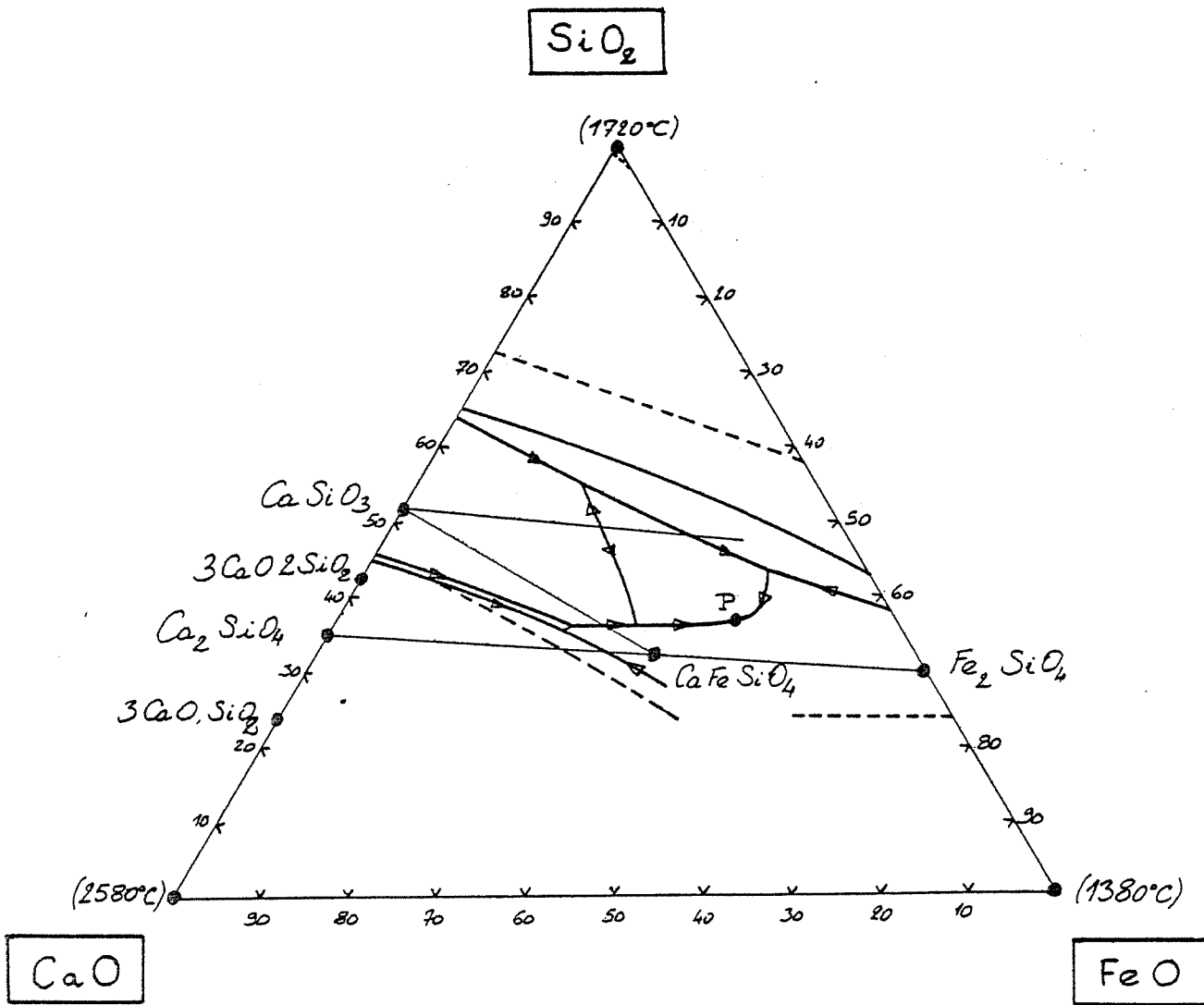


Fig. 2.23. DIAGRAMME D'EQUILIBRE ENTRE LES PHASES SOLIDE ET CRISTALLISEE DU SYSTEME :  
SiO<sub>2</sub> - CaO - FeO

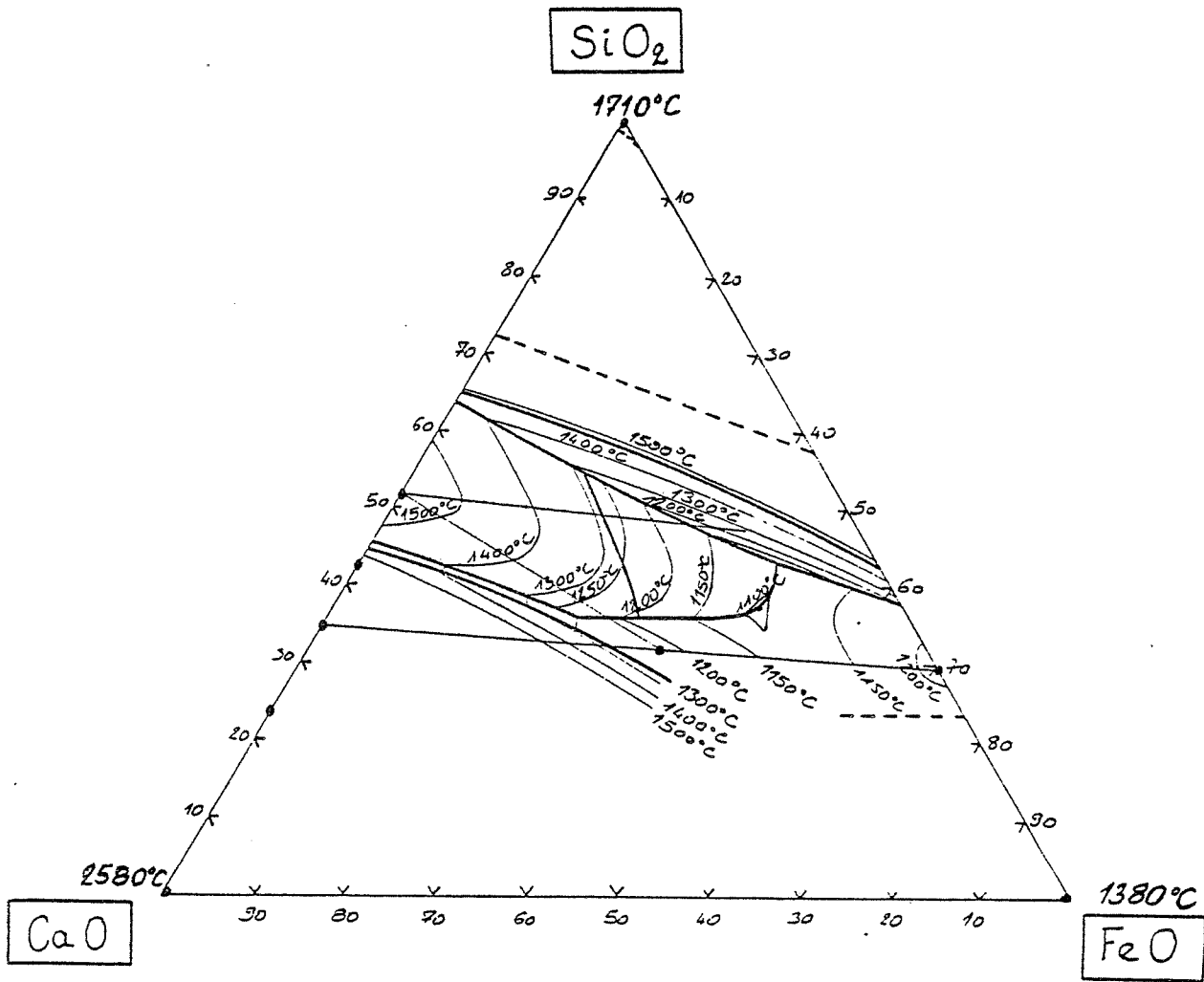


fig.2.24 LE SYSTEME  $\text{SiO}_2$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{FeO}$   
 REPRESENTATION DES ISOTHERMES

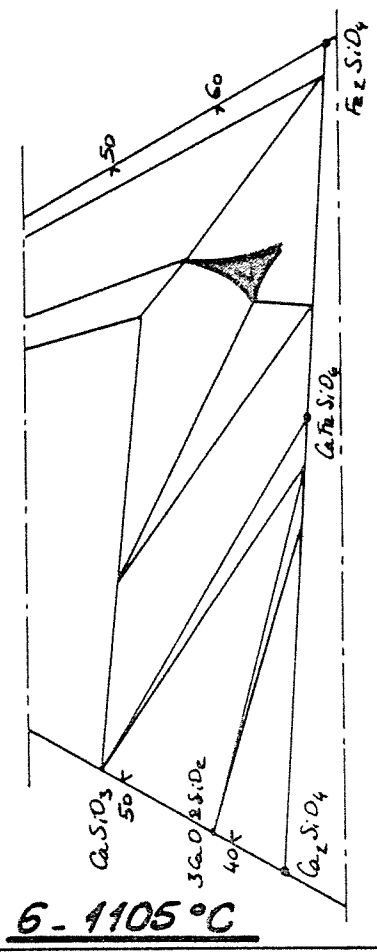
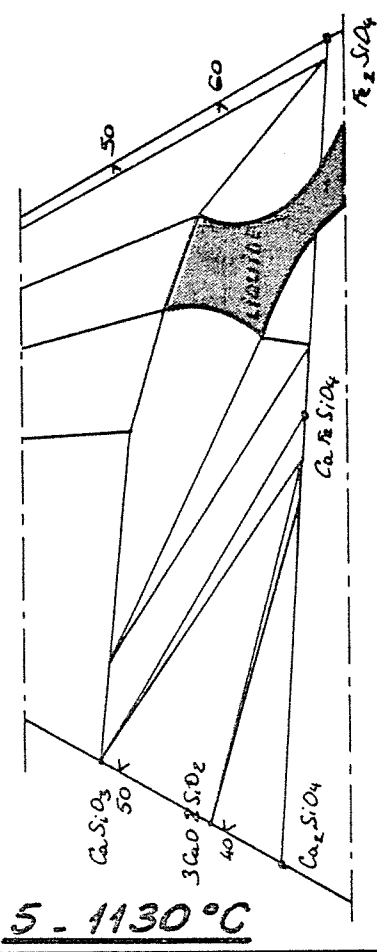
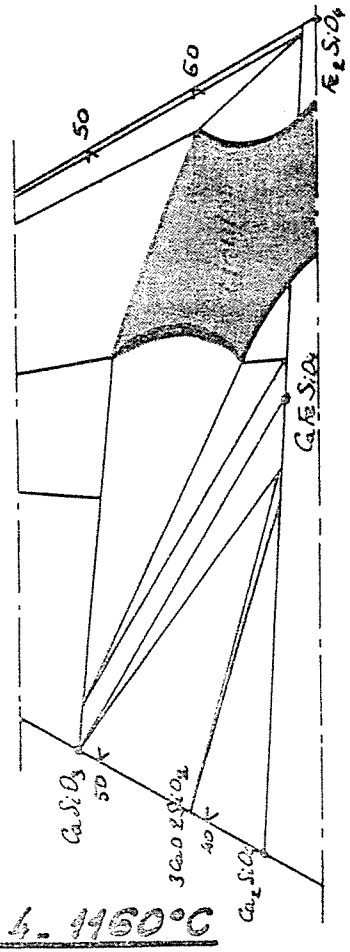
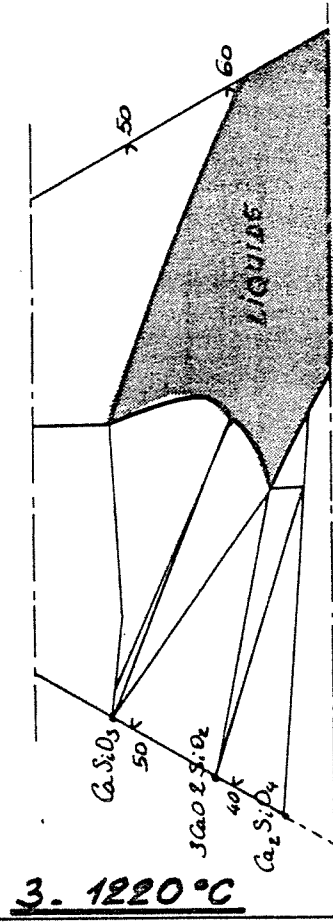
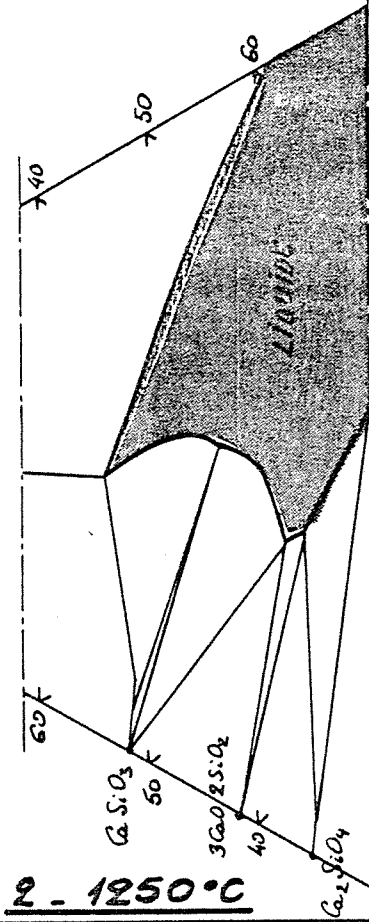
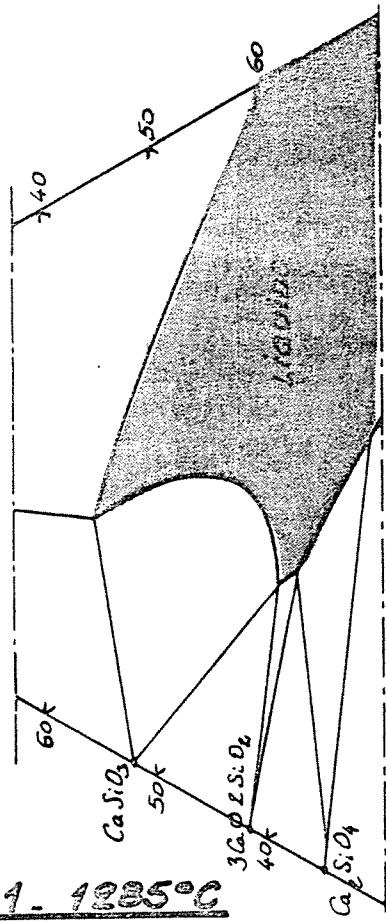
découpage. Un ajout, correctement dosé en silice et oxyde de fer conduira à un abaissement brutal de cette température (zone des puits thermiques). Ainsi, à quantité égale d'énergie fournie au foyer, le liquide résultant de la fusion de ce mélange aura donc une viscosité très faible et pourra ainsi, comme on le verra plus loin, éventuellement subir un écoulement important.

La représentation ternaire  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  nous montre que la zone de puits thermiques est obtenue par la composition de bain suivante :

$\text{SiO}_2$	→	32 à 45%
$\text{CaO}$	→	10 à 20%
$\text{FeO}$	→	40 à 55%

Ces six valeurs constituent les frontières du domaine caractérisant le bain optimal. On peut constater que l'aire de ce domaine est très réduite (5% de l'aire représentant la totalité des mélanges possibles). On doit en déduire que le dosage en matériaux complémentaires doit être effectué avec précision.

On a ainsi déterminé une méthode qui permettra, pour un niveau de température donné, donc, pour une quantité d'énergie fournie, d'optimiser l'écoulement de la matière en phase liquide.



## D.- LE PRINCIPE DU DECOUPAGE THERMIQUE.

### 1. NOTRE IDEE DIRECTRICE.

Il nous a paru intéressant d'effectuer la synthèse des phénomènes précédemment observés en vue de l'élaboration d'un procédé thermique de découpage.

En effet, le découpage thermique des roches ou des bétons nécessite :

1. Un apport calorifique important en une zone ponctuelle afin d'y atteindre la phase liquide du matériau : on a vu que l'oxydation d'un métal dans un jet d'oxygène peut être une solution à ce problème.
2. Un écoulement rapide du matériau en fusion afin de permettre une progression unidirectionnelle rapide de la coupe et d'éviter une propagation volumique du foyer ("effet de cratère") qui conduirait à un échauffement important de tout le voisinage de la zone attaquée.

Cet écoulement rapide présente le triple avantage de :

- contribuer à la précision de cette coupe,
- réduire l'altération de la zone voisine de la coupe,
- optimiser le rendement énergétique (donc économique) du processus.

L'aptitude à l'écoulement de la phase liquide du nouveau matériau obtenu (matériau initial + oxydes métalliques) et la vitesse caractérisant cet écoulement dépendent du temps de cristallisation de cette phase liquide. Il sera, évidemment, d'autant plus grand que la température de changement d'état sera faible. On voit donc bien le rôle

essentiel que jouera la recherche des mélanges conduisant aux températures eutectiques ou proches des puits thermiques. C'est de la facilité à les obtenir que dépendra l'aptitude ou la non aptitude d'un matériau à une découpe thermique.

## 2. L'ORGANIGRAMME DU DECOUPAGE THERMIQUE.

La méthode que nous préconisons consiste donc à transformer localement le matériau à découper en un laitier suffisamment fluide pour pouvoir être évacué du reste du milieu solide.

Cet écoulement de la matière résulte de trois phases (figure 2.29.)

### 2.1. Une phase thermique.

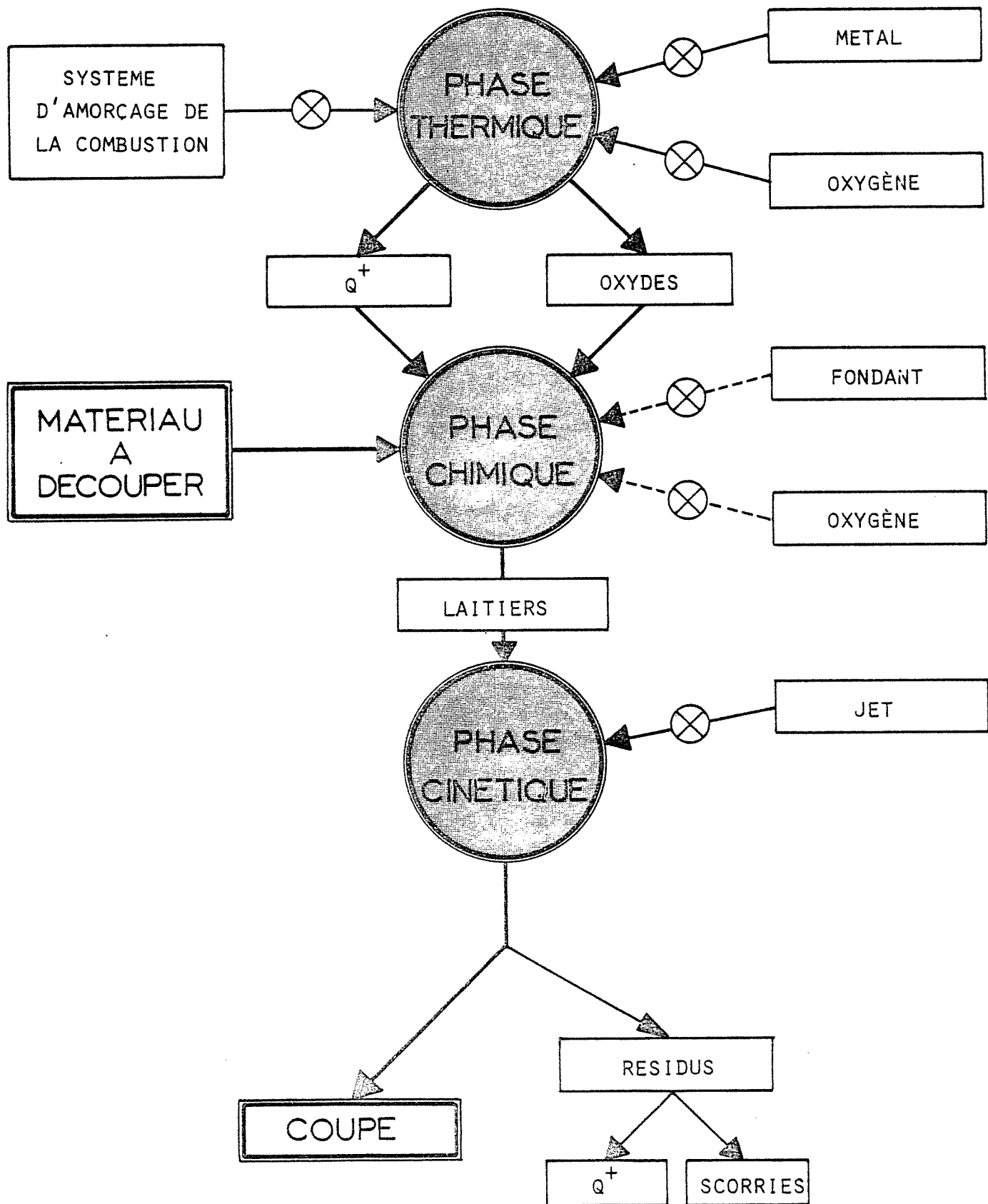
Durant cette phase, on provoque, au contact du matériau (sur une surface de quelques dizaines de millimètres carrés), une réaction fortement exothermique par la combustion de métal dans un jet d'oxygène de forte pression.

### 2.2. Une phase thermo-chimique.

L'énergie thermique dégagée lors de la réaction précédente et les oxydes métalliques résidus de cette réaction assurent la transformation locale du matériau en un laitier très fluide dont la température de cristallisation est très inférieure à la température de fusion du matériau originel.

### 2.3. Une phase cinétique.

C'est en fait la phase d'avance de la coupe ; en effet, le laitier doit être évacué, d'une part, pour permettre la pénétration de nouveaux produits de combustion et donc l'avance de la coupe et, d'autre



part, pour réduire la puissance calorifique du foyer en une zone où cela n'est désormais plus nécessaire et où, par contre, cela risquerait de conduire à un échauffement important du béton.

Cette opération -qui peut être réalisée partiellement par gravité- est obtenue par action d'un jet fluide (gaz ou liquide) à forte pression.

La conséquence de la superposition -instantanée et continue- de ces trois phases est donc de conduire à un forage de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre dans le matériau d'épreuve. L'exécution de forages tangents déterminera ensuite la coupe.



## E.- LE PROCEDE TECHNOLOGIQUE.

### 1. LES CONDITIONS DE LA CONCEPTION.

L'analyse de l'organigramme précédent nous faisait présager la relative complexité du procédé en raison, notamment, des nombreux conditionnements nécessaires et, sur chacun d'eux, des circuits de transferts et des régulations indispensables à une combustion optimisée.

Par ailleurs, l'application du principe de découpage ne pouvait être envisagée, dans le domaine du génie civil, que par un procédé qui soit compatible avec les caractéristiques particulières aux interventions sur chantier et avec les règles de sécurité.

Entre ces deux familles de sujétions, un compromis devait donc être établi. Ainsi, dans notre premier procédé (oxybéton), ce sont les conditions de compatibilité qui ont pris l'ascendant sur les conditions d'optimisation tant il nous a paru indispensable que le matériel soit simple, léger, mobile, sans aucun danger de détente de gaz et puisse être utilisé, autant que possible, en tout lieu et toutes circonstances. Par contre, dans notre second procédé, à la régulation plus complexe et donc au fonctionnement plus délicat, nous avons tenu à optimiser le rendement énergétique.

## 2. LA TECHNOLOGIE.

### 2.1. Description sommaire.

L'appareil est finalement constitué, dans les cas les plus courants :

- d'une lance combustible, qui comporte les matériaux solides nécessaires à la combustion ( Fe, Al, Mg, SiO<sub>2</sub>, etc...)
- d'un circuit de fluide haute pression, comprenant, notamment, une centrale de conditionnement et une unité de régulation ; ce circuit est raccordé à la lance par un porte lance.

Lors de nos premiers essais, par soucis d'optimisation, nous avons distingué le circuit fluide destiné à la combustion du métal (oxygène) de celui destiné à l'action cinétique (air comprimé, par exemple). Un tel système, convenable au laboratoire (en poste fixe) s'avérait moins performant lors d'applications industrielles et, très vite, nous n'avons plus utilisé que l'oxygène tant pour l'action thermique que pour l'action cinétique... Dans certains cas particuliers, cependant, pour des forages de grandes profondeurs, l'eau (sous forte pression) a été employée pour accélérer l'action cinétique par la vaporisation brutale (de nombreuses précautions sont cependant nécessaires).

Nous avons donné au procédé deux configurations : (Fig. 2.33)

Dans la première, la lance est fabriquée suivant une composition initiale déterminée : elle est essentiellement constituée d'un tube d'acier à l'intérieur duquel sont maintenus par un procédé mécanique (prédéformation plastique) les fils métalliques (fer, aluminium, etc...) nécessaires aux réactions.

Une telle configuration ne permet pas l'ajout de "fondants"

fig. 2.33.a

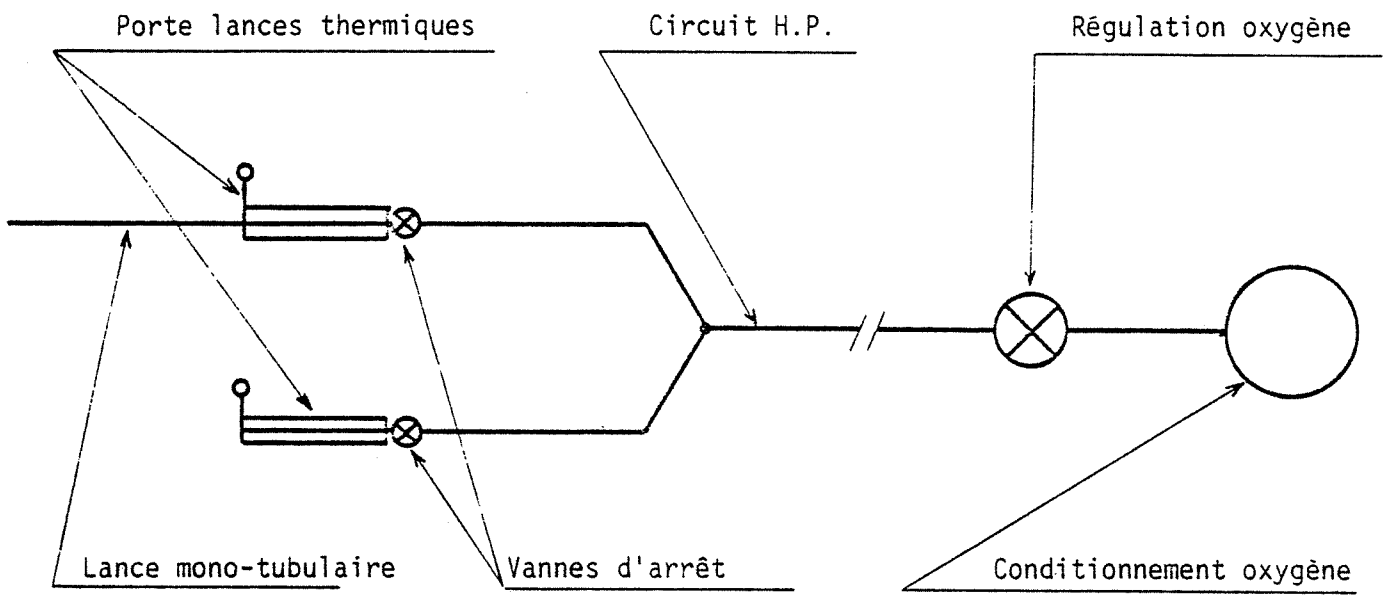
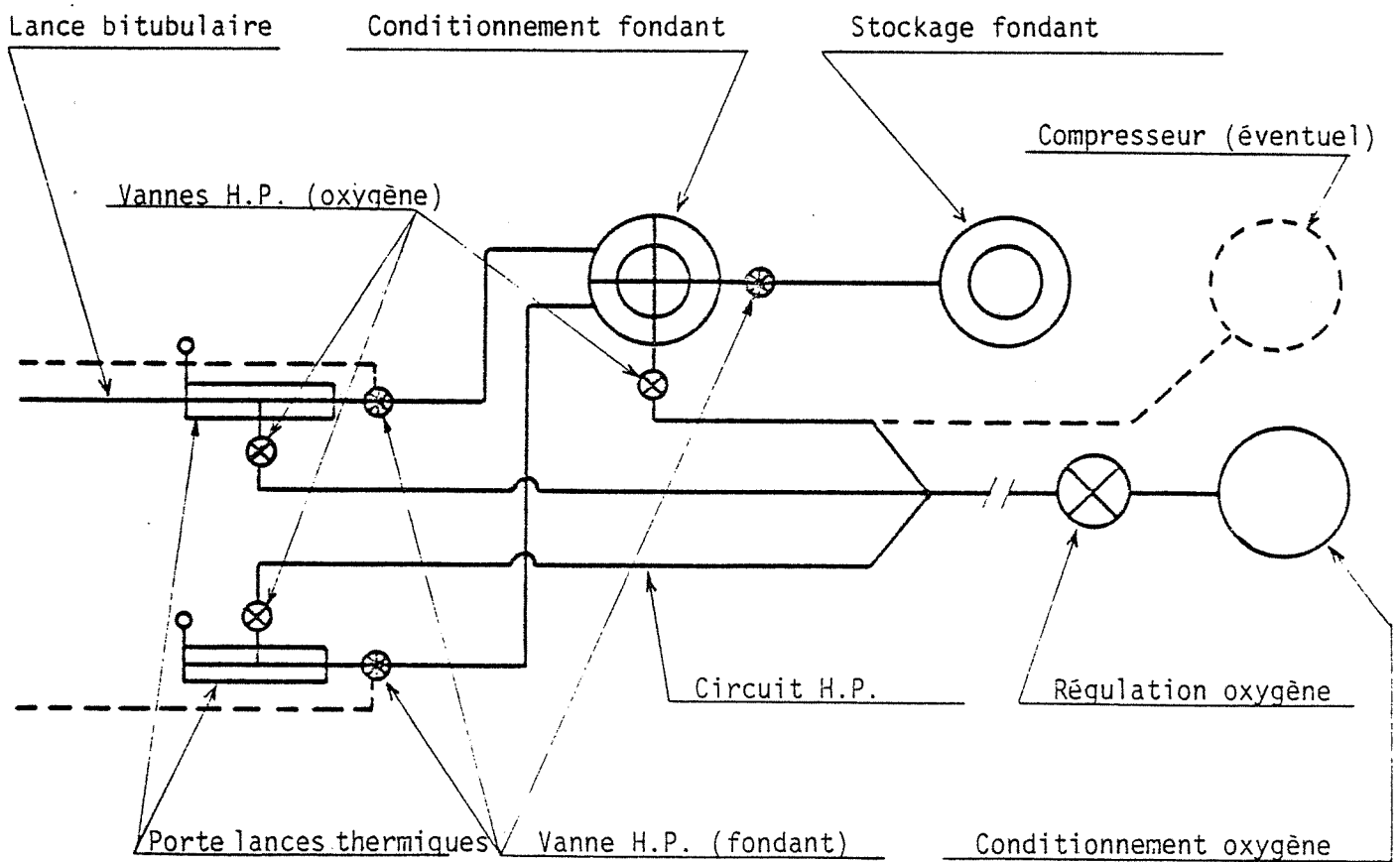


fig. 2.33.b



supplémentaires au coeur du foyer. Cependant, d'utilisation à la fois très simple et très fiable, il est bien adapté pour le découpage de roches siliceuses ou de bétons à agrégats plutôt siliceux (l'eutectique ou le puits thermique s'obtiennent alors simplement en faisant varier le dosage en métal).

Par contre, le découpage de roches calcaires (ou de béton à agrégats plutôt calcaires) par un tel procédé conduit à une consommation de métal très importante et, donc, à un bilan économique peu satisfaisant.

Nous avons alors étudié une seconde configuration (figure 2.33.b) plus complexe mais qui permet, cette fois, d'obtenir la composition de bains la plus performante en agissant d'une part, sur le choix et le dosage des métaux contenus dans la lance et d'autre part, en projetant au coeur du foyer (par un tube intérieur situé suivant l'axe de la lance) un fondant pulvérisé (silice, par exemple).

## 2.2. Le fonctionnement opérationnel.

Après l'allumage de la lance, celle-ci est portée contre l'élément à découper ; elle brûle très rapidement (un mètre par minute, par exemple) tout en forant un trou cylindrique de quelques centimètres de diamètre ; la vitesse de forage dans le béton varie de 30 à 50 centimètres par minute ; il suffit ensuite de juxtaposer les trous pour obtenir un découpage linéaire.

En opération industrielle, afin d'avoir un déroulement continu et rapide, les découpeurs travaillent par équipe de deux techniciens : pendant qu'une lance brûle, une nouvelle lance est montée sur l'autre porte-lance et vient relayer la précédente lorsque celle-ci est totalement consommée.

fig. 2.35.a

DECOUPAGE D'UNE EPROUVETTE  
(12 x 12 x 100 cm)

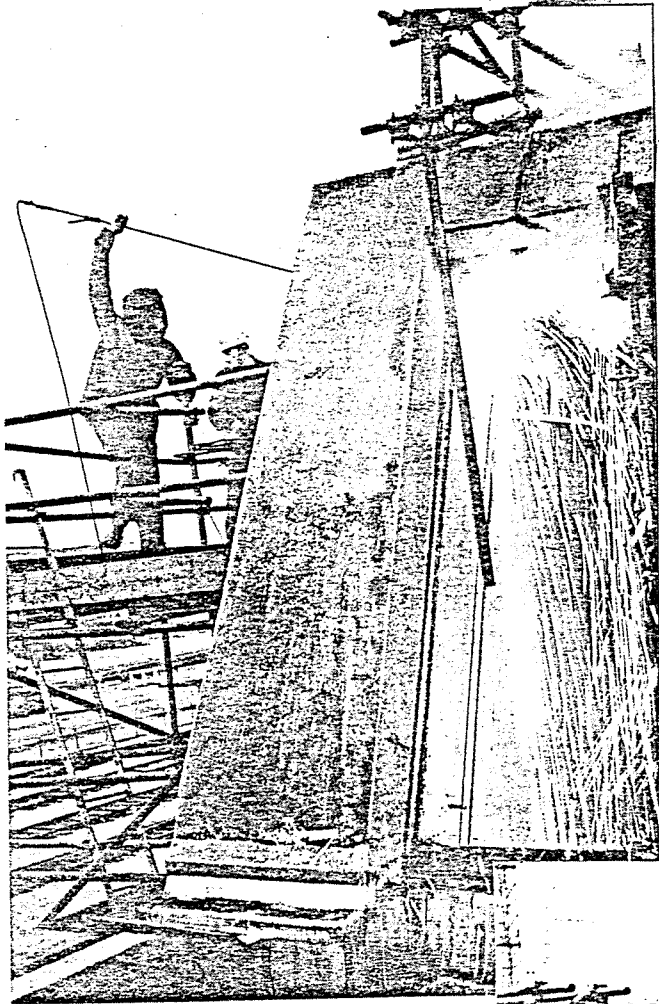
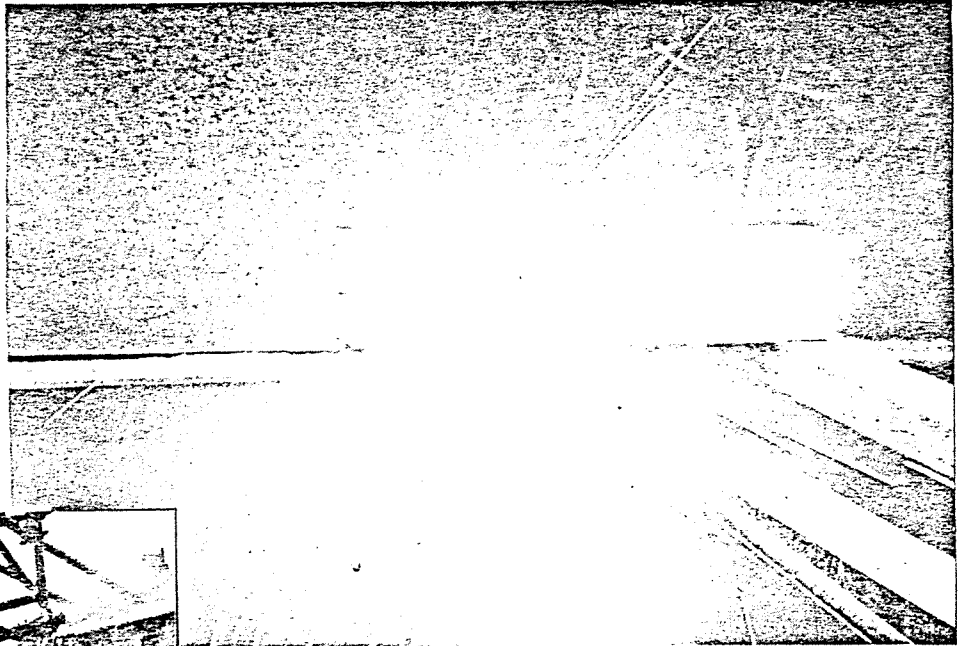
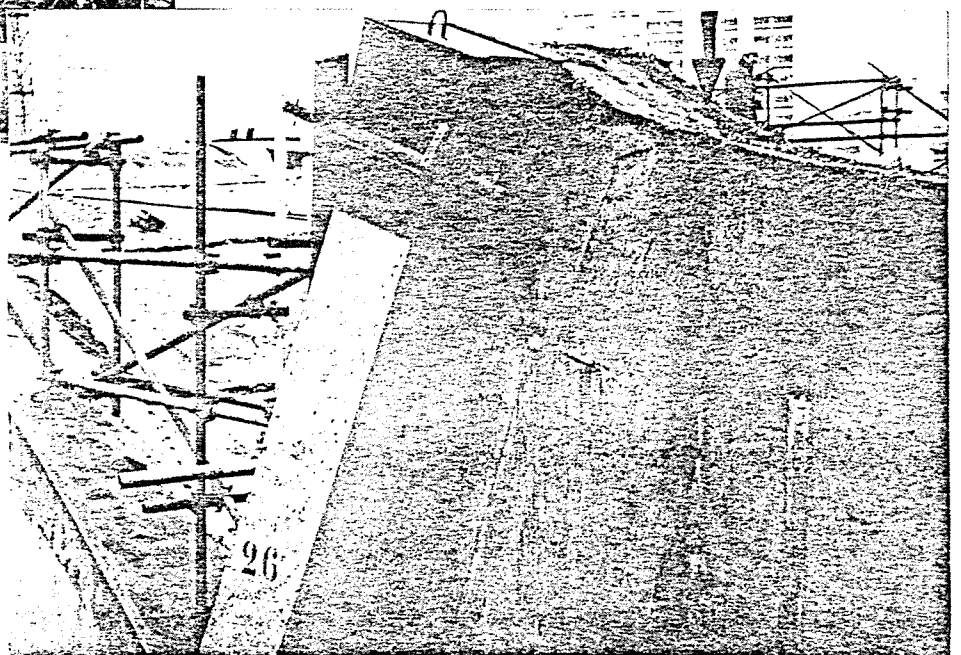


fig. 2.35.b UNE OPERATION INDUSTRIELLE.

fig. 2.35.c EXEMPLE DE COUPE THERMIQUE OBTENUE.



Les techniciens doivent évidemment être convenablement protégés par des vêtements ignifugés contre les projections d'étincelles.

Par ailleurs, il convient peut-être de noter que l'opérateur n'a quasiment aucun effort musculaire à exercer. Il doit, par contre, avoir une assez bonne résistance physique à la chaleur... en ce sens, cette opération se rapproche beaucoup de celle du soudage et n'a aucun point commun avec les opérations de démolition par procédé mécanique (perforatrice, marteau-piqueur...).

### 3. LES PERFORMANCES ET LES RENDEMENTS ENERGETIQUES.

Le découpage se déroule sans aucun bruit et sans aucune vibration ; par contre, le matériau découpé se trouve soumis à un champ de température dont il nous faudra étudier l'importance et les conséquences (chapitres 3 et 4)

Par ailleurs, il convient de distinguer les performances propres du procédé, telles qu'on peut les mesurer en laboratoire, de celles de chantier qui sont, évidemment, tributaires de la qualité des conditions de travail et de l'organisation générale de celui-ci.

De plus, il n'est pas question ici de rapporter les performances obtenues pour toutes les configurations étudiées. Nous avons choisi d'examiner l'une d'entre elles - parmi les plus moyennes - : il s'agit d'une lance du premier type (figure 2.33.a)

#### 3.1. Les vitesses d'avance.

##### a) Cas d'un perçage rectiligne horizontal (figure 2.37)

Le diamètre  $\phi_t$  du forage cylindrique obtenu est pratiquement proportionnel au diamètre  $\phi_\ell$  de la lance utilisée suivant la loi approchée (établie empiriquement) :  $\phi_t = 5 + 2 \phi_\ell$  (en mm)

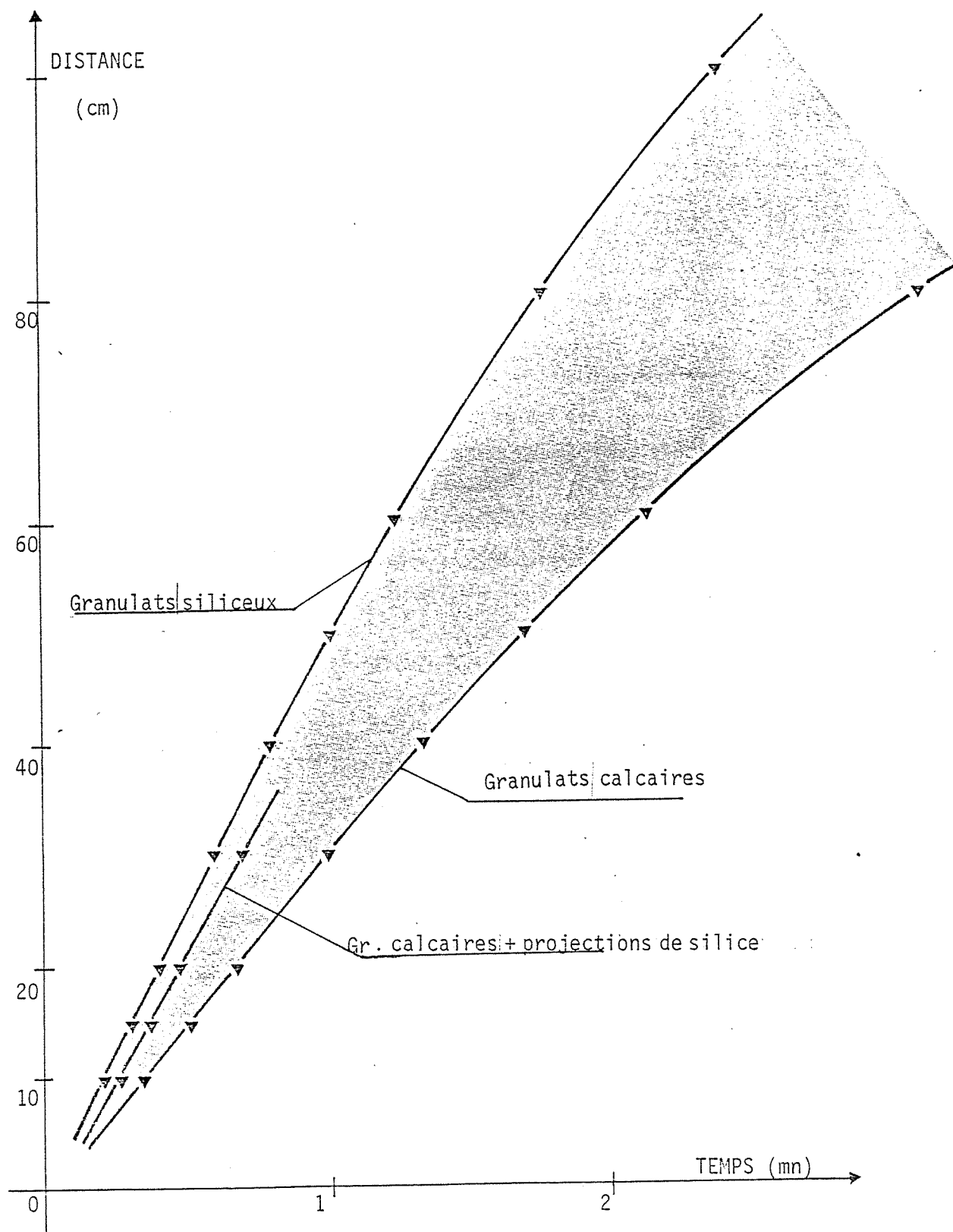


fig. 2.37 - Découpage unidirectionnel du béton :  
vitesse de coupe en fonction de la nature des granulats

Le diagramme de vitesse d'avance d'une lance de  $\phi_l = 17\text{mm}$  ( $\phi_t \neq 40\text{mm}$ ) est donné par la fig. 2.37 pour deux bétons à granulats de quartz (I) et à granulats calcaires (II) ; on a aussi déterminé la vitesse d'avance pour le cas d'un béton à granulats calcaires subissant pendant le découpage des projections de silice (l'intérêt d'un tel ajout est évident).

On note que la vitesse subit un léger fléchissement pour des épaisseurs importantes, plus sensible, là encore, avec des granulats calcaires : ceci s'explique essentiellement par la difficulté que rencontre l'action cinétique pour se développer dans ces dimensions-là.

b) Cas d'un découpage surfacique (fig. 2.39).

On peut alors caractériser la vitesse d'avance à partir de la surface découpée.

Avec les deux compositions de béton précédentes, on obtient les deux domaines représentées sur la fig. 2.39. On retrouve, évidemment, l'influence de l'action cinétique comme cause de la diminution de ces vitesses pour le découpage d'éléments de grande épaisseur.

3.2. Les domaines de validité.

En fait, le domaine n'est limité que par l'action cinétique. Ainsi, dans un forage ascendant (où le laitier coule par gravité) des profondeurs de l'ordre de trois à quatre mètres sont atteintes sans difficultés particulières. Exceptionnellement, par passes successives, des profondeurs beaucoup plus importantes peuvent être atteintes (jusqu'à dix mètres).

Par contre, pour des forages descendants, la limite, en conditions normales, est très vite atteinte (dalle de 1,30 à 1,50 mètre



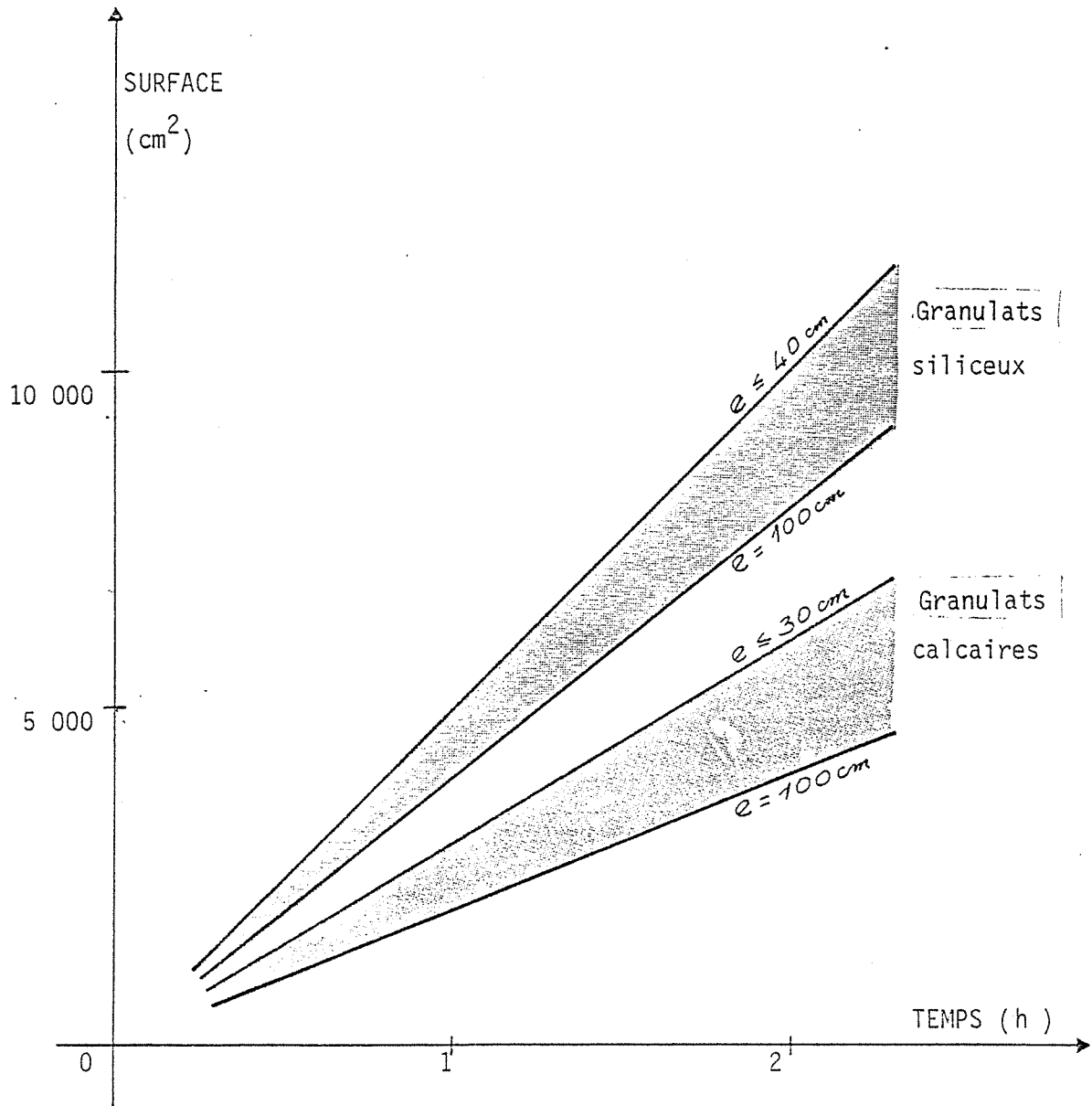


fig. 2.39 - Découpage surfacique du béton : vitesse de coupe en fonction de la nature des Granulats

d'épaisseur. Seul, alors, un procédé complémentaire d'extraction du laitier permet de dépasser cette limite (projection d'eau sous pression). Cependant, cette opération se fait toujours au détriment de la précision et de la qualité de la coupe.

### 3.3. La précision du forage.

Il faut distinguer la rigueur géométrique du forage de la précision en orientation et position.

La tolérance sur le diamètre du trou cylindrique est de l'ordre de 3 à 5 mm.

La précision en position et orientation dépend essentiellement du soin apporté par l'opérateur appliquant sur l'élément une lance pouvant mesurer jusqu'à trois mètres de longueur. Cependant, pour des travaux particuliers, on peut utiliser des guides (tout comme on peut utiliser des petites lances (jusqu'à 6 mm) pour des forages de petit diamètre).

### 3.4. Le rendement énergétique.

#### a) Consommation du fer.

Dans le type de lances adopté pour cette étude, c'est l'élément essentiel d'appréciation de la consommation et, donc, du rendement du procédé.

On a reporté sur le diagramme 2.41 les quantités de combustible consommé en fonction de la profondeur de coupe (ou de la quantité de béton fondu).

Trois éprouvettes distinctes avaient été réalisées :

- éprouvette 1 : béton riche en silice dans sa totalité ;
- éprouvette 2 : béton riche en silice sur dix centimètres d'épaisseur, puis

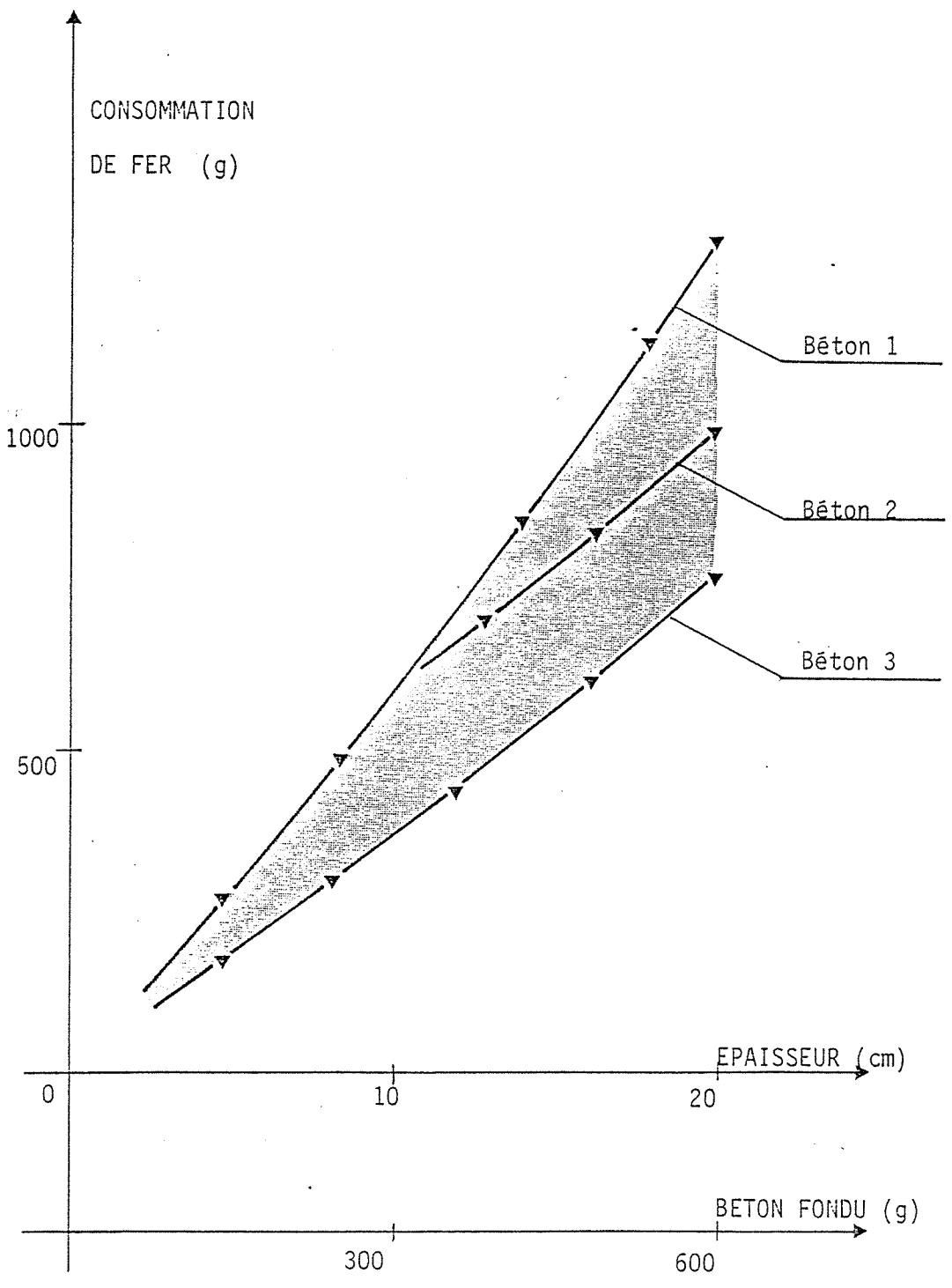


fig. 2.41 - Consommation de fer en fonction de la profondeur de forage.

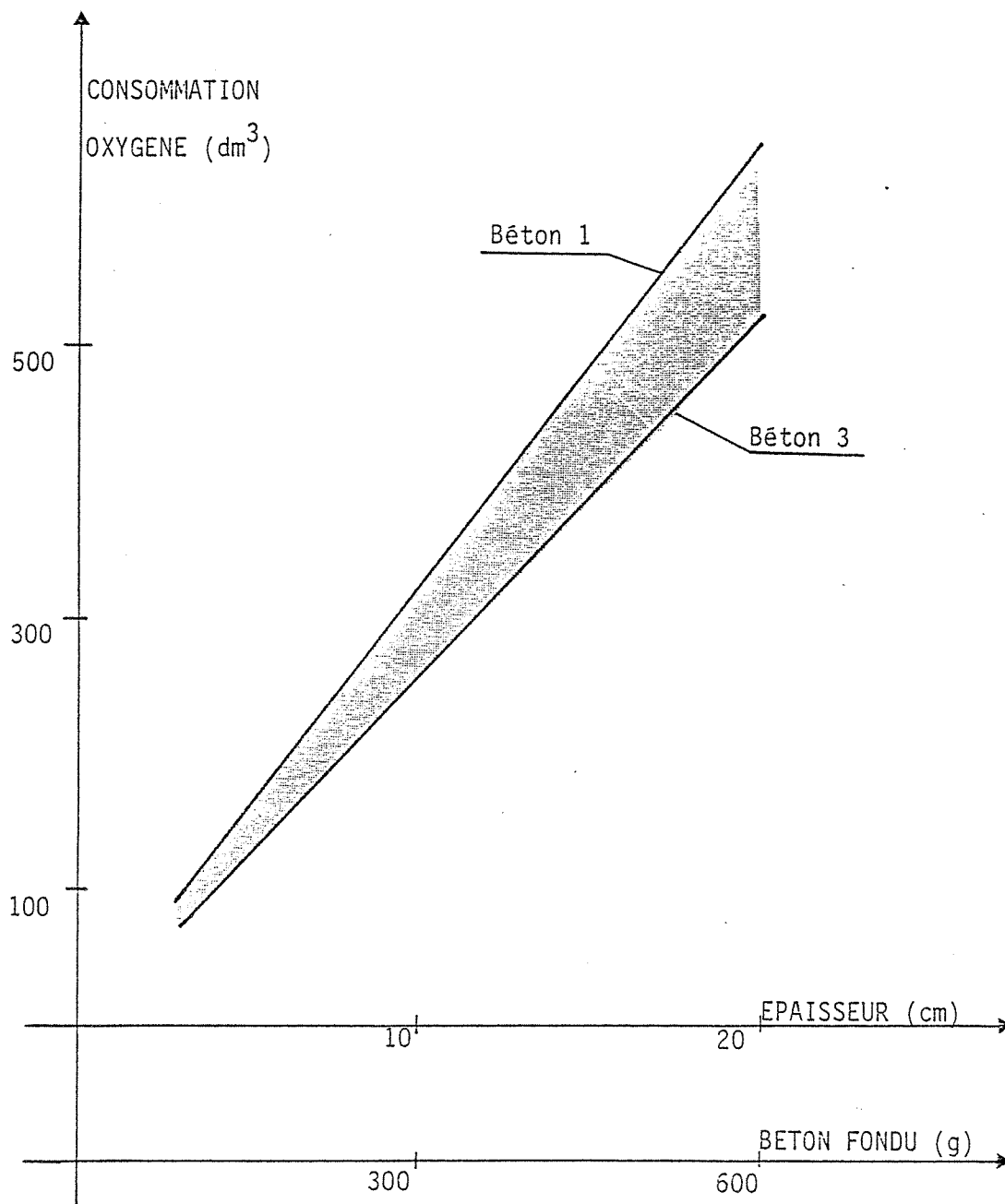


fig. 2.42 . Consommation d'oxygène en fonction de la profondeur de forage.

riche en calcaire sur les dix autres centimètres ;

- éprouvette 3 : béton riche en calcaire.

Les résultats sont éloquents et montrent tout l'intérêt de la recherche de la zone de puits thermique.

#### b) Consommation d'oxygène.

Il s'agit là, de l'oxygène ayant contribué à la fois à l'action thermique et à l'action cinétique.

On a exprimé, pour les expériences précédentes (uniquement bétons 1 et 2), les volumes d'oxygène consommés rapportés, là encore, à la profondeur de la coupe et au poids de béton fondu (figure 2.42)

### 3.5. Retour sur les justifications théoriques du procédé.

Les importants écarts de consommation de fer constatés lors du découpage du béton réalisé à partir soit de granulats calcaires soit de granulats siliceux, s'expliquent parfaitement à partir, par exemple, du diagramme  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{FeO}$  ( fig. 2.23 et 2.24).

En effet, on pouvait constater sur ce diagramme :

- 1° - Que la zone de puits thermique P ( $T_F \neq 1000^\circ\text{C}$ ) correspond à un mélange plutôt pauvre en calcaire (18%  $\text{CaO}$ ) et plutôt riche en silice (38%  $\text{SiO}_2$ ).
- 2° - Qu'une augmentation d'environ 20% de la teneur en calcaire conduisait à doubler sensiblement la quantité de  $\text{FeO}$  pour conserver une combustion optimisée (point de fusion dans la zone de puits thermique).

Ces résultats, prévisibles dès la partie théorique, sont donc sensiblement confirmés quantitativement par notre étude expérimentale des consommations (que nous avons volontairement limitée au fer dans ce mémoire).

## F.- CONCLUSIONS.

L'exploitation, très particulière, de principes (l'évolution des températures de fusion des mélanges en fonction de leurs compositions) que d'autres -les géologues notamment- connaissaient depuis longtemps nous a ainsi permis d'élaborer des procédés de découpage performants et économiquement fiables.

Ces dernières années, il nous a été donné de conduire de multiples applications dans les domaines les plus divers :

- aéronautique : découpage de boucliers thermiques, de fuselages...
- mécanique : tronçonnage de lourds bâtis de fonte...
- métallurgie : découpage de lingots de cuivre...
- construction navale : découpage de coques de navires gros porteurs...
- chimie : "nettoyage" de fours d'aluminium après arrêts accidentels...

Cependant, nos goûts et nos convictions personnels nous ont toujours poussés à développer l'utilisation de cette technique dans le domaine du génie civil tant il nous paraissait qu'elle pouvait contribuer à combler le retard important qu'avaient accumulé, ces dernières décennies, les méthodes de démolition par rapport aux méthodes de construction. [15]

Par ailleurs, le caractère simple du procédé et la fiabilité économique qu'il garantissait (consommations et rendements parfaitement connus comme on l'a vu) étaient selon nous, deux conditions essentiellement favorables à son développement dans ce secteur d'activité.

L'utilisation rigoureuse du découpage thermique lors de modifications d'ouvrages de génie civil ne peut être envisagée qu'avec une parfaite connaissance des conséquences qu'implique l'application de ce procédé sur la base de la structure.

Celles-ci sont essentiellement :

### CHAPITRE III

- économiques : car la suppression de liaisons, la création de nouvelles liaisons, etc... nécessitent un découpage important pour la stabilité, de nouveaux schémas mécaniques dont on doit déterminer la stabilité.
- statiques : car le découpage établit dans le matériau de part et d'autre de la coupe, un champ de contraintes.

C'est l'étude de la seconde direction que nous retenons :

### LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE THERMIQUE

1. Sur la base des données de départ, on nous intéresse :
2. Sur la compatibilité de ce champ avec la conservation des qualités du matériau déposé. Ceci doit nous conduire, après l'adoption de critères caractéristiques de niveau d'altération (des nous appelons des "critères d'état limite") à l'établissement d'une cartographie des domaines admissibles (que nous nommons "domaines critiques").

## A.- LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'utilisation rigoureuse du découpage thermique lors de modifications d'ossatures de génie civil ne peut être envisagée qu'avec une parfaite connaissance des conséquences qu'implique l'application de ce procédé sur le reste de la structure.

Celles-ci sont essentiellement :

- mécaniques : car la suppression de liaisons, la création de rotules plastiques, etc..., résultant du découpage impliquent, pour la structure, de nouveaux schémas mécaniques dont on doit démontrer la stabilité,
- thermiques : car le découpage établit dans le matériau, de part et d'autre de la coupe, un champ de température.

C'est l'étude de la seconde direction que nous retiendrons, dans ce chapitre, en nous interrogeant :

1. Sur la connaissance de ce champ en fonction des différents paramètres caractérisant d'une part, la coupe thermique (nature, intensité, orientation spatiale), et d'autre part, le matériau d'épreuve (compositions, dimensions, âge, etc...),
2. Sur la compatibilité de ce champ avec la conservation des qualités du matériau découpé. Ceci doit nous conduire, après introduction de critères caractéristiques de niveaux d'altération (que nous appellerons des "critères d'état limite") à l'établissement d'une cartographie des domaines altérés (que nous nommerons "domaines critiques").



Remarquons qu'une telle connaissance de ces domaines critiques, pour tous les procédés de démolition, jouerait un rôle essentiel dans le choix de méthodes d'exécution.

Enfin, du point de vue du matériau étudié, deux modèles ont retenu notre attention : d'une part, celui du béton seul, et d'autre part, celui du béton armé et du béton précontraint non fortement armé (cas des voiles, des dalles, des coques, et, dans certains cas, des poutres).

B.- L'ELABORATION DU MODELE THERMOCINETIQUE DE  
LA CONDUCTION DANS UN MILIEU POREUX.

1.- LE MILIEU SOLIDE HOMOGENE ET ISOTROPE.

La conduction de la chaleur est un phénomène irréversible. Il résulte de l'existence d'un gradient de température à l'intérieur d'un élément matériel E (ou d'une différence de température entre deux éléments contigus  $E_1$  et  $E_2$ ). Ses effets conduisent à uniformiser cette température.

Ce phénomène découle des mouvements des particules constituant l'élément E considéré (ou les éléments  $E_1$  et  $E_2$ ). Dans l'interprétation macroscopique, on peut lui associer un transport d'énergie (appelée énergie thermique).

Les paramètres intensif et extensif en sont respectivement la température thermodynamique (T) et l'entropie (S).

Etudions ce transport d'énergie thermique : trois types de champs sont nécessaires à cette étude :

1°) Le champ des variables d'état :

Il est représenté par la masse volumique  $\rho_p(t)$ .

2°) Le champ d'intensité :

Il est représenté, à tout instant, par la température  $T_p(t)$ . ( où t est le temps ).

3°) Le champ de processus :

Celui-ci caractérise le flux d'extensité passant à travers une surface ( $\Sigma$ ) régulière tracée à l'intérieur du volume d'espace occupé

par le système matériel E.

Soit une grandeur extensive définie dans le domaine (E) à partir de sa densité en volume  $\gamma_P(t)$  pour tout P appartenant à E.

A chaque instant t, l'établissement du bilan énergétique traduit que le taux de variation de la grandeur extensive  $\gamma_P(t)$  est égal à la somme du flux d'extensité traversant la frontière  $\Sigma(E)$  du domaine et du taux de production d'extensité à l'intérieur de ce domaine (E). [16] [17] [18] [19] .

Le flux d'extensité peut être représenté par la densité superficielle  $\phi_Q(t)$  définie sur le continu  $S(E)$  ; le taux de production d'extensité par la densité volumique  $\bar{\omega}_P(t)$

( $\phi_Q(t)$  sera compté positivement s'il s'agit du flux sortant de l'élément solide limité par la surface  $\Sigma(E)$ .)

Ainsi le bilan énergétique s'écrit :

$$\iiint_{P \in E} \frac{d}{dt} \gamma_P(t) dv_P = \iint_{Q \in S(E)} \phi_Q(t) ds_Q + \iiint_{P \in E} \bar{\omega}_P(t) dv_P$$

Par ailleurs, la densité superficielle  $\phi_Q(t)$  est reliée au champ de processus  $\vec{q}_P(t)$  associé au transport de la grandeur extensive  $\tau$  à travers la matière par la relation :

$$\phi_Q(t) = + \vec{q}_P(t) \cdot \vec{n}_Q$$

(relation dans laquelle  $\vec{n}_Q$  est le vecteur normal en Q à S(E) et dirigé vers l'extérieur de E).

On peut en déduire la relation différentielle locale :

$$\frac{\delta}{\delta t} \gamma_P(t) = - \operatorname{div} \vec{q}_P(t) + \bar{\omega}_P(t)$$

Remarquons que si la grandeur extensive ne peut être ni créée, ni détruite, le terme  $\bar{\omega}_P(t)$  est nul, l'équation traduisant le bilan du transport d'énergie devient alors simplement :

$$\frac{\delta}{\delta t} \gamma_P(t) = - \operatorname{div} \vec{q}_P(t)$$

Dans le cas de la conduction pure en milieu solide, les éléments matériels  $v_P$  constituant E sont immobiles au sens macroscopique ; l'énergie totale de ces portions de matière se ramène donc à la seule énergie interne.

Si par ailleurs, le champ de variables d'état  $\mu_P(t)$  est un champ uniforme  $\rho$  (c'est-à-dire si les effets dus au transfert d'énergie thermique dans E sont grands par rapport à ceux découlant des dilatations -ce qui sera le cas dans notre étude- le bilan énergétique local s'écrit alors :

$$\rho \frac{\delta}{\delta t} \mu_P(t) = - \operatorname{div} q_P(t) + \bar{\omega}_P(t)$$

où  $\mu_P$  représente l'énergie interne de l'élément entourant le point P.

(notons que l'on désigne souvent le champ de processus  $\vec{q}$  par "champ de

conduction" ou "champ de Fourier").

La non uniformité du champ d'intensité  $T_p(t)$  étant à l'origine du phénomène de transport d'énergie, il serait intéressant de le relier à l'évolution du champ de processus  $\vec{q}_p(t)$ .

Admettons que cette relation soit linéaire (ONSAGER) et fasse correspondre à la grandeur vectorielle  $\vec{q}_p(t)$ , la grandeur vectorielle  $\text{grad } T_p(t)$ . L'opérateur linéaire  $L_p(T)$  introduit alors est appelé tenseur de conductivité.

On obtient ainsi la relation phénoménologique de la conduction en milieu solide :

$$\vec{q}_p(t) = L_p(T) \cdot \text{grad } T_p(t)$$

Dans le cas d'un corps homogène isotrope, le tenseur  $L_p(t)$  est un tenseur sphérique ; on peut lui associer une fonction scalaire  $\lambda(T)$ , appelée conductivité thermique, telle que :

$$L_p(T) = -\lambda(T) \cdot \tilde{u}$$

Dans ces conditions,  $\vec{q}_p(t) = -\lambda(T) \text{ grad } T$

D'autre part, le champ d'intensité peut être relié au champ (uniforme) de variable d'état  $\rho$  et à la densité massique d'énergie interne  $\mu_p(t)$ . En effet, on définit la densité d'énergie interne par son taux de variation en fonction de la température et on a :

$$\frac{d\mu_P(t)}{dT} = C(T)$$

(Relation dans laquelle  $C(T)$  est appelée "chaleur massique à la température  $T$ ".)

En conclusion, nous pouvons affirmer que la connaissance du comportement thermocinétique d'un milieu solide homogène et isotrope soumis à un gradient de température résulte, d'une part, de l'établissement du bilan traduisant les transports d'énergie et, d'autre part, de la connaissance des trois caractéristiques thermophysiques du milieu solide considéré (la masse volumique  $\rho$ , la conductivité thermique  $\lambda(T)$  et la chaleur massique  $C(T)$ ).

La résolution de ces équations, avec l'écriture des conditions aux frontières du domaine  $E$  et des conditions initiales satisfaisantes physiquement, nous conduit à l'établissement des thermogrammes représentant l'évolution thermique dans le milieu étudié.

On pourra ainsi obtenir, notamment, les thermogrammes chronologiques définissant les variations du champ des températures en fonction du temps sur l'ensemble discret des points  $P_1, P_2, \dots, P_n$  contenus dans  $E$ ... Souvent, il sera aussi déterminant de connaître les thermogrammes topologiques traduisant les variations du champ des températures en tous les points du milieu à un instant donné  $t_a$ .

## 2.- CAS D'UN MILIEU POREUX MACROSCOPIQUEMENT HOMOGENE ET ISOTROPE : LES BETONS.

### 2.1. Le modèle du milieu poreux.

Les matériaux utilisés en construction sont tous constitués, plus ou moins partiellement, d'une phase solide qui peut être : [20] [21]

- Une phase solide continue (c'est le cas des matériaux consolidés).
- Une phase solide discontinue (il s'agit alors des matériaux pulvérulents, granulaires ou fibreux. Ces derniers, d'ailleurs, ne peuvent plus être considérés comme macroscopiquement isotropes).

Si l'on excepte les métaux, la structure de ces matériaux laisse toujours apparaître des cavités qui peuvent alors, en fonction des conditions d'élaboration et des conditions thermohygro-métriques imposées aux frontières du domaine observé, se présenter suivant une phase liquide ou suivant une phase gazeuse ou suivant un mélange de ces deux phases.

A partir des caractéristiques géométriques des cavités, et de leur nombre, on peut définir la porosité du matériau.

Il devient alors important, pour l'analyse future des transferts de chaleur dans de tels matériaux, de séparer les systèmes poreux obtenus à partir de grains de matière assemblés par des liants, des systèmes constitués de petits volumes de gaz totalement enveloppés par la matière réticulée formant le matériau.

Le premier milieu sera dit à porosité ouverte. Il peut être le siège, sous l'action d'une cause extérieure (gradient de température ou de pression, par exemple) d'un transfert de masse avec ou sans changement d'état physique (suivant les conditions de l'équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse).

Le second milieu est généralement considéré comme fermé aux transferts de l'eau liquide (il peut cependant présenter des perméabilités à la phase gazeuse) ; il sera dit à porosité fermée.

Nous préoccupant, dans la suite de notre étude, du comportement thermophysique des bétons, nous nous attacherons principalement à l'étude des milieux poreux à phase solide continue et à porosité ouverte.

Pour un béton d'ouvrage, dans les conditions habituelles de vieillissement, l'eau est liée à la structure par une certaine énergie de liaison (liaisons chimiques, adsorption de surface, capillarité, ...). Cette eau va contribuer largement au développement des transferts thermiques dans le milieu poreux. On verra ce qu'il en résulte sur l'évolution de l'énergie de liaison.

## 2.2. Les transferts thermiques dans un milieu poreux.

### 2.2.1. Le bilan énergétique.

Les transferts thermiques dans un milieu poreux sont géné-



ralement exprimés par des relations qui supposent l'équivalence de ce milieu, par nature hétérogène, à un milieu continu homogène fictif dont les caractéristiques thermophysiques dépendent de la nature des phases solide, liquide et gazeuse constituant le milieu, de la répartition spatiale de ces phases, de leur évolution dans le temps, etc...

Si l'on néglige les effets éventuels dus aux dilatations, aux changements de phase du fluide (vaporisation ou condensation) et aux réactions physico-chimiques (adsorption, hydratation) sur le champ thermique, on peut affirmer que les transferts thermiques au sein de ce milieu poreux obéissent à une loi analogue à celle de la conduction au sein d'un milieu solide homogène. On tire alors des relations initiales l'équation :

$$\rho C(T) \frac{\delta T}{\delta t} = \lambda(T) \Delta T + \frac{d\lambda}{dT} (\text{grad } T)^2$$

(Relation dans laquelle  $\lambda(T)$  et  $\rho C(T)$  désignent la "conductivité thermique équivalente" et la "chaleur volumique du milieu poreux".)

Etablissons donc les deux modèles équivalents.

### 2.2.2. Conductivité thermique équivalente $\lambda_0$ du milieu poreux étudié.

La conductivité thermique  $\lambda_0$  du milieu poreux considéré (c'est-à-dire à phase solide continue et à porosité ouverte) dépend des conductivités thermiques propres à la phase solide ( $\lambda_s$ ) et à la phase fluide ( $\lambda_f$ ) en équilibre hygrométrique, plus ou moins saturée et dépend aussi de la distribution spatiale de ces phases solide et fluide dans le milieu. Enfin, l'importance des échanges de chaleur par rayonnement et par convection au sein des pores doit être estimée

dans les conditions thermiques de l'étude et pour les caractéristiques géométriques des matériaux étudiés.

#### 2.2.2.1. Analyse du mécanisme de la conduction :

##### 2.2.2.1.1. Modèles série et parallèle. [22]

La schématisation la plus simple d'un milieu poreux consiste en une superposition de couches planes alternées de milieu solide ( $\lambda_s$ ) et de milieu fluide ( $\lambda_f$ ).

Si la direction de propagation de la chaleur est perpendiculaire à la direction des couches, le modèle est dit "série" ; si, au contraire, il est orienté suivant cette direction, il est dit "parallèle".

Dans ces deux cas extrêmes, il est facile de calculer la conductivité apparente du milieu :

Si  $\varepsilon$  est la porosité du milieu, on a (en négligeant dans un premier temps les effets de convection et de rayonnement).

$$\lambda_0^P = \lambda_s (1 - \varepsilon) + \lambda_f \varepsilon \quad (\text{modèle parallèle})$$

$$\lambda_0^S = \frac{\lambda_f \lambda_s}{\varepsilon \lambda_s + (1 - \varepsilon) \lambda_f} \quad (\text{modèle série})$$

##### 2.2.2.1.2. Autres modèles.

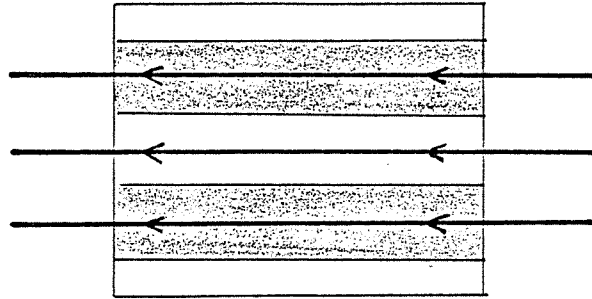
On montre que, pour une porosité  $\varepsilon_i$  donnée, la conductivité thermique équivalente  $\lambda_{o_i}$  est toujours comprise entre les conductivités des deux milieux fictifs précédents.

Des modèles plus précis de conductivité thermique ont été établis:

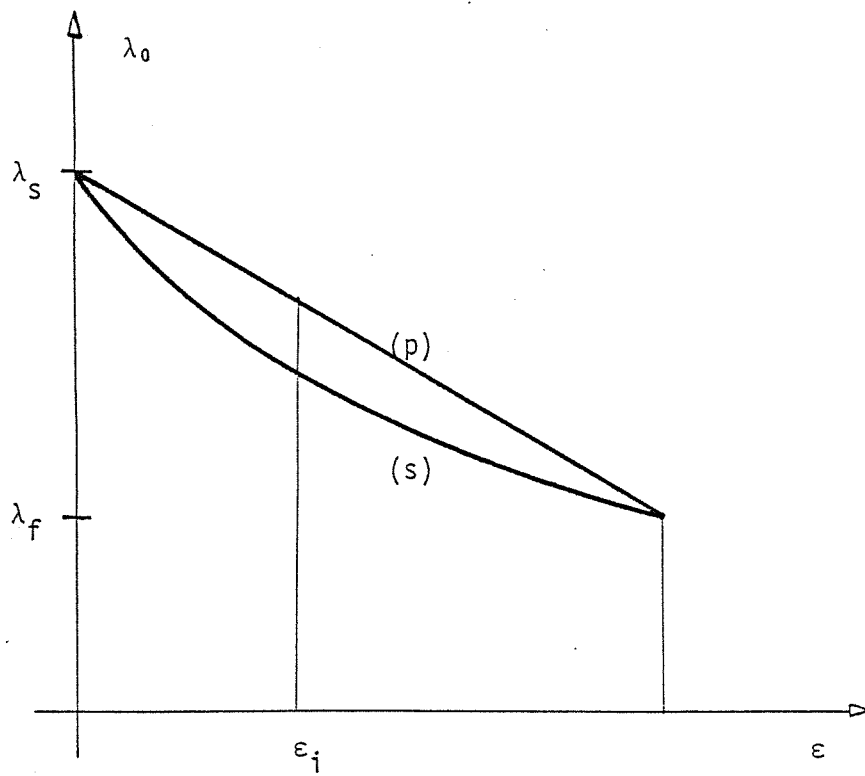
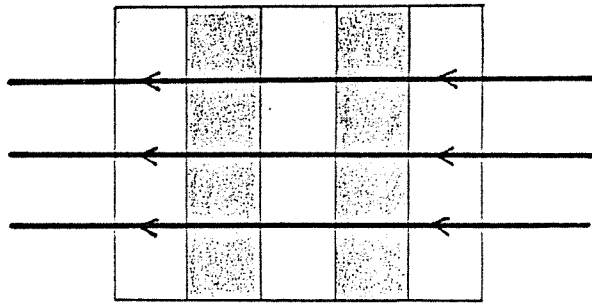
- Le modèle mixte série-parallèle :

On admet qu'une fraction  $\alpha$ , de porosité  $\varepsilon_a$ , du matériau est

Modèle  
parallèle



Modèle  
série



représentée par le modèle "parallèle" alors que le volume restant  $(1 - \alpha)$ , de porosité  $\varepsilon_b$  peut être représenté par le modèle "série". On a donc évidemment :

$$(1 - \alpha)\varepsilon_b + \alpha\varepsilon_a = \varepsilon$$

et la conductivité thermique apparente du milieu devient alors :

$$\lambda_o = \alpha \lambda_s (1 - \varepsilon_a) + \lambda_f \varepsilon_a + (1 - \alpha) \frac{\lambda_f \lambda_s}{\varepsilon_b \lambda_s + (1 - \varepsilon_b) \lambda_f}$$

- Des modèles plus complexes ont été élaborés par de nombreux chercheurs [23] [24] [25] [26]. Cependant quelle que soit la complexité de leurs représentations géométriques (cylindres, sphères, prismes, etc...) ou de leurs formulations mathématiques, ils ont toujours été étudiés uniquement en régime permanent avec une phase liquide immobile (conditions très éloignées de celles que nous connaissons lors du découpage).

#### 2.2.2.2. Effets du rayonnement à travers les pores. [27]

On montre que la conductivité thermique équivalente de deux surfaces séparées par la distance  $l$  et échangeant de la chaleur par rayonnement peut se mettre sous la forme :

$$\lambda_r = 4\sigma \frac{\alpha}{2 - \alpha} \cdot l T_m^3$$

avec :

- $\sigma$  : constante de Stefan :  $5,69 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $\alpha$  : émissivité (facteur d'émission hémisphérique totale)
- $T_m$  : température moyenne entre les deux surfaces

Compte tenu, notamment, des faibles dimensions des pores dans les matériaux qui retiennent notre attention, on constate que la contribution du rayonnement thermique aux transports de chaleur peut être négligée jusqu'à des températures de l'ordre de 500°C ; au-delà de cette valeur, elle reste encore très faible.

#### 2.2.2.3. Transmission de la chaleur par convection naturelle.

Différentes études se sont intéressées à la convection naturelle dans les milieux poreux particuliers que sont les milieux granulaires et fibreux à forte porosité. Il a, notamment, été montré que les effets de cette convection n'étaient plus sensibles dès que les dimensions des pores restaient inférieures au millimètre, les mouvements de convection naturelle étant alors empêchés par les pertes de charge importantes offertes par le milieu [27]. Compte tenu de la géométrie des pores des bétons, nous négligerons donc, ce type de transfert.

#### 2.2.2.4. Remarque et conclusion.

Nous nous sommes préoccupé, dans notre effort de modélisation d'un mélange di-phasique (solide - fluide). Or, les bétons sont, en fait, des mélanges triphasiques (solide - eau - air). Les valeurs relatives des conductivités propres de ces trois constituants sont les suivantes :

$$\lambda_a \text{ (air)} = 0,026 \text{ W/m } ^\circ\text{C (à } 20 \text{ } ^\circ\text{C et } 1 \text{ atm)}$$

$$\lambda_e \text{ (eau)} = 0,600 \text{ W/m } ^\circ\text{C (à } 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\lambda_s \text{ (solide)} = 0,5 \text{ à } 3,0 \text{ W/m } ^\circ\text{C (à } 20^\circ\text{C)}$$

Ces chiffres montrent de façon évidente que les phases solide et liquide sont, en fait, les vecteurs du transfert thermique par conduction. Il est donc primordial de connaître leur distribution au

sein du milieu et, ainsi, on constate que la variation de la conductivité thermique du matériau en fonction de la teneur en eau devra être déterminée.

Cependant, il convient de préciser que les modèles théoriques (simples ou complexes) de conductivité thermique équivalente ne constituent que des approches de la réalité des phénomènes. Il nous paraît préférable, du fait de la multiplicité des hypothèses concernant les distributions des phases liquide et gazeuse, de recourir à des résultats expérimentaux (à la condition de bien connaître les paramètres qui ont présidé à ces études).

### 2.2.3. La chaleur volumique du milieu poreux $(\rho c)_o$ .

L'enthalpie est une grandeur extensive. On en déduit l'expression de la chaleur volumique d'un milieu poreux en fonction des chaleurs massiques des phases le constituant ; on a donc :

$$(\rho c)_o = (1 - \varepsilon) (\rho c)_s + \varepsilon s_e (\rho c)_e + \varepsilon s_a (\rho c)_a$$

où  $\varepsilon$  est la porosité du milieu.

$s_e$  et  $s_a$  les saturations en eau et en air ( $s_e + s_a = 1$ ).

$(\rho c)_s$ ,  $(\rho c)_e$  et  $(\rho c)_a$  les chaleurs volumiques des phases solide - eau - air.

Sachant que la chaleur volumique de l'air est négligeable par rapport à celles des phases solide - eau, on a :

$$(\rho c)_o \approx (1 - \varepsilon) (\rho c)_s + \varepsilon s_e (\rho c)_e$$

### 3.- LES TRANSFERTS DE MASSE.

#### 3.1. Les processus de transferts de masse :

Sous les effets de différentes causes, des transferts de masse peuvent se développer dans un milieu poreux. On peut distinguer principalement : [28]

- les transferts au sein de la phase gazeuse (et éventuellement de la phase liquide) par diffusion moléculaire.
- les transferts de la phase liquide saturant partiellement le milieu poreux, sous l'action des forces capillaires.
- les transferts de la phase liquide saturant l'espace des pores par convection naturelle ou forcée (dans la mesure où l'importance des pertes de charge dues aux parois des pores n'est pas trop grande... ce qui n'est plus le cas pour les micro-pores du béton).

#### 3.2. L'eau dans les milieux poreux. [29] [30]

Les liaisons de l'eau avec la phase solide existent sous différentes formes.

- des liaisons chimiques (sous la forme d'ions OH ou de composés moléculaires - cristaux hydratés),
- des liaisons dues à l'adsorption de surface,
- des liaisons dues aux forces capillaires.

Une méthode d'évaluation de la qualité de la liaison eau-solide consiste en la détermination de l'énergie de liaison c'est-à-dire de l'énergie libre obtenue lors d'une déshydratation du corps.

Le travail nécessaire à la séparation d'une mole d'eau liée (suivant un processus irréversible et isotherme) peut être exprimé par

$$W = - \Delta F = RT \log \frac{P_s}{P_u}$$

où  $\Delta F$  est la variation d'énergie libre entre l'eau pure plane et l'eau liée à la surface,

R la constante des gaz parfaits,

$P_s$  et  $P_u$  la pression de vapeur dans le matériau et la pression de saturation à la température T.

Au delà de l'eau liée par capillarité, l'eau limitée par les ménisques est de l'eau libre. La pression de vapeur dans un capillaire de corps poreux est différente de celle située au-dessus d'un liquide plan. La diminution de pression représente l'énergie de liaison de l'eau.

La loi de Kelvin donne la différence de pression au ménisque

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{2\sigma V_0}{r RT}}$$

où :

$\rho$  est la tension desurface,

r le rayon de courbure du ménisque,

$V_0$  le volume spécifique.

il vient donc l'énergie de liaison :

$$W = \frac{2\sigma}{r} V_0$$



Dans la pratique, les matériaux vont donc présenter une ap-  
titude à la rétention d'eau d'autant plus grande en présence d'humidité  
environnante, que la proportion de pores fins que comporte leur structure  
sera grande.

Evidemment, la désorption de l'humidité et le séchage de ces  
matériaux seront d'autant plus difficiles que l'eau sera liée aux parois  
internes par des énergies plus élevées (cas des bétons notamment).

### 3.3. Les transferts par diffusion moléculaire.

Soit un mélange de plusieurs constituants. Si l'une des es-  
pèces chimiques n'est pas distribuée de façon uniforme dans ce milieu,  
des transferts de masse par diffusion moléculaire vont tendre à établir  
cet équilibre au sein du mélange. La raison de tels transferts résulte  
de l'existence d'un potentiel chimique de l'élément considéré. Dans cer-  
taines hypothèses et pour des dimensions de pores suffisamment importantes,  
ces gradients peuvent être reliés au gradient de sa concentration en masse  
C. [28]

La loi de diffusion (loi de Fick) permet alors d'écrire  
l'équation du transfert sous la forme :

$$\text{div} (D \text{ grad } C) = \frac{\delta C}{\delta t}$$

Relation où le coefficient de diffusion D dépend de la saturation, de la  
distribution spatiale des pores concernés par la phase étudiée, etc...

A titre d'exemple, on peut dire que les transferts de ce  
type au sein du matériau poreux vont surtout consister en la diffusion  
de la vapeur d'eau jusqu'à un état de saturation partielle du milieu.

#### 4.- LES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES BETONS.

Par la nature et la diversité de ses constituants, le béton est un mélange tri-phasique très complexe.

L'élaboration d'un modèle thermocinétique permettant la détermination, par le calcul, des "propriétés thermophysiques équivalentes" peut conduire soit à des approximations importantes et des résultats erronés si le modèle est très simple, soit à des calculs très longs et complexes si le modèle s'efforce d'être représentatif de toute la réalité physique.

Aussi préfère-t-on généralement une détermination expérimentale qui permet une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques du matériau en fonction de tous les paramètres (température, composition du béton, nature du granulat, porosité, nature de la phase liquide, conditions hygrométriques, etc...).

##### 4.1. La nature de l'eau dans le béton.

Lors de l'élaboration du béton, les constituants anhydres du ciment se combinent chimiquement avec une partie de l'eau du mélange (sous forme d'ions OH ou de groupements  $H_2O$ ). L'eau restante est liée à la matrice solide ainsi constituée par les énergies de liaison (adsorption et capillarité notamment).

La détermination de cette énergie peut être obtenue à partir d'une déshydratation du béton effectuée sous condition isotherme et dans une ambiance dont le degré hygrométrique est décroissant en fonction du temps. On peut, alors :

- relier la variation du niveau d'énergie libre à la quantité d'eau libérée,

#### 4.- LES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DES BETONS.

Par la nature et la diversité de ses constituants, le béton est un mélange tri-phasique très complexe.

L'élaboration d'un modèle thermocinétique permettant la détermination, par le calcul, des "propriétés thermophysiques équivalentes" peut conduire soit à des approximations importantes et des résultats erronés si le modèle est très simple, soit à des calculs très longs et complexes si le modèle s'efforce d'être représentatif de toute la réalité physique.

Aussi préfère-t-on généralement une détermination expérimentale qui permet une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques du matériau en fonction de tous les paramètres (température, composition du béton, nature du granulat, porosité, nature de la phase liquide, conditions hygrométriques, etc...).

##### 4.1. La nature de l'eau dans le béton.

Lors de l'élaboration du béton, les constituants anhydres du ciment se combinent chimiquement avec une partie de l'eau du mélange (sous forme d'ions OH ou de groupements H<sub>2</sub>O). L'eau restante est liée à la matrice solide ainsi constituée par les énergies de liaison (adsorption et capillarité notamment).

La détermination de cette énergie peut être obtenue à partir d'une déshydratation du béton effectuée sous condition isotherme et dans une ambiance dont le degré hygrométrique est décroissant en fonction du temps. On peut, alors :

- relier la variation du niveau d'énergie libre à la quantité d'eau libérée,

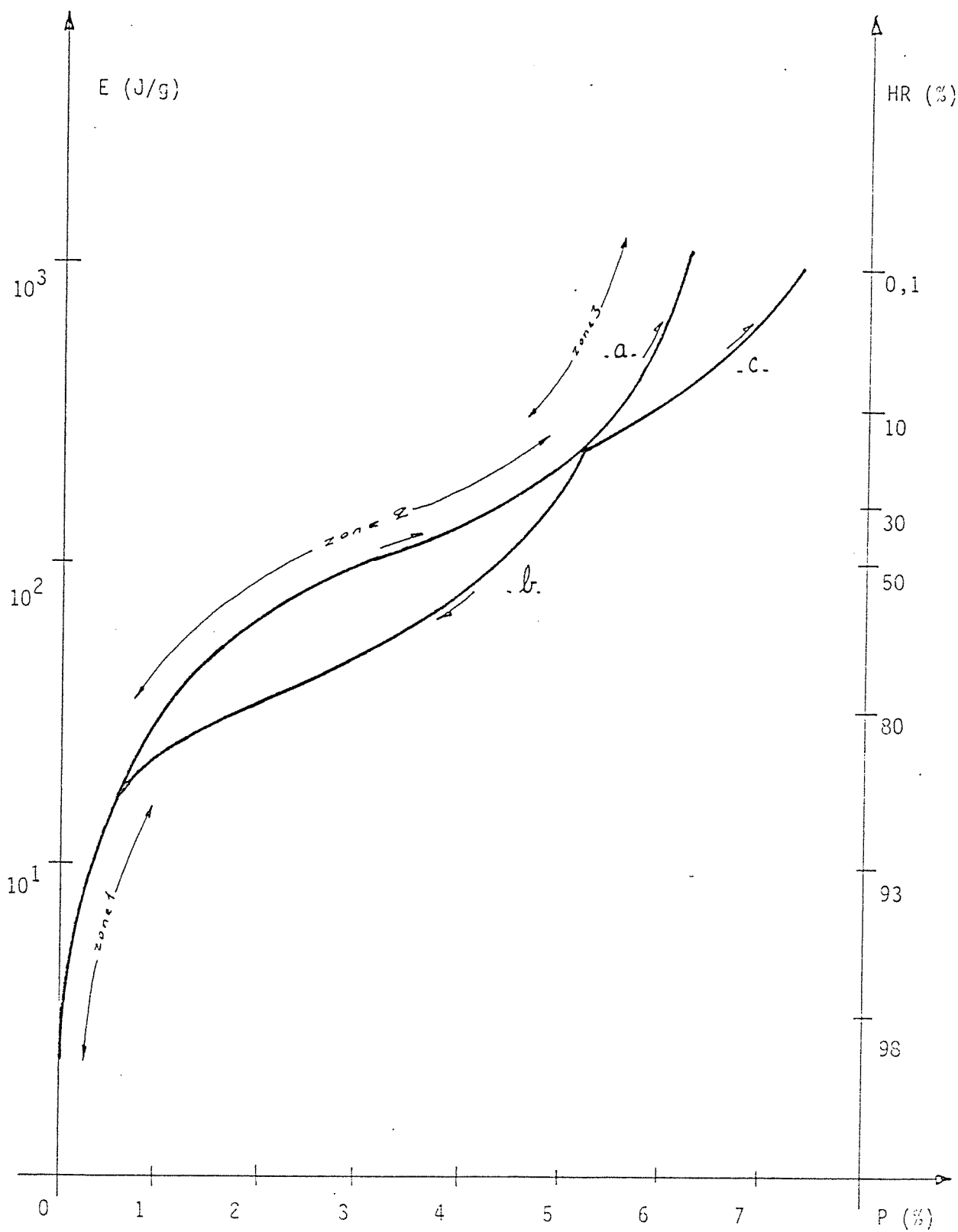
- observer un cycle complet déshydratation - réhydratation (à partir d'un état initial que l'on considèrera saturé - H.R.  $\neq$  98%),
- rechercher les perturbations apportées par une élèvation de température de l'ambiance.

Les courbes représentées sur la fig. 3.23 nous expriment [29]

1. Les variations d'énergie de liaison en fonction de la quantité d'eau libérée. En effet, la première zone (état liquide important) nous montre un état où l'eau s'écoule dans les capillaires en étant principalement retenue par ceux-ci. La seconde zone correspond aux couches périphériques d'eau absorbée ; l'énergie de liaison est beaucoup plus importante. Enfin, la troisième zone correspond à la dernière couche d'eau adsorbée (monomoléculaire à état quasi-rigide) ; les énergies de liaison sont alors considérables (courbe a).

2. L'existence d'une hystérésis lors d'un cycle déshydratation-réhydratation ; c'est une caractéristique des matériaux poreux de cette nature ; cela signifie que l'on peut sensiblement restituer, en quantité, l'état initial d'humidité du matériau mais que, pour des états hygrométriques intermédiaires, l'eau n'est plus liée avec la même énergie (courbe b).

3. L'élévation de la température (non conservation des conditions isothermes) active la désydratation. De plus, on constate que la quantité libérée est augmentée (courbe c). Ceci est dû à la nature particulière des bétons ; en effet, dans un état relativement sec, pour des températures de l'ordre de 60°C-70°C, on peut noter un réarrangement des silicates tricalcique et bicalcique.



Les molécules d'eau ainsi privées de liaisons chimiques viennent évidemment s'ajouter à l'eau liée physiquement... Ces phénomènes se produisant pour des températures relativement faibles, il faut en tenir compte lors de l'application de traitements thermiques au béton au delà de ces températures de 60 à 70°C (étuvage, découpage, etc...)

#### 4.2. La conductivité thermique des bétons

Les variations de cette caractéristique thermophysique sont évidemment fonction des constituants du béton, donc, notamment, de la nature des granulats, du dosage en ciment et de la quantité d'eau incluse.

Limitons notre observation à deux directions principales qui seraient la variation de la conductivité en fonction de la température d'une part et, d'autre part, la variation de la conductivité en fonction de la teneur en eau.

##### a) Variation avec la température : [31]

La conductivité thermique a été déterminée en régime quasi-stationnaire (avec très faible gradient thermique dans le modèle) pour chaque température et alors que l'équilibre hygrométrique avec l'ambiance est atteint (en quelque sorte, on suppose la déshydratation résultant de l'action de la température totalement effectuée à l'instant de la mesure de la conductivité). La courbe représentative permet d'effectuer trois constatations :

- La variation de la conductivité thermique en fonction de la température présente un maximum dans l'intervalle (50°-60°). On avait déjà remarqué, sur la fig. 3.23, que cet intervalle correspondait, lors de la déshydratation du béton à un changement de pente de la courbe

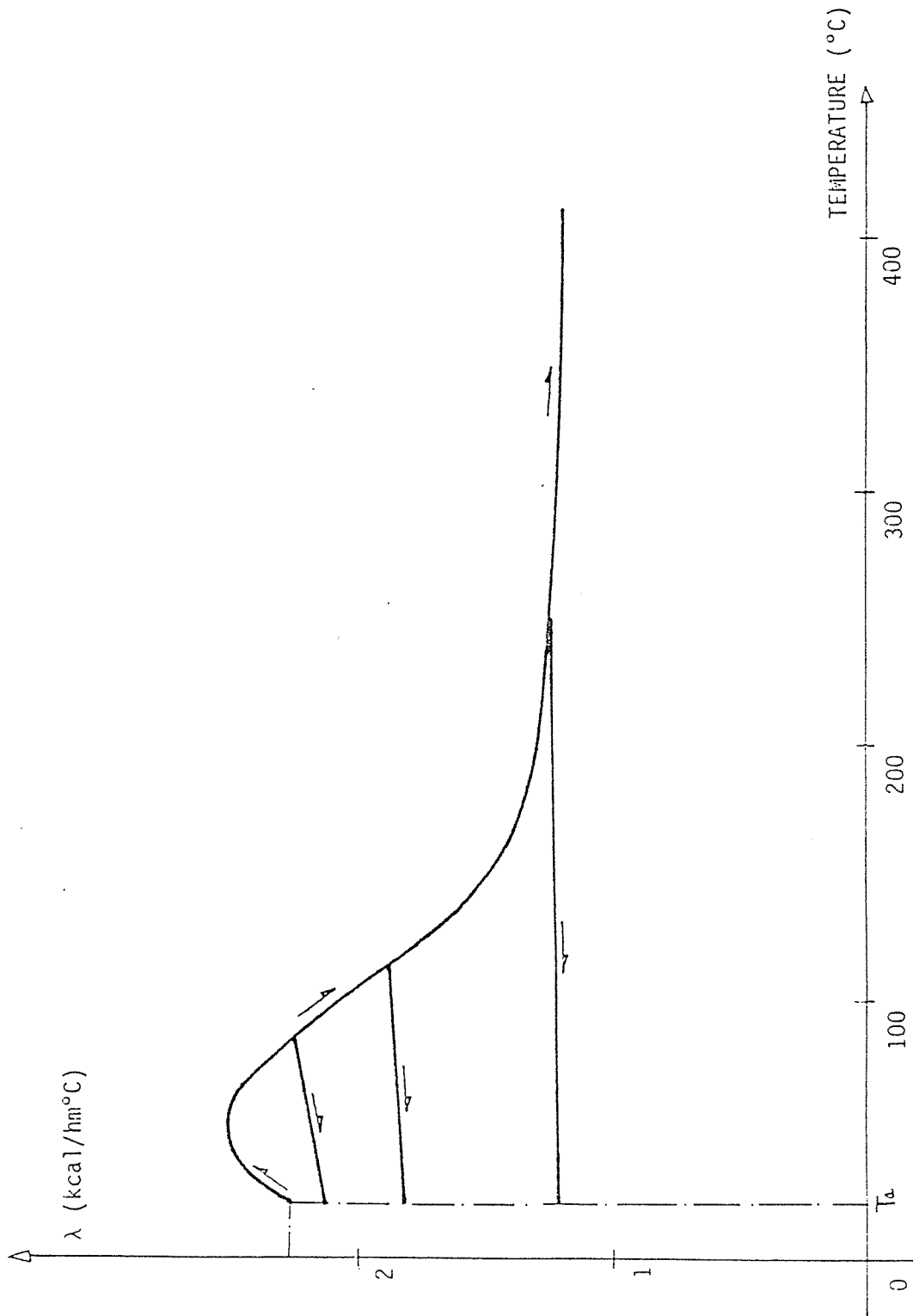


fig 3.25 : Conductivité thermique en fonction de la température (bâton de quartz)

annonçant les couches d'eau à plus forte énergie de liaison.

- De 60°C à 120°C, environ, la forte décroissance notée résulte du départ de l'eau (capillaire et adsorbée) contenue dans la matrice (et aussi de la réduction du nombre de liaisons conductives du fait de la décomposition de certains hydrates .

- Au delà de 120°C à 140°C, la variation de conductivité est moins grande et on tend vers une valeur constante, en effet, l'eau restante est la seule couche monomoléculaire adsorbée, très fortement liée et, donc, très stable.

#### b) Variation avec la teneur en eau. [32]

La courbe représentative des variations de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau met l'accent sur un point qui nous paraît important. En effet, on sait que la teneur en eau d'un béton à un instant donné, dépend essentiellement de son histoire (dosage initial, âge et conditions de conservation). La qualité des transferts thermiques qui se développent dans un tel matériau dépendra donc, elle aussi, de ces trois éléments et on verra plus loin des cas où cela est déterminant (fig. 3.27a).

#### 4.3. La chaleur volumique des bétons ( $\rho c$ ) [29] [32]

En fait, pour des raisons évidentes au thermicien, ce n'est pas la chaleur volumique que nous observerons mais un autre paramètre la diffusivité  $a$ , rapport entre la conductivité thermique et la chaleur volumique :  $\frac{\lambda}{\rho c}$  .

Une fois de plus, la teneur en eau du béton, comme on le constate sur la fig. 3.27.b joue le rôle de paramètre essentiel dans les variations de la diffusivité.



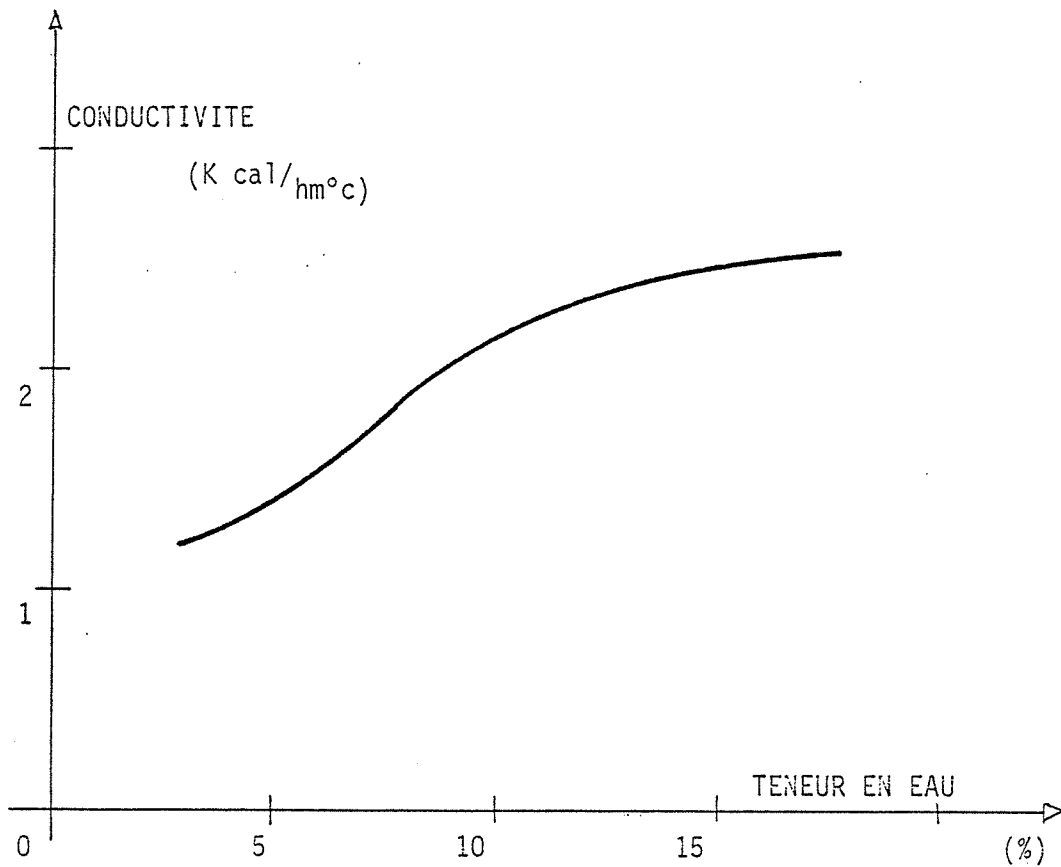


fig 3.27a : Variation de la Conductivité thermique du béton (à 20°C) en fonction de la teneur en eau (granulats de quartz )

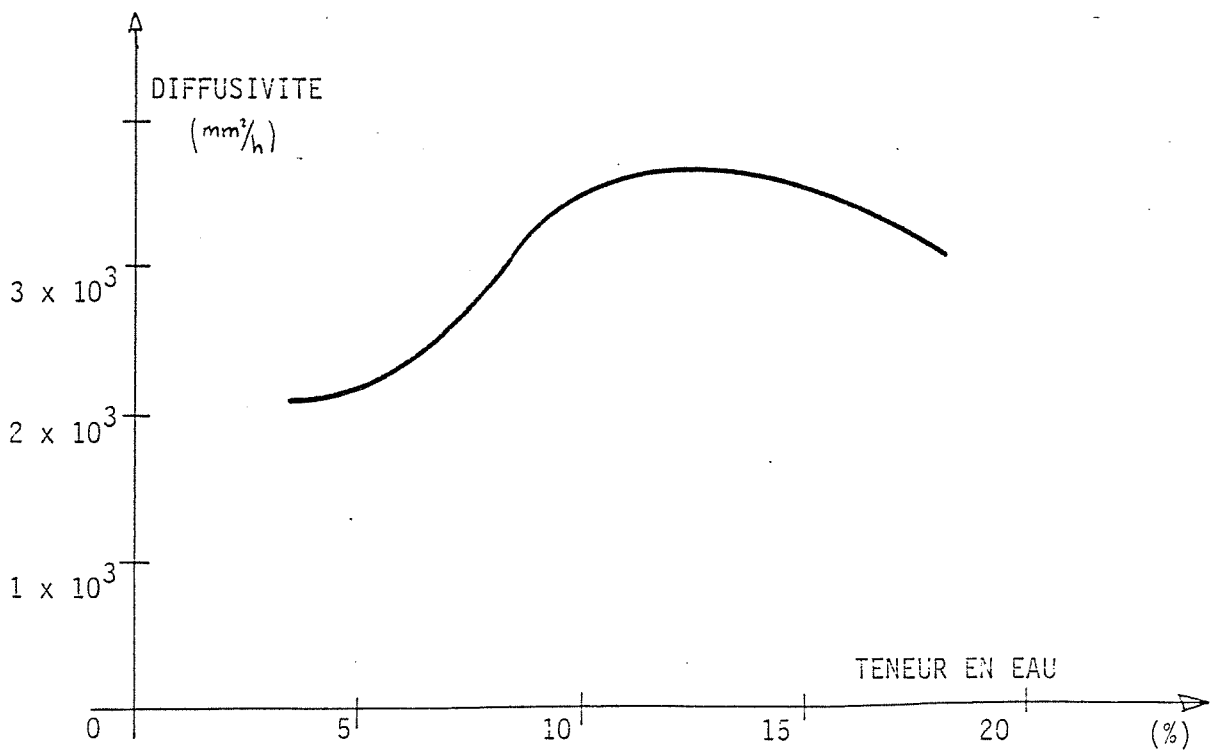


fig 3.27b : Variation de la diffusivité thermique du béton en fonction de la teneur en eau (granulats de quartz)

C.- LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE DES BETONS.

Du point de vue du bilan énergétique, on peut dire que la quantité de chaleur ( $\Phi_Q$ ) dégagée par la combustion de la lance thermique lors de la coupe, sert à :

- 1°) élever la température de la tranche future découpée ( $\Phi_1$ ),
- 2°) assurer le changement d'état physique (phase solide à phase liquide et gazeuse) de cette tranche de matériaux ( $\Phi_2$ ),
- 3°) évaporer l'eau incluse dans le béton (ou au voisinage immédiat de la coupe) ( $\Phi_3$ ),
- 4°) élever la température du béton de part et d'autre de cette coupe ( $\Phi_4$ ).

En outre, une partie non négligeable de la chaleur produite est dissipée vers l'extérieur par rayonnement ( $\Phi_5$ ) ou est évacuée avec le laitier lors de la coupe, pendant l'action cinétique ( $\Phi_6$ ).

On a donc :

$$\Phi_Q \neq \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6$$

La quantité réelle ( $\Phi_u$ ) de chaleur conduisant à l'échauffement du béton -qui va constituer une des conditions aux limites de notre problème- a dû être déterminée expérimentalement.

## 1.- ETUDE THEORIQUE.

### 1.1. Les hypothèses et les modèles thermocinétiques associés.

Ils vont concerner essentiellement la coupe thermique, d'une part, et le béton d'autre part.

#### 1.1.1 La modélisation de la coupe thermique :

##### 1.1.1.1. Les modèles géométriques.

Deux modèles sont retenus, correspondant à deux opérations distinctes.

##### a) Une coupe continue :

Celle-ci est, comme on l'a vu au chapitre II , élaborée à partir de l'exécution de trous sécants. Admettons que la surface obtenue soit plane (figure 3.30).

##### b) Un trou isolé :

Il résulte d'une seule application de lance thermique et est représenté par un cylindre de diamètre égal à 4 centimètres environ (figure 3.30).

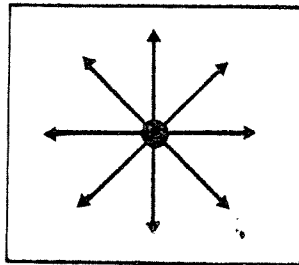
##### 1.1.1.2. Les modèles thermocinétiques associés.

a) La densité de flux de chaleur  $\psi_0$  (résultant de la quantité  $\Phi_4$ ) est considérée uniforme sur la surface latérale du cylindre ou sur le plan de la coupe rectiligne. Cette hypothèse tient compte de la grande vitesse d'avance de la lance (40 cm/mn) comparée à la vitesse de propagation du flux dans le béton (isolant). On en vérifiera cependant la validité lors de l'étude expérimentale.

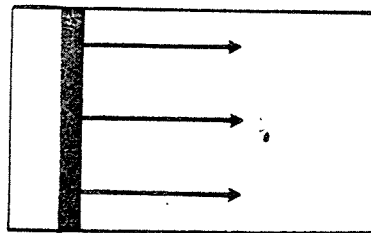
b) Le modèle ayant une épaisseur finie constante est donc limité latéralement par deux plans perpendiculaires à la coupe : on admettra que les pertes de flux de chaleur par ces deux plans sont négligeables.

c) La densité de flux de chaleur résultant de la combustion de la lance thermique peut être représentée en fonction du temps par un "échelon de flux " rectangulaire d'intensité  $\phi_0$  et de longueur  $(t_1 - t_0)$  où  $t_0$

- Coupe type A1 (trou isolé) :



- Coupe type A2 (continue) :



- Echelon de flux :

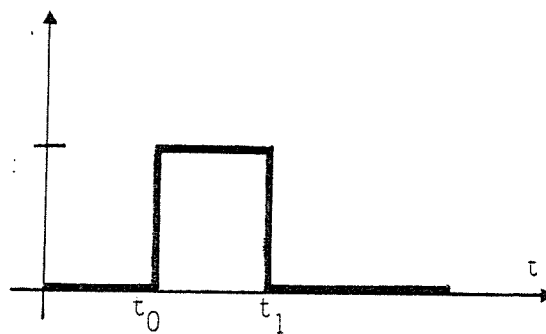


fig. 3.30 Les modèles géométriques et thermocinétiques de coupe thermique.

est l'instant initial de la coupe alors que l'écart  $(t_1 - t_0)$  représente une durée moyenne équivalente pour cette même coupe (fig.3.30).

### 1.1.2. La modélisation du béton :

1.1.2.1. Le matériau est macroscopiquement homogène et isotrope à l'état initial. Il n'y a donc pas d'armatures d'une part et pas de gradient hydraulique d'autre part.

1.1.2.2. Les caractéristiques thermophysiques du milieu équivalent au milieu poreux seront, dans un premier temps, considérées constantes dans les calculs et égales aux valeurs moyennes déterminées dans les domaines de températures observées.

1.1.2.3. Il ne sera pas tenu compte, a priori, des chaleurs latentes de changement d'état de l'eau dans les calculs... Elles ne seront cependant pas négligées puisque les conditions aux limites de ces mêmes calculs (déterminées expérimentalement) les auront prises effectivement en compte.

1.1.2.4. L'élément découpé aura des dimensions telles que l'on pourra considérer le milieu semi infini à partir de la coupe et pendant la durée de propagation. En d'autres termes, il n'existe pas de singularités (discontinuités, changement de section, parois, excavations,...) dans le voisinage de la coupe (on montrera que quelques centimètres suffisent à satisfaire cette hypothèse) venant perturber les lignes de flux qui seront donc parallèles (coupe plane) ou radiales (trou unique).

## 1.2. Equations générales et solutions analytiques.

### 1.2.1. Dans le modèle du mur semi infini à lignes de flux parallèles.

La relation traduisant le bilan énergétique devient, compte tenu des hypothèses :

$$\rho c \frac{\delta T(x, t)}{\delta t} = \lambda \frac{\delta^2 T(x, t)}{\delta x^2} ; \text{ en posant } a = \frac{\lambda}{\rho c}, \text{ on a donc :}$$

$$* \frac{\delta T(x, t)}{\delta t} - a \frac{\delta^2 T(x, t)}{\delta x^2} = 0 \quad \text{pour } x > 0 \text{ et } t > 0.$$

Les conditions à la frontière du domaine s'expriment par :

$$* \left\{ \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right\}_{x=0} = - \frac{\phi_0}{\lambda}$$

et les conditions initiales sont :

$$* T(x, t) = T_0 \quad \text{pour } t = 0$$

Remarquons que la densité de flux  $\phi(x, t)$  (définie par  $\lambda \frac{\delta T}{\delta x} = -\phi$ ) satisfait la même équation différentielle que  $T(x, t)$ , c'est-à-dire que l'on a :

$$* \frac{\delta \phi(x, t)}{\delta t} - a \frac{\delta^2 \phi(x, t)}{\delta x^2} = 0 \quad \text{pour } x > 0 \text{ et } t > 0$$

$$* \{\phi(x, t)\}_{x=0} = \phi_0 \quad \text{pour } x = 0 \text{ et } t > 0$$

Montrons que l'expression  $\mu(x, t)$  ci-dessous est solution particulière de l'équation précédente

$$\mu(x, t) = \frac{e^{-\frac{x^2}{4at}}}{\sqrt{t}},$$

On a :

$$\frac{\delta \mu(x, t)}{\delta t} = -\frac{1}{2t\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} + \frac{x^2}{4at^2\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}}$$

$$\frac{\delta^2 \mu(x, t)}{\delta x^2} = -\frac{2}{2at\sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}} + \frac{x^2}{4a^2 t^2 \sqrt{t}} e^{-\frac{x^2}{4at}}$$

donc  $\mu(x, t)$  est une solution particulière de :

$$\frac{\delta \mu(x, t)}{\delta t} - a \frac{\delta^2 \mu(x, t)}{\delta x^2} = 0$$

Par ailleurs, des propriétés importantes de la fonction  $\mu(x, t)$  sont :

- $\mu(x, t) \rightarrow 0$  pour  $t \rightarrow 0$  (et  $x \neq 0$ )
- $\mu(x, t) \rightarrow \infty$  pour  $t \rightarrow 0$  (si  $x = 0$ )
- $\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x, t) dx = \sqrt{2\pi a}$
- Il existe d'autres solutions aux équations initiales

par intégration ou dérivation de  $\mu(x, t)$ .

Ainsi, par exemple, elles sont satisfaites par l'expression :

$$\int_x^\infty \mu(x, t) dx.$$

$$\int_0^x \frac{e^{-\frac{x^2}{4at}}}{\sqrt{t}} dx = 2\sqrt{a} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{at}}} e^{-\xi^2} d\xi \quad \text{en posant } \xi = \frac{x}{2\sqrt{at}}$$

Introduisons la "fonction erreur"  $\{\text{erf}(x)\}$  et la "fonction erreur complémentaire"  $\{\text{erfc}(x)\}$ , en posant :

- $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$
- $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi$

Les principales propriétés de ces fonctions sont les suivantes :

- $\text{erf}(0) = 0$
- $\text{erf}(-x) = -\text{erf}(x)$

$$\cdot i \operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x)$$

$$\cdot \operatorname{erf}(\infty) = 1$$

$$\cdot i \operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty \operatorname{erfc}(\xi) d\xi$$

$$\cdot i^n \operatorname{erfc}(x) = \int_x^\infty i^{n-1} \operatorname{erfc}(\xi) d\xi \quad (n = 1, 2, \dots)$$

Des relations précédentes, on peut tirer que :

$$\phi(x, t) = A \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \quad (x > 0, t > 0, A = \text{constante}),$$

est solution ; d'après les conditions aux limites, on a évidemment :  $A = \phi_0$

D'où la solution générale sous la forme :

$$\phi(x, t) = \phi_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \text{ pour } x > 0, \text{ et } t > 0$$

Revenons à l'équation différentielle originelle, on a alors :

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \frac{\phi_0}{\lambda} \int_x^\infty \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) dx \\ &= \frac{\phi_0}{\lambda} \cdot 2\sqrt{at} \cdot i \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \end{aligned}$$

D'où :

$$T(x, t) = \frac{2}{\lambda} \phi_0 \left[ \sqrt{\frac{at}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4at}} - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \right]$$

Pour nous replacer dans les conditions exactes du problème (échelon de flux), il suffit alors d'exprimer la température résultant des applications d'un flux  $\{\phi_0\}$  à partir de l'instant  $t_0$  et d'un flux  $\{-\phi_0\}$  à partir de l'instant  $t_1$ . On obtient ainsi la solution recherchée.



pour  $0 < t < t_0$

$$\bullet T(x, t) = T_0$$

pour  $t_0 < t < t_1$

$$\bullet T(x, t) = T_0 + \frac{2\phi_0}{\lambda} \left( \frac{\sqrt{a(t-t_0)}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_0)}} - \frac{x}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right) \right)$$

pour  $t_1 < t < \infty$

$$\bullet T(x, t) = T_0 + \frac{2\sqrt{a}}{\lambda\sqrt{\pi}} \phi_0 \left( \sqrt{(t-t_0)} e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_0)}} - \sqrt{(t-t_1)} e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_1)}} \right) - \frac{x}{\lambda} \phi_0 \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a(t-t_1)}} \right) \right)$$

### 1.2.2. Dans le modèle de la conduction radiale :

En coordonnées cylindrique  $(M, \theta, z)$ , la relation traduisant le bilan énergétique, s'exprime sous la forme :

$$\frac{\delta T(r, \theta, z, t)}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T(r, \theta, z, t)}{\delta z^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} r \frac{\delta T(r, \theta, z, t)}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 T(r, \theta, z, t)}{\delta \theta^2}$$

Les hypothèses précédemment formulées entraînent :

$$- \frac{\delta T(r, \theta, z)}{\delta \theta} = 0$$

$$- \frac{\delta T(r, \theta, z)}{\delta z} = 0 ; \text{ on a, alors, la relation :}$$

$$\bullet \frac{\delta T(r, t)}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T(r, t)}{\delta r^2} + \frac{a}{r} \frac{\delta T(r, t)}{\delta r}$$

Dans le cas de l'application d'un flux  $\phi_0$  à partir de l'instant 0, les conditions d'échange à la frontière sont :

$$\bullet \phi_0 = -\lambda \left[ \frac{\delta T(r, t)}{\delta r} \right]_{r=R} \quad (R : \text{ rayon de forage})$$

Les conditions initiales sont :

$$T(0) = T_0$$

Effectuons les changements de coordonnées suivants :

$$t^* = (t - t_0) \frac{a}{R^2}$$

$$r^* = \frac{r}{R}$$

$$T^*(r^*, t^*) = \frac{T(r, t) - T_0}{T_0}$$

$$\phi^*(r, t) = \phi(r, t) \frac{R}{\lambda}$$

On a alors :

$$\frac{\delta T(r, t)}{\delta t} = \frac{aT_0}{R^2} \frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta t^*} \quad ; \quad \frac{\delta^2 T(r, t)}{\delta r^2} = \frac{T_0}{R^2} \frac{\delta^2 T^*(r^*, t^*)}{\delta r^{*2}}$$

$$\text{et } \frac{1}{r} \frac{\delta T(r, t)}{\delta r} = \frac{T_0}{R^2 r} \frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta r^*}$$

Et les relations deviennent :

$$\frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta t^*} = \frac{\delta^2 T^*(r^*, t^*)}{\delta r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta r^*}$$

(remarquons que les caractéristiques thermophysiques n'interviennent plus dans l'équation).

$$\frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta t^*} \Big|_{r^*=1} = \frac{\phi_0}{\lambda} = -\frac{\phi_0}{R}$$

$$T^*(r^*, t^*) \Big|_{t^*=0} = 0 \quad (r^* > 1)$$

Effectuons la transformation de Laplace en posant :

$$L^* T^*(r^*, t^*) = \int_0^\infty e^{-pt^*} T^*(r^*, t^*) dt^*$$

Il vient :

$$L^* \left( \frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta t^*} \right) = \int_0^\infty e^{-pt^*} \frac{\delta T^*}{\delta t^*} dt^* = e^{-pt^*} T^* \Big|_0^\infty + p \int_0^\infty e^{-pt^*} T^* dt^*$$

$$= p.L^* [T^*(r^*, t^*)]$$

$$\cdot L^* \frac{\delta T^*(r^*, t^*)}{\delta r^*} = \frac{\delta L^* T^*(r^*, t^*)}{\delta r^*}$$

$$\cdot L^* \frac{\delta^2 T^*(r^*, t^*)}{\delta r^{*2}} = \frac{\delta^2 L^* T^*(r^*, t^*)}{\delta r^{*2}}$$

Les équations initiales deviennent donc, par transformation,

$$\cdot \frac{\delta^2 L^*(T^*)}{\delta r^{*2}} + \frac{1}{r^*} \frac{\delta L^*(T^*)}{\delta r^*} - q^2 L^*(T^*) = 0$$

$$\cdot \frac{\delta L^*(T^*)}{\delta r^*} \Big|_{r^*=1} = -\frac{\phi_0}{q^2}$$

On arrive ainsi à "l'équation de BESSEL". Sa solution générale est de la forme :  $L^*(T^*) = C K_0(qr^*)$ . La condition aux limites

$$\text{devient alors : } \frac{\delta L^*(T^*)}{\delta r^*} \Big|_{r^*=1} = -q \cdot C K_0(q) = -\frac{\phi_0}{p}$$

$$\text{On a donc : } L^*(T^*) = \frac{\phi_0}{p} \frac{K_0(qr^*)}{qK_1(q)}$$

Le théorème de l'inversion nous permet de remonter à  $T^*(r^*, t^*)$  :

Après calculs, on obtient :

$$T^*(r^*, t^*) = -\frac{2}{\pi} \phi_0 \int_0^\infty \left\{ \frac{1 - e^{-\alpha^2 t^*}}{\alpha^2} \right\} \left\{ \frac{J_0(\alpha r^*) Y_1(\alpha) - Y_0(\alpha r^*) J_1(\alpha)}{J_1^2(\alpha) + Y_1^2(\alpha)} \right\} d\alpha$$

(On peut obtenir une solution approchée utilisable pour les faibles valeurs de  $t^*$  en développant en série la transformée  $L^*(T^*)$  et en prenant l'original terme à terme.)

Tous calculs effectués, et en revenant aux valeurs réelles ( $T, \phi_0, r, t$ )  
on obtient l'expression :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a(t-t_0)R}{r}} \quad i \operatorname{erfc} \left( \frac{r - R}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right) \cdot \phi_0$$

$$- \frac{1}{2\lambda} \cdot a(t-t_0) \cdot \left( \frac{3}{R} + \frac{1}{r} \right) \sqrt{\frac{R}{r}} \cdot i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{(r - R)}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right) \cdot \phi_0$$

Pour nous replacer dans les conditions réelles du problème,  
opérons comme en 1.2.1., nous trouvons :

pour  $0 < t < t_0$

$$\bullet T(r, t) = T_0$$

pour  $t_0 < t < t_1$

$$\bullet T(r, t) = T_0 + \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{a(t-t_0)R}{r}} \quad i \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r - R}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right\} \cdot \phi_0$$

$$- \frac{1}{2\lambda} a(t-t_0) \left( \frac{3}{R} + \frac{1}{r} \right) \sqrt{\frac{R}{r}} \cdot i^2 \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r - R}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right\} \cdot \phi_0$$

pour  $t_1 < t < \infty$

$$\bullet T(r, t) = T_0 + \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{aR}{r}} \left( \sqrt{(t-t_0)} \quad i \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(r - R)}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right\} - \sqrt{(t-t_1)} \quad i \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(r - R)}{2\sqrt{a(t-t_1)}} \right\} \right) \cdot \phi_0$$

$$- \frac{a \left( \frac{3}{R} + \frac{1}{r} \right) \sqrt{\frac{R}{r}}}{2\lambda} \left( (t-t_0) i^2 \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(r - R)}{2\sqrt{a(t-t_0)}} \right\} - (t-t_1) i^2 \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(r - R)}{2\sqrt{a(t-t_1)}} \right\} \right) \cdot \phi_0$$

### 1.3. Le traitement du calcul et les résultats numériques.

#### 1.3.1 Les paramètres du traitement.

La première modélisation (mur semi-infini - lignes de flux parallèles) conduit aux élévations de températures les plus grandes. Par ailleurs, c'est celle qui correspond à la plupart des cas d'utilisation du découpage thermique : c'est donc celle dont nous avons choisi de présenter les résultats ici.

Les paramètres du calcul sont évidemment classés suivant qu'ils dépendent :

- de la coupe thermique :

- le flux thermique  $\phi_0$

- le temps d'application de ce flux  $\Delta t$  tel que  $\Delta t = t_1 - t_0$

- du béton :

- la conductivité thermique  $\lambda$

- la diffusivité thermique  $a$

Ils constituent donc, tous les quatre, des données d'entrée pour le programme caractérisant l'opération réelle de découpage thermique.

#### 1.3.2. Les thermogrammes chronologiques.

Le calcul a été conduit en collaboration avec le Centre Informatique de l'Université P. et M. CURIE à Paris. Le programme est écrit en FORTRAN.

Les valeurs numériques des entrées concernant la coupe thermique,  $\phi_0$  et  $\Delta t$ , ont été déterminées suivant un processus que nous analyserons lors de l'étude expérimentale.

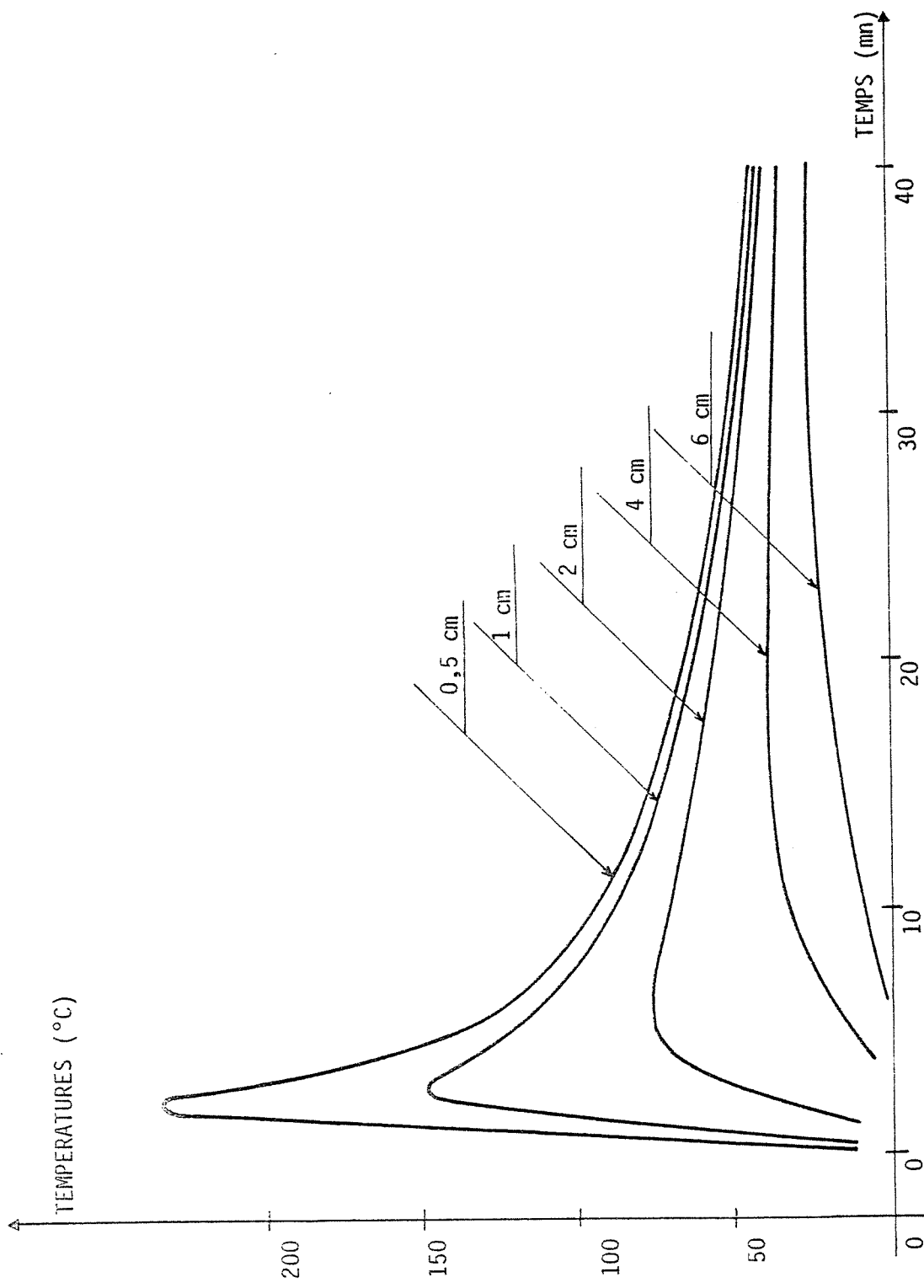


fig 3.40 : Evolution de la température dans le béton en fonction du temps pour différentes profondeurs.

Les sorties étaient effectuées sous forme de tableau de valeurs des températures en fonction du temps pour les valeurs de  $\lambda$ ,  $a$ ,  $\phi_0$ ,  $\Delta t$  entrées et pour des abscisses déterminées ( $x = r$ )

Il était ensuite facile, par un second traitement, de tracer les thermogrammes chronologiques pour différentes profondeurs ( $r_i$ ). (figure 3.40).

Remarque : Mesure des caractéristiques thermophysiques vraies du béton.

De tels diagrammes mettent en évidence la faible diffusivité du béton qui a pour effet d'étaler largement dans le temps la propagation de la chaleur (temps  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ). On pourrait ensuite tracer le diagramme de propagation du champ de température en fonction du temps pour une intensité de ce champ donnée ( $T_i$ ) soit  $M_{T_i}(t)$  et en déduire la vitesse de propagation :  $\left[ \frac{dr(t)}{dt} \right]_{T_i}$  (figure 3.42).

De tels graphes sont caractéristiques de l'évolution du processus dans le milieu et doivent permettre, selon nous, de mesurer directement, lors de l'étude expérimentale, les caractéristiques thermophysiques vraies du béton à la température considérée... On pourrait ainsi, notamment, déterminer l'évolution de la diffusivité en fonction de la température... Nous n'avons, cependant, pas dépouillé nos résultats expérimentaux en ce sens (qui n'est pas une direction principale de notre étude).

1.3.3. Les thermogrammes topologiques.

Les thermogrammes chronologiques permettent d'appréhender les caractères thermophysiques du matériau. En fait, l'ingénieur a plutôt besoin de connaître, lors d'un découpage, les thermogrammes

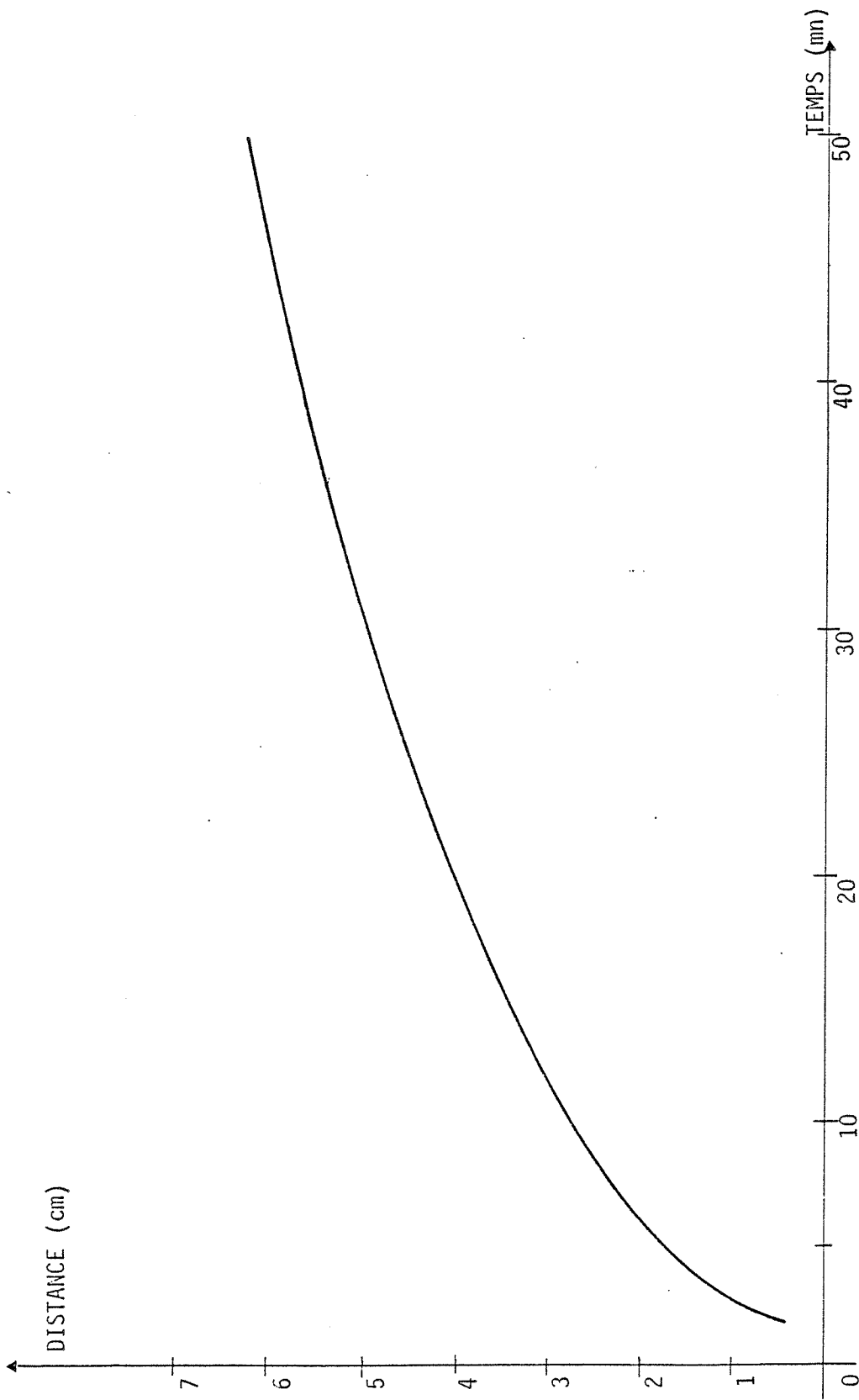


fig 3.42 : Propagation du front des températures maximum en fonction du temps.



topologiques car c'est à partir d'eux et d'un critère d'état limite (par exemple une température critique  $T_c$ ) qu'il pourra déterminer les frontières du domaine altéré par l'opération.

On a donc représenté, fig. 3.44, le thermogramme correspondant aux températures maximales atteintes lors de la coupe.

Se souvenant que les conditions aux limites résultent d'une détermination expérimentale, il est intéressant de se préoccuper de l'influence de l'incertitude de ces mesures : on a ainsi représenté les courbes correspondant à des écarts (positif et négatif) de 15% par rapport aux valeurs moyennes de flux  $\phi_0$  et de temps d'application du flux  $\Delta t$ .

On obtient, de cette façon, un fuseau des températures maximales probables (notions que, d'ailleurs, seule une étude statistique plus poussée nous permettra d'approcher sérieusement).

Par ailleurs, nous avons aussi représenté, en pointillé, sur cette même figure 3.44, le fuseau des températures maximales résultant d'un trou cylindrique isolé (modèle 1.2.2).

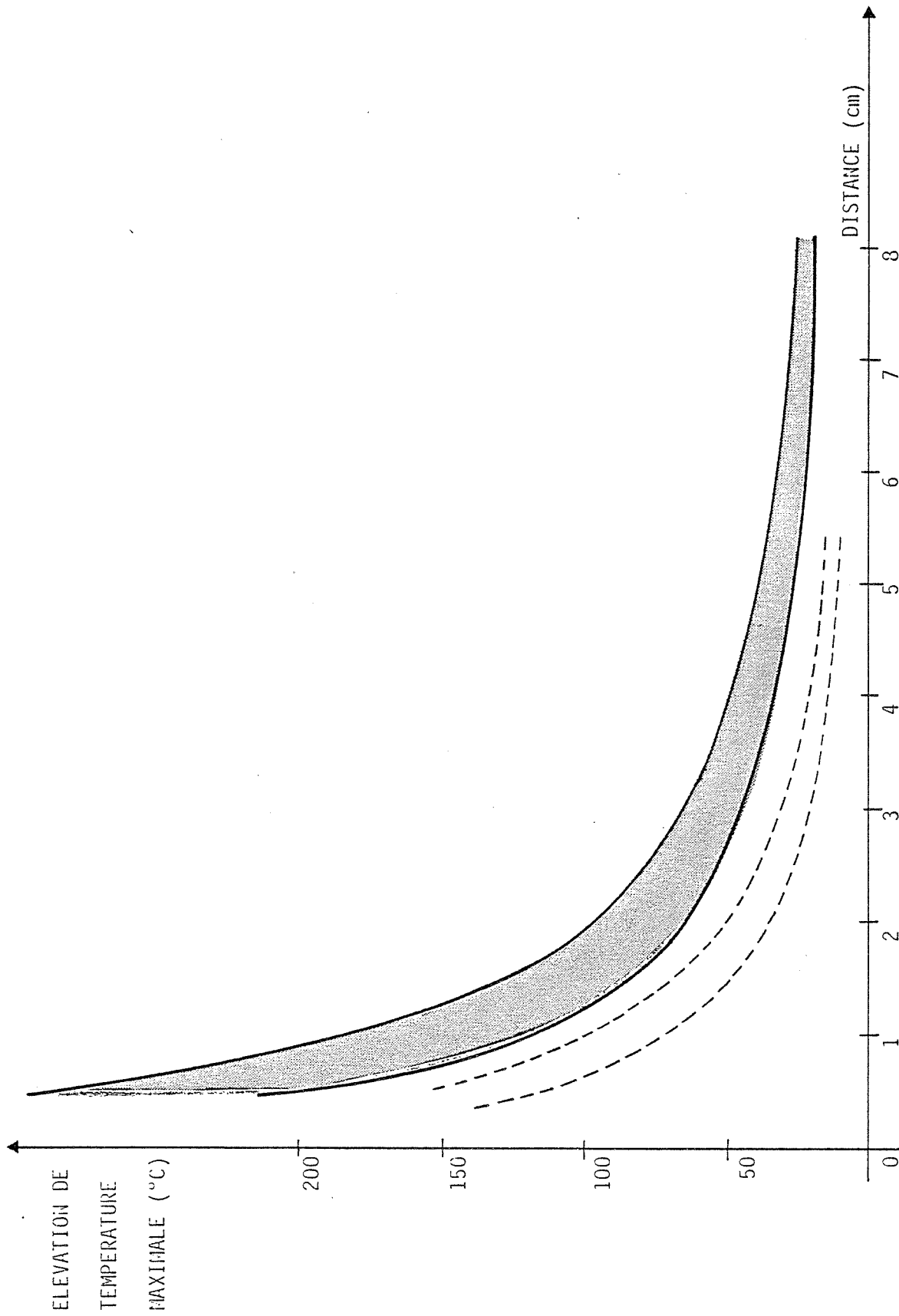


fig. 3.44 Fuseau des températures maximales probables dans le béton en fonction de la distance à la coupe thermique.

## 2.- ETUDE EXPERIMENTALE.

### 2.1. Les objectifs de cette étude.

Les objectifs de l'étude expérimentale peuvent être divisés en deux catégories :

2.1.1. Déterminer les conditions aux limites du calcul théorique, d'une part, et, d'autre part, établir directement les thermogrammes chronologiques et topologiques (ce qui permet de vérifier la validité des modèles de calcul).

Ce fut l'objet des séries d'expérimentations repérées par le code B 1.

2.1.2. Explorer l'influence des paramètres que nous savions déterminants dans le processus d'établissement du champ des températures (et que nous n'avions pas fait varier dans l'étude théorique).

Parmi ceux étudiés, nous rapporterons ici les principaux, tels :

2.1.2.1. L'étude de l'influence de l'action cinétique développée lors de la combustion (séries expérimentales de code B 2).

2.1.2.2. L'étude de l'influence de l'âge du béton (et donc de la teneur en eau) (code B 3).

2.1.2.3. L'étude de l'influence d'effet de bord remettant en cause le modèle semi-infini (cas de petits éléments ou d'éléments discontinus) (code B 4).

2.1.2.4. L'étude de l'influence de l'orientation spatiale de l'élément découpé (code B 5).

Remarque : Par contre, nous n'avons pas analysé, lors de cette étude expérimentale, l'influence des variations des caractéristiques thermo-

physiques du béton en fonction de ses constituants (agrégats notamment) : en effet, d'une part, l'étude théorique (avec les résultats expérimentaux donnés en B...) nous a déjà précisé cette influence puisque les caractéristiques thermophysiques ont justement été choisies comme paramètres et, d'autre part, le nombre d'éprouvettes réalisées (vingt-cinq au total pour les cinq types) s'en serait trouvé augmenté de façon très importante... Il convient aussi de noter que la remarque faite en (1.3.2. page 41) pourrait, a posteriori, et après un assez long dépouillement que nous n'avons d'ailleurs pas conduit, permettre de répondre à ce dernier objectif.

## 2.2. Les processus expérimentaux.

### 2.2.1. Les corps d'épreuve.

#### 2.2.1.1. La fabrication et la conservation du béton.

La composition fut sensiblement identique pour les vingt-cinq éprouvettes réalisées. Les proportions entre les différents constituants étaient les suivantes :

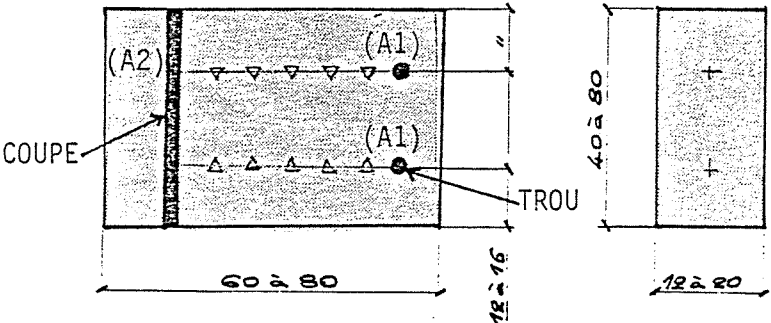
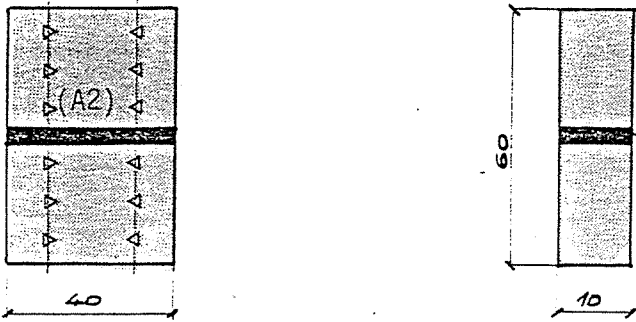
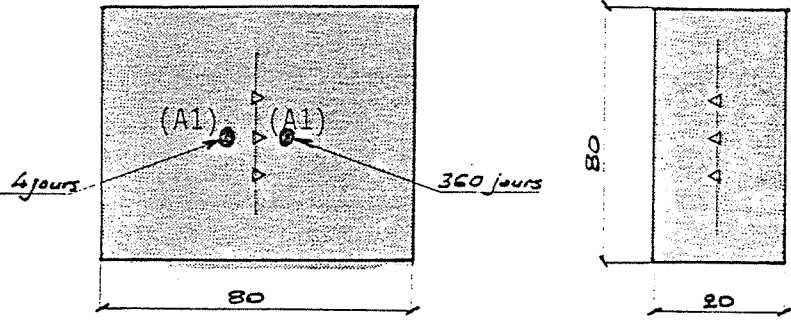
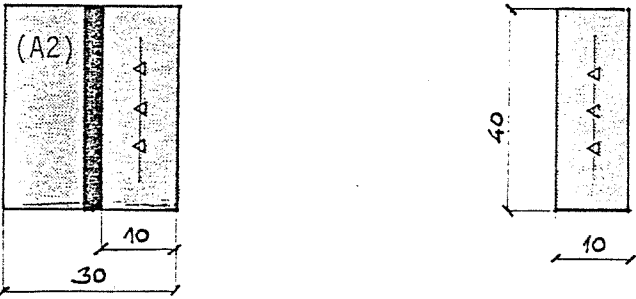
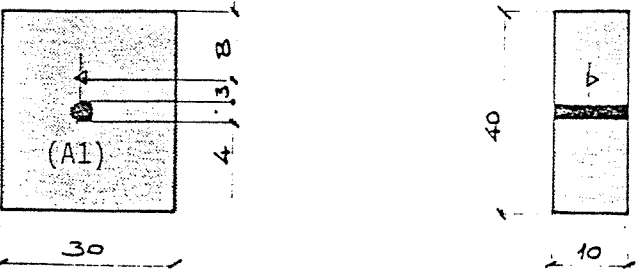
- ciment C. P. A. de classe 325	:	1,00 (soit 350 kg /m <sup>3</sup> )
- eau de gachage	:	0,54 (soit 190 kg /m <sup>3</sup> )
- granulats roulés 5/20	:	3,25 (soit 1140 kg /m <sup>3</sup> )
- sable 0/5	:	1,82 (soit 640 kg /m <sup>3</sup> )

Les éprouvettes étaient réalisées dans des moules en bois, préalablement huilés. L'ensemble était conservé 7 jours sous film de polyuréthane puis décoffré et conservé à l'air libre jusqu'à l'essai qui était effectué (sauf pour le type B 3) à partir de 45 jours.

#### 2.2.1.2. La géométrie des modèles.

Elle est définie, avec le nombre d'éprouvettes, sur la fi-

EPROUVETTES BETON

CODES	DIMENSIONS (cm)	N.B
<p><b>B1</b> (A1 et A2)</p>		<p><b>8</b></p>
<p><b>B2</b> (A2)</p>		<p><b>3</b></p>
<p><b>B3</b> (A1)</p>		<p><b>1</b></p>
<p><b>B4</b> (A2)</p>		<p><b>8</b></p>
<p><b>B5</b> (A1)</p>		<p><b>5</b></p>


 Coupes thermiques
  Thermocouples.

gure 47. On a distingué les cinq familles d'éprouvettes correspondant aux cinq objectifs préalablement retenus.

### 2.2.2. La coupe thermique.

- On a distingué deux types de coupes (repérées par le code A)
- le trou unique (de diamètre égal à 4 centimètres environ (code A 1)),
  - la coupe "plane" (constituée de trous distants entre leurs axes de 3,5 centimètres environ (code A 2)).

Les lances thermiques seront toujours appliquées perpendiculairement à l'élément à découper. Sauf dans le cas B 5, elles seront toujours horizontales (et donc l'élément sera toujours vertical).

### 2.2.3. La mesure.

#### 2.2.3.1. Les capteurs.

Les capteurs retenus sont des thermocouples : un des problèmes essentiels de métrologie en thermique est de ne pas perturber localement le champ de température à mesurer par la présence du capteur d'où :

- les capteurs seront de petites dimensions et isolés,
- les sorties de capteurs doivent, dans la mesure du possible épouser des lignes quasi-isothermes.

Ces conditions jointes au fait qu'il fallait un couple fiable sur la large plage de température envisagée [0, 1 000°C] nous a conduit à choisir des thermocouples Chromel-Alumel de diamètre 200 $\mu$  à 320 $\mu$  gainés en soie de verre.

Ces caractères particuliers et le grand nombre de couples nécessaires (plus de quatre cents) nous ont conduit à les fabriquer et les étalonner nous-mêmes (en utilisant les installations du Laboratoire de Thermique de l'Université de Paris VI).

gure 47. On a distingué les cinq familles d'éprouvettes correspondant aux cinq objectifs préalablement retenus.

#### 2.2.2. La coupe thermique.

On a distingué deux types de coupes (repérées par le code A)

- le trou unique (de diamètre égal à 4 centimètres environ (code A 1)),
- la coupe "plane" (constituée de trous distants entre leurs axes de 3,5 centimètres environ (code A 2)).

Les lances thermiques seront toujours appliquées perpendiculairement à l'élément à découper. Sauf dans le cas B 5, elles seront toujours horizontales (et donc l'élément sera toujours vertical).

#### 2.2.3. La mesure.

##### 2.2.3.1. Les capteurs.

Les capteurs retenus sont des thermocouples : un des problèmes essentiels de métrologie en thermique est de ne pas perturber localement le champ de température à mesurer par la présence du capteur d'où :

- les capteurs seront de petites dimensions et isolés,
- les sorties de capteurs doivent, dans la mesure du possible épouser des lignes quasi-isothermes.

Ces conditions jointes au fait qu'il fallait un couple fiable sur la large plage de température envisagée  $[0, 1\ 000^{\circ}\text{C}]$  nous a conduit à choisir des thermocouples Chromel-Alumel de diamètre  $200\mu$  à  $320\mu$  gainés en soie de verre.

Ces caractères particuliers et le grand nombre de couples nécessaires (plus de quatre cents) nous ont conduit à les fabriquer et les étalonner nous-mêmes (en utilisant les installations du Laboratoire de Thermique de l'Université de Paris VI).

fig.50 a Courbe d'étalonnage des thermocouples chromel-alumel.

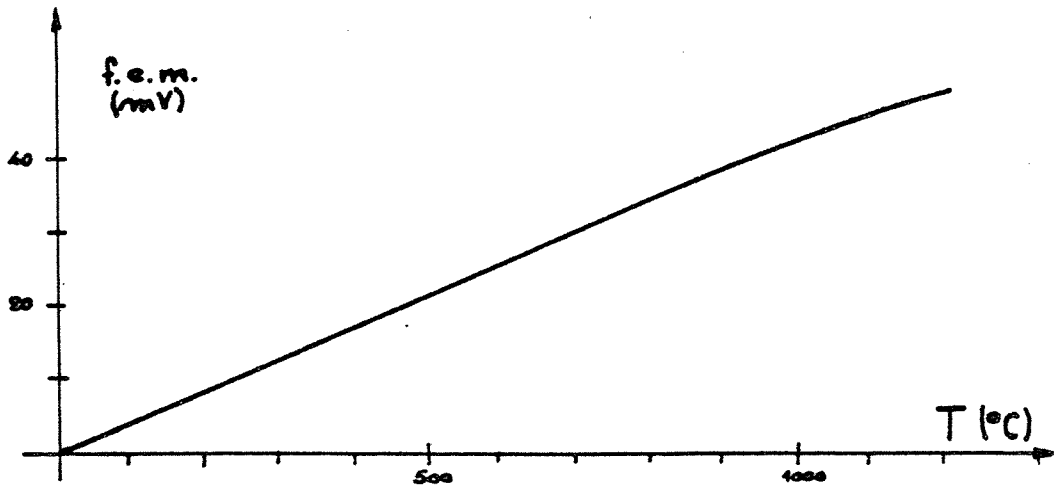
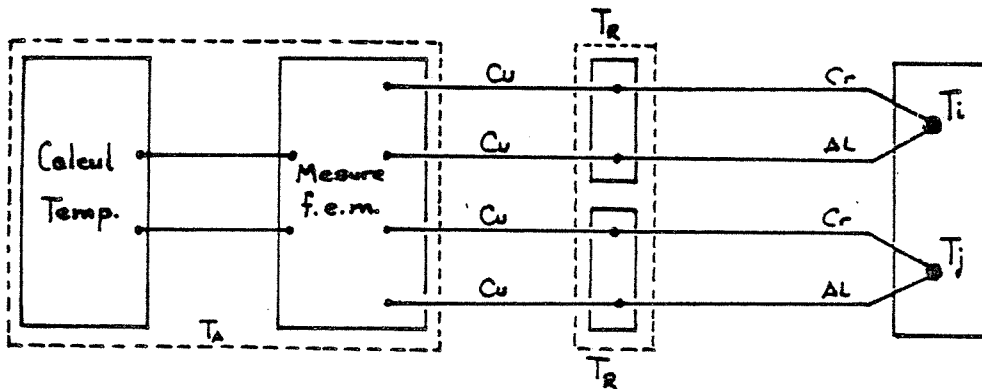
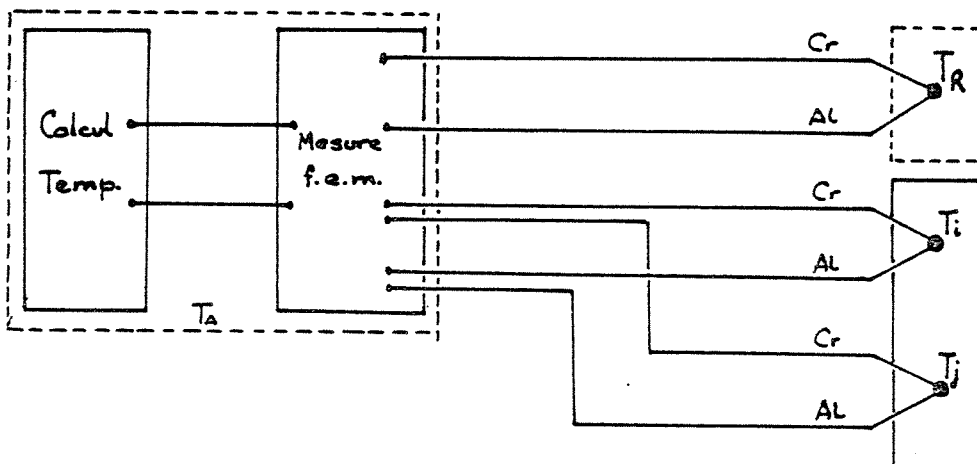


fig.50 b Circuits thermoélectriques utilisés.

\* éprouvettes de grandes dimensions



\* éprouvettes de petites dimensions





MONTAGE DES THERMOCOUPLES

Nous trouverons figure 50 a. la courbe d'étalonnage des thermocouples chromel-alumel réalisés.

#### 2.2.3.2. Le montage des thermocouples.

Suivant les cas, deux circuits thermoélectriques ont été réalisés tels qu'indiqué sur la figure 50 b. avec ou sans utilisation d'une source froide extérieure stabilisée.

Une des difficultés pratiques du montage résidait dans le positionnement des thermocouples dans le béton. En effet, le support nécessaire, outre qu'il devait être fiable pendant la coulée, ne devait pas, lui non plus, perturber localement le champ à explorer.

Trois types de supports ont successivement été retenus, suivant les dimensions des éprouvettes, (figure 52 a.) :

- \* un fil de nylon, sur lequel étaient fixés les couples, était tendu dans le coffrage après coulage de la moitié inférieure de l'éprouvette.
- \* les thermocouples débordaient de quelques millimètres d'un support en matière plastique fixé sur le coffrage (la conductivité de la matière choisie était peu différente de celle du béton).
- \* les thermocouples étaient positionnés sur des plots en béton préfabriqués qui étaient ensuite fixés dans le coffrage.

Les ruptures d'éprouvettes après essais nous ont permis de vérifier qu'ainsi l'ordre de grandeur des erreurs de position restait inférieur à deux millimètres. Cependant, il convient de noter que dix pour cent environ des thermocouples étaient rendus inutilisables par les opérations de bétonnage (rupture de fils, arrachement du support, etc...)

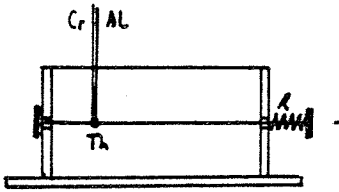
#### 2.2.3.3. L'enregistrement et le traitement.

On a utilisé une chaîne d'acquisition de données HEWLETT PACKARD..., à dix voies, pilotée par une machine programmable (9820 HP)

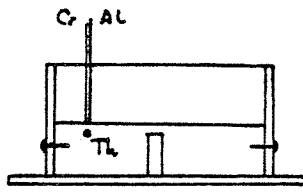
# MONTAGE DES THERMOCOUPLES

## A. DANS LE BETON

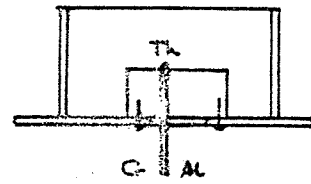
### VUE DE FACE



Support fil nylon

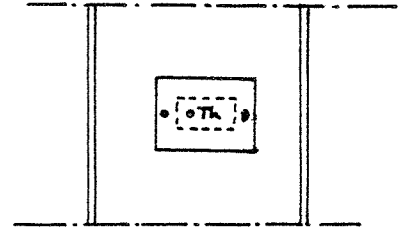
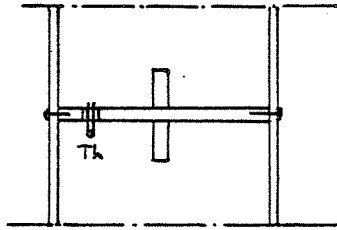
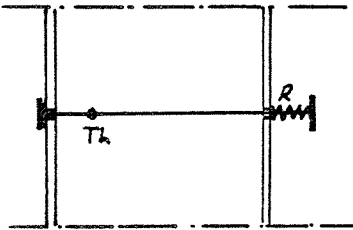


Support plexiglass

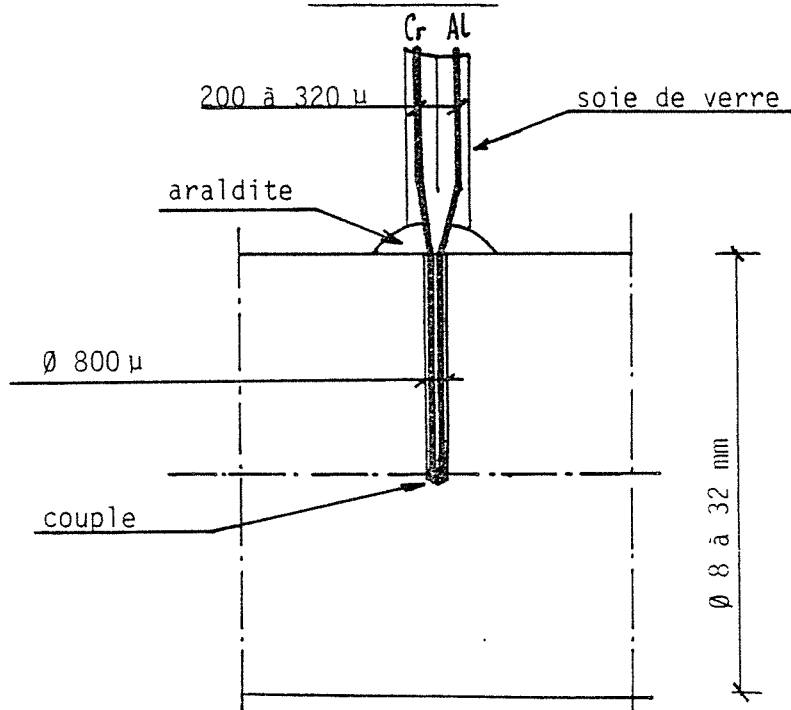


Support béton

### VUE DE DESSUS



## B. DANS L'ACIER



(9830 HP). Compte tenu de l'évolution très rapide du régime transitoire à observer, les mesures, commandées par l'ordinateur, pouvaient être effectuées jusqu'à une fréquence de dix lectures par seconde (dans les cas extrêmes). L'ordinateur restituait ensuite directement, à partir des forces électromotrices enregistrées, les élévations de température sur imprimante.

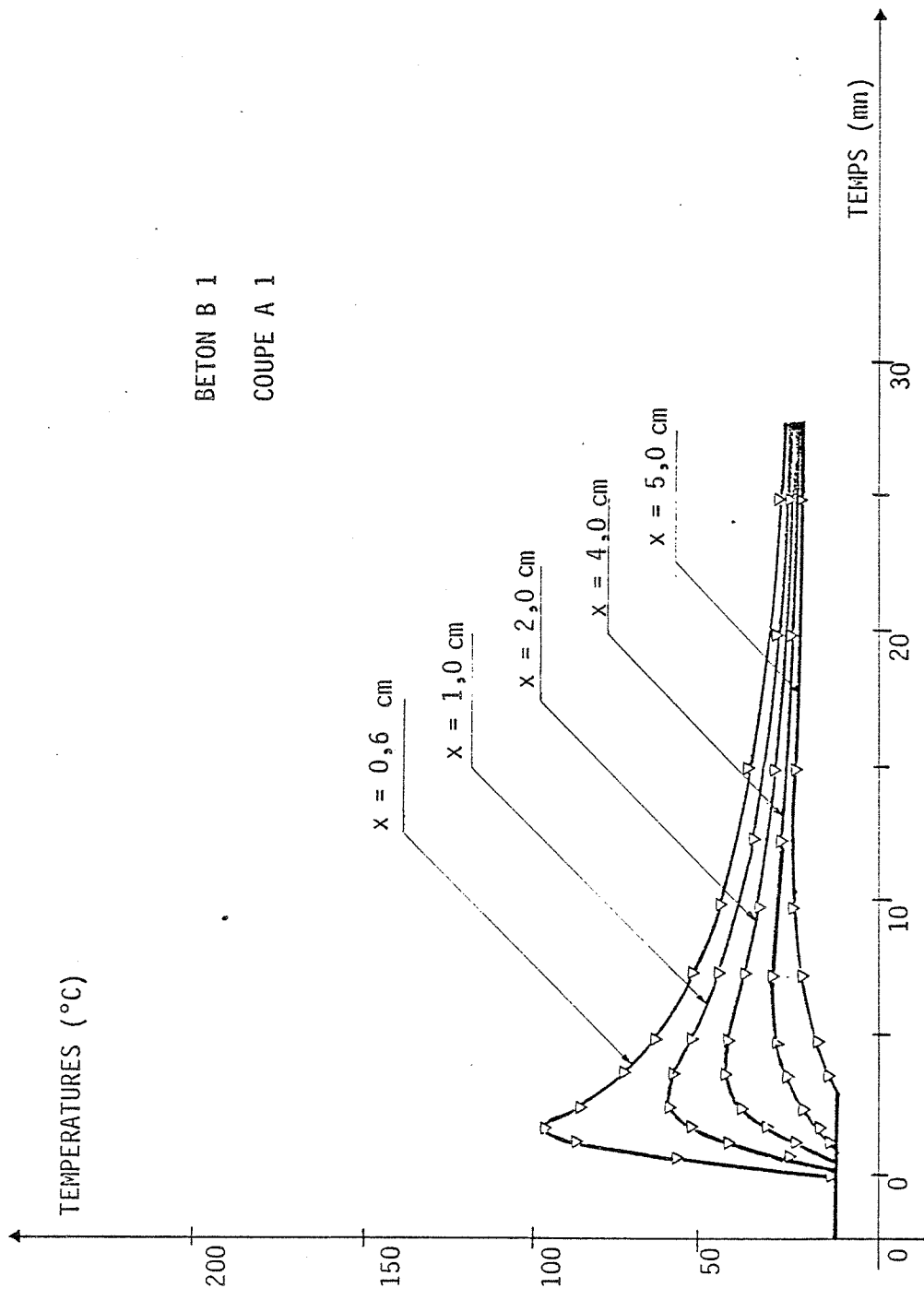


fig 3.54 : Evolution de la température dans le béton en fonction du temps (distance x en cms) -Coupe A 1.

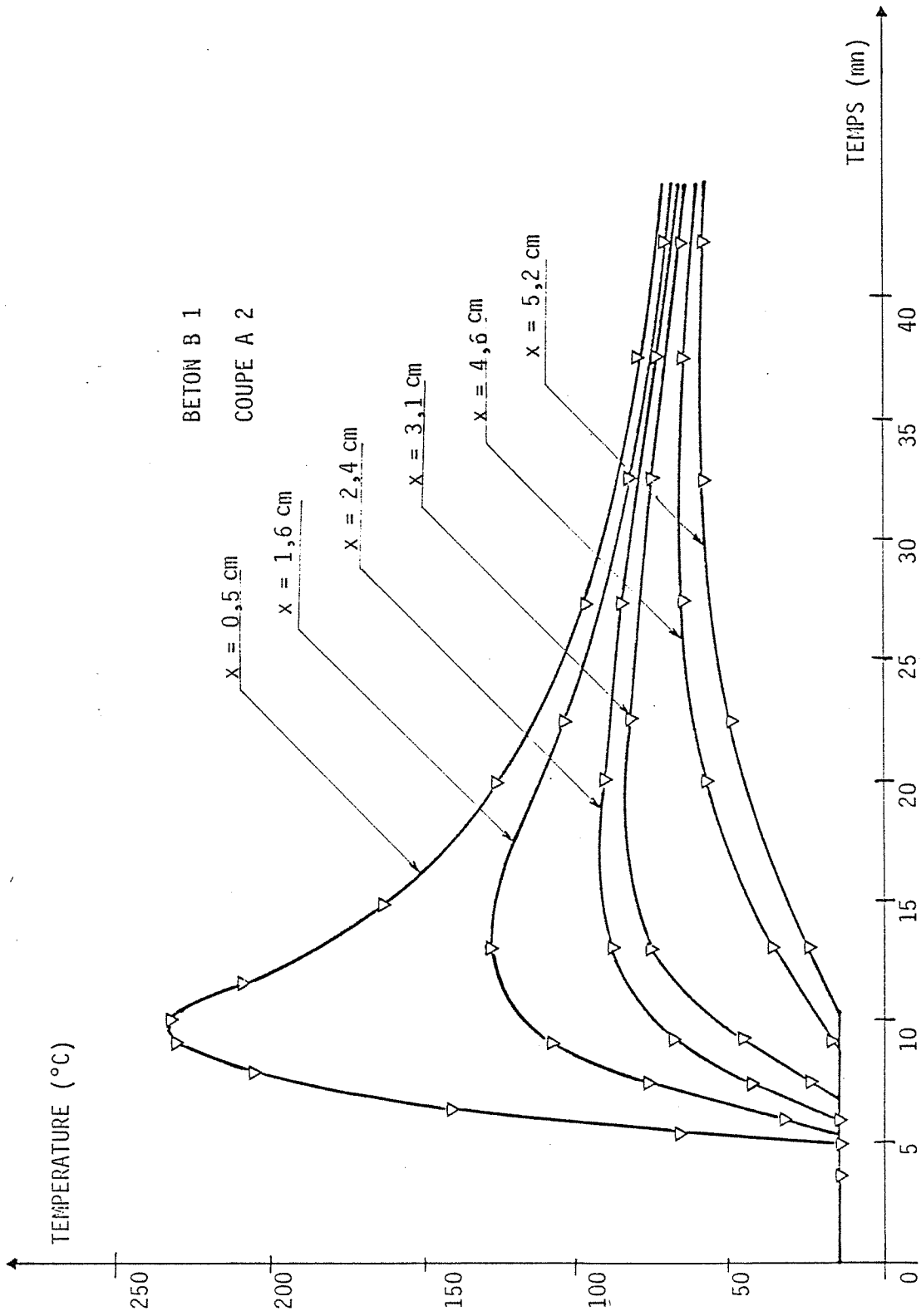


fig 3.55 : Evolution de la température dans le béton en fonction du temps (distance x en cms) - Coupe A 2.

### 2.3. L'étude du modèle semi-infini (à lignes de flux parallèles ou radiales).

Pour les différentes éprouvettes de code B 1, on a donc effectué des coupes de code A 1 (radial) et de code A 2 (parallèle).

On a ainsi obtenu des séries de thermogrammes chronologiques pour chaque position de thermocouples.

Ainsi, sur les fig. 3.54 et 3.55, nous observons les mesures effectuées sur une éprouvete B 1 de dimensions 60 x 60 x 15 cm sous les effets d'une "coupe ponctuelle" A 1 et d'une "coupe plane" A 2.

On peut en déduire alors les courbes des températures maximales atteintes dans le béton en fonction de l'éloignement à la coupe dans ces deux cas (figure 3.57).

Plus généralement, au delà de l'éprouvete de laboratoire unique, il est intéressant de déterminer ces mêmes thermogrammes pour des opérations réalisées dans des conditions d'exécution légèrement différentes (changement d'opérateur, variation de pression d'oxygène, etc...) et plus représentatives d'une exécution à caractère industriel que d'un travail de laboratoire : on obtient alors, en établissant l'enveloppe de tous les résultats, deux fuseaux qui permettent la prévision des températures probables atteintes lors d'opérations réelles identiques (fig. 3.58). C'est la connaissance de ces deux domaines qui intéressera plus particulièrement l'ingénieur d'études... C'est aussi à partir d'eux que l'on amorcera, dans les premières conclusions de cette étude, la définition d'un critère d'état limite.



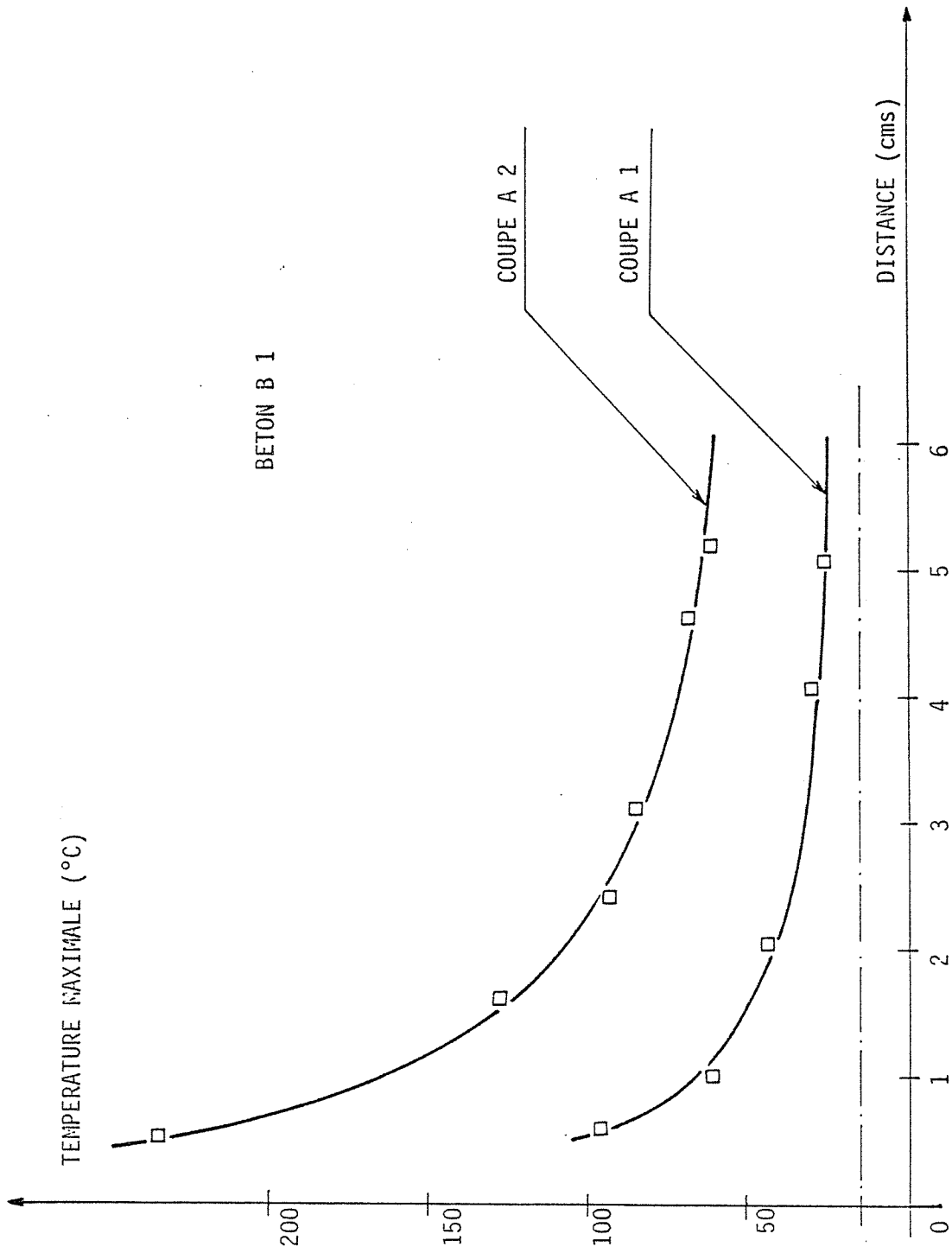


fig 3.57 : Evolution des températures maximales dans le béton en fonction de la distance et du type de coupe thermique.

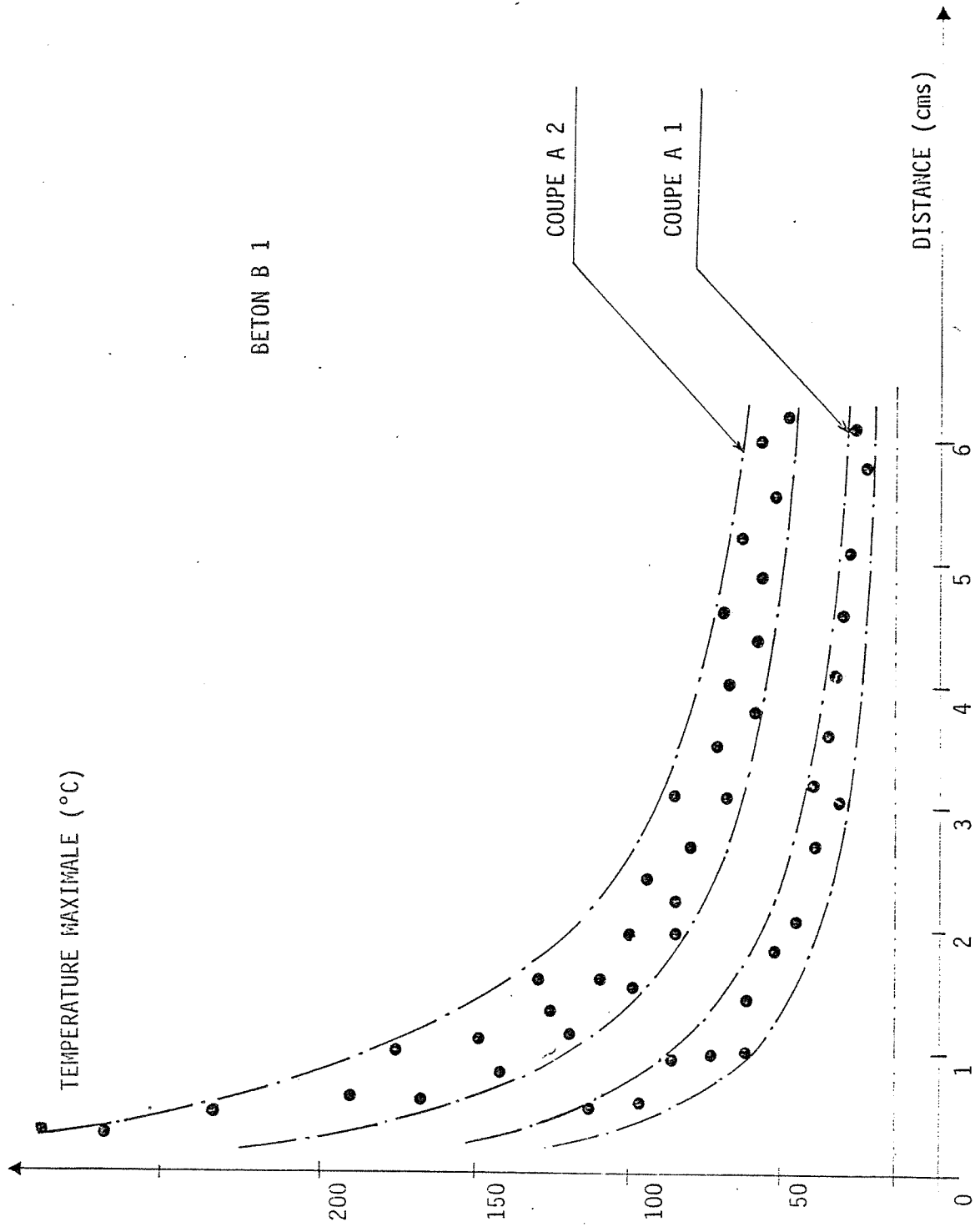


fig 3.58 : Fuseaux des températures maximales probables en fonction de la distance pour des coupes A 1 et A 2 (établis avec 2 séries de huit éprouvettes)



#### 2.4. Etude de l'influence de l'action cinétique.

On a vu, dans le chapitre II , que le rôle de cette action était d'évacuer le laitier et, ainsi, de faire progresser le forage.

Nous nous sommes, dans toute la partie précédente, préoccupé uniquement de plans de découpe verticaux qui constituaient, en même temps des plans de symétrie parfaits du point de vue géométrique et du point de vue thermique dans le béton découpé.

Observons, maintenant, le cas d'un découpage horizontal (code B 2). Il est évident que les deux franges de la coupe ne sont pas dans les mêmes conditions thermiques. La frange inférieure subit l'écoulement du laitier, voire sa stagnation partielle, alors que la frange supérieure perd, dès la fusion, tout contact avec le laitier (du seul fait de la pesanteur). Il en résulte que le modèle de l'échelon de flux que nous avons adopté comme condition aux limites reste bien adapté au cas de la frange supérieure mais convient moins à celui de la frange inférieure puisqu'au delà de l'instant  $t_1$  elle reste soumise à l'influence du laitier piégé dans la coupe.

Il nous paraît important d'estimer la différence de température en résultant dans le béton de part et d'autre de cette coupe.

On a, pour cela, élaboré des éprouvettes conformément au code B 2 (figure 48).

Les thermocouples sont alors disposés symétriquement par rapport au plan de coupe horizontal. Les températures sont enregistrées simultanément. Les résultats donnés sur la figure 60 montrent que l'écart entre les températures développées dans la zone supérieure et dans la zone inférieure est de l'ordre de 15% (nous y reviendrons dans les conclusions).

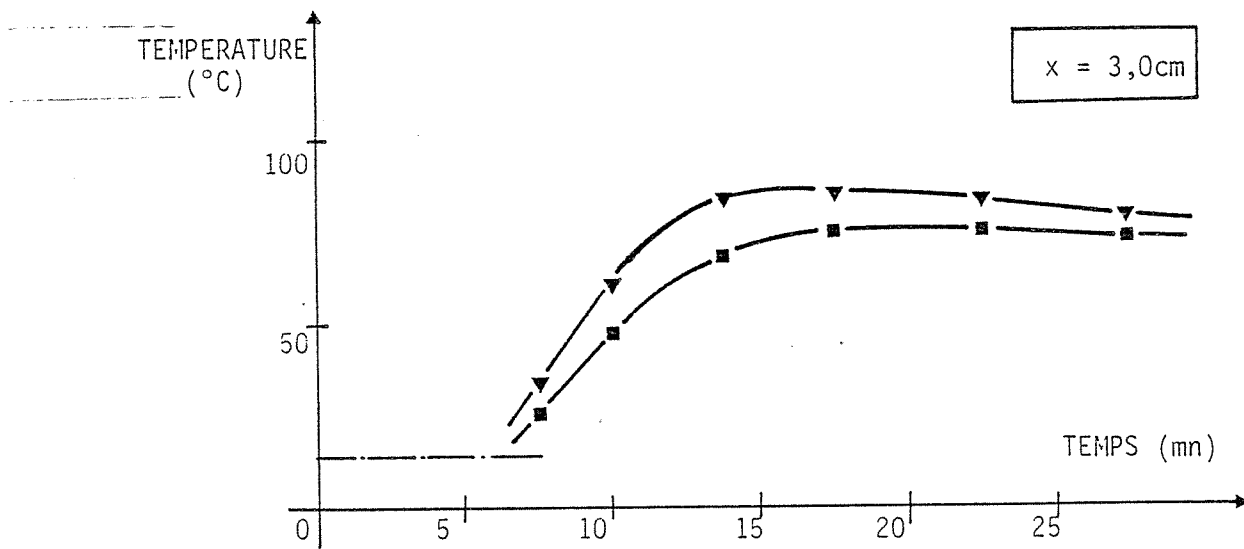
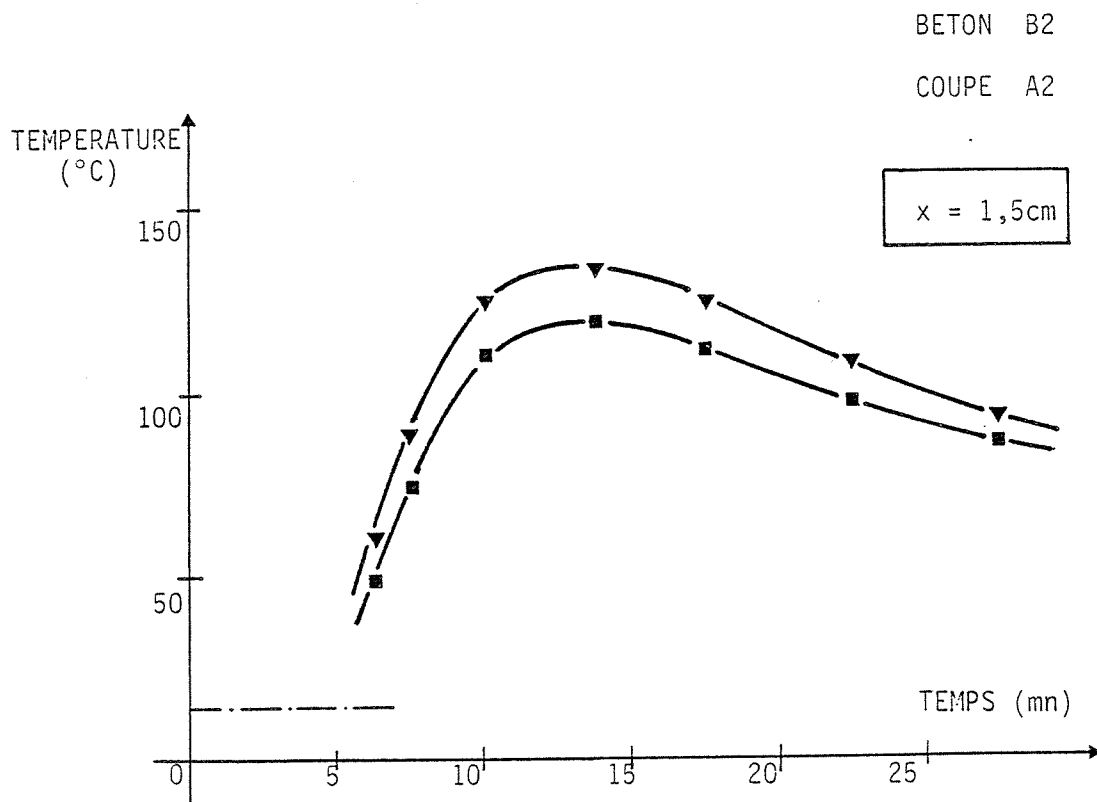


fig.3.60 Influence de l'action cinétique.

- thermocouples situés au-dessus de la coupe
- ▼ thermocouples situés au-dessous de la coupe

## 2.5. Etude de l'influence de l'âge du béton.

On sait que la teneur en eau libre du béton décroît avec l'âge de celui-ci. Dans les essais précédents, nous n'avons pas tenu compte de ce paramètre (dosage en eau initial et âge du béton lors de l'essai étaient sensiblement identiques dans tous les cas).

Nous avons donc réalisé un corps d'épreuve particulier pour constituer l'essai préliminaire d'une étude que nous n'avons pas encore menée plus largement.

L'éprouvette (code B 3) est de dimension importante (80 x 80 x 20 cm - 280 kg). Equipée de trois thermocouples alignés suivant un plan de symétrie passant par le centre, elle a subi deux opérations de forage en deux points situés symétriquement par rapport à ce plan.

L'une a été effectuée dès le décoffrage, quatre jours après la coulée du béton ; l'autre un an plus tard après une conservation, sans traitement particulier, dans l'ambiance du laboratoire (hygrométrie entre 40 et 70%).

Les résultats (figure 62) font apparaître une compensation intéressante. En effet, les courbes sont sensiblement identiques. Pourtant, les consommations en lances thermiques (et donc le flux total dégagé lors de la coupe) ont été supérieures de 34% lors du forage du trou dans le béton jeune.

Notre explication de ce phénomène est qu'une grande partie de la chaleur produite, lors de la première opération, a, en fait, été utilisée pour vaporiser la grande quantité d'eau libre contenue dans le béton (voire pour contribuer à des transformations au sein du matériau et ainsi n'a pas participé à l'échauffement du béton adjacent.

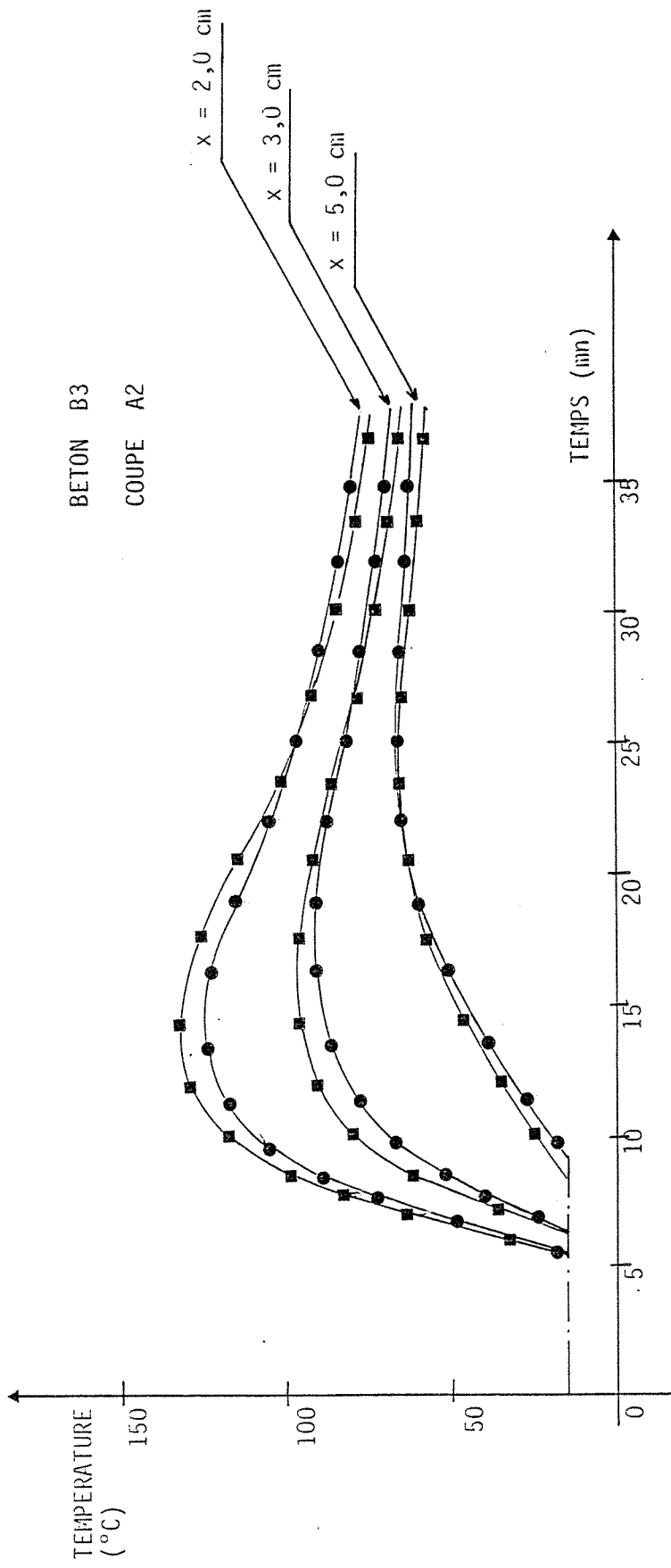


fig. 3.62 Influence de l'âge du béton (● : 4 jours - ■ : 360 jours)

Remarque :

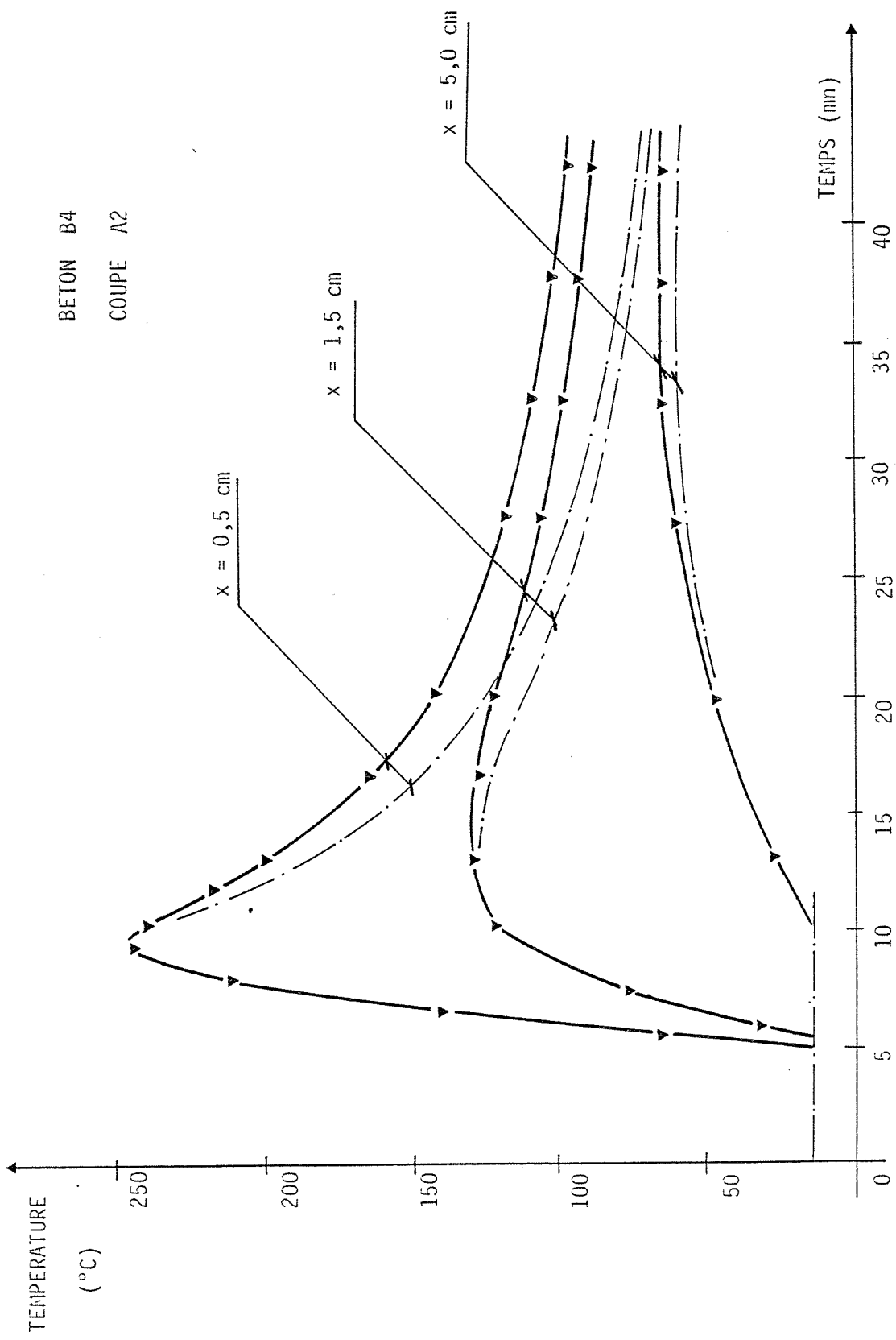
Il faut, cependant, se garder de tirer des conclusions trop hâtives de ce qui n'a constitué, selon nous, qu'un essai préliminaire. En effet, l'étude du rôle de l'eau nous paraît déterminante tant dans l'élaboration du champ des températures que dans l'évolution des propriétés mécaniques du béton découpé (voir chapitre IV). Ainsi, le volume de vapeur résultant de la vaporisation brutale de l'eau incluse dans un béton saturé n'est plus compatible avec les dimensions des capillaires et conduit à des surpressions et des micro-fissurations importantes dans le voisinage (quelques millimètres) de la coupe. Une étude plus approfondie de ces phénomènes nous paraît, pour l'avenir, indispensable : elle nécessite, cependant, des moyens expérimentaux importants.

2.6. Etude de l'influence de "l'effet de bord".

Très souvent, la géométrie de l'élément à découper ne correspond plus au modèle semi-infini à cause de petites dimensions dans la direction perpendiculaire à la coupe. Dans ces cas, le transfert thermique s'effectue par conduction dans le béton puis par convection et rayonnement à la limite de la paroi. Les niveaux relatifs de ces échanges sont tels que la température atteinte dans un point fixe de l'élément à découper est évidemment supérieure à celle atteinte au même point du modèle semi-infini associé.

Nous avons cherché à quantifier ce phénomène dans différentes configurations particulières (petites pièces - existence de discontinuités d'épaisseur - existence de trous au voisinage de la coupe - etc...)

Nous en rapportons notamment une particulière ici pour l'intérêt qu'elle présentera dans l'étude des propriétés mécaniques (voir chapitre IV).



BETON B4  
COUPE A2

fig. 3.64 Influence de l'effet de bord (en trait mixte Béton B1-milieu semi-infini).

Il s'agit d'éprouvettes prismatiques de dimensions 30 x 40 x 10 cm (code B 4) subissant une coupe telle qu'indiqué en figure 48 afin de séparer un élément de dimension 10 x 10 x 40 (dans lequel trois thermocouples étaient disposés à X cm de la coupe).

Le graphe de la figure 64 exprime l'écart de températures ainsi obtenu (nous reviendrons sur ces résultats) et montre la nécessité de telles expérimentations chaque fois que le découpage de petites pièces est programmé.

### 2.7. Influence de l'orientation spatiale de la coupe.

Comme nous allons le voir, c'est un paramètre très important. Nous repèrerons cette orientation par l'angle  $\alpha$ , angle entre la lance thermique (considérée normale à l'élément à découper et orientée positivement vers celui-ci) et un axe vertical (orienté positivement vers le bas) (Ainsi, une coupe effectuée sur une paroi verticale sera repérée par :  $\alpha = + \frac{\pi}{2}$ , sur une paroi horizontale inférieure (sol) par  $\alpha = 0$  et sur une paroi horizontale supérieure (plafond) par  $\alpha = \pi$ ).

On a réalisé une série de 5 éprouvettes prismatiques identiques 30 x 40 x 10 (code B 5) dans lesquelles on a effectué un forage unique (coupe A 1) après avoir disposé chaque éprouvette dans les orientations suivantes.

$$\alpha_1 = 0 \quad ; \quad \alpha_2 = + \frac{\pi}{4} \quad ; \quad \alpha_3 = + \frac{\pi}{2} \quad ; \quad \alpha_4 = + \frac{2\pi}{3}$$

$$\alpha_5 = + \pi$$

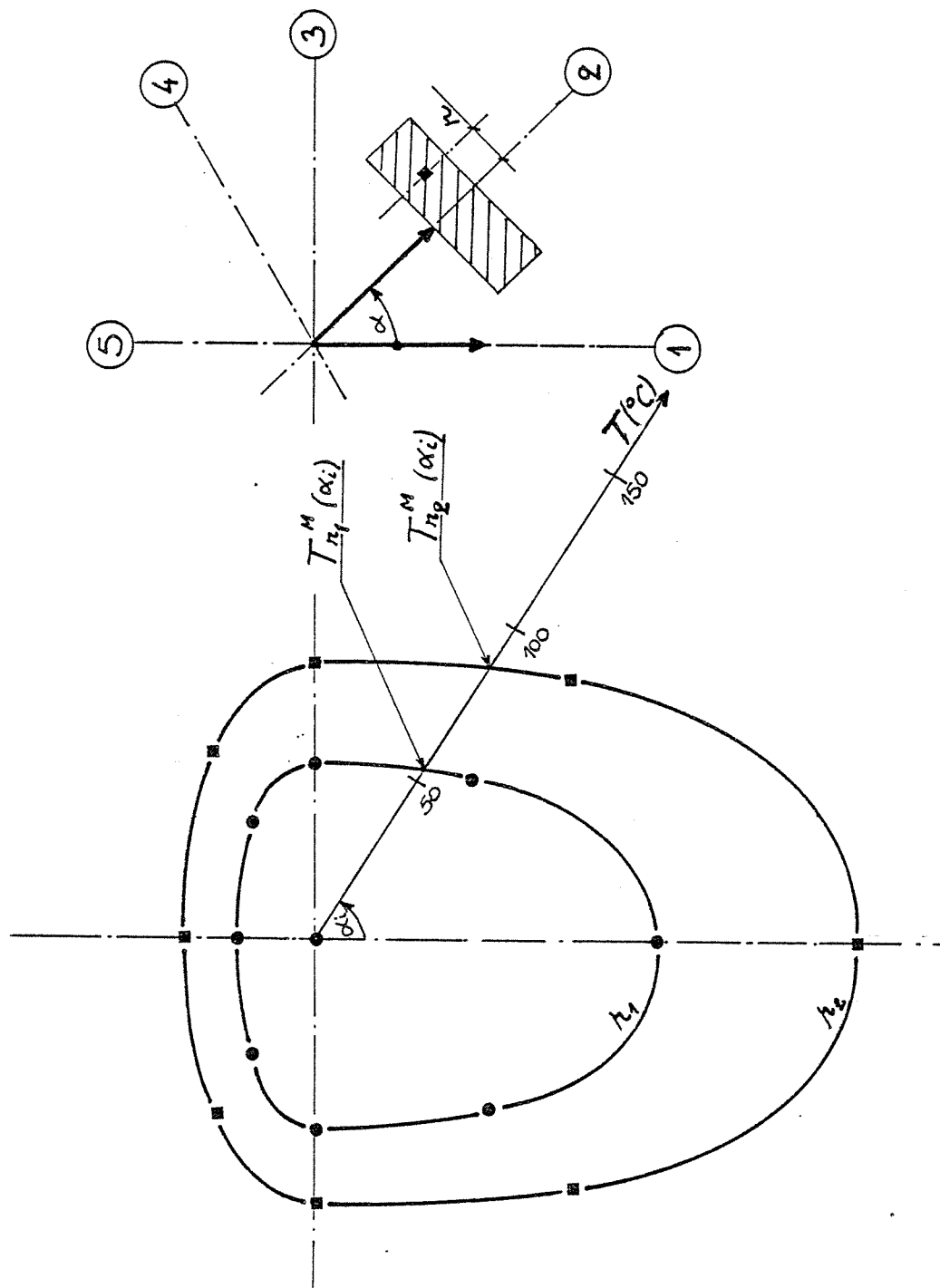


fig. 3.66 Influence de l'orientation spatiale de la coupe thermique : température maximale en fonction de la distance  $r_i$  et de l'angle  $\alpha_i$  (ci-dessus,  $r_1 = 1,2$  cm et  $r_2 = 0,8$  cm)



La mesure des températures obtenues dans les différents cas nous permet d'établir, pour une distance à la coupe donnée ( $r_0$ ) un thermogramme en fonction de l'orientation  $\alpha$  (figure 66).

Les grands écarts de températures obtenues mettent en évidence le rôle de l'action cinétique. Ainsi, par exemple, pour un angle  $\alpha = +\pi$ , le laitier, dès sa fusion, s'écoule par gravité, la lance avance très rapidement avec une consommation plus faible ; l'échelon de flux est donc appliquée suivant un temps  $[t_1 - t_0]$  très bref et une intensité  $\phi_0$  réduite. Au contraire, dans le cas  $\alpha = 0$ , le laitier ne peut plus s'écouler seul et c'est la pression d'oxygène (et la vaporisation de l'eau du béton) qui l'évacue, plus difficilement, de la coupe ; celle-ci est alors moins rapide et consomme une énergie plus importante ; l'échelon de flux étant appliqué plus longtemps et avec une plus forte intensité, la température en résultant est donc plus élevée.

Nous verrons, lors des conclusions de ce chapitre, le rôle important de tels thermogrammes dans la définition des limites des domaines d'état critique.

D.- LA THERMOCINETIQUE DU DECOUPAGE THERMIQUE DU  
BETON ARME.

Dans les paragraphes B et C, nous avons toujours considéré le matériau macroscopiquement isotrope. Un tel modèle, admissible dans le cas du béton, ne l'est plus lorsque nous avons du béton armé ou du béton précontraint, la présence de l'armature étant, alors, la cause de l'anisotropie.

Pour ces matériaux composites, les objectifs de l'étude rapportée ici ont été les suivants :

1. Connaître, lors du découpage, le champ de température dans les armatures en fonction de leurs dimensions, de leurs positions et de leurs orientations par rapport à la coupe (étude théorique et étude expérimentale).
2. Estimer les perturbations du champ de températures établi dans le béton du fait de la présence d'armatures (étude expérimentale uniquement).

## 1. ETUDE THEORIQUE.

### 1.1. Les hypothèses et les modèles thermocinétiques associés.

#### 1.1.1. Les modélisations des coupes thermiques.

Elles seront de configurations identiques à celles retenues lors de l'étude du découpage du béton (codes A 1 et A 2). Il convient, cependant, d'observer un élément nouveau : lors du découpage de l'armature, la combustion de celle-ci augmente le dégagement de chaleur à prendre en compte dans le bilan énergétique suivant une part qui est d'autant plus importante que la quantité d'acier brûlé est, elle-même, importante. Il sera tenu compte de ce phénomène en prenant une densité de flux  $\phi_0$  plus élevée pour définir l'échelon de flux caractérisant la condition aux limites du problème (rappelons que les dimensions de cet échelon sont déterminées expérimentalement).

#### 1.1.2. La modélisation du corps d'épreuve.

Nous étudierons le cas d'une armature placée perpendiculairement à la coupe. Nous admettrons le milieu semi-infini dans la direction de cette armature.

Observons les valeurs des caractéristiques thermophysiques des deux matériaux en présence (à la température ambiante, en unité c. g. s.).

(	:	:	)
(	:	Conductivité	Chaleur spécifique
(	:	$\lambda$	c
(	:	:	)
(	:	:	)
(	acier	: 0,11	: 0,12
(	:	:	)
(	béton	: 0,0020 à 0,0035	: 0,23
(	:	:	)

On remarque, notamment, que le rapport des conductivités thermiques de l'acier et du béton varie de 25 à 50 environ. Le béton va donc constituer une enveloppe isolante autour de l'armature dans la direction de laquelle va donc se propager le flux.

\* En première approximation, on peut considérer que les pertes latérales de flux sont nulles sur la surface latérale de la barre et on peut ainsi se ramener au modèle déjà utilisé pour le béton (mur semi-infini).

Un tel calcul donne, évidemment, des résultats par excès mais ceux-ci sont obtenus en utilisant le même programme de calcul que celui du béton ; seules, les données d'entrées (conductivité  $\lambda$ , diffusivité  $a$ , densité de flux  $\phi_0$  et temps d'application  $t_1 - t_0$ ) sont à reconsidérer : une telle méthode de prédétermination, très rapide, peut s'avérer suffisante dans beaucoup de cas.

\* Une meilleure approche de la solution réelle sera, cependant, obtenue en prenant en compte ces pertes latérales de flux autour de la barre.

Nous avons donc établi, aussi, un programme de calcul dans cette configuration.

## 1.2. Equations générales et solutions analytiques.

### 1.2.1. Dans le modèle du mur semi-infini.

De C 1.2.1., on peut déduire l'expression de la température en fonction du temps ( $t$ ), de la distance à la coupe ( $r$ ), des caractéristiques thermophysiques de l'acier ( $\lambda_a$  et  $a_a$ ) et des conditions aux limites  $\phi_0$  et ( $t_1 - t_0$ ).

On obtient :

pour  $0 < t < t_0$

$$\bullet T_a(x, t) = T_0$$

pour  $t_0 < t < t_1$

$$\bullet T_a(x, t) = T_0 + \frac{2\phi_0}{\lambda_a} \left[ \frac{\sqrt{a_a(t-t_0)}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a_a(t-t_0)}} - \frac{x}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_a(t-t_0)}} \right]$$

pour  $t_1 < t < \infty$

$$\bullet T_a(x, t) = T_0 + \frac{2\sqrt{a_a}}{\lambda_a \sqrt{\pi}} \phi_0 \left[ \sqrt{(t-t_0)} e^{-\frac{x^2}{4a_a(t-t_0)}} - \sqrt{(t-t_1)} e^{-\frac{x^2}{4a_a(t-t_1)}} \right] \\ - \frac{x}{\lambda_a} \phi_0 \left[ \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{a_a(t-t_0)}} \right\} - \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{a_a(t-t_1)}} \right\} \right]$$

1.2.2. Dans le modèle de la "barre semi-infini" non isolée latéralement.

Considérons un élément de barre limité par les deux sections droites d'abscisses  $x$  et  $x + dx$ . A la suite du découpage de la barre à l'abscisse  $x = 0$ , le flux de chaleur entrant dans cet élément par la section d'abscisse  $x$  est, à l'instant  $t$ ,  $-\lambda \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \cdot A$  (où  $A$  est la section de la barre) ; le flux de chaleur sortant à la section  $x + dx$  au même instant est :

$$\left( -\lambda \frac{\delta T(x + dx, t)}{\delta x} - \lambda \frac{\delta^2 T(x + dx, t)}{\delta x^2} dx \right) \cdot A$$

le flux de chaleur qui traverse la surface latérale de l'élément est  $(T(x, t) - T_0) \cdot p \cdot h \cdot dx$  (où  $T_0$  est la température du béton à l'état initial,  $p$  le périmètre de la barre et  $h$  le coefficient d'échange acier-béton.

Ecrivons le bilan énergétique ; on a donc, pour l'élément de volume  $A dx$  :

$$A\rho c \frac{\delta T(x,t)}{\delta t} dx = \lambda \frac{\delta^2 T(x,t)}{\delta x^2} A dx - h.p. T(x,t) - T_0 dx$$

d'où les équations :

$$\bullet \frac{\delta T(x,t)}{\delta t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\delta^2 T(x,t)}{\delta x^2} - \frac{4h}{\rho c} |T(x,t) - T_0|$$

$$\bullet t = 0 \quad T = T_0$$

$$\bullet x = 0 \quad - \lambda \left| \frac{\delta T(x,t)}{\delta x} \right|_0 = \phi_0$$

$$\text{Posons : } T^*(x^*, t^*) = \frac{T(x,t) - T_0}{\theta} ;$$

$$x^* = \frac{x}{\ell} ; t^* = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{t}{\ell^2}$$

On a alors :

$$\bullet \frac{\delta T^*(x^*, t^*)}{\delta t^*} = \frac{\delta^2 T^*(x^*, t^*)}{\delta x^{*2}} - \frac{4h}{\theta \lambda} T^*(x^*, t^*)$$

$$\bullet t^* = 0 \quad T^*(x^*, t^*) = 0$$

$$\bullet x^* = 0 \quad \left| \frac{\delta T^*(x^*, t^*)}{\delta x^*} \right|_0 = -1 \quad (\text{avec } \theta = \frac{\phi_0 \ell}{\lambda})$$

En utilisant la transformation de Laplace, on obtient, alors, la relation :

$$\frac{\delta^2 L^* |T^*(x^*, t^*)|}{\delta x^{*2}} - \left( p + \frac{4h}{\theta \lambda} \right) \cdot L^* |T^*(x^*, t^*)| = 0$$

Tous calculs effectués et en revenant aux valeurs réelles  
 ( $T, \theta, x, t$ ), on obtient les solutions (en se plaçant dans les conditions  
 réelles du problème ( $\phi_0$  de  $t_0$  à  $t_1$ ) :

1° Pour  $t < t_0$  et  $x > 0$

$$T(x, t) = T_0$$

2° Pour  $t_0 < t < t_1$  et  $x > 0$

$$T(x, t) = T_0 + \frac{\phi_0}{4\lambda \sqrt{\frac{h}{\lambda\phi}}} \left[ e^{-x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_0)}{\rho c}}} - \sqrt{\frac{4h(t-t_0)}{\phi\rho c}} \right) - e^{+x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_0)}{\rho c}}} + \sqrt{\frac{4h(t-t_0)}{\phi\rho c}} \right) \right]$$

3° Pour  $t > t_1$  et  $x > 0$

$$T(x, t) = T_0 + \frac{\phi_0}{4\lambda \sqrt{\frac{h}{\lambda\phi}}} \left[ e^{-x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_0)}{\rho c}}} - \sqrt{\frac{4h(t-t_0)}{\phi\rho c}} \right) - e^{+x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left| \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_0)}{\rho c}}} + \sqrt{\frac{4h(t-t_0)}{\phi\rho c}} \right| - e^{-x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left| \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_1)}{\rho c}}} - \sqrt{\frac{4h(t-t_1)}{\phi\rho c}} \right| + e^{+x\sqrt{\frac{4h}{\lambda\phi}}} \cdot \operatorname{erfc} \left| \frac{x}{2\sqrt{\frac{\lambda(t-t_1)}{\rho c}}} + \sqrt{\frac{4h(t-t_1)}{\phi\rho c}} \right| \right]$$

### 1.3. Les résultats.

#### 1.3.1. Les paramètres du traitement.

La seconde modélisation (barre semi-infinie avec pertes latérales) est celle dont nous avons choisi de présenter les résultats :

Comme dans le cas du découpage du béton seul les paramètres du calcul sont, évidemment, classés suivant qu'ils dépendent :

- de la coupe thermique :
  - le flux thermique  $\phi_0$  ;
  - le temps d'application de ce flux.
- du corps d'épreuve :
  - la conductivité thermique de l'acier ;
  - la diffusivité thermique ;
  - le coefficient d'échange thermique acier-béton ;
  - le diamètre de l'armature.

Ces six éléments constituent donc les données d'entrées pour le programme.

#### 1.3.2. Les thermogrammes chronologiques.

Les sorties étaient effectuées, pour chaque diamètre d'armatures (pages suivantes :  $\emptyset$  10 mm, 16 mm, 25 mm) sous forme de tableaux de valeurs des températures en fonction du temps.

Un traitement complémentaire permettrait de tracer les thermogrammes chronologiques pour des points appartenant à l'axe de l'armature et situés à différentes distances de la coupe (figure 3.76).

De tels résultats nous montrent, notamment, que les premiers millimètres sont seuls concernés par des températures susceptibles de modifier, après refroidissement, les propriétés mécaniques de l'acier (par exemple, perte de l'érouissage).



### 1.3.3. Les thermogrammes topologiques.

De tels thermogrammes ont été représentés sur la figure 3.77. Ces courbes font apparaître l'évolution de la température en fonction du diamètre de l'armature.

Il est intéressant de noter que les variations de température en fonction du diamètre seraient négligeables si les conditions aux limites de flux ne variaient elles-mêmes aussi en fonction de ce même diamètre. En effet, la combustion propre de l'armature participe de façon importante au dégagement calorifique et c'est donc cette combustion qui contribue largement aux écarts représentés figure 3.77.

Par ailleurs, la comparaison des thermogrammes chronologiques et topologiques obtenus dans le béton et dans les armatures nous confirme ce que l'écart important entre les diffusivités de ces deux matériaux nous faisait présager : au contact de l'acier et du béton sur toute la surface latérale de l'armature, vont exister des déformations différentielles (dues aux dilatations). Ces déformations peuvent conduire à des effets (glissements, rupture) dont le caractère irréversible peut contribuer à définir un critère de ruine. Nous reviendrons sur ce point important dans les chapitres 4 (adhérence béton armé) et 5 (rupture d'un tirant précontraint).

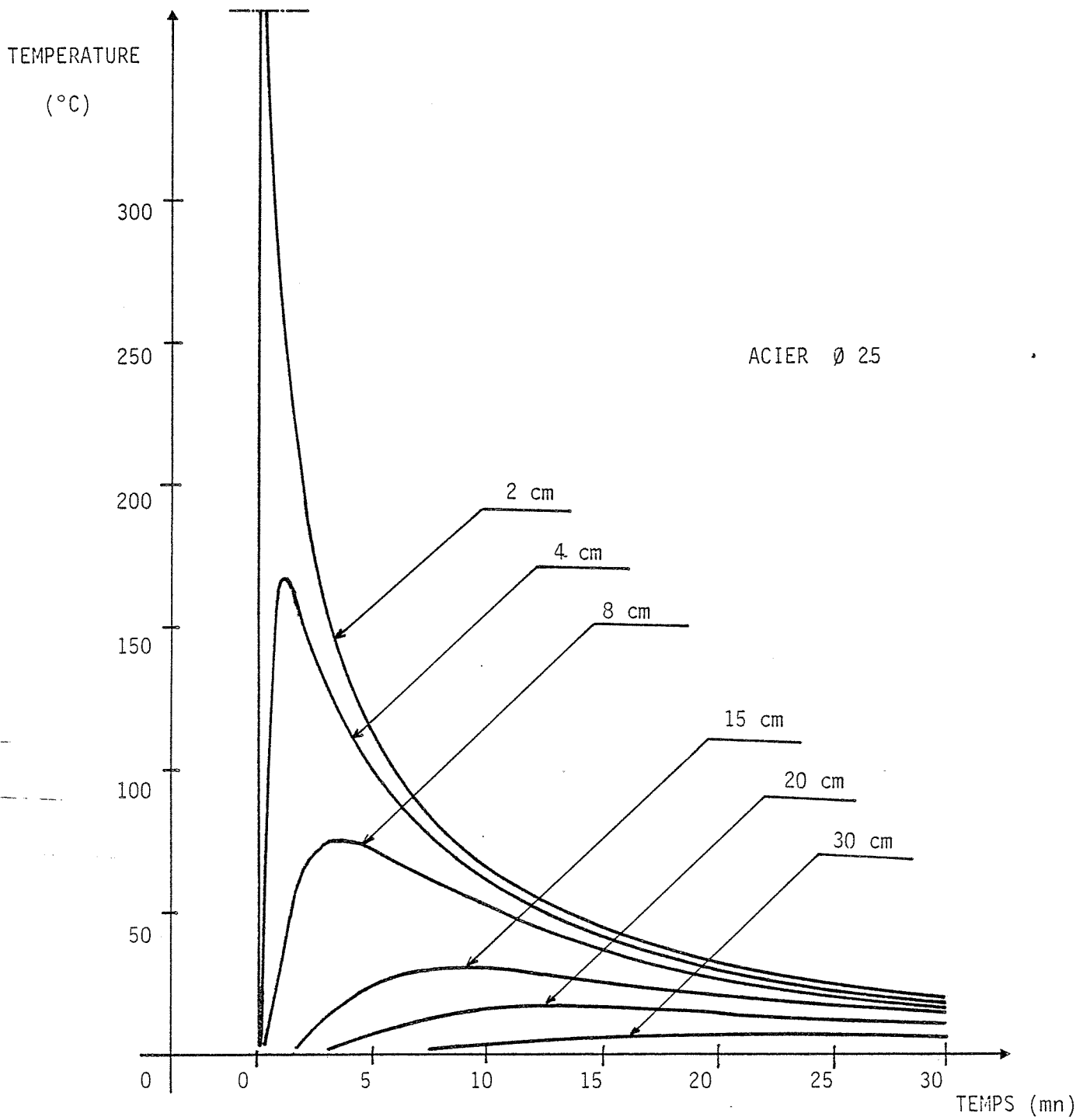


fig. 3.76 Evolution de la température dans une armature de béton armé (Ø 25) à différentes distances de la coupe thermique.

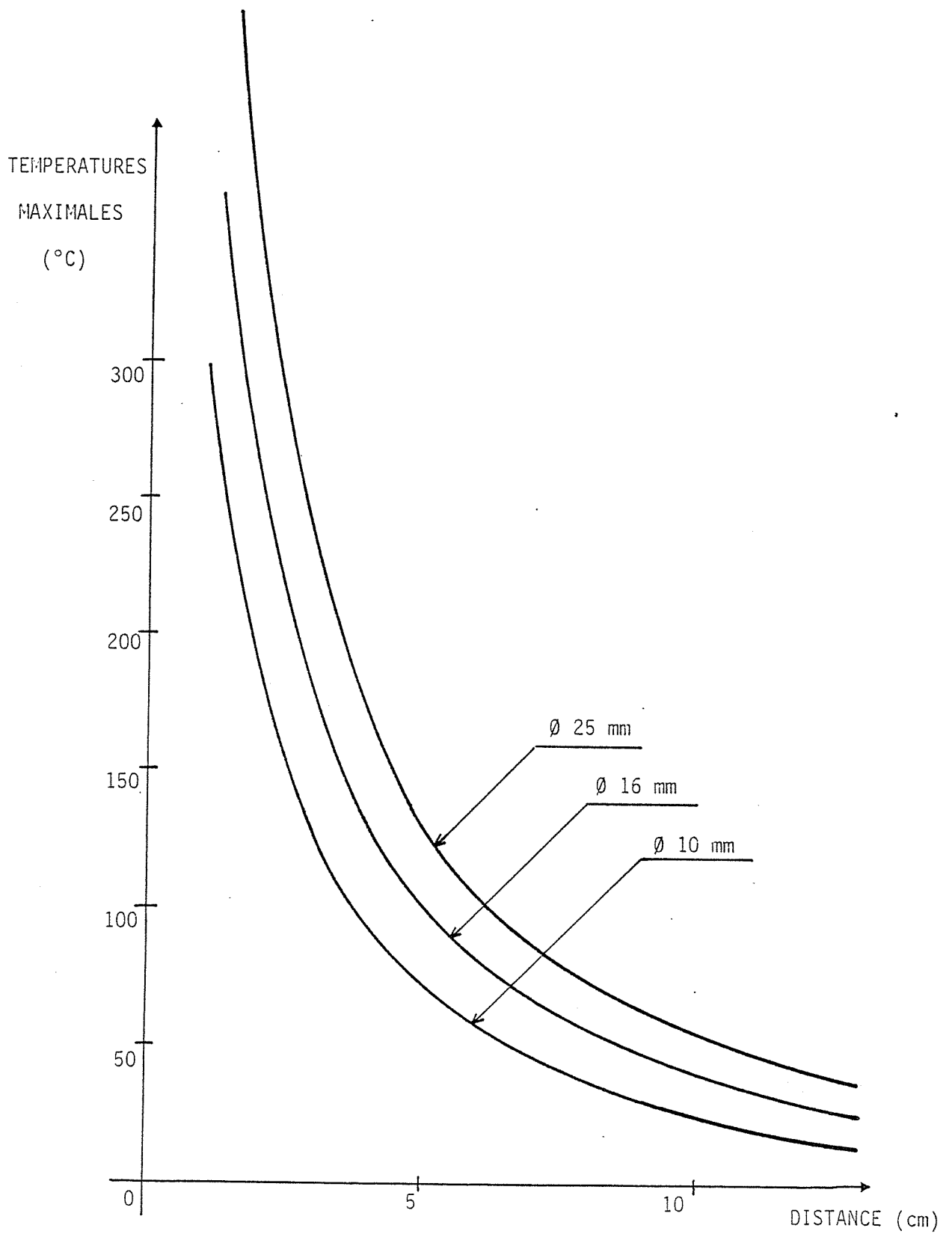


fig. 3.77 Evolution des températures maximales dans les armatures de béton armé perpendiculaires à la coupe thermique.

## 2. ETUDE EXPERIMENTALE.

### 2.1. Les objectifs de l'étude.

Les objectifs de l'étude expérimentale se partagent en deux catégories :

2.1.1. Déterminer les conditions aux limites du calcul théorique d'une part, et d'autre part, établir directement les thermogrammes dans le cas d'armatures perpendiculaires à la coupe thermique.

(Ce sera l'objet des séries d'expérimentations repérées par le code BA1)

2.1.2. Estimer l'importance des perturbations causées au champ de températures installé dans le béton du fait de la présence des armatures conductrices et établir directement les thermogrammes de barres placées parallèlement à la coupe.

### 2.2. Les processus expérimentaux.

#### 2.2.1. Les corps d'épreuve.

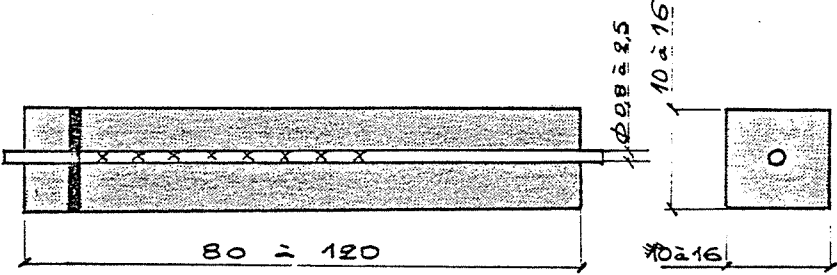
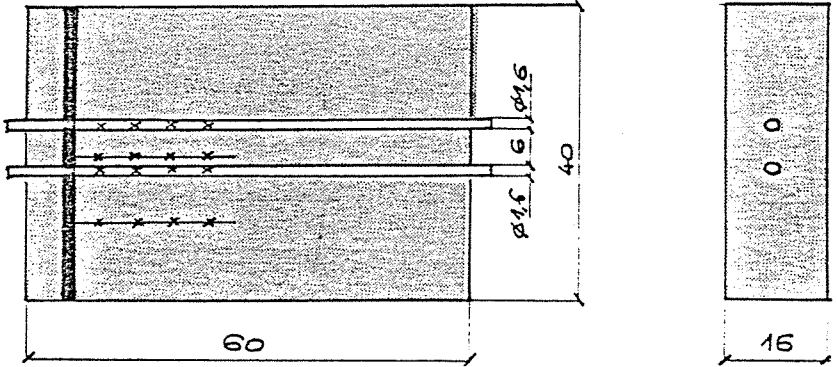
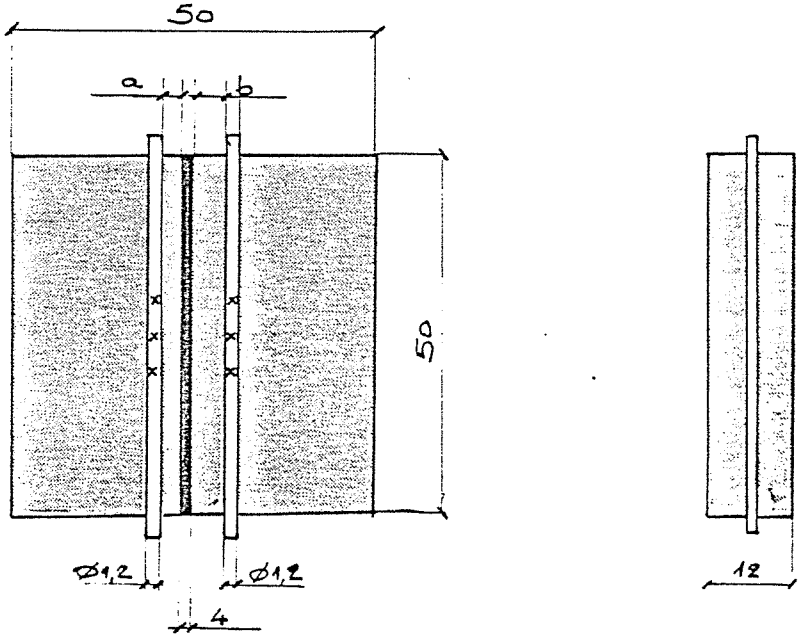
La fabrication et la mise en oeuvre du béton sont conduites de façons identiques à celles décrites dans le chapitre précédent (en fait les éprouvettes étaient réalisées, puis essayées, en même temps).

La géométrie et le nombre des modèles sont définis sur la fig. 3.79 ; on a distingué trois familles d'éprouvettes afin d'atteindre les objectifs précédemment précisés.

#### 2.2.2. Le montage des thermocouples.

Par rapport aux expériences précédentes, un nouveau problème se présentait : la mesure simultanée des températures dans le béton et dans l'acier.

EPROUVETTES BETON ARME

CODES	DIMENSIONS (cms)	N.B.
BA 1		7
BA 2		2
BA 3		3

Afin de minimiser l'erreur systématique due à la présence du capteur, le thermocouple était placé au coeur de l'armature ; il y pénétrait par un trou radial (donc suivant un plan quasi-isotherme) de très petite dimension (0,8mm) -voir fig.3.52b-. Initialement, la présence d'un bain d'étain en fond de trou pour réduire encore la résistance thermique de contact avait été envisagée ; compte tenu des difficultés de mise en oeuvre et du grand nombre de couples utilisés, cette solution ne fut finalement pas retenue.

### 2.3. Les thermogrammes dans les armatures de direction perpendiculaire à la coupe thermique :

#### 2.3.1. Les thermogrammes chronologiques.

Ces thermogrammes sont établis à partir d'éprouvettes unidirectionnelles de type "BA 1" (fig 3.79 ) subissant une coupe thermique de code A 1 (simple trou) ou d'éprouvettes bi-directionnelles de type "BA 2" subissant alors une coupe thermique continue de code A 2.

Les graphes des fig. 3.81 et 3.82 font apparaître les deux familles de thermogrammes obtenues pour différentes positions de thermocouples et pour un même diamètre d'armature ( $\varnothing 10$ ).

Ces deux réseaux nous montrent que, au contraire des résultats trouvés dans le béton, la nature de la coupe (A 1 ou A 2) n'entraîne pas de variations importantes sur le champ de températures en résultant dans l'armature, au moins pour de faibles valeurs du temps (par contre, après un temps assez long, les armatures subissent alors l'échauffement du béton, d'où des températures alors légèrement plus élevées dans le cas A 2 que dans le cas A 1).

Par ailleurs, on a dit, en D 111 , la contribution que

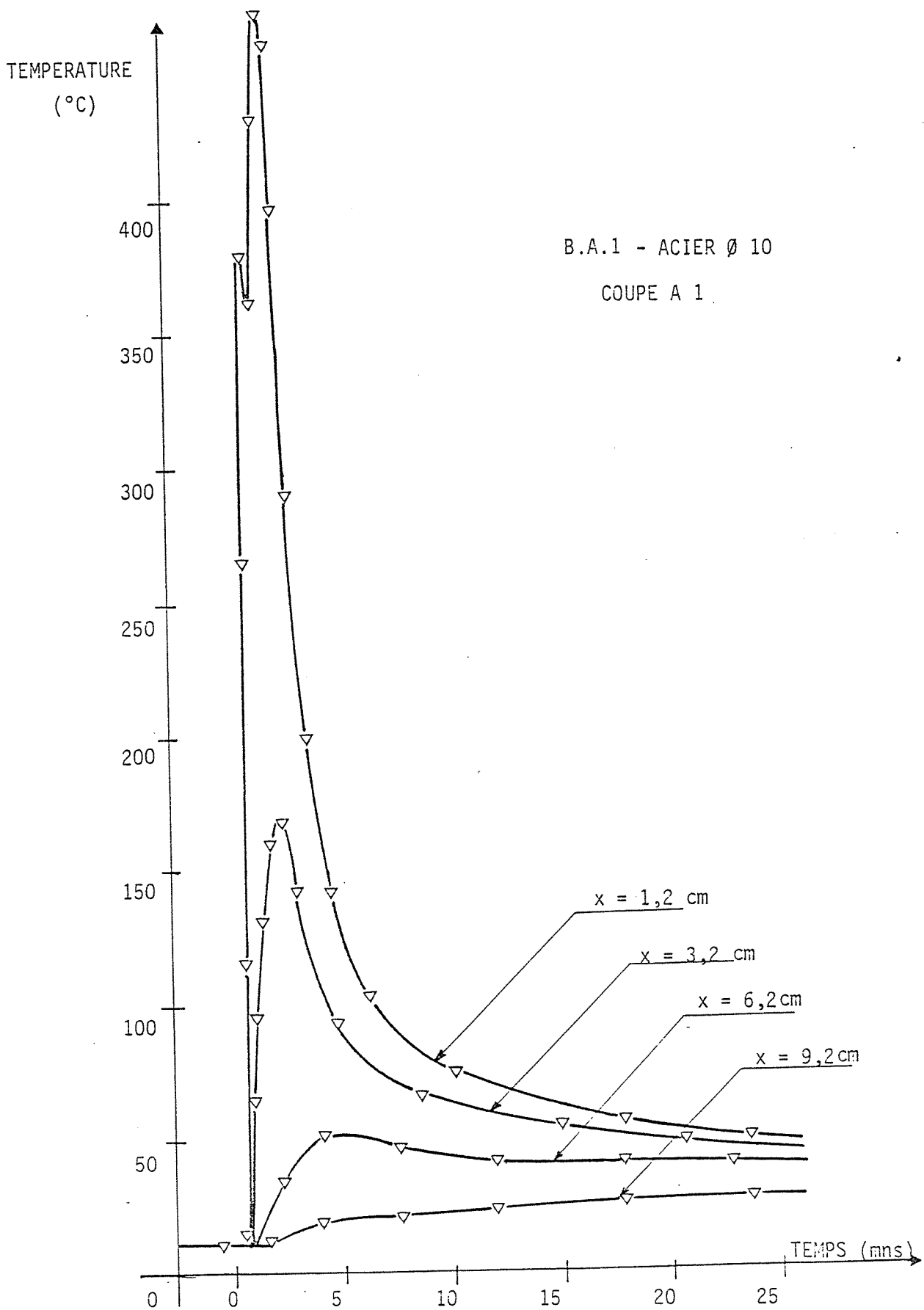


fig 3.81 : Evolution des températures dans une armature en fonction du temps (distances en cms) - Coupe A 1.

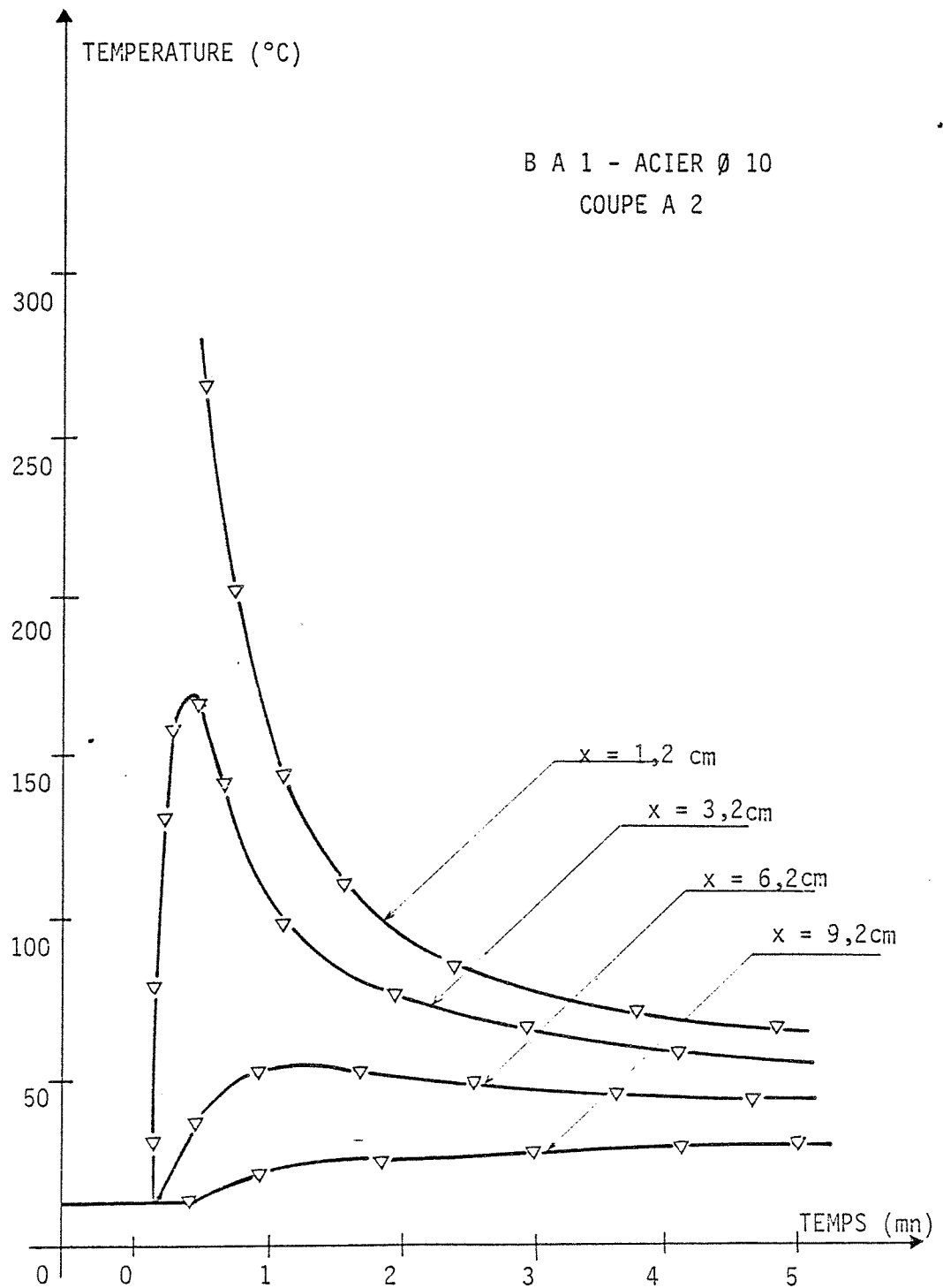


fig. 3.32 : Evolution des températures dans une armature en fonction du temps (distance en cms) - Coupe A 2.



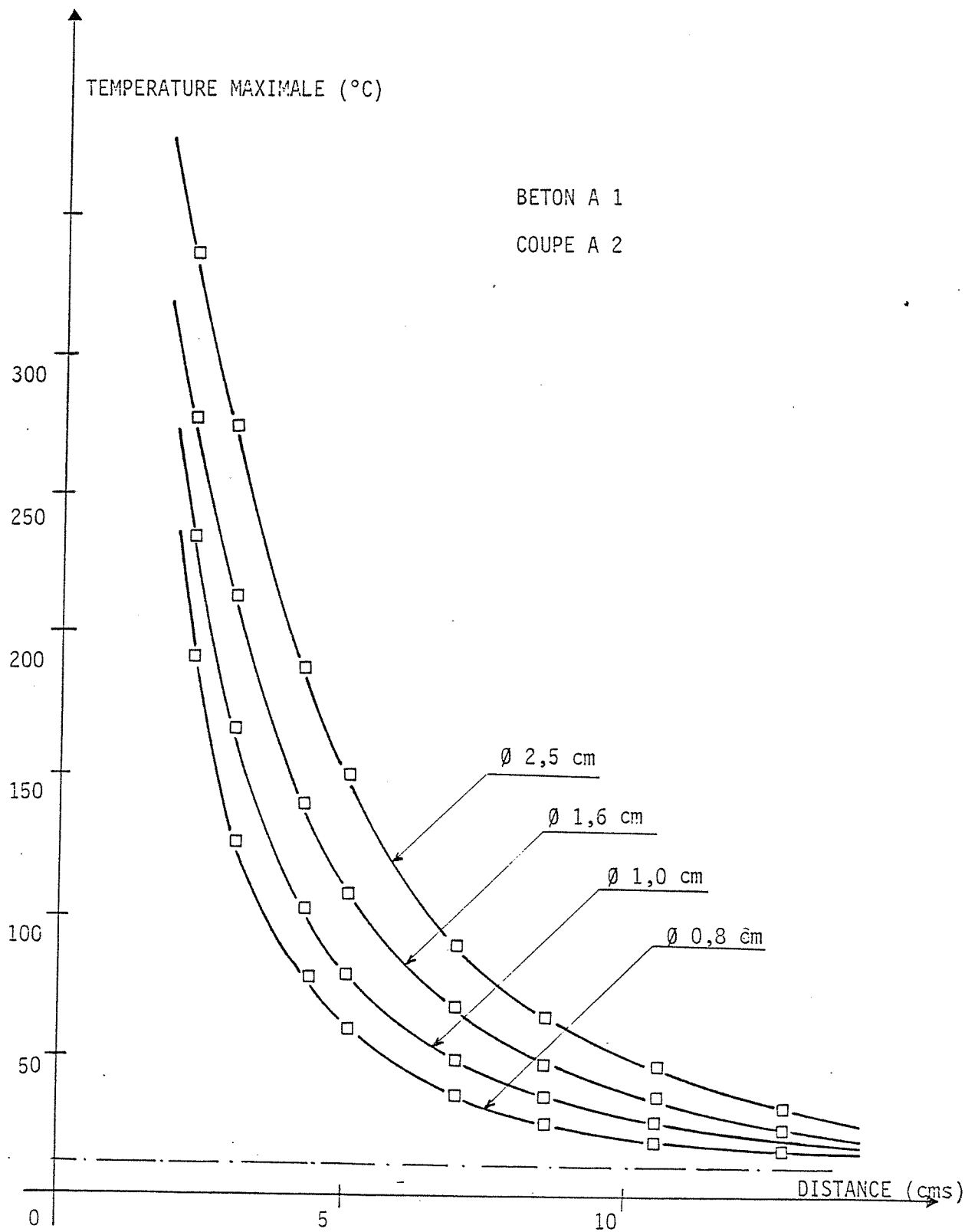


fig3.83 : Evolution des températures maximales dans des armatures de différents diamètres.

pouvait apporter au bilan énergétique final la combustion propre de l'armature. Une mise en évidence de ce phénomène (et des pertes de chaleur radiales tout au long de la barre) peut être observée en faisant varier le diamètre des armatures.

On a donc réalisé des éprouvettes de type BA 1 dont les diamètres prenaient pour chacune d'entre elles les valeurs : 8 - 10 - 16 - 25 mm. On a obtenu ainsi des thermogrammes chronologiques de même allure que les précédents dont on a pu tirer les thermogrammes topologiques intéressants.

#### 2.3.2. Les thermogrammes topologiques.

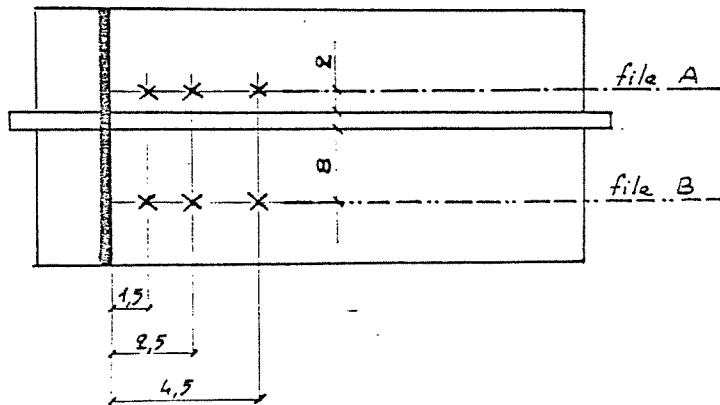
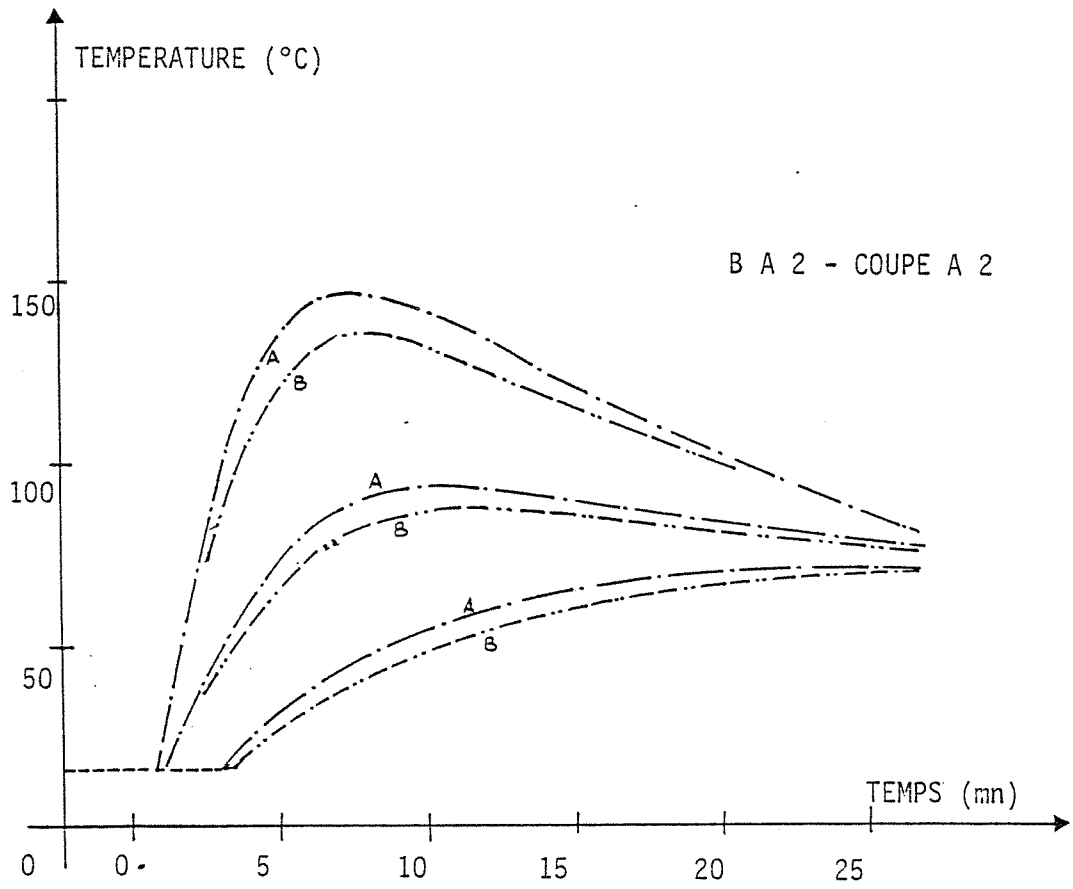
Ils permettent, notamment, de caractériser le niveau de température maximale atteinte lors du découpage en fonction de la distance à la coupe et des dimensions de l'armature (figure 3.83).

Ces résultats seront importants lors de la discussion des conclusions ainsi que lors de l'étude des propriétés mécaniques de l'élément découpé (étude de la liaison acier-béton, notamment).

#### 2.4. Réflexion sur l'isotropie du béton faiblement armé.

Dans le paragraphe C, à propos de la conduction dans le béton, nous avons formulé une hypothèse d'isotropie. Il paraît donc important de s'interroger sur la validité de cette hypothèse dans le cas -le plus général- d'éléments peu armés (voile, dalles, coques...). En d'autres termes, peut-on considérer les champs de températures dans le béton d'un élément de béton seul et d'un élément de béton armé comme étant sensiblement identiques (ce qui signifierait que les perturbations dues aux armatures seraient négligeables)?

Nous avons réalisé un modèle de type BA 2 dans lequel on



s'est proposé de mesurer la température dans le béton en des points situés sur une ligne parallèle à une armature et situés à une distance fixe de celle-ci (une distance d'enrobage conventionnel, par exemple, soit  $y = 2$  cm).

En ces points, l'échauffement résulte du flux (fort) traversant directement le béton, perpendiculairement à la coupe et du flux (faible) résultant des pertes latérales le long de l'armature.

Le graphe de la fig 3.85 montre les températures relevées respectivement à 1,5 cm, 2,5 cm et 4,5 cm de la coupe thermique. On a porté sur ce graphe, repérés par file B, les niveaux atteints dans une éprouvette identique sans armature.

On peut en déduire une conclusion intéressante quant à la perturbation : elle est très faible et autorise, dans les cas courants, à étendre les résultats du paragraphe C au béton des éléments de béton faiblement armé.

#### 2.5. Thermogrammes dans les armatures de direction parallèle à la coupe.

En toute rigueur, cette étude est inutile ! En effet, le flux de chaleur parvenant à ces armatures est celui propagé dans le béton (donc, l'estimation a déjà été faite). Cependant, l'ingénieur souhaitera souvent avoir ces résultats directement tant ils correspondent à des problèmes courants.

On a donc réalisé une éprouvette de type BA 3 (figure 3.79) telle que la coupe thermique soit effectuée entre deux armatures parallèles munies de thermocouples.

Les résultats (évidents) sont donnés sur la figure 3.87 et confirment ceux précédemment trouvés.

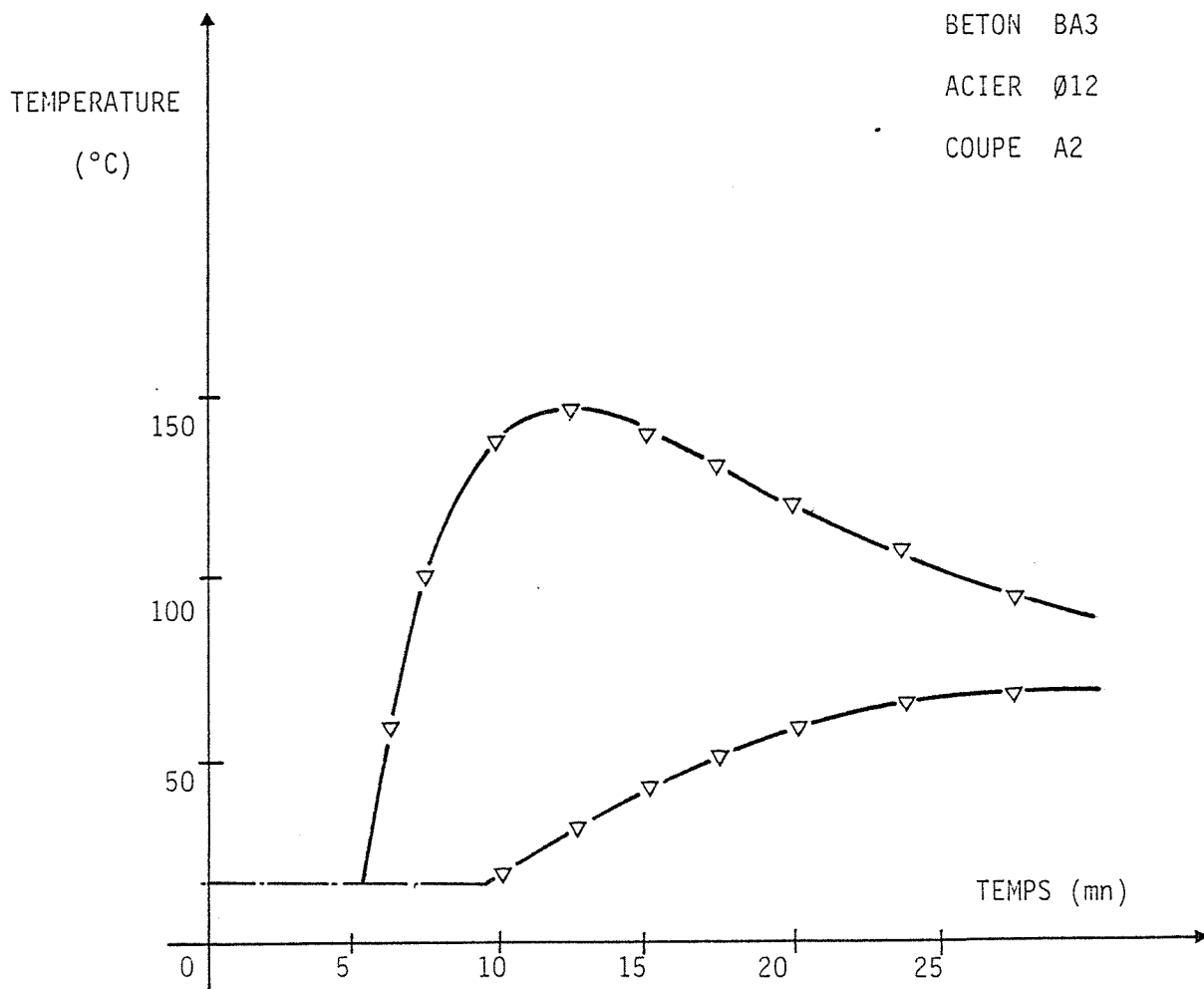


fig.3.87 Evolution des températures dans les armatures parallèles à la coupe.

## E. LES CONCLUSIONS DE L'ETUDE THERMOCINETIQUE .

L'étude que nous venons de conduire nous permet de développer des conclusions dans trois voies principales.

La première sera la comparaison des résultats expérimentaux aux thermogrammes théoriques. Elle nous permettra d'établir le degré de solidité des modèles de calcul proposés et, éventuellement, de déterminer les possibilités d'extension de ces modèles à des matériaux de caractéristiques thermophysiques différentes de celles du béton.

La seconde voie s'intéressera à l'établissement d'un domaine critique au voisinage de la coupe thermique, c'est-à-dire, d'un domaine à l'intérieur duquel sont atteints des critères d'état limite pour certaines propriétés du matériau découpé (il nous faudra donc, préalablement, avoir défini ces critères). Ces domaines critiques permettront, ensuite, la prévision des altérations et des dégradations dans les éléments découpés. Ils seront donc, au même titre que les rendements énergétiques, indispensables à l'ingénieur d'études lors de la conception et du choix des méthodes de démantèlement des structures.

La troisième voie s'attachera à préciser le prolongement futur de cette étude dans des directions selon nous insuffisamment explorées jusqu'alors.

## 1. - COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX.

Examinons successivement le cas du béton et le cas des armatures.

### 1.1. Les thermogrammes dans le béton.

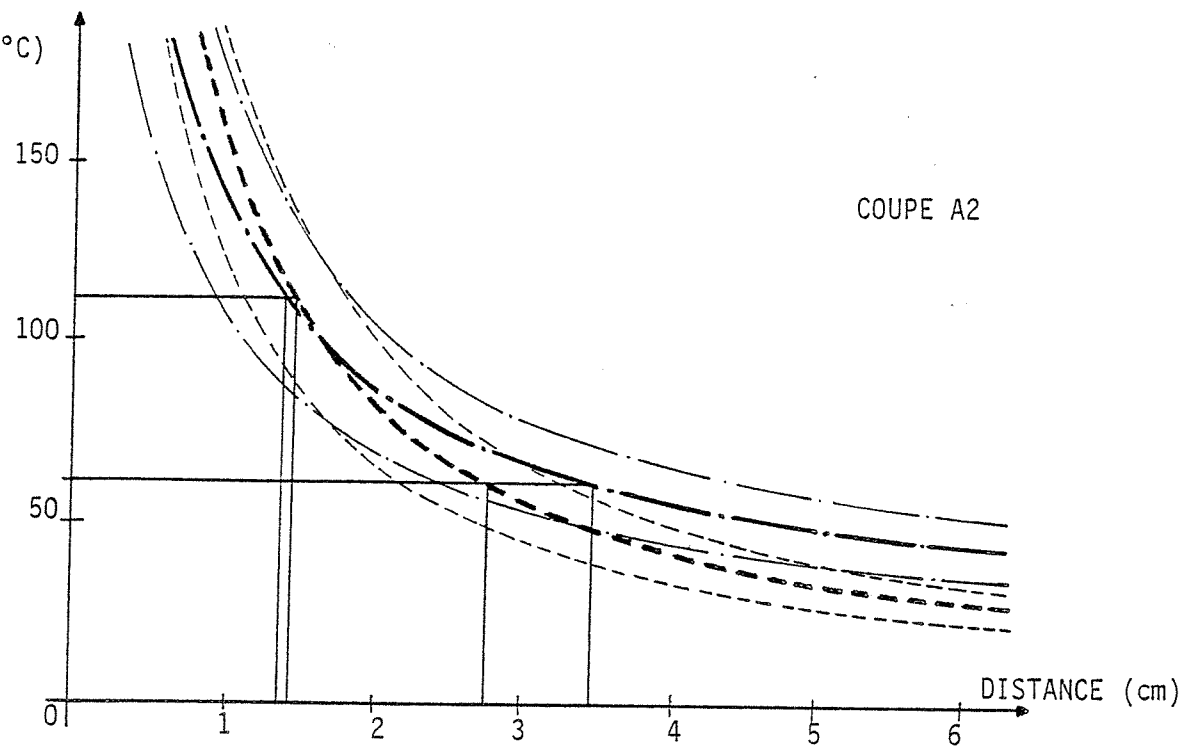
#### 1.1.1. Détermination des écarts

On a reporté, sur les figures 3.90, pour les deux coupes habituellement retenues, les fuseaux constituant l'enveloppe des résultats expérimentaux (repérés par la ligne moyenne en trait mixte fort et les frontières en trait mixte fin) et les fuseaux des élévations de températures obtenus théoriquement (page 3.45) (repérés par les courbes en trait pointillé).

Dans le cas de la coupe plane (A2), on constate une superposition des résultats pour les distances à la coupe voisines de 15 mm. Dans un voisinage plus immédiat, notre calcul théorique a conduit à une majoration des températures  $-155^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $140^{\circ}\text{C}$  à 10 mm- qui est cependant suffisamment faible pour que les deux fuseaux restent largement superposés. Par contre, des écarts relatifs notablement plus grands -mais il est vrai à des températures faibles (inférieures à  $40^{\circ}\text{C}$ )- sont notés pour des distances plus importantes (supérieures à 50 mm).

Le cas du forage cylindrique (A1) est un peu différent dans la mesure où, au delà de 30 millimètres de distance, les résultats théoriques et expérimentaux sont sensiblement confondus. Par contre, les écarts deviennent notables dans le voisinage de la coupe ( $80^{\circ}\text{C}$  et  $65^{\circ}\text{C}$  à 10 mm), cependant, il est intéressant de constater que les résultats théoriques restent toujours, dans cette zone, supérieurs aux résultats expérimentaux et peuvent donc, de ce fait, en constituer une enveloppe utile.

ELEVATION DE  
TEMPERATURE (°C)



ELEVATION DE  
TEMPERATURE (°C)

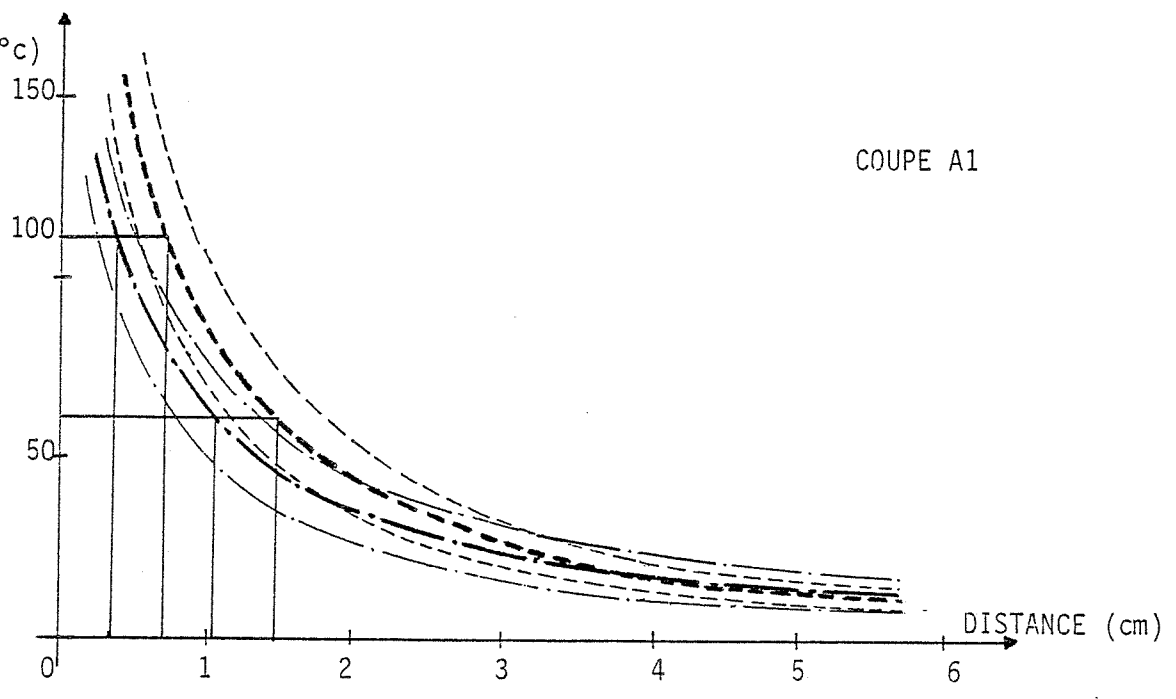


Fig 3.90 COMPARAISON DES RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX (Béton B1)  
(Tracé des fuseaux et de leurs lignes moyennes).

(Légende : Résultats théoriques : - - - - - )  
                  Résultats expérimentaux : ———— )



Un autre moyen de comparer nos résultats peut être d'examiner les largeurs des domaines soumis à une certaine élévation de température (on verra tout l'intérêt de cette notion dans le paragraphe suivant). Ainsi, par exemple, nous retenons comme températures critiques les niveaux 110°C et 60°C. Dans le cas de la coupe plane, les abscisses correspondantes sont respectivement situées à 13 mm (exp) et 14 mm (th) pour 110°C et à 27 mm (th) et à 34 mm (exp) pour 60°C alors que pour le cas du forage cylindrique, elles sont à 4 mm (exp) et 7 mm (th) pour 110°C et à 10 mm (exp) et à 15 mm (th) pour 60°C (Fig.3.90).

#### 1.1.2. Conclusion, retour sur le modèle de calcul

Compte tenu de la faible importance et du signe de ces écarts, on peut estimer que la prévision des thermogrammes conduite à partir de notre modèle de calcul est satisfaisante et suffisante pour la plupart des utilisations envisagées dans le domaine du Génie Civil.

Rappelons que notre modèle thermocinétique était constitué d'un creneau de flux appliqué en même temps sur toute la surface à découper. Ceci sous-entendait, en hypothèse, que la vitesse d'avance de la coupe était évidemment très grande par rapport à la vitesse de propagation du flux dans la direction perpendiculaire à cette coupe. D'autres modèles auraient pu être recherchés tels que nous n'ayons plus à formuler cette hypothèse (elle ne serait d'ailleurs plus vérifiée dans le découpage de plaques de matériaux très conducteurs tel l'acier). Ainsi, par exemple, un schéma bidimensionnel du découpage (avance de la coupe suivant l'axe  $\vec{x}$ , propagation des flux de chaleur suivant  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  (perpendiculaire à  $\vec{x}$ ) a été conduit suivant la méthode des éléments finis. Il n'a cependant pas, à ce jour, permis une réduction des écarts avec nos résultats expérimentaux.

Sans doute, un troisième modèle aurait pu être élaboré en reprenant nos hypothèses et en tenant mieux compte de certaines réalités physiques du découpage (notamment présence de laitier piégé à l'intérieur de la coupe). Il avait été choisi à partir d'un créneau de flux constitué à nouveau d'une partie constante d'intensité, légèrement réduite,  $\phi_0$  appliquée de l'instant de  $t_1$  à l'instant  $t_2$  et d'une partie d'intensité décroissante de  $\phi_0$  à 0 de l'instant  $t_2$  à l'instant  $t_3$ . Nous n'avons cependant pas traité un tel modèle.

Enfin, il est sans doute intéressant de souligner que notre modèle de calcul peut être utilisé avec une bonne précision, pour la prévision des thermogrammes résultant du découpage thermique d'autres matériaux de construction tels les granits ( $\lambda = 3 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ), les marbres ( $\lambda = 2,5 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ), les terres cuites ( $\lambda = 1 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ), les bétons de granulats légers ( $0,1 < \lambda < 0,4 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ), l'amiante-ciment ( $\lambda = 0,6 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ ) etc...

### 1.2 Les thermogrammes dans les armatures.

La dimension transversale de l'armature (6 mm à 25 mm) étant toujours inférieure à celle du forage (35 mm à 45 mm), on peut considérer que la coupe s'effectue toujours en une seule passe et de façon instantanée, aussi, dans ce cas, le modèle théorique est-il très près de la réalité physique.

La Figure 3.92 permet de quantifier les écarts obtenus entre le calcul théorique et l'expérimentation pour une armature de 16 millimètres de diamètre.

On peut constater qu'à partir d'une distance égale à quatre fois le diamètre de l'armature, la différence entre les réponses est

.../...

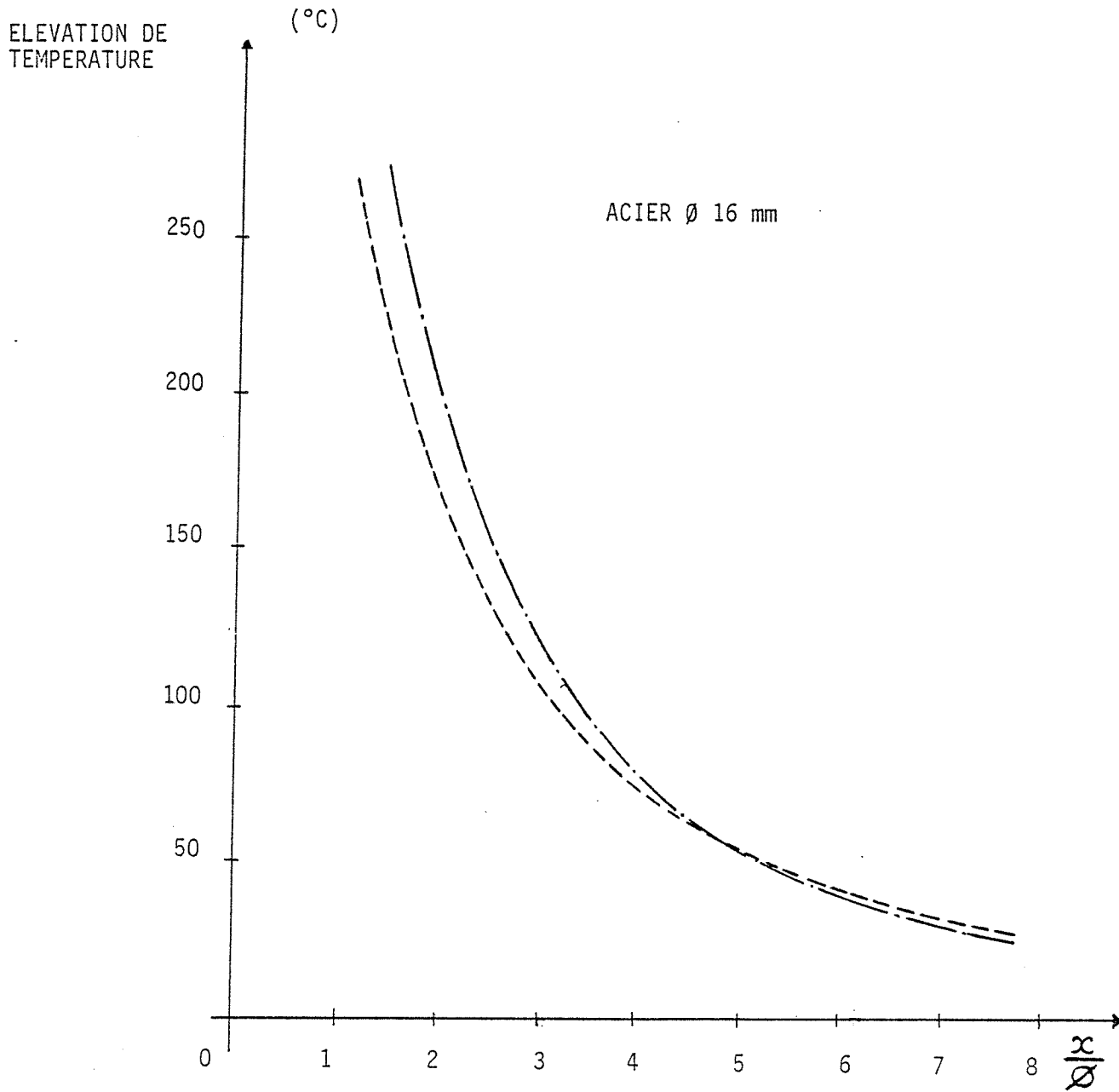


Fig. 3.93 COMPARAISON DES-RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX. (armatures)  
 (Résultats théoriques -----; Résultats expérimentaux -.-.-.-)

## 2. - L'ETABLISSEMENT DES DOMAINES CRITIQUES.

### 2 1. La notion de critère d'état limite.

On dira qu'un élément E d'un système S a atteint son état limite quand il ne remplit plus la fonction  $F_i$  qui a conduit à son dimensionnement lors de la conception du système S.

Dans notre cas, l'élément E peut être un petit élément de volume de béton ou d'acier, observé localement, et faisant partie d'un système S qui est, par exemple, une structure en béton armé.

Pour cet élément, dans la plupart des cas, l'état limite va s'exprimer à partir de propriétés mécaniques (résistance à la rupture, limite élastique, modules de déformation longitudinale et transversale...) ou chimiques (état stable des composés hydratés pour le béton, configurations allotropiques pour les aciers écrouis, etc...).

La conception du système S implique obligatoirement, lors de son calcul, que les variations de ces propriétés restent admissibles c'est-à-dire, inférieures à des écarts limites compatibles avec les lois du dimensionnement.

Or, tous ces paramètres dépendent de la température (on précisera la variation de certains d'entre eux dans le chapitre suivant).

Il en résulte, donc, la définition de variations limites admissibles de températures  $\overline{\Delta T}_i$  pour chacune de ces propriétés.

On notera, par exemple,  $\overline{\Delta T}_E$ ,  $\overline{\Delta T}_V$ ,  $\overline{\Delta T}_O$  et, plus généralement  $\overline{\Delta T}_P$ , les écarts admissibles de températures compatibles avec les modules de déformation, la résistance à la rupture ou la propriété P.

En général, plusieurs propriétés interviennent et l'écart admissible retenu est l'enveloppe des écarts de ces différentes pro-

## 2.- L'ETABLISSEMENT DES DOMAINES CRITIQUES.

### 2 1. La notion de critère d'état limite.

On dira qu'un élément E d'un système S a atteint son état limite quand il ne remplit plus la fonction  $F_i$  qui a conduit à son dimensionnement lors de la conception du système S.

Dans notre cas, l'élément E peut être un petit élément de volume de béton ou d'acier, observé localement, et faisant partie d'un système S qui est, par exemple, une structure en béton armé.

Pour cet élément, dans la plupart des cas, l'état limite va s'exprimer à partir de propriétés mécaniques (résistance à la rupture, limite élastique, modules de déformation longitudinale et transversale...) ou chimiques (état stable des composés hydratés pour le béton, configurations allotropiques pour les aciers écrouis, etc...).

La conception du système S implique obligatoirement, lors de son calcul, que les variations de ces propriétés restent admissibles c'est-à-dire, inférieures à des écarts limites compatibles avec les lois du dimensionnement.

Or, tous ces paramètres dépendent de la température (on précisera la variation de certains d'entre eux dans le chapitre suivant).

Il en résulte, donc, la définition de variations limites admissibles de températures  $\overline{\Delta T}_i$  pour chacune de ces propriétés.

On notera, par exemple,  $\overline{\Delta T}_E$ ,  $\overline{\Delta T}_V$ ,  $\overline{\Delta T}_\sigma$  et, plus généralement  $\overline{\Delta T}_P$ , les écarts admissibles de températures compatibles avec les modules de déformation, la résistance à la rupture ou la propriété P.

En général, plusieurs propriétés interviennent et l'écart admissible retenu est l'enveloppe des écarts de ces différentes pro-

priétés. On pourrait le noter, par exemple,  $\overline{\Delta T_{E,V,\sigma}}$  ou, plus généralement  $\overline{\Delta T_{p,q,r}}$ .

## 2. Rappel des paramètres du découpage thermique.

On a vu que l'on pouvait distinguer :

- ceux qui caractérisent la coupe thermique, c'est-à-dire :

- la nature (simple trou ou coupe plane),
- l'orientation spatiale,
- l'énergie réellement développée (lance thermique et éventuellement armature).

- ceux qui caractérisent le matériau, c'est-à-dire :

- la nature (béton ou béton armé),
- les dimensions,
- la composition initiale,
- l'âge et la teneur en eau,
- les caractéristiques thermophysiques.

## 2.3. La cartographie des domaines critiques.

### 2.3.1. Le principe de cette cartographie :

Etant donnée une "configuration de découpage" parfaitement déterminée par la connaissance des paramètres ci-dessus, d'une part, et étant donné, d'autre part, un écart  $\overline{\Delta T_{p,q,r}}$  résultant de l'analyse des critères d'état limite, nous nous proposons d'établir le contour du domaine incluant l'ensemble des points qui, dans le voisinage de la coupe thermique, sont soumis à une variation de champ d'intensité au moins égale à  $\overline{\Delta T_{p,q,r}}$ .

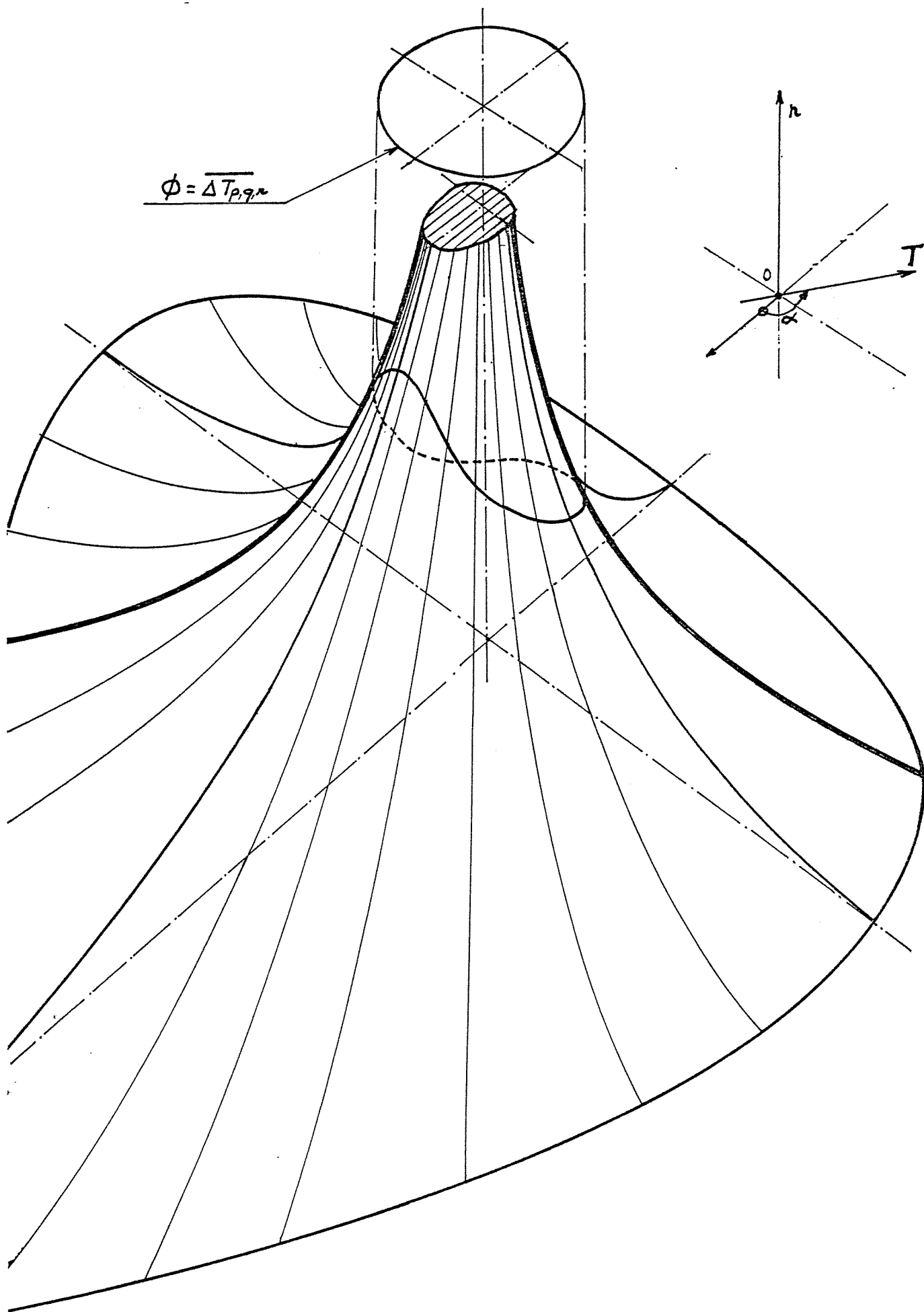


fig. 3.97 Etablissement du "domaine critique"  
 (Représentations de  $T(r, \infty)$  et de  $\overline{\Delta T}$ )





La connaissance de tels domaines, établie avec rigueur pour les différents procédés de démolition, est, selon nous, indispensable, au même titre que les conditions économiques et les contraintes de nuisances, pour dégager objectivement des critères de choix entre les techniques afin de contribuer à l'indispensable rationalisation des méthodes de démolition.

## 2. A PROPOS DE NECESSAIRES PROLONGEMENTS

Différentes directions doivent retenir notre attention lors d'études futures. Elle concernent essentiellement :

2.1. La détermination du champ de température dans les éléments de béton fortement armés. (about de poutres, par exemple).

Le modèle thermocinétique doit alors prendre en compte les perturbations apportées par la grande quantité d'armatures. Une méthode de calcul par éléments finis nous paraît adaptée à ce problème. Les premières études sont déjà commencées dans cette direction.

2.2. L'analyse statistique des résultats expérimentaux permettant une approche probabiliste des domaines critiques prenant mieux en compte les conditions réelles d'exécution (hors laboratoire).

2.3. L'étude de configurations insuffisamment explorées : il en est ainsi notamment des massifs importants (nous n'avons pas abordé l'étude tridimensionnelle) fréquemment rencontrés dans différents types d'ouvrages (barrages, centrales nucléaires, etc...). Dans ces cas, les conditions aux limites (échelon de flux) ne sont plus, alors, correctement modélisées.



CHAPITRE IV

----

L'EVOLUTION DES PROPRIETES MECANIQUES

DU BETON ET DU BETON ARME SOUMIS A DECOUPAGE THERMIQUE

## A.- LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'étude thermocinétique nous a donné les moyens d'établir des "domaines critiques d'utilisation" du découpage thermique. On a vu que l'élévation de température constituait le paramètre déterminant les frontières de ces domaines.

De nombreuses conditions - fonctionnelles, sécurité incendie, etc. - fixeront souvent les bornes maximales de cette élévation de température ; cependant, dans un grand nombre de cas, l'évolution du comportement mécanique du béton en fonction de son échauffement restera, selon nous, le critère le plus déterminant.

Il doit donc être étudié.

A notre connaissance, aucun chercheur ne s'est préoccupé des effets, sur le béton, d'un choc thermique caractérisé par une aussi forte élévation de température en un temps aussi bref, et il n'était pas dans nos moyens d'entreprendre, de façon exhaustive, une telle étude.

Plus modestement, notre méthode a suivi deux voies complémentaires :

1°) La recherche des variations des propriétés mécaniques du béton en fonction de la température lors de l'application lente d'un fort champ thermique pendant un temps très long. Cette première partie va nous permettre de préciser l'existence de différents niveaux critiques de température à l'égard de l'évolution des propriétés mécaniques du béton, mais elle ne prend pas en compte, du point de vue de la thermocinétique, une image très fidèle du découpage.

2°) La comparaison globale des propriétés mécaniques d'éprouvettes de béton ayant subi un découpage à celles d'éléments de référence non traités thermiquement. Cette seconde partie nous permettra de caractériser, dans les conditions réelles d'échauffement cette fois, les variations de caractéristiques mécaniques conventionnelles (résistance à la traction, adhérence acier-béton, ...).

B .- RETOUR SUR L'EVOLUTION DES PROPRIETES  
MECANIQUES DU BETON EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.

1. LA DILATATION THERMIQUE ET LE RETRAIT DU BETON.

En l'absence de sollicitations mécaniques, les variations dimensionnelles du béton sont de deux types :

- la dilatation : phénomène uniquement thermique qui va donc essentiellement concerner le comportement des granulats et du ciment hydraté.
- le retrait : phénomène hygrométrique résultant essentiellement des migrations de l'eau retenue dans les pores et capillaires (et dans une certaine mesure des caractéristiques du ciment hydraté).

Lorsque le béton est soumis à une élévation de température (suffisamment lente pour permettre la diffusion de l'eau et l'équilibre hygrométrique avec l'ambiance), les variations de dimensions mesurées résultent des deux phénomènes précédents dont, d'ailleurs, les évolutions sont de signes opposés.

La figure 4.5 représente cette évolution. On observe une réduction de la pente de la courbe vers 50-60°C puis une augmentation vers 110-120°C. [33]

La mesure de la quantité d'eau désorbée (courbe en pointillés) explique ces variations (particulièrement importantes dans le domaine 50-120°C).

Arrivé à 120°C, si l'on refroidit (très lentement) le béton, on mesure une variation dimensionnelle très différente de la précédente

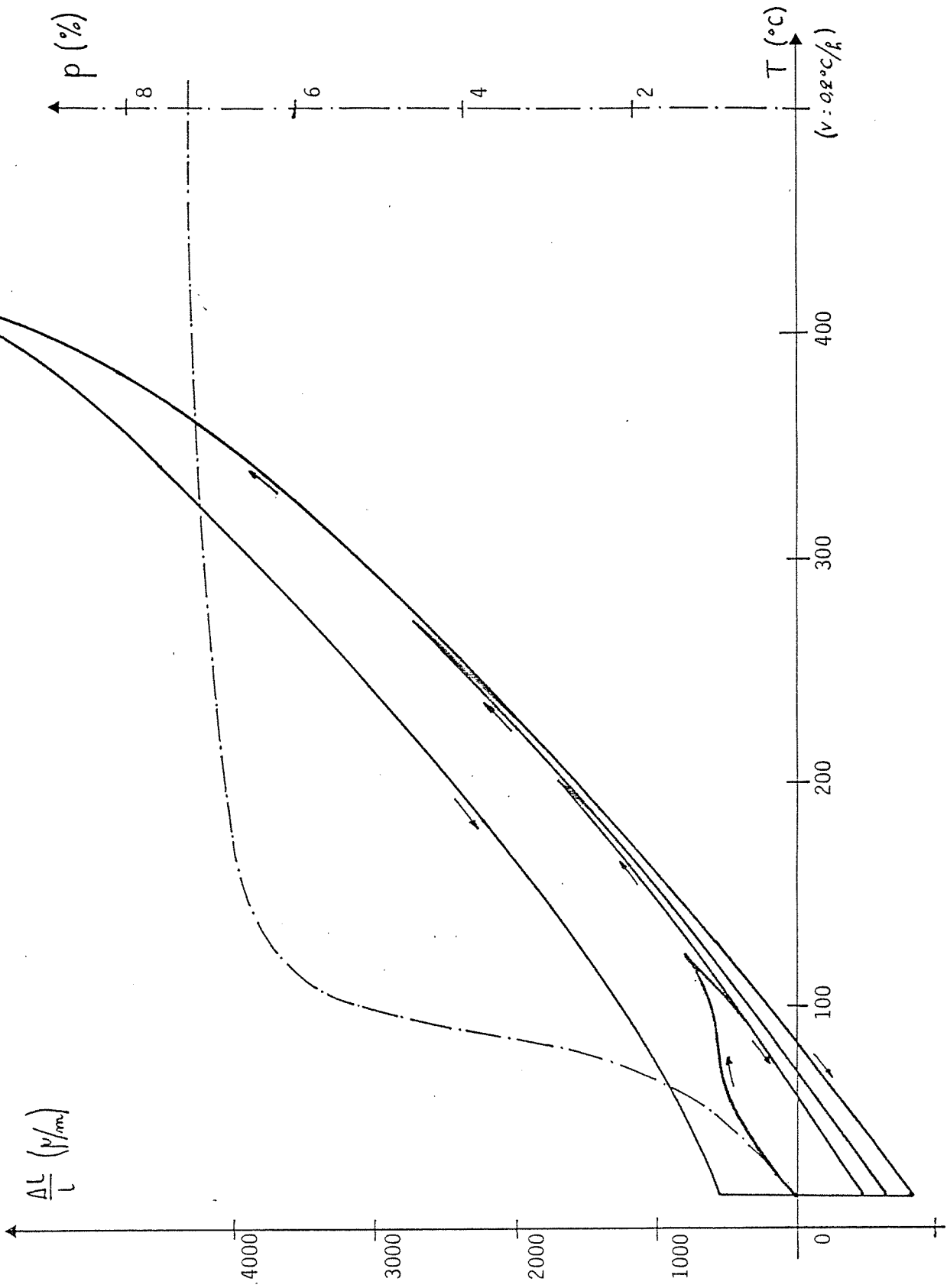


fig. 4.5 Evolution de la déformation (dilatation + retrait) du béton en fonction de la température (en trait mixte, rappel de l'évolution de la perte d'eau).

et caractéristique de l'allongement relatif de ce béton sollicité à 120°C.

Ce retour à l'état initial (20°C) permet de déterminer (par différence) le retrait engendré par le cycle thermique effectué.

Une seconde sollicitation thermique détermine une variation sensiblement identique à celle obtenue lors du refroidissement. La poursuite de la sollicitation au-delà du palier précédent conduit à une désorption supplémentaire et un nouveau refroidissement permet de mesurer le nouveau retrait résiduel.

A l'égard de ces phénomènes pour des traitements thermiques situés entre 120°C et 300°C, on peut donc considérer que le béton a un comportement quasi-élastique avec un retrait qui s'accroît avec la température.

Au contraire, entre 300°C et 600°C (suivant les constituants et les compositions des bétons), l'allongement  $\frac{\Delta l}{l}$  s'accroît très rapidement et au retour à l'état initial (20°C), on obtient un allongement résiduel significatif d'un endommagement du béton incompatible avec son utilisation. Ce niveau de température peut donc constituer un critère d'état limite pour notre matériau.

## 2. LE MODULE D'ELASTICITE ( $E_p$ ) ET LE COEFFICIENT DE POISSON ( $\nu_p$ ).

Les mesures traduites par la fig.4.7.a concernent le module d'élasticité correspondant à des charges de courte durée. Les sollicitations mécaniques ne sont appliquées qu'après avoir atteint l'équilibre hygrométrique de l'éprouvette isotherme. [33]

Une nouvelle fois, pour des températures de 50°C-60°C et 110°C-120°C apparaissent des variations importantes des modules. Au-delà de ce seuil, on relève une décroissance quasi-linéaire.



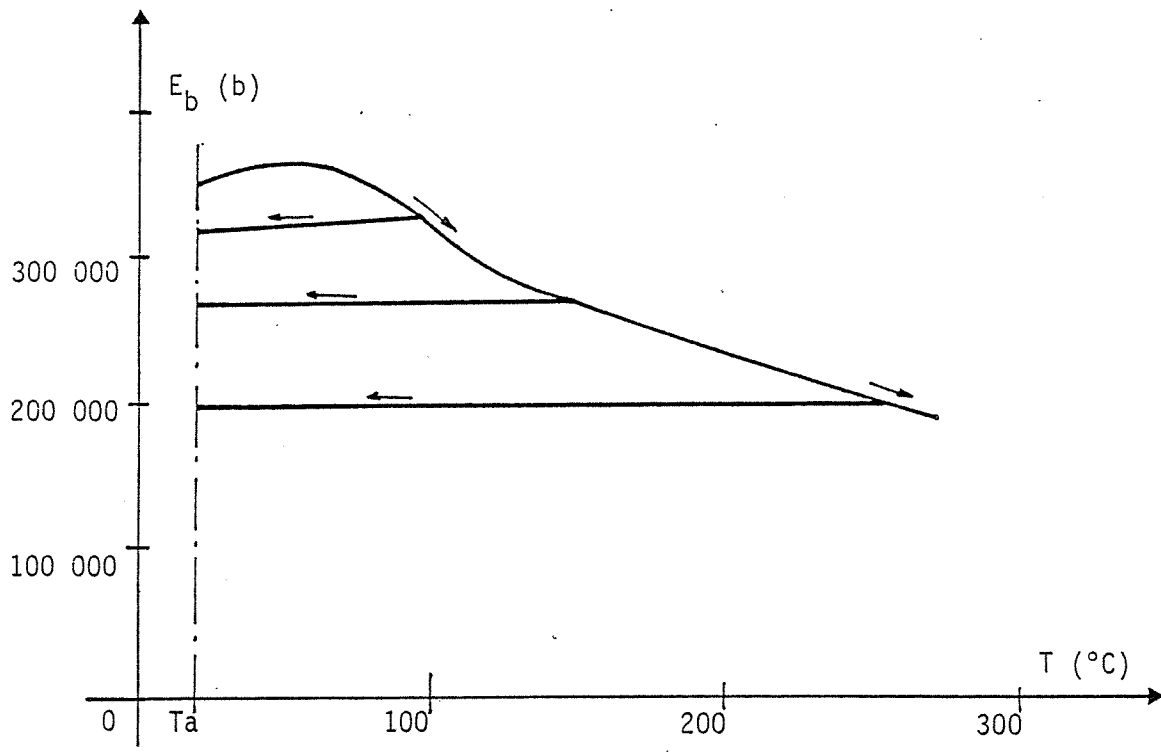


fig. 4.7.a Evolution du module d'élasticité du béton en fonction de la température. (granulats de quartz - 350 kg CPA par  $m^3$ )

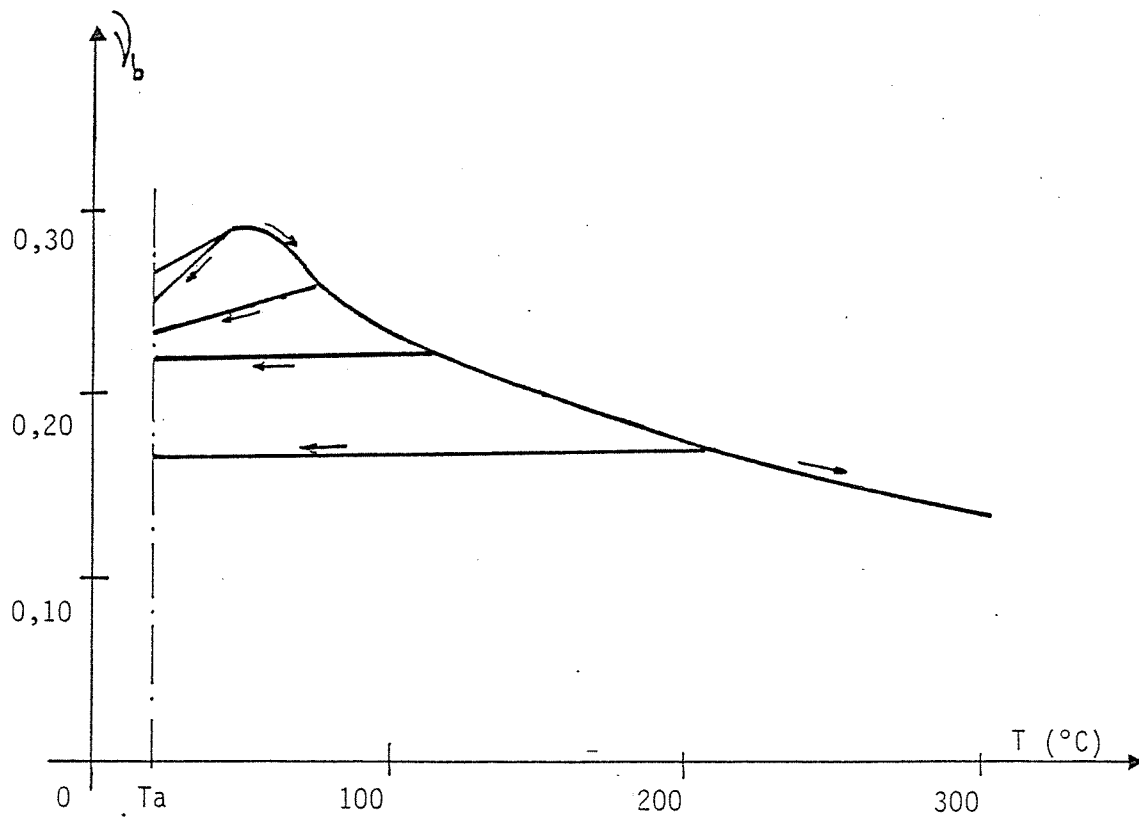


fig. 4.7.b Evolution du coefficient de Poisson du béton en fonction de la température. (granulats de quartz - 350 kg CPA par  $m^3$ )

Le graphe 4.7.b représente la variation du coefficient de Poisson du béton. Le domaine 50-110°C révèle là encore, des singularités analogues aux précédentes.

Dans les deux cas, pour des échauffements supérieurs à 120°C (donc après désorption), les graphes représentatifs des retours à l'ambiante sont des droites quasi-horizontales.

On doit noter que pour des températures de l'ordre de 280°C à 300°C, les valeurs du module élastique et du coefficient de Poisson sont sensiblement divisées par deux.

### 3. RESISTANCE A LA COMPRESSION.

La résistance à la compression varie avec la température.[34]  
Le graphe 4.9 nous caractérise cette variation pour des bétons anciens (entre 300 et 500 jours).

Ainsi, des échauffements à des niveaux de 110°C et 300°C conduisent à des pertes de résistance de 20 et 35% environ.

Par contre, nous savons qu'une élévation de température (faible et lente) appliquée à des bétons jeunes (moins de 60 jours) peut conduire à une élévation sensible de la résistance à la compression (vraisemblablement par accélération de la formation des hydrates du ciment). Il devra être tenu compte de cette remarque dans l'interprétation de certains de nos résultats ultérieurs.

### 4. CONCLUSION.

L'influence de la température sur les caractères mécaniques du béton est donc importante. Il convient, cependant, de souligner que tout ce que nous venons de dire correspond à des évolutions lentes des

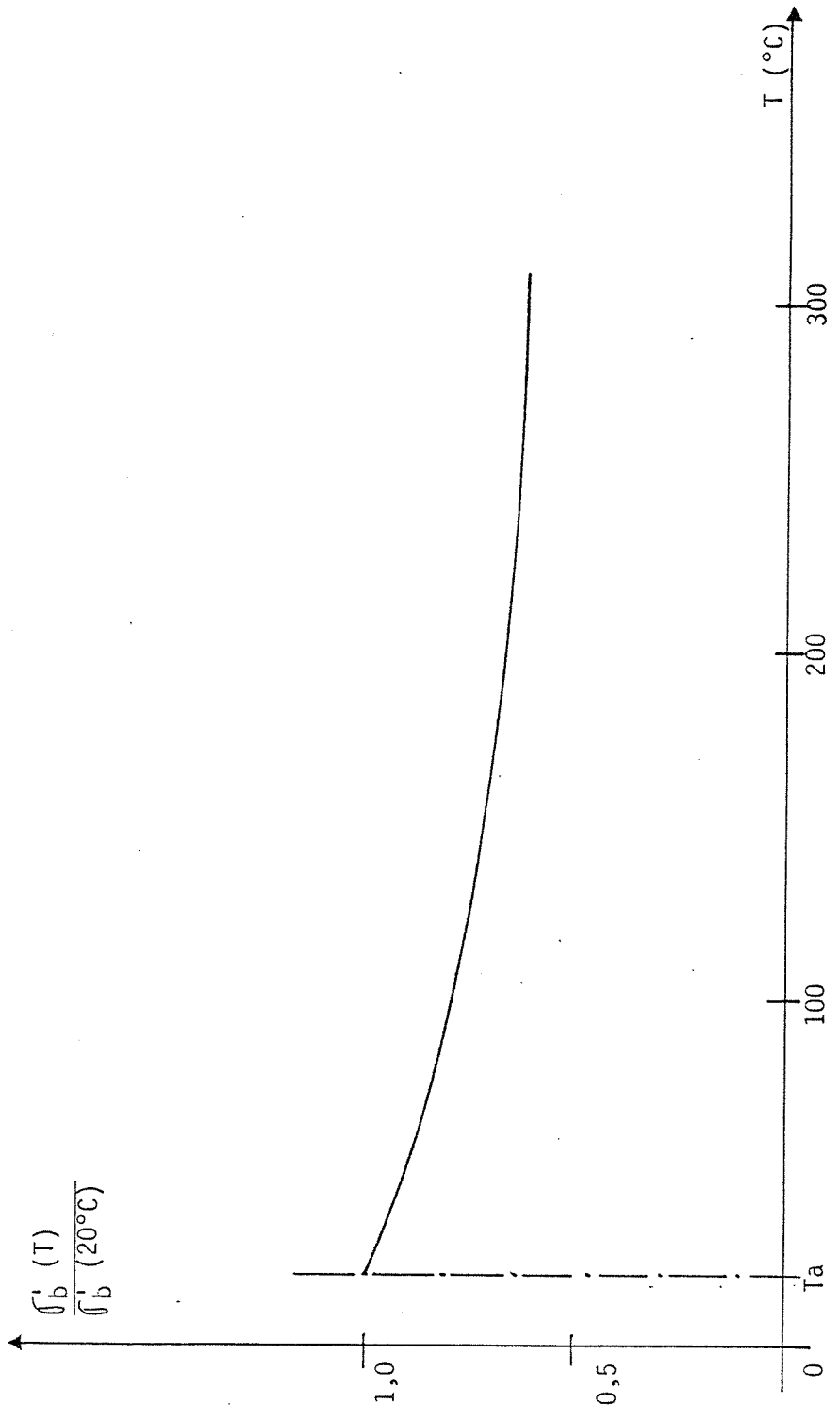


fig. 4.9 Evolution de la résistance à la compression du béton en fonction de la température.

températures et des transferts hygrométriques stabilisés. Il n'en est évidemment pas ainsi lors d'un découpage où les transferts de chaleur et de masse sont soumis à un régime variable brutal.

Cependant, tous les résultats précédents nous confirment dans l'idée qu'il existe trois seuils de température critique.

- 60°C : début des variations sensibles des propriétés mécaniques.

- 120°C : stabilisation de ces variations suivant des lois quasi-linéaires (l'essentiel de l'eau incluse est transformée).

- 300 à 400°C : limite du domaine d'utilisation du béton (micro-fissuration de retrait, déformation, résistance,...)

Ces trois seuils vont donc contribuer à l'établissement de "critères d'états limites mécaniques" dont on déduira, comme on l'a vu dans le chapitre précédent, des "domaines d'état limite" définissant des frontières à l'utilisation du découpage thermique.

C.- ETUDE EXPERIMENTALE DE LA RESISTANCE MECANIQUE  
D'ELEMENTS DE BETON ET DE BETON ARME DECOUPES.

1. PRELIMINAIRE.

Incomplètement satisfait par le modèle du "béton isotherme en équilibre hygrométrique" que nous avons retenu dans le paragraphe précédent, nous avons tenu à prolonger l'étude de l'altération des propriétés mécaniques par une étude expérimentale destinée à mesurer "globalement" les variations de ces propriétés sous l'effet d'une élévation de température résultant d'un véritable découpage thermique.

De nombreux essais ont été effectués ; ils étaient notamment destinés à mesurer la résistance à la compression et la résistance à la traction du béton découpé, la résistance de "reprises de bétonnage" constituées de béton découpé et de béton coulé postérieurement au découpage et, enfin, l'adhérence acier-béton.

Notamment, deux questions fondamentales se posent au spécialiste de béton armé :

- l'échauffement résultant du découpage conduit-il à un endommagement important ?
- l'adhérence acier-béton est-elle altérée lors du découpage d'une armature ?

Il nous a paru important de rapporter ici les résultats des deux séries expérimentales qui pourraient constituer un premier élément de réponse à ces questions :

Le processus expérimental adopté a consisté chaque fois à comparer les propriétés mécaniques obtenues sur deux séries d'éprou-

vettes, réalisées en même temps et à partir d'un même béton, géométriquement identiques lors de l'essai, l'une ayant préalablement subi un découpage alors que l'autre ne connaissait dans le même temps aucun traitement thermique.

## 2. ESSAIS DE RESISTANCE EN TRACTION (PAR FLEXION).

On a réalisé, ensemble, à partir d'un même béton, deux séries de dix éprouvettes 10 x 10 x 40 cm, et douze éprouvettes 10 x 30 x 40 cm (figure 4.13).

La composition du béton était la suivante :

- Ciment C.P.A. 325	1,00	(350 kg/m <sup>3</sup> )
- Sables 0-5 mm	1,82	(640 kg/m <sup>3</sup> )
- Gravier silico-calcaires de Seine 5-20 mm	3,17	(1110 kg/m <sup>3</sup> )
- Eau	0,54	(190 kg/m <sup>3</sup> )
- $\sigma_b^1$ (28 jours) = 370 bars	- Affaissement : 5 cm.	

Ces éprouvettes ont été conservées vingt huit jours en atmosphère saturée, puis quarante huit heures à 60 % d'humidité. Les éprouvettes de la seconde série ont alors été découpées à la dimension 10 x 10 x 40 cm et les vingt deux corps d'épreuves ont été essayés tels qu'on le voit sur la figure 4.13.

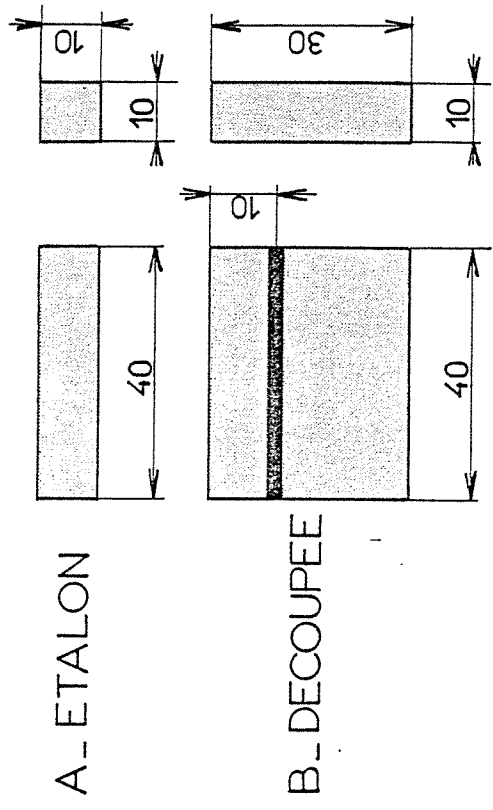
Les résultats sont les suivants :

les moyennes des résistances en traction du béton des séries A et B sont respectivement de 31,6 daN/cm<sup>2</sup> et 28,6 daN/cm<sup>2</sup>, alors que les écarts types sont respectivement de 4 et 6,4 daN/cm<sup>2</sup>.

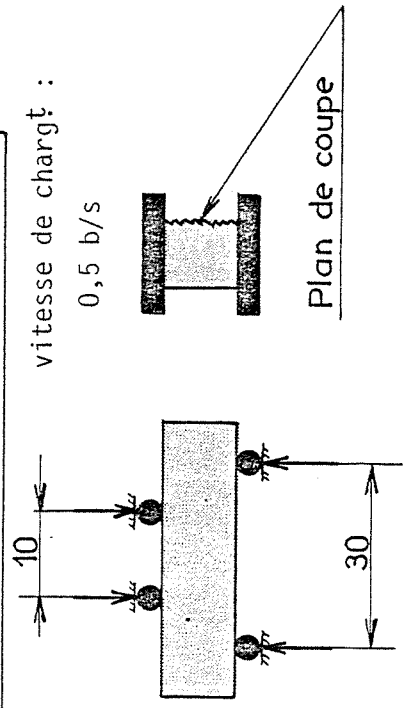
De tels résultats ne font pas, selon nous, apparaître d'écarts importants qui auraient traduit une perte de résistance en traction due à une microfissuration induite par le découpage thermique.

Il convient cependant de rester prudent dans cette interprétation. En effet, comme nous l'avons dit, c'est un "effet global" que nous mesurons et nous pouvons avoir une microfissuration importante sur une partie

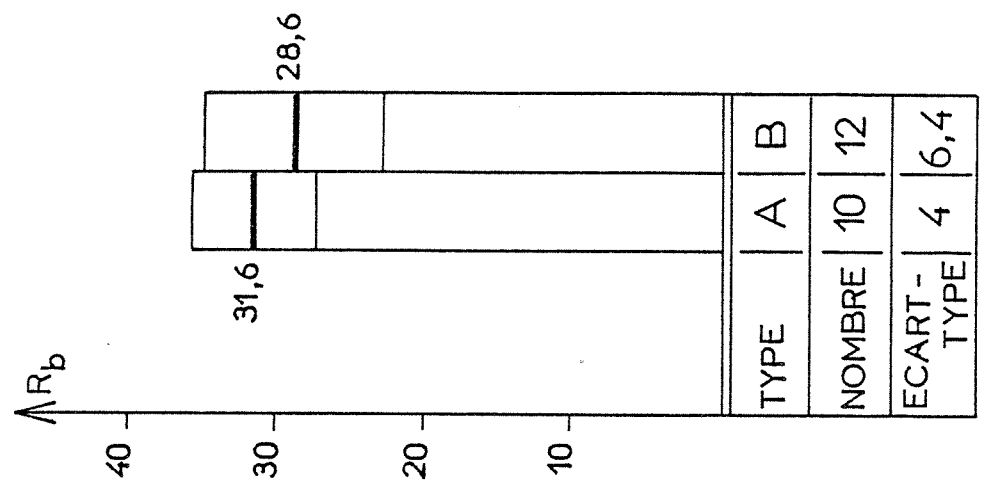
# EPROUVETTES



# MODE OPERATOIRE



# RESULTATS



de l'éprouvette (au voisinage immédiat de la coupe) et à l'inverse un renforcement léger de la résistance du fait de l'action de la température sur la formation des hydrates, ces deux effets se compensant sensiblement.

Une étude sur des bétons plus anciens, à l'aide d'un processus expérimental et de moyens d'investigations adaptés à l'étude de cette microfissuration nous permettrait de mieux préciser ce facteur.

### 3. L'ADHERENCE ACIER-BETON.

Lorsqu'une armature est découpée dans un ouvrage, on sait qu'elle ne peut être sollicitée en traction à sa contrainte admissible en satisfaisant aux conditions de compatibilité du calcul de béton armé (non glissement entre l'acier et le béton) qu'à une distance de la coupe égale à la longueur dite "d'ancrage ou de scellement droit" [35] [36].

Il est donc important de savoir si cette longueur  $\ell_d$  est modifiée et donc si l'adhérence acier-béton est altérée par le découpage thermique.

Préalablement, examinons l'évolution de la température dans l'armature en fonction d'un paramètre  $\lambda_d$ , rapport entre la distance à la coupe ( $x$ ) et la longueur de scellement droit  $\ell_d$ , (soit  $\lambda_d = \frac{x}{\ell_d}$ ).

On constate (fig. 4.15) que l'élévation de la température n'est véritablement sensible que pour des valeurs de  $\lambda_d$  inférieures à un tiers environ.

Pour nous placer dans le cas le plus défavorable, nous nous proposons de conduire notre étude (comparative) de l'adhérence pour des barres ancrées dans le béton suivant une longueur égale à dix fois leur diamètre soit sensiblement  $\lambda_d = \frac{1}{3}$ . (en effet, pour des armatures H.A.,  $\frac{10 \phi}{\ell_d} \neq \frac{1}{3}$ ).



TEMPERATURE

°C

ADHERENCE  
ACIER C1(φ10)

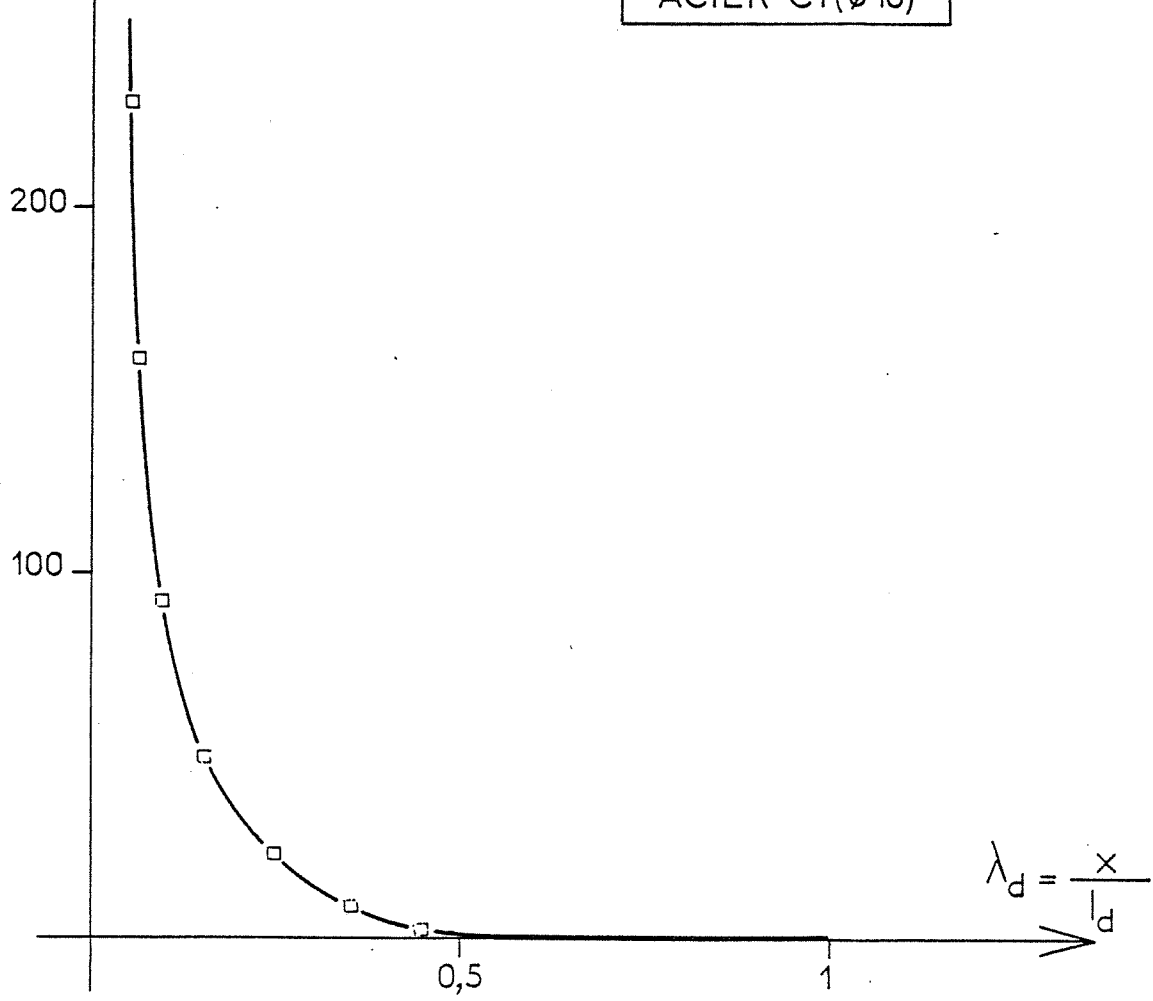


fig. 4.16 a . Essais d'adhérence : éprouvettes étalon

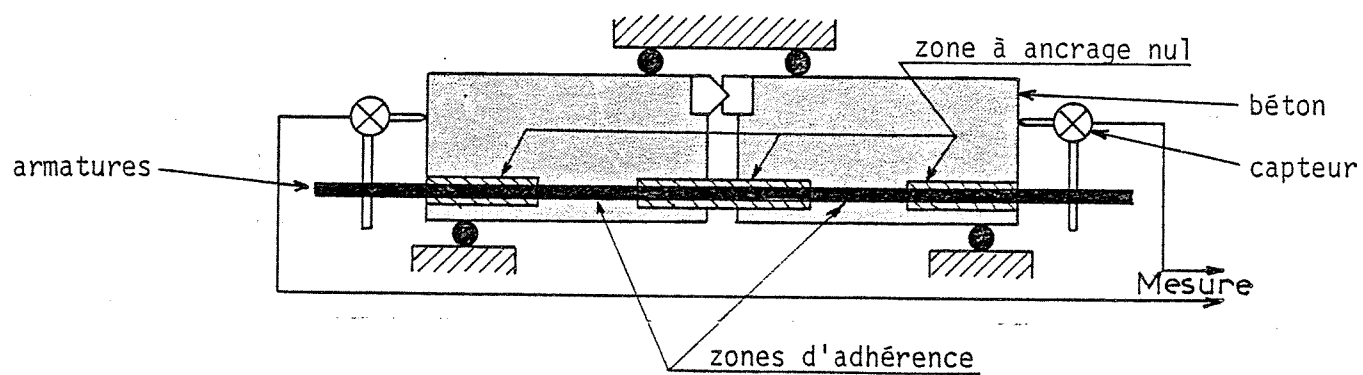
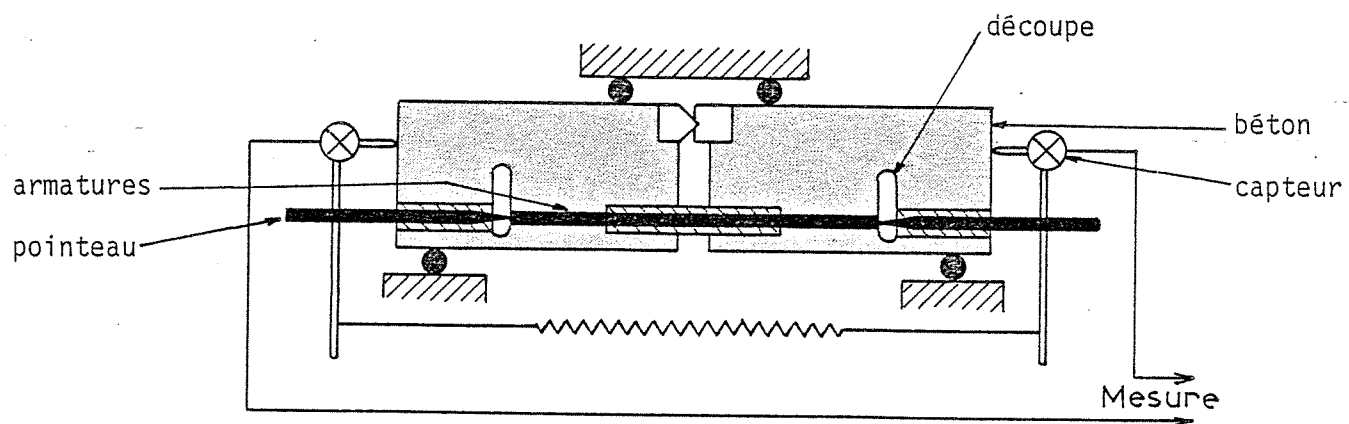


fig. 4.16 b . Essais d'adhérence : éprouvettes découpées



Les modèles et le processus expérimental sont caractérisés sur les figures 4.16 a, 4.16 b et les photos 4.18.

La figure 4.16 a détermine l'éprouvette étalon, sollicitée en flexion. L'armature, ancrée de part et d'autre dans les demi-poutres en béton, est munie de deux capteurs de déplacements destinés à mesurer les glissements relatifs de l'acier et du béton lors de la sollicitation.

La figure 4.16 b définit l'éprouvette découpée. Le découpage a été réalisé aux extrémités latérales des longueurs d'ancrage ; l'armature ainsi découpée a été remplacée, de part et d'autre de l'éprouvette par deux pointeaux en acier, centrés sur le béton, libres de se déplacer sans frottement et maintenus au contact de la partie d'armature restante par un ressort de faible tension. Les capteurs de déplacements préalablement utilisés sont maintenant montés sur les pointeaux et la sollicitation est exercée comme précédemment (même vitesse de montée en charge) (figure 4.16 a - photos).

Les résultats (affectés des dispersions relativement importantes et habituelles aux mesures d'adhérence acier-béton) [37] [38] [39] n'ont pas fait apparaître de différences, tant du point de vue de la charge de rupture que du point de vue de l'évolution des premiers glissements pour les charges intermédiaires.

#### 4. CONTRAINTES D'ORIGINE THERMIQUE.

Il nous a paru nécessaire de prolonger le calcul du champ de température dans le béton par la détermination du champ des contraintes en résultant (en fait, le même programme de calcul conduisait aux températures et aux contraintes). [40] [41]

Les hypothèses simplificatrices de notre calcul étaient les

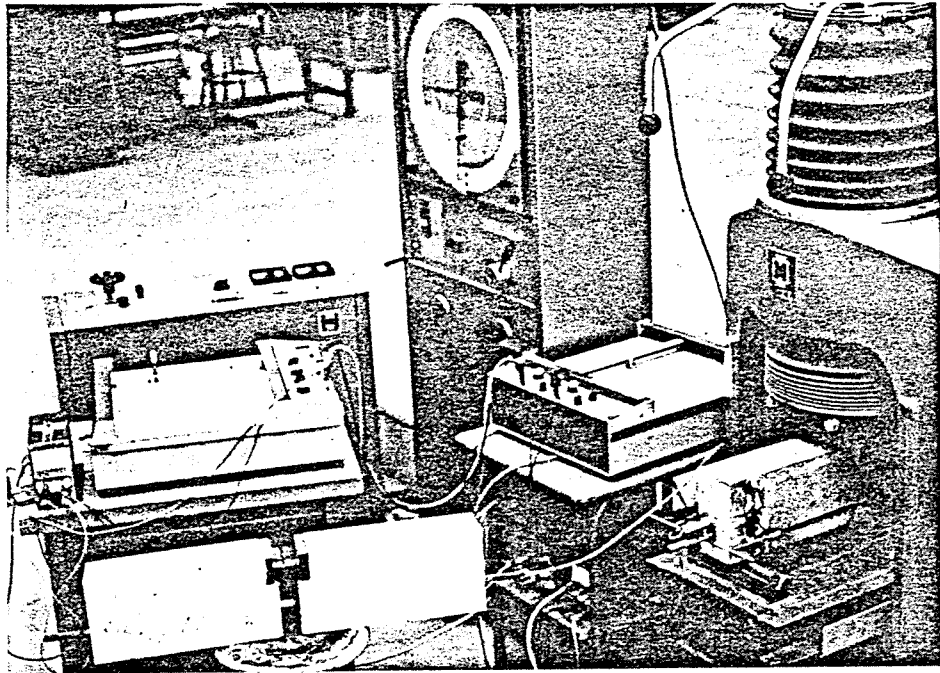
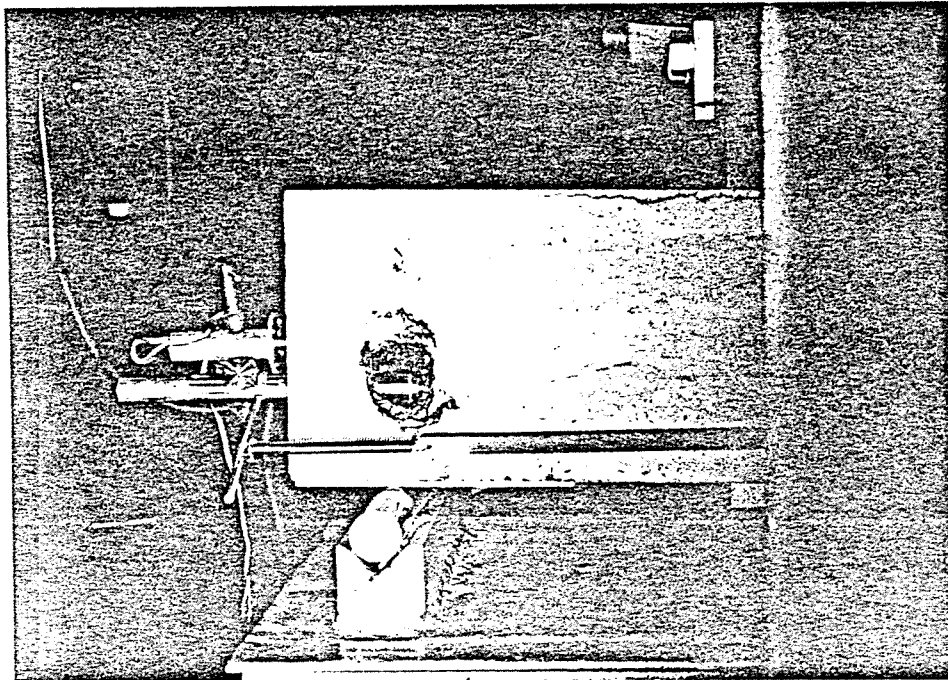


Fig. 4.18 - Essais d'adhérence :  
- Vue générale (en haut)  
- Le montage des capteurs de déplacement (en bas)



suivantes :

- Comportement mécanique du béton :

On admet un comportement élastique parfait jusqu'à sa rupture (module d'élasticité instantané  $E = 300\ 000$  bars).

- Comportement thermique du béton :

La conductivité et la diffusivité équivalentes sont supposées constantes dans le domaine ( $\lambda = 0,25$  kcal/mn.cm.°C et  $a = 0,40$  cm<sup>2</sup>/mn).

- Modèle de calcul et conditions aux limites.

Le flux est appliqué uniformément sur la coupe avec une densité  $\phi_0$  ( $\phi_0 = 0,10$  kcal/mn.cm<sup>2</sup>) durant un temps  $\tau$ .

Le béton constitue une plaque homogène, semi-infinie dans la direction perpendiculaire à la coupe (direction  $\vec{x}$ ).

L'épaisseur de cette plaque (direction  $\vec{z}$ ) et sa dimension transversale (direction  $\vec{y}$ ) sont petites par rapport à la longueur.

Les échanges thermiques avec le milieu extérieur suivant les faces latérales peuvent être négligés.

Enfin, on considèrera la plaque libre de se dilater transversalement.

Les principaux résultats de ce calcul apparaissent sur le tableau 4.20 et la figure 4.21.

La figure 4.21 nous donne les contraintes maximum atteintes pour deux configurations extrêmes de coupe thermique. Elle permet, ainsi, de définir un "fuseau probable" de ces contraintes d'origine thermique. On a aussi porté sur cette figure les frontières des domaines ayant subi, pour les mêmes configurations de coupes, un échauffement supérieur à 110°C et à 50°C (zones hachurées).

Il est intéressant de reporter, sur ce fuseau les résistances caractéristiques et admissibles du béton utilisé.

\*\*\* CALCUL DES CONTRAINTES DANS LE BETON \*\*\*

MODUL D'ELASTICITE = .36E+06 COEFF. DE POISSON = .25 COEFF. DE DILATATION = .10E-04

CONDUCTIVITE = .28E-03 KCAL/HR\*CM\*DEG.C DIFFUSIVITE = .40 CM2/HR

FLUX IMPULSE = .10 KCAL/HR\*CM\*HR DUREE DU FLUX = 90 SECONDES

X (CM)	.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	15.0	20.0	30.0
T = .25	94.7	6.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = .50	247.4	49.2	.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = .75	383.0	115.0	3.3	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.00	515.7	189.5	12.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.25	632.9	266.6	27.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.50	741.7	343.8	46.9	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 1.75	782.7	413.7	70.9	.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.00	692.0	445.5	97.9	.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.25	642.3	452.6	124.7	1.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.50	601.3	449.4	146.2	3.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 2.75	567.2	441.7	167.6	5.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.00	538.2	432.2	183.2	7.6	.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.25	513.3	422.1	195.4	10.6	.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.50	491.5	412.0	205.0	14.1	.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 3.75	472.3	402.1	212.5	18.0	.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.00	455.2	392.6	218.2	22.1	.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.25	439.9	383.6	222.5	25.4	.9	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.50	426.0	375.0	225.8	28.7	1.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 4.75	413.3	366.9	228.2	32.1	1.7	.0	.0	.0	.0	.0
T = 5.00	401.8	359.2	229.9	35.3	2.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 5.25	391.6	352.3	231.3	38.4	2.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 5.50	382.6	345.6	232.5	41.5	3.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 5.75	374.7	339.0	233.2	44.6	4.1	.0	.0	.0	.0	.0
T = 6.00	367.8	332.3	233.8	47.7	4.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 6.25	361.9	325.6	234.2	50.8	5.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 6.50	356.0	318.9	234.5	53.9	6.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 6.75	350.1	312.2	234.6	57.0	7.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 7.00	344.2	305.5	234.6	60.1	8.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 7.25	338.3	298.8	234.5	63.2	8.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 7.50	332.4	292.1	234.4	66.3	9.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 7.75	326.5	285.4	234.3	69.4	10.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 8.00	320.6	278.7	234.2	72.5	11.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 8.25	314.7	272.0	234.1	75.6	12.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 8.50	308.8	265.3	234.0	78.7	12.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 8.75	302.9	258.6	233.9	81.8	13.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 9.00	297.0	251.9	233.8	84.9	14.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 9.25	291.1	245.2	233.7	88.0	15.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 9.50	285.2	238.5	233.6	91.1	16.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 9.75	279.3	231.8	233.5	94.2	16.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 10.00	273.4	225.1	233.4	97.3	17.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 10.25	267.5	218.4	233.3	100.4	18.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 10.50	261.6	211.7	233.2	103.5	19.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 10.75	255.7	205.0	233.1	106.6	20.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 11.00	249.8	198.3	233.0	109.7	20.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 11.25	243.9	191.6	232.9	112.8	21.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 11.50	238.0	184.9	232.8	115.9	22.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 11.75	232.1	178.2	232.7	119.0	23.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 12.00	226.2	171.5	232.6	122.1	24.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 12.25	220.3	164.8	232.5	125.2	24.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 12.50	214.4	158.1	232.4	128.3	25.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 12.75	208.5	151.4	232.3	131.4	26.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 13.00	202.6	144.7	232.2	134.5	27.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 13.25	196.7	138.0	232.1	137.6	28.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 13.50	190.8	131.3	232.0	140.7	28.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 13.75	184.9	124.6	231.9	143.8	29.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 14.00	179.0	117.9	231.8	146.9	30.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 14.25	173.1	111.2	231.7	150.0	31.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 14.50	167.2	104.5	231.6	153.1	32.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 14.75	161.3	97.8	231.5	156.2	32.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 15.00	155.4	91.1	231.4	159.3	33.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 15.25	149.5	84.4	231.3	162.4	34.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 15.50	143.6	77.7	231.2	165.5	35.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 15.75	137.7	71.0	231.1	168.6	36.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 16.00	131.8	64.3	231.0	171.7	36.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 16.25	125.9	57.6	230.9	174.8	37.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 16.50	120.0	50.9	230.8	177.9	38.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 16.75	114.1	44.2	230.7	181.0	39.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 17.00	108.2	37.5	230.6	184.1	40.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 17.25	102.3	30.8	230.5	187.2	40.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 17.50	96.4	24.1	230.4	190.3	41.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 17.75	90.5	17.4	230.3	193.4	42.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 18.00	84.6	10.7	230.2	196.5	43.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 18.25	78.7	4.0	230.1	199.6	44.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 18.50	72.8	-2.7	230.0	202.7	44.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 18.75	66.9	-9.4	229.9	205.8	45.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 19.00	61.0	-16.1	229.8	208.9	46.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 19.25	55.1	-22.8	229.7	212.0	47.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 19.50	49.2	-29.5	229.6	215.1	48.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 19.75	43.3	-36.2	229.5	218.2	48.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 20.00	37.4	-42.9	229.4	221.3	49.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 20.25	31.5	-49.6	229.3	224.4	50.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 20.50	25.6	-56.3	229.2	227.5	51.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 20.75	19.7	-63.0	229.1	230.6	52.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 21.00	13.8	-69.7	229.0	233.7	52.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 21.25	7.9	-76.4	228.9	236.8	53.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 21.50	2.0	-83.1	228.8	239.9	54.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 21.75	-3.9	-89.8	228.7	243.0	55.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 22.00	-9.8	-96.5	228.6	246.1	56.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 22.25	-15.7	-103.2	228.5	249.2	56.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 22.50	-21.6	-109.9	228.4	252.3	57.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 22.75	-27.5	-116.6	228.3	255.4	58.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 23.00	-33.4	-123.3	228.2	258.5	59.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 23.25	-39.3	-130.0	228.1	261.6	60.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 23.50	-45.2	-136.7	228.0	264.7	60.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 23.75	-51.1	-143.4	227.9	267.8	61.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 24.00	-57.0	-150.1	227.8	270.9	62.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 24.25	-62.9	-156.8	227.7	274.0	63.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 24.50	-68.8	-163.5	227.6	277.1	64.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 24.75	-74.7	-170.2	227.5	280.2	64.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 25.00	-80.6	-176.9	227.4	283.3	65.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 25.25	-86.5	-183.6	227.3	286.4	66.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 25.50	-92.4	-190.3	227.2	289.5	67.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 25.75	-98.3	-197.0	227.1	292.6	68.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 26.00	-104.2	-203.7	227.0	295.7	68.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 26.25	-110.1	-210.4	226.9	298.8	69.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 26.50	-116.0	-217.1	226.8	301.9	70.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 26.75	-121.9	-223.8	226.7	305.0	71.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 27.00	-127.8	-230.5	226.6	308.1	72.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 27.25	-133.7	-237.2	226.5	311.2	72.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 27.50	-139.6	-243.9	226.4	314.3	73.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 27.75	-145.5	-250.6	226.3	317.4	74.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 28.00	-151.4	-257.3	226.2	320.5	75.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 28.25	-157.3	-264.0	226.1	323.6	76.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 28.50	-163.2	-270.7	226.0	326.7	76.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 28.75	-169.1	-277.4	225.9	329.8	77.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 29.00	-175.0	-284.1	225.8	332.9	78.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 29.25	-180.9	-290.8	225.7	336.0	79.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 29.50	-186.8	-297.5	225.6	339.1	80.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 29.75	-192.7	-304.2	225.5	342.2	80.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 30.00	-198.6	-310.9	225.4	345.3	81.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 30.25	-204.5	-317.6	225.3	348.4	82.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 30.50	-210.4	-324.3	225.2	351.5	83.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 30.75	-216.3	-331.0	225.1	354.6	84.0	.0	.0	.0	.0	.0
T = 31.00	-222.2	-337.7	225.0	357.7	84.8	.0	.0	.0	.0	.0
T = 31.25	-228.1	-344.4	224.9	360.8	85.6	.0	.0	.0	.0	.0
T = 31.50	-234.0	-351.1	224.8	363.9	86.4	.0	.0	.0	.0	.0
T = 31.75	-239.9	-357.8	224.7	367.0	87.2	.0	.0	.0	.0	.0
T = 32.00	-245.8	-364.5	2							

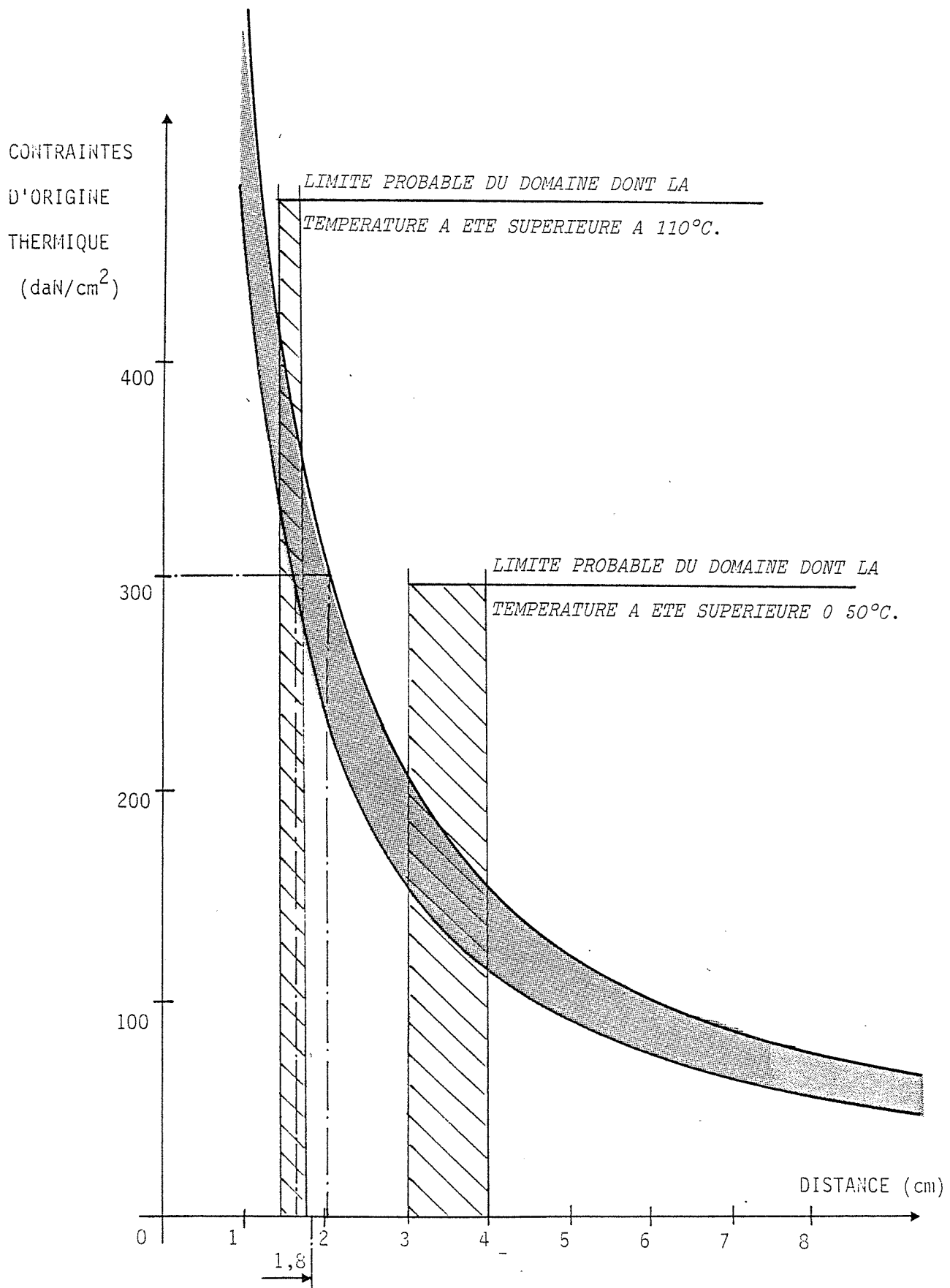


fig. 4.21 Fuseau des contraintes maximales dues au découpage thermique en fonction de la distance à la coupe.

Ainsi, par exemple, observons le cas d'un béton dosé à 400 Kilogrammes de ciment (CPA de classe 325) par mètre cube. A sa résistance nominale à la compression à 28 jours ( $\sigma'_{28}$  définie selon CCBA 68) égale à 300 daN/cm<sup>2</sup> correspond donc un domaine critique calculé d'amplitude égale à 1,8 cm  $\pm$  0,2 cm. (Par ailleurs, la frontière de ce domaine a subit un échauffement de 100°C environ).

Il convient cependant de remarquer que la zone altérée ainsi calculée semble assez largement supérieure à celle que l'on peut déterminer expérimentalement après avoir coupé thermiquement un tel béton et l'avoir soumis à des mesures locales de résistance au voisinage de la coupe (scléromètre, compression d'échantillons prismatiques, ...).



#### D. CONCLUSION

Nous tenons à l'affirmer loyalement : l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux subissant un découpage thermique, telle que nous l'avons relatée dans les pages précédentes, ne prétend pas apporter une contribution suffisante à la connaissance des effets mécaniques du découpage thermique (notamment dans le proche voisinage de la coupe - quelques millimètres -).

Dans notre esprit, elle ne constitue qu'une étude préliminaire qui a cependant permis, à travers des modèles et des expérimentations très simples, de quantifier - la plupart du temps par excès - une image de la réalité physique dont la connaissance était nécessaire lors de l'exécution de certains travaux pour lesquels il était impératif, selon nous, de définir un "domaine critique".

Cette étude permet notamment d'affirmer le caractère très local des effets du découpage thermique. Il a pu être montré, d'une part, que la coupe n'altère pas la liaison mécanique par adhérence entre l'acier et le béton (au sens des méthodes de calcul du béton armé) et que, d'autre part, les variations de résistance à la rupture du béton restent globalement inférieures à dix pour cent environ dès que l'élément présente des dimensions de l'ordre de cent à cent cinquante millimètres dans la direction de la propagation du flux de chaleur (ce qui est le cas général dans les constructions).



## CHAPITRE V

---

### LE DECOUPAGE THERMIQUE DES STRUCTURES

## A. PRELIMINAIRE

L'origine des applications industrielles du découpage thermique dans les domaines du Bâtiment et des Travaux Publics réside toujours dans l'importance d'une ou plusieurs conditions liées :

1) A la stabilité de la structure :

Il s'agit, pour l'essentiel, la plupart du temps, de conditions d'équilibre statique pendant les travaux et, pour l'ouvrage futur, de conditions de résistance de la partie conservée.

2) A l'environnement et au site :

Ce sont alors presque toujours des conditions tendant à limiter les nuisances et, plus particulièrement, le bruit et les vibrations.

3) Aux impératifs chronologiques :

Les conditions de délais sont souvent déterminantes dans le choix des méthodes et des solutions.

4) A la sécurité du chantier :

En effet, une démolition en gros éléments réduit le nombre de postes de travail et peut donc permettre de les localiser dans les zones parfaitement stables et accessibles où les fonctions de sécurité seront mieux assurées.

Il en résulte que les grands domaines d'application sont, en fait, les suivants : [42]

- 1°) le démantèlement complet d'ouvrages en béton armé ou précontraint, le découpage pouvant d'ailleurs être utilisé seul ou avec d'autres techniques.
- 2°) la destruction d'ouvrages provisoires.
- 3°) la modification de constructions pour des raisons esthétiques, fonctionnelles ou réglementaires (adaptation de volumes à l'évolution des services qu'ils abritent, mise en conformité avec des règles de sécurité incendie, etc...)
- 4°) la modification des constructions pour des raisons de stabilité (structures hyperstatiques soumises à des dénivellations d'appuis accidentelles.)
- 5°) la destruction de parties d'ouvrages sinistrés (séismes, incendie, explosions, ...)
- 6°) quelques cas plus particuliers tels que l'exécution de travaux sous-marins, le découpage de blocs rocheux, le renforcement d'ouvrages en béton armé, etc...

Dans le développement de ce chapitre, nous aborderons séparément la démolition du béton armé et la démolition du béton précontraint.

Concernant le béton armé, nous explorerons les grands domaines précédemment énoncés à travers, pour chacun d'eux l'observation d'un exemple réel qu'il nous a été donné d'étudier et qui, à l'époque de sa réalisation a constitué dans la plupart des cas, un prototype original.

Nous porterons notre attention, ensuite, sur la réflexion prospective conduite à propos de grands projets (non encore réalisés) à l'étude desquels nous avons collaboré (centrales nucléaires, tours hertziennes, cheminées de centrales thermiques).

Concernant le béton précontraint, nous nous préoccupons d'abord de l'étude du comportement d'un élément précontraint lors de sa coupe. Nous examinerons, ensuite, le démantèlement de la première grande ossature à poutres précontraintes démolie.

## B.- LA DEMOLITION DES OUVRAGES EN BETON ARME

### 1 ANALYSE DES DIFFERENTS TYPES D'OUVRAGES . (A PARTIR D'ETUDES DE CAS) .

#### 1.1 Démantèlements complets.

##### 1.1.1 Démolition d'un pont-route sur voies de chemin de fer.

Le pont en béton armé à poutres sous chaussée de deux traverses continues représentées sur la figure 5.6 était insuffisant pour assurer la circulation. Il a été doublé par un pont dalle en béton précontraint ; rendu inutile, il fallait le démolir sans gêner la circulation routière sur le nouvel ouvrage et sans arrêter ni ralentir la circulation ferroviaire (comportant notamment le passage de trains rapides type "turbotrains") débouchant, sans visibilité, des deux tunnels adjacents.

Le mode opératoire a été le suivant :

- Réalisation d'un ouvrage provisoire métallique reposant sur les poutres longitudinales puis sur les files d'appui du tablier.
- Etablissement d'une liaison mécanique entre cet ouvrage et les dalles et les poutres transversales du pont à démolir.
- Découpage (au gabarit de transport) de ces éléments ainsi suspendus.
- Découpage des poutres longitudinales et enlèvement (ainsi que l'ouvrage provisoire.)
- Découpage et enlèvement des piliers centraux.

L'ensemble de l'opération a été réalisée en six jours, sous

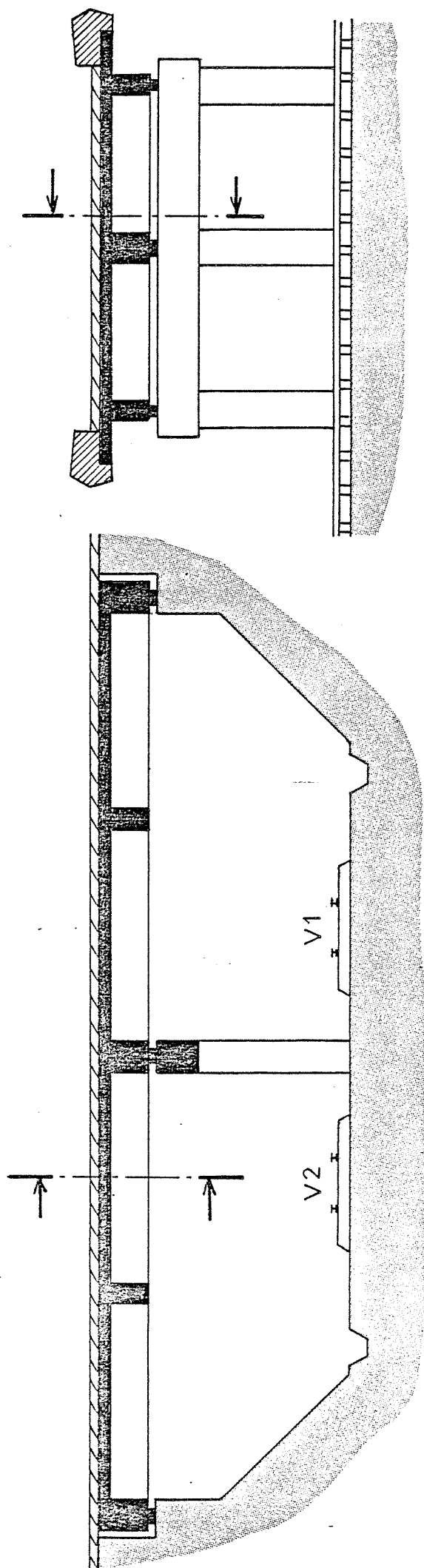
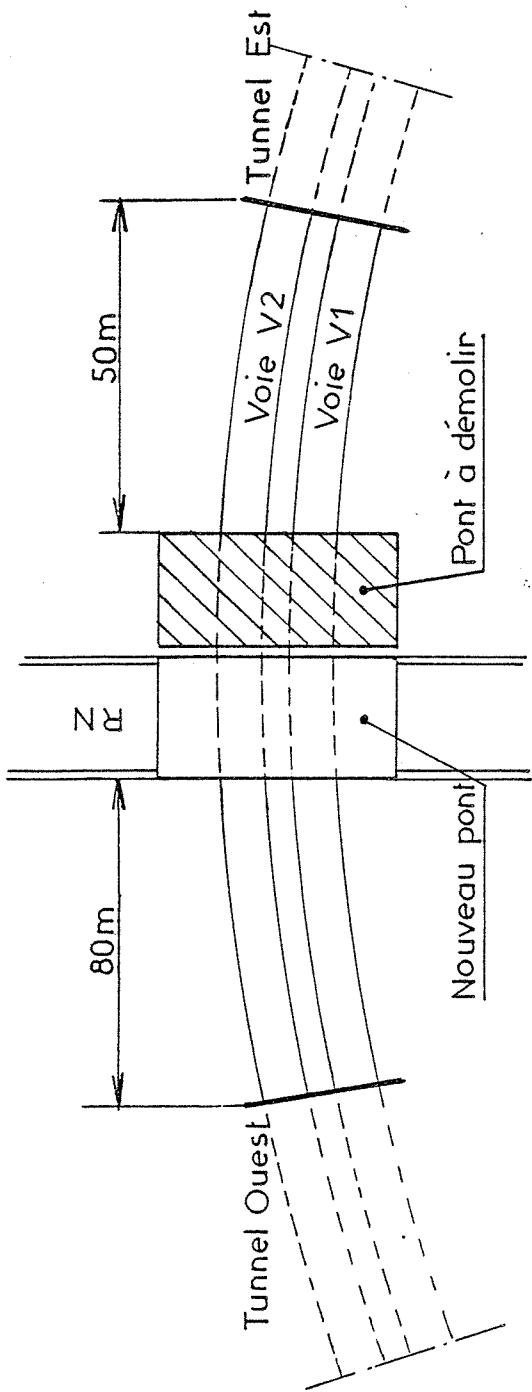


Fig. 5.6



le contrôle strict des services de l'Équipement et de la S.N.C.F.. Elle n'a entraîné aucun ralentissement du trafic ferroviaire (et, a fortiori, du trafic routier) et s'est effectuée dans le plus strict respect de conditions de sécurité draconiennes. Par ailleurs, cette solution s'était avérée, à l'appel d'offres, moins coûteuse que l'exécution, beaucoup plus longue, par des méthodes traditionnelles.

#### 1.1.2 Démolition d'une ossature d'immeuble.

L'ensemble de la structure était soutenu par sept portiques en béton armé (hauteur 21 m - portée 16 m) qui subsistaient après démolition par procédé traditionnel du reste du bâtiment. L'ouvrage, pris entre deux artères à forte circulation, était mitoyen d'un hôtel et d'un immeuble d'habitation et de bureaux (problèmes de sécurité et de nuisances.)

Après montage des palées de stabilité destinées à assurer les contreventements provisoires et calculées comme tel, le découpage pour la dépose puis la mise au gabarit routier ont été conduits, tels qu'indiqués sur la figure 5.8, suivant un ordre compatible avec la sécurité du chantier et du voisinage.

L'ensemble de l'opération a nécessité sept jours.

#### 1.2 Démolition de structures provisoires.

L'enlèvement des ouvrages provisoires pose toujours de façon aiguë des problèmes de délais, de coût et quelques fois aussi de nuisances. Il peut en être ainsi, par exemple, de parois moulées rendues partiellement inutiles et qui se prêtent bien à un découpage thermique silencieux et rapide.

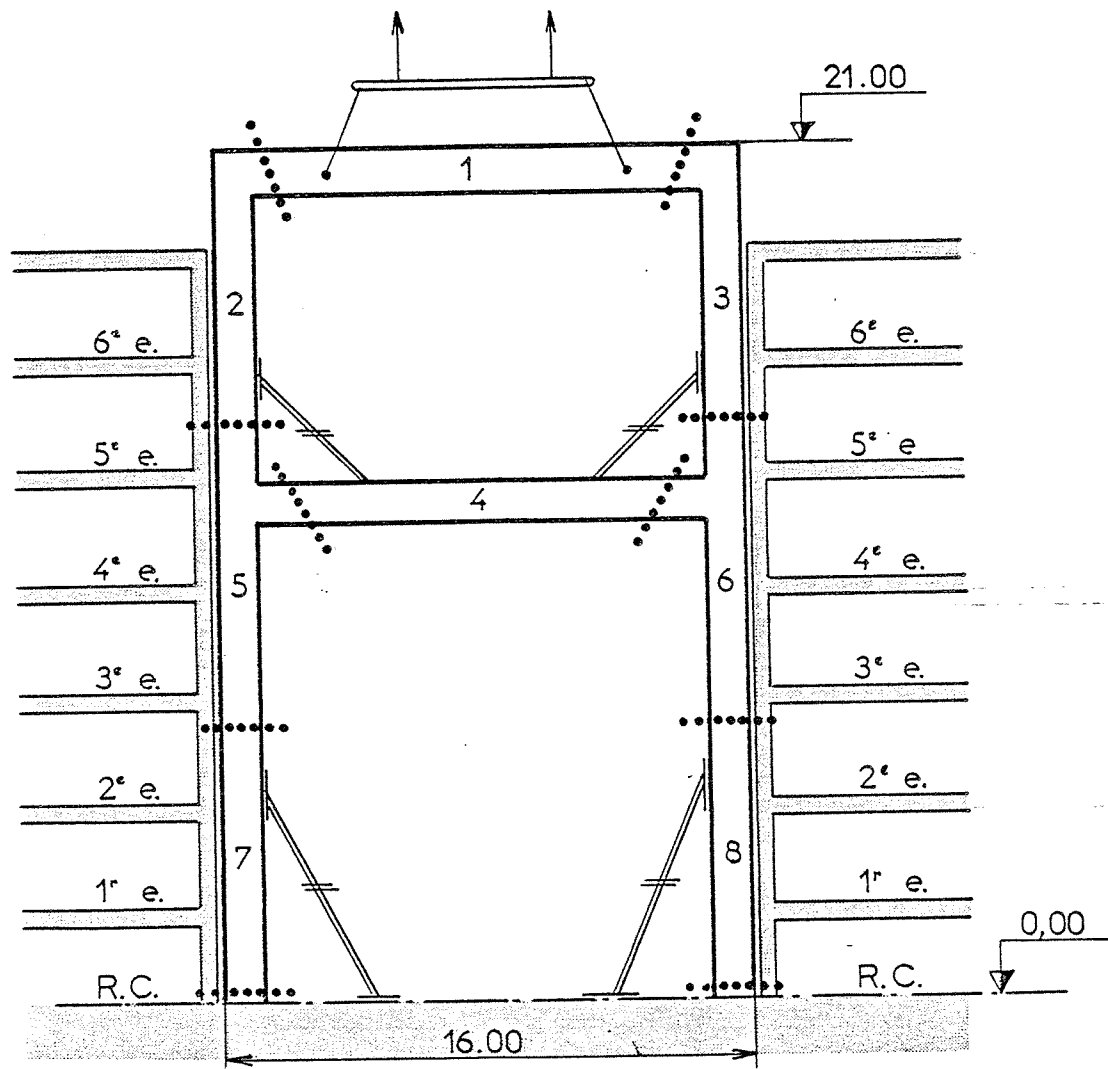


fig. 5.8

Démolition d'une ossature d'immeuble.

Un autre exemple peut être cité : la suppression du portique de lancement des caissons en béton précontraint (d'un poids de deux mille tonnes) destinés à réaliser, pour une ligne de métro, une traversée sous fluviale de la Seine. De quinze mètres de hauteur et de vingt mètres de portée, le portique en béton armé devait être préalablement contreventé afin d'assurer la stabilité durant les phases intermédiaires. Il était découpé en trois blocs (figures 5.10 et 5.11).

La poutre supérieure avait une largeur de table de 2,70 m et une hauteur de 2,20 mètres ; les épaisseurs, au droit des coupes, variaient de quarante à quatre-vingts centimètres.

L'ensemble de l'opération planifiée par les conditions très strictes de la navigation fluviale, fut réalisé par deux découpeurs en quatre jours, en toute sécurité.

### 1.3 Modifications des constructions pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques.

Dans ces cas-là, le maintien du service de l'ouvrage ainsi que le respect des conditions de vie de l'utilisateur et de la qualité des marchandises ou des matériels stockés conditionnent toujours largement la méthode d'intervention.

Ainsi, par exemple, l'agrandissement, par surélévation, d'un central téléphonique en fonctionnement est une opération délicate tant sont sensibles aux vibrations les appareils et les circuits installés. Celle présentée ici l'était plus encore dans la mesure où, préalablement à la construction, il fallait démolir l'étage supérieur

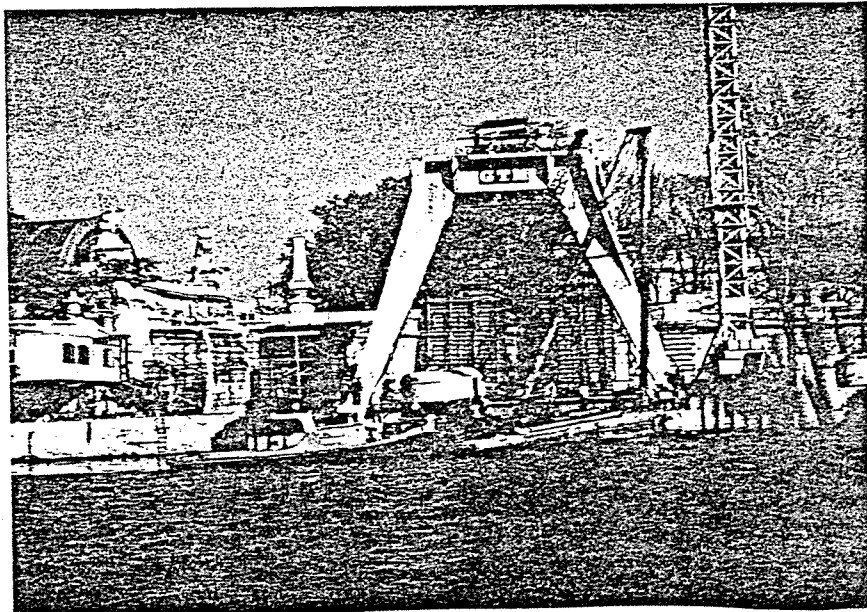
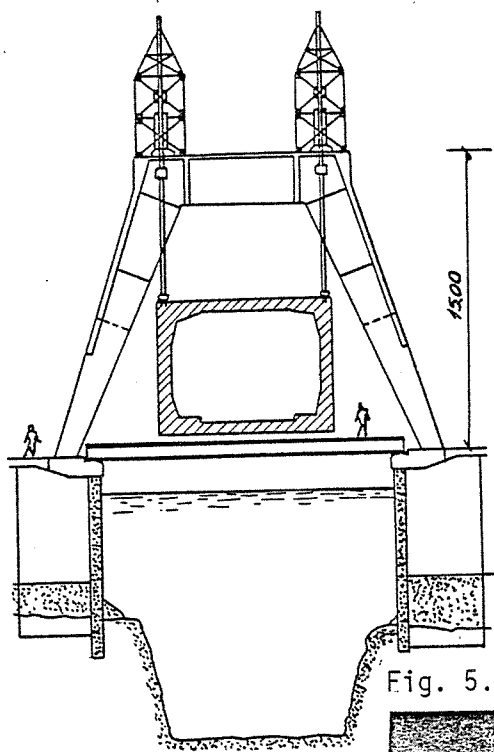


Fig. 5.10 a et b : VUES D'ENSEMBLE DE LA STRUCTURE.

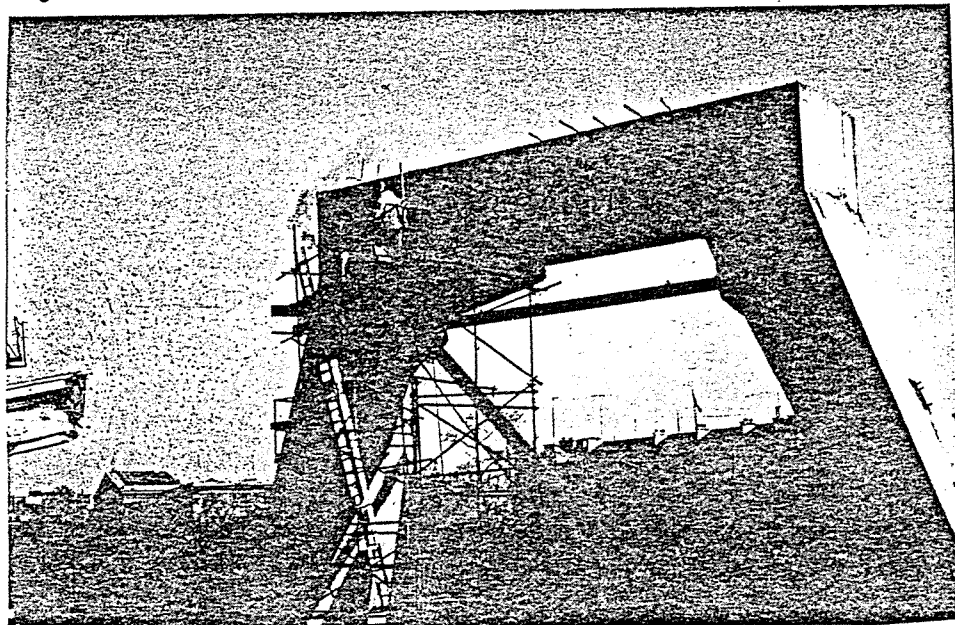


Fig. 5.10 c et d : DECOUPAGE DE LA POUTRE SUPERIEURE.

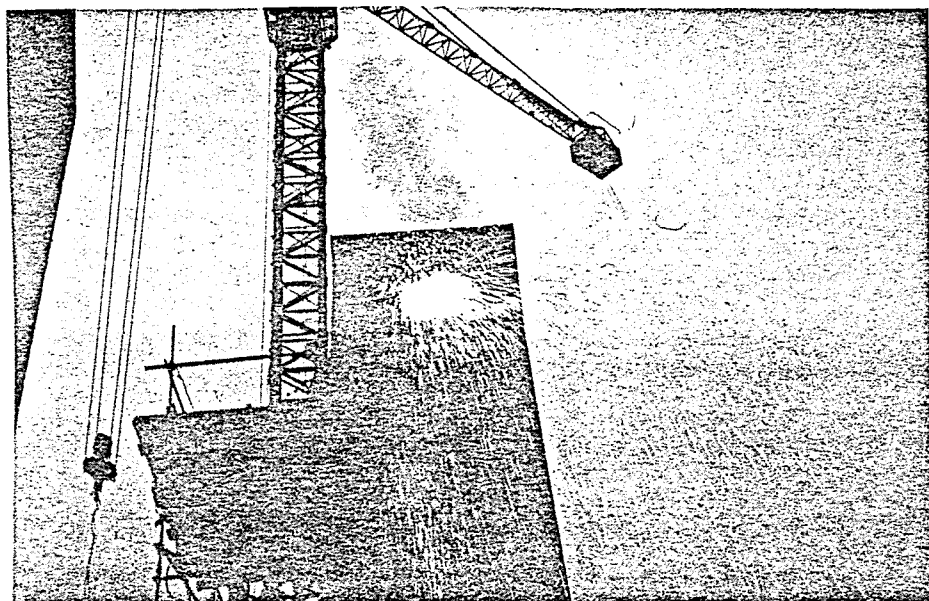


Fig.5.11 a et b

ENLEVEMENT DE LA POUTRE  
SUPERIEURE DECOUPEE  
(1.400.000 N)

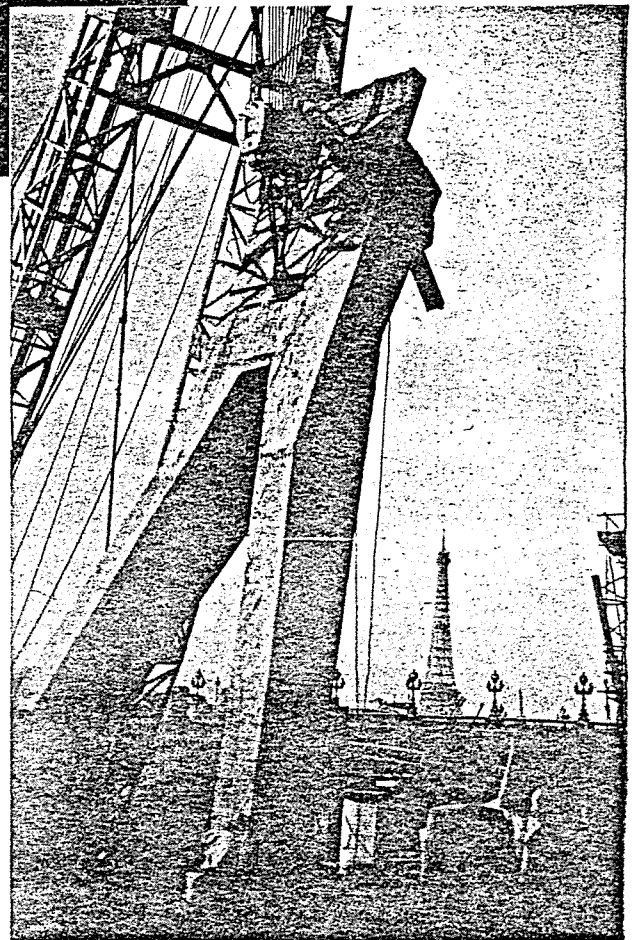
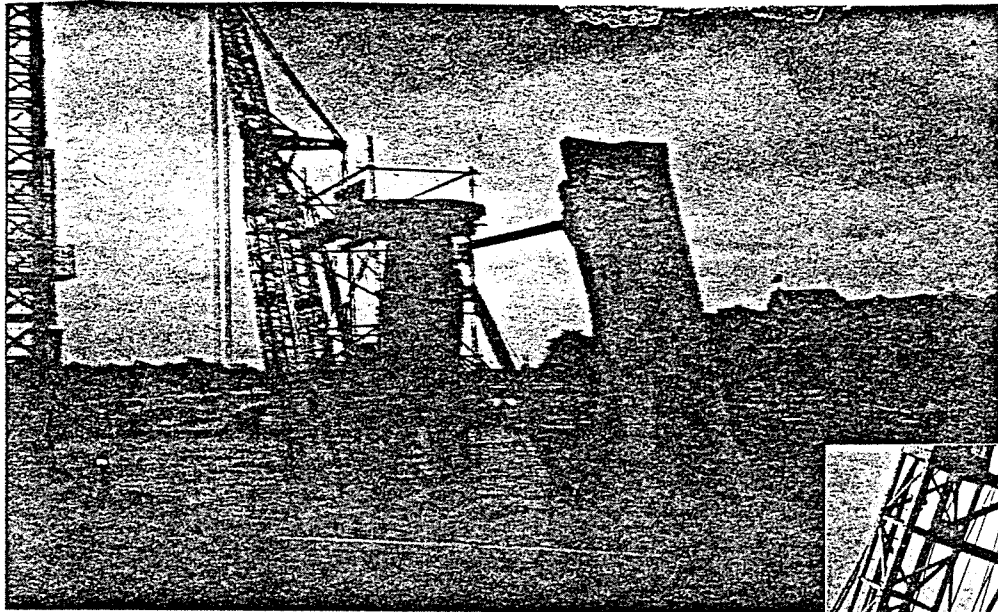
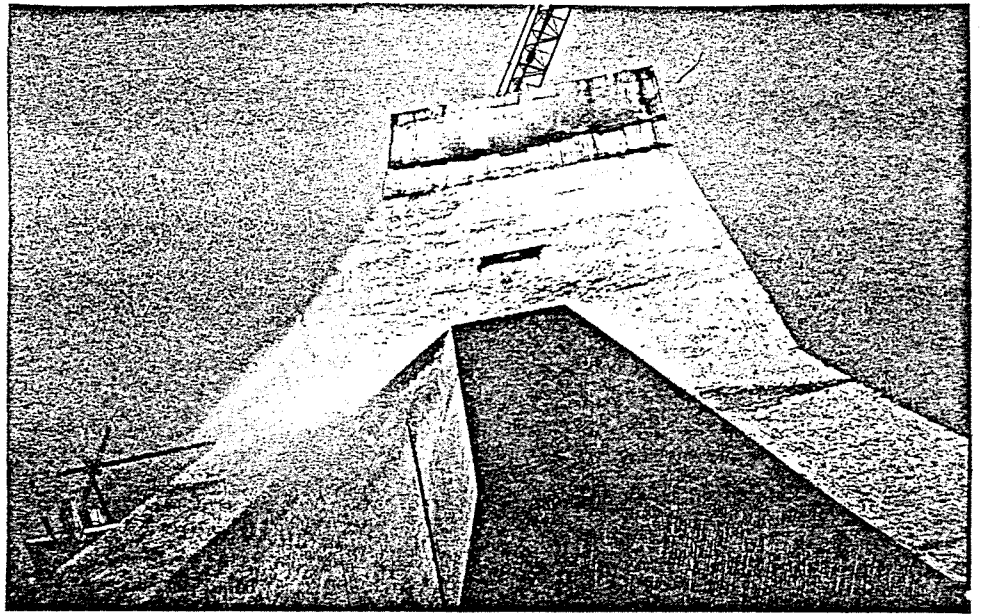


Fig. 5.11 C

FIN DE L'OPERATION DE DECOUPAGE.

du bâtiment comportant déjà cinq niveaux.

La lourde structure à poutres et poteaux en béton armé est représentée sur la figure 5.13 ; les sections moyennes sont de 80 x 25 cm pour les poutres et de 40 x 50 cm pour les poteaux.

Par ailleurs, le Central était mitoyen, sur les quatre murs d'immeubles résidentiels et du Conservatoire National de Musique. Il n'avait pas d'accès direct sur les rues voisines. (fig. 5.13 )

L'installation d'une grue étant impossible, tout le béton armé (poutres, dalles et poteaux) dut être découpé en huit cents blocs de trois cents à cinq cents kilogrammes pour être évacués par palans électriques.

La durée d'intervention, conditionnée surtout par les difficultés d'évacuation, fut de trois mois.

Cet ouvrage est particulièrement représentatif d'un large domaine d'opérations effectuées dans des structures où le bruit et les vibrations constituent des nuisances inadmissibles et incompatibles avec le service (centres de calculs, hôpitaux, centres militaires opérationnels,...). Le plus souvent la présence du béton à démolir suffisait à condamner le projet. Après quelques opérations très spectaculaires, ces travaux sont désormais, ces dernières années, devenus si courants qu'il n'apparaît plus nécessaire de les présenter longuement.

Plan de masse

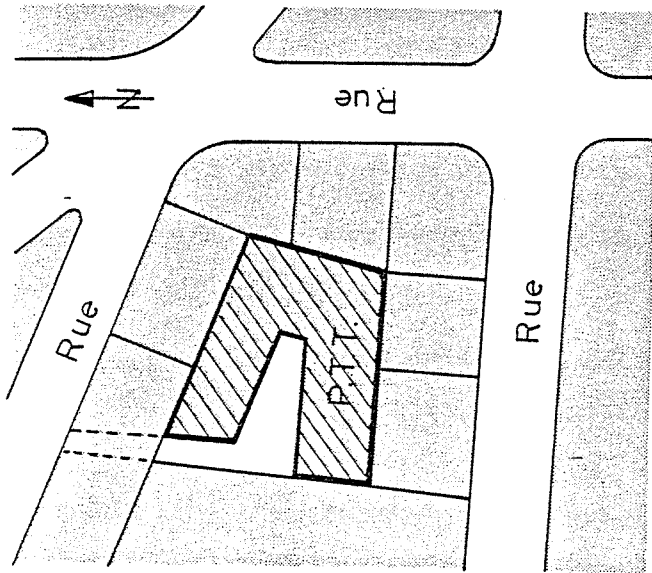
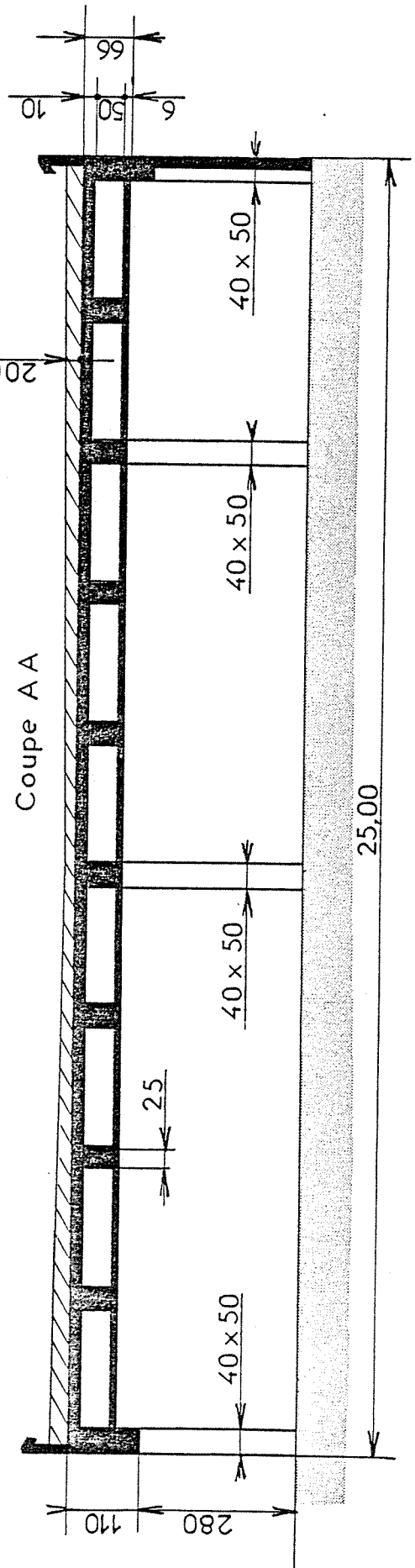
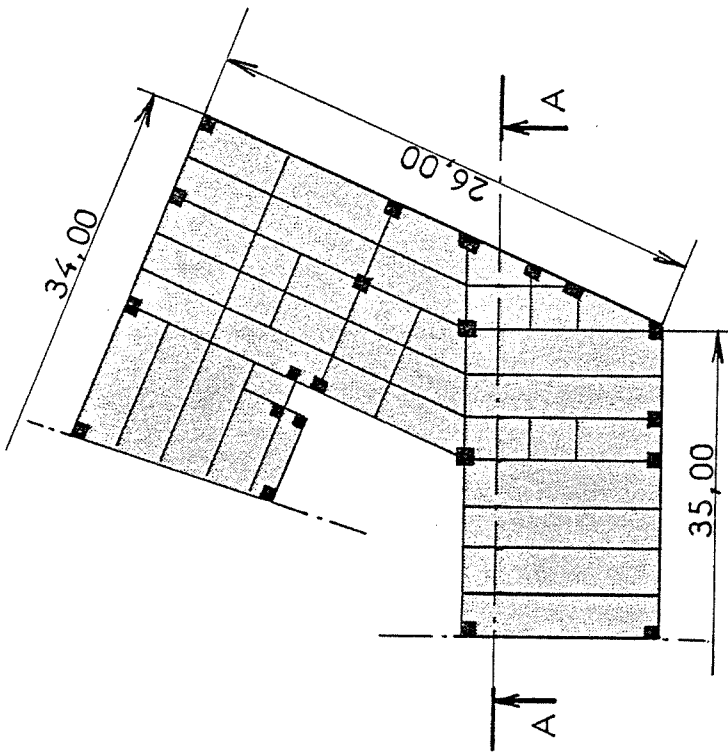


Schéma de la poutraison (partie Est)



#### 1.4 Modification des constructions pour des raisons de stabilité;

Deux causes, en fait, peuvent être à l'origine de l'application du découpage thermique qui sera alors utilisé pour réaliser des discontinuités dans la structure sous la forme :

- 1) de joints de dilatation : sur des éléments soumis à des variations de température (et difficilement accessibles à un sciage mécanique) ;
- 2) de joints de rupture : dont la mission est, en général, de permettre à la structure de s'adapter (sans accroître ses sollicitations) aux effets d'une dénivellation d'appui due à des tassements différentiels.

Observons une opération conduite sur une ossature poutre-poteau d'un important parking souterrain. L'excavation avait découvert une importante couche d'argile qui, décomprimée, allait subir un lent gonflement dont l'importance allait se révéler supérieure aux prévisions les plus pessimistes.

Pour réduire les dommages causés à la structure, il fut, entre autres, nécessaire de réduire le degré d'hyperstaticité de la structure par création de joints supplémentaires (le processus d'élaboration de ces joints est décrit figure 5.15).

Cependant, il convient de remarquer que de telles applications ne peuvent être que très particulières et exceptionnelles. Elles nécessitent bien évidemment la connaissance parfaite du comportement mécanique de la structure (adaptation plastique du béton,...) avant et après opération et un contrôle très strict de l'exécution.

Elle permet cependant de proposer une solution à des problèmes qui sont importants mais, heureusement, exceptionnels.



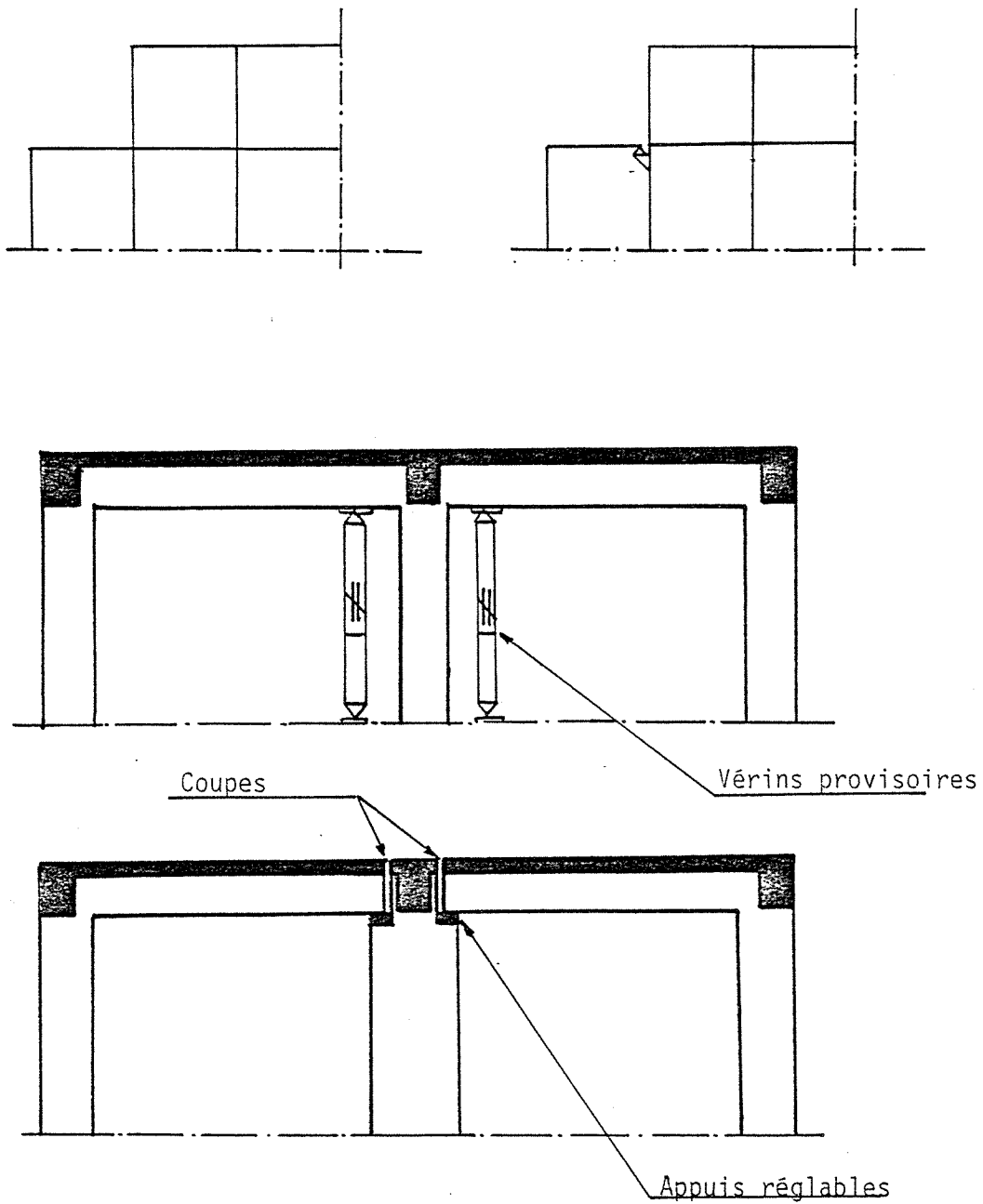


fig. 5.15 Exemples de réduction (par découpage) de l'hyperstaticité de structures subissant des dénivellations d'appuis accidentelles.

### 1.5 Destruction de parties d'ouvrages sinistrés.

Les ingénieurs ont longtemps négligé ce domaine de recherche : comment traiter un ouvrage ayant subi un sinistre grave (séisme, incendie , explosion .)

De grandes catastrophes récentes mettant en cause d'importantes structures en béton armé (tremblements de terre en Turquie, Roumanie et Chine notamment, incendie d'un grand immeuble à Paris) ont singulièrement mis l'accent sur ce problème grave en l'explicitant, essentiellement, sous deux formes :

1°) Comment séparer les parties reconnues stables du reste de la structure endommagée sans que cette opération entraîne la ruine de l'ensemble ou des prises de risques importantes.

2°) Comment supprimer rapidement et en toute sécurité les parties d'ouvrages déclarées sinistrées.

Le résultat de tout sinistre, pour une structure, peut se ramener :

- à des variations de positions géométriques des liaisons extérieures (dénivellations d'appui par exemple)
- à la dégradation de ces liaisons mécaniques externes (l'encastrement initial devient articulation après sinistre.)
- à la création, dans la structure, de "liaisons" internes supplémentaires dues à des plastifications de sections (créations de rotules notamment).

- à la "disparition" de certains éléments de cette structure par rupture ou par instabilité de forme (flambement de poteaux par exemple).

La conséquence est en général d'augmenter les sollicitations des sections et de réduire le degré d'hyperstaticité (on peut d'ailleurs arriver ainsi à des structures isostatiques... voire hypostatiques qui ne sont plus stables.)

La démolition d'ouvrages sinistrés nécessite :

1. l'examen complet de l'ensemble de l'ouvrage par les moyens modernes d'investigation.
2. la recherche par l'analyse des résultats de ces examens et de toutes les hypothèses pouvant alors être formulées, de tous les schémas mécaniques susceptibles de se développer désormais dans la structure.
3. l'établissement topologique et chronologique du découpage compatible avec la stabilité de la structure (c'est-à-dire avec, à la fois, à tous instants, son équilibre statique, ses conditions de résistance et sa stabilité de forme) et compatible avec l'ensemble des schémas retenus.

C'est évidemment une "méthode encadrante" conduisant à un très lourd travail d'étude (nécessitant laboratoire, moyens de calculs et aptitude à une analyse probabiliste de la sécurité) mais c'est, selon nous, même si elle ne satisfait pas le bilan économique à court terme, la seule méthode garantissant à la fois :

- la conservation éventuelle, en l'état, d'une partie de la structure sur laquelle on pourra ensuite développer les techniques de consolidation,
- la sécurité totale de l'opération,

... ce qui ne manque pas de rendre, à long terme, le bilan largement favorable!

Comme nous le verrons plus loin sur un exemple précis, cette méthode, dans sa démarche, s'apparente beaucoup à celle que nous développerons dans la démolition des ouvrages en béton précontraint.

## 2. PROSPECTIVE A PROPOS D'AUTRES OUVRAGES PARTICULIERS.

Toutes les réalisations dont nous venons de parler ont constitué des prototypes qu'il était intéressant d'élaborer... La répétition de telles opérations à d'autres ouvrages analogues entre maintenant dans le domaine de l'application industrielle plus courante.

Il est cependant encore de nombreux problèmes dont on sait qu'ils se poseront inévitablement à moyen ou long terme, et face auxquels on peut trouver un large terrain pour le développement de ces travaux.

Citons deux familles d'exemples qu'il nous a été donné d'examiner, et analysons très rapidement les conditions dans lesquelles sont posés ces problèmes :

- les fûts de grande hauteur (de 60 à 250 mètres de haut).
- les centrales nucléaires en béton armé (première génération).

2.1 Les fûts de grande hauteur (relais hertziens ; T.V. ; cheminées de centrales thermiques).

La nécessité fonctionnelle de leur construction a rendu indispensables le développement des méthodes de calculs de tels ouvrages, et l'analyse très poussée des sollicitations statiques et surtout dynamiques qui leur sont appliquées.

Elle a contribué aussi au développement de nouveaux procédés d'exécution (coffrages glissants) et de métrologie (laser) dans la construction.

Cependant, lors des études, l'hypothèse de démolition n'avait à aucun moment été émise et n'a absolument pas conditionné la conception. Qu'en résulte-t-il aujourd'hui ?

#### 2.1.1 Les relais hertziens (et T.V.)

La première génération de tour hertzienne a quinze ans environ. Depuis ce temps, l'évolution des transmissions téléphoniques (totalement par faisceaux hertziens désormais) a rendu nécessaire l'établissement d'un nouveau réseau de tours plus dense et plus performant. La plupart des anciens ouvrages se sont trouvés inutilisables et ont dû être doublés par des ouvrages plus importants. Dans un grand nombre de sites, le souci du respect de l'environnement a rendu obligatoire la démolition de ces ouvrages inutiles... La décision administrative de démolir était sans doute difficile à prendre... mais bien plus encore à exécuter !

Les conditions du problème sont les suivantes :

1. Au pied des tours de cette première génération, ont été souvent édifiés les centraux électroniques régionaux où sont traitées toutes les communications transmises (téléphones, télévision, police, etc...) (figure 5.20.a), d'où la stricte interdiction de bruit, et, plus encore, de vibrations dans cette structure ;
2. L'interdiction de chutes de gravats (petits ou gros), propres à toute démolition, pour des raisons de sécurité du personnel et des matériels précédemment indiqués ;
3. Les conditions de travail en grande hauteur sur une couronne extrême-

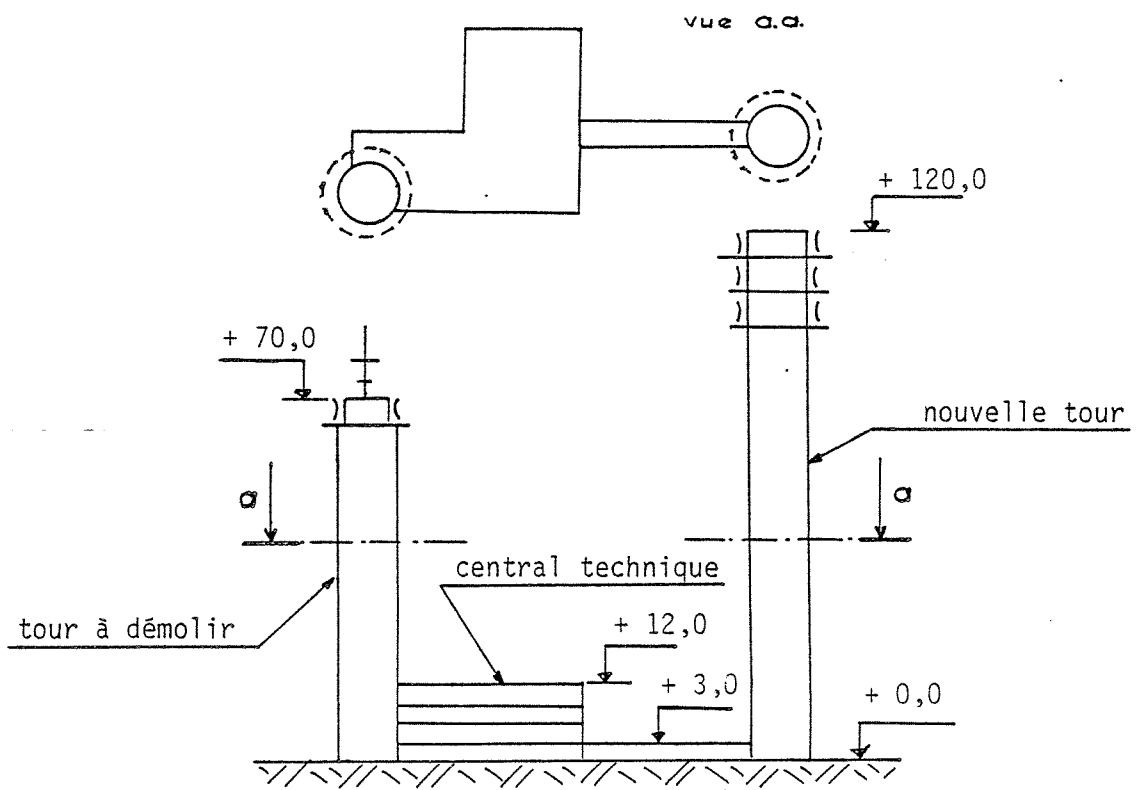


fig.5.20 a Schéma d'un relais hertzien (type Cesson).

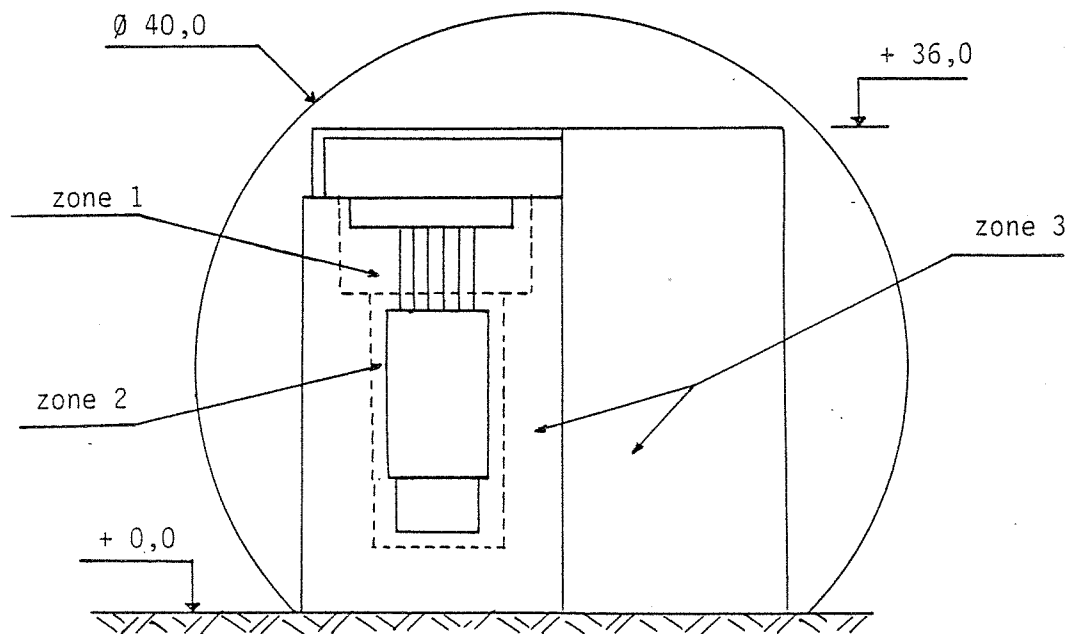


fig.5.20 b Schéma d'une centrale nucléaire (type Chinon I).

ment étroite (effet de trainée et rafales).

### 2.1.2. Les cheminées de centrales thermiques.

Globalement de même nature que le précédent, le problème est compliqué encore car :

1. Les dimensions longitudinales sont plus grandes (jusqu'à 250 mètres) et donc, la sensibilité à une variation locale de section transversale et de poids (due à des échafaudages extérieurs, par exemple) est accrue et on doit établir rigoureusement que l'on ne risque pas, pour des vents très ordinaires, une mise en résonance.
2. L'oxydation due au dégagement de gaz agressifs (Centrale d'Issy) peut avoir localement détruit les armatures. On se retrouvera ainsi, en ces points, face à un élément de moindre résistance et, qui plus est, qui risque d'avoir un comportement fragile...

### 2.2. Les centrales nucléaires en béton armé (première génération -type Chinon I) (figure 5.20 b)

Le nombre et l'originalité des problèmes à résoudre lors de la construction des centrales nucléaires étaient tels que celui de la démolition paraissait, alors, bien mineur et de peu d'urgence. Par ailleurs, on pouvait, alors, espérer que l'évolution des techniques l'aurait résolu le jour où il se poserait... Or, dans le monde, plusieurs centrales nucléaires sont arrivées au "terme de leur vie active" depuis quelques années déjà.

Le problème, outre son aspect financier, est essentiellement de deux ordres..

1. Le béton est contaminé (on distingue trois genres).

Cela interdit donc tout travail direct et nécessite une automatisation totale de l'opération de découpage ; par ailleurs, celle-ci doit délivrer des blocs suffisamment petits (quelques dizaines de centimètres) pour être efficacement décontaminés avant leur rejet à l'air libre.

Enfin, toutes les poussières ou fumées résultant de l'opération doivent être strictement contrôlées avant rejet.

2. Les dimensions des structures en béton sont très importantes (les épaisseurs varient de 4,00 à 8,00 mètres). Cependant, la densité d'armature favorise et accélère le découpage thermique.



## C.- LA DEMOLITION DU BETON PRECONTRAINTE

### 1 LA NECESSITE D'UNE ETUDE PRELIMINAIRE.

La destruction du béton précontraint (notamment celui résultant de l'application des systèmes dits à post-tension) représentera incontestablement, en matière de démolition, les opérations les plus délicates dans l'avenir.

Jusqu'à présent les réalisations effectuées dans le monde sont très peu nombreuses et ont toujours pris un caractère exceptionnel et expérimental. [43]

Rappelons que les efforts de tension couramment utilisés varient de 30 000 daN à 500 000 daN (voir 1 000 000 daN dans les structures des réacteurs nucléaires).

#### 1.1 Le comportement d'un élément précontraint lors de sa coupe thermique. [44] à [48]

Il est essentiel de connaître le comportement des deux constituants (armature et béton) d'un élément précontraint lors de son découpage suivant une section droite. En effet, différents phénomènes peuvent être envisagés ; comme on va le voir, ils dépendent beaucoup de la qualité mécanique de l'injection.

Formulons les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : l'injection est nulle.

La coupe des fils des câbles étant instantanée, à cet

instant, l'énergie potentielle emmagasinée dans le câble est libérée, aux effets de frottement et ancrage près, sous forme d'énergie cinétique qui va, après la rupture du cachetage d'extrémité, conduire à la projection des tronçons de fils vers l'extérieur. Un bouclier doit alors être capable d'absorber cette énergie et, ainsi, d'empêcher toute projection sur le chantier ou son voisinage. D'autre part, dans cette hypothèse, il est évident que l'effet de précontrainte est totalement neutralisé dans l'élément qui n'est plus, donc, que du béton armé ordinaire.

Hypothèse 2 : l'injection existe.

Admettons alors que cette injection puisse permettre aux fils de s'ancrer à nouveau dans leur gaine ; on crée ainsi un second système précontraint certes moins élancé que le système initial mais dont les extrémités peuvent, cette fois, être libres (si la coupe a consisté à détacher totalement cet élément du reste de la structure.) Dans cette configuration, l'importance de la précontrainte résiduelle résultera directement de la nature et de la qualité de l'ancrage réalisé entre les fils et le béton (on verra que l'on sera conduit à définir une "longueur d'ancrage"). De nouvelles coupes seront alors, en principe, nécessaires pour réduire totalement cette précontrainte.

Hypothèse 3 : le système est mixte.

Il s'agit en quelque sorte d'estimer tous les cas intermédiaires que l'on peut composer à partir des deux extrêmes précédents et du schéma mécanique de la structure (dès que la structure sera complexe, c'est une analyse probabiliste qui devra être conduite) En effet, on ne peut admettre qu'une telle structure reste dans un

état d'équilibre inconnu localement et que la précontrainte puisse se libérer brutalement (effet 1) à la suite des sollicitations résultant d'une manipulation de levage ou des vibrations du véhicule de transport lors de l'évacuation... Dans notre esprit, au moins pour les ouvrages anciens pour lesquels -toutes les gammagraphies le prouvent- les injections n'offrent que peu de garanties d'uniformité, ce schéma peut conduire à des accidents graves. Il nous semble que la façon la plus absolue d'en tenir compte est de décider de découper systématiquement les câbles en tronçons tels que les effets de précontrainte soient largement neutralisés.

L'objet de notre étude était donc de confirmer (ou d'infirmier) nos convictions quant à la validité de nos hypothèses, d'une part, et d'autre part, dans celle (2) qui conduit à la création d'un nouveau système précontraint, de connaître parfaitement la mécanique de ce système.

## 1.2. La modélisation de la liaison câble-béton avant et après découpage.

### 1.2.1. Retour sur l'adhérence type béton armé (exp. de M. Robinson).

Observons les expériences de M. Robinson concernant l'adhérence "type béton armé". Il exerçait un effort de traction sur une armature noyée dans une éprouvette de béton (figure 5.28 a). Il déterminait, à partir de jauges de déformations, l'effort de traction développé (en toutes sections) dans l'acier et le béton (La somme de ces deux efforts, en chaque section, étant évidemment égale à  $F$ , l'effort de traction.).

On peut alors écrire l'équilibre d'un tronçon d'armature de longueur  $dx$ . Appelons  $s(x)$  l'action exercée par le béton (adhérence) sur l'armature par unité de longueur (figure 5.28 a), on a :

$$F(x) - F(x + dx) = s(x)dx \quad (\text{expression à partir de laquelle il est aisé de définir une contrainte d'adhérence.})$$

Par intégration, on peut exprimer le déplacement de chaque point de l'armature par rapport à sa position initiale avant tension. On peut aussi mesurer le déplacement de la section de béton initialement au contact avec le point considéré de l'armature. On en déduit alors le déplacement relatif de l'armature par rapport au béton.

Pour chaque section, on peut ainsi tracer la relation entre le déplacement relatif acier-béton  $u(x)$  et l'effort d'adhérence  $s(x)$  (figure 5.28 b).

Cette loi comporte une phase élastique : le béton qui enveloppe l'armature se comporte élastiquement et se déforme, au voisinage de celle-ci selon un ménisque de révolution de flèche  $u$ .

Le déplacement relatif entre l'acier et le béton est donc égal à  $u$  et on a :

$$s(x) = ku \quad (k \text{ constante caractéristique de la liaison}).$$

Si  $u$  dépasse une valeur limite  $u^*$ , l'enveloppe de béton casse ; l'armature glisse alors dans le béton suivant les lois du frottement que M.Brice a caractérisé par une contrainte constante ( $\tau_d$ ). (En réalité, plutôt que le graphe bi-linéaire représenté en 5.28 b, on a un raccordement courbe dû à une phase élastoplastique peu importante. De plus, l'ordre de grandeur de  $u^*$  est faible, de l'ordre de 10 à 25 $\mu$  ).



### 1.2.2 L'adaptation au béton précontraint - Définition de notre modèle.

Admettons dans le raisonnement que nous nous proposons de suivre maintenant, que les phénomènes mis en évidence lors d'une sollicitation de traction restent vrais lors de l'application d'un effort de compression... M. Robinson n'avait pas réalisé une telle étude à cause vraisemblablement des difficultés expérimentales (instabilité de l'armature) d'une part et surtout d'autre part de la non représentativité, dans ce cas, du fonctionnement réel des armatures de béton armé... On peut s'attendre vraisemblablement, toutes choses restant égales par ailleurs, à une légère amélioration de  $s(x)$  pour un glissement  $u$  déterminé, à cause de la déformation transversale qui aura, cette fois, une action favorable sur la liaison.

Admettons aussi que les  $n$  fils (de section A) constituant le câble de précontrainte soient découpés simultanément dans toute la section (l'effort de précontrainte est réparti uniformément dans la section du câble et les déformations longitudinales des fils sont identiques).

Enfin, nous négligerons les effets du poids propre de l'élément et les effets cinétiques dus à l'application brutale de la variation de précontrainte à l'instant de la coupe.

Soit une poutre en béton (de section B) cylindrique armée suivant son axe longitudinal d'un câble de  $n$  fils (section  $nA$ ).

Le câble a été tendu puis solidarisé à la poutre par une injection que l'on considèrera parfaite.

### 1.2.3 Etude de la liaison : variations de contrainte dans l'armature.

Effectuons une coupe de la poutre (prenons le plan de coupe

fig. 5.28 a Exp. de M. Robinson - Variation de l'effort de traction dans une armature.

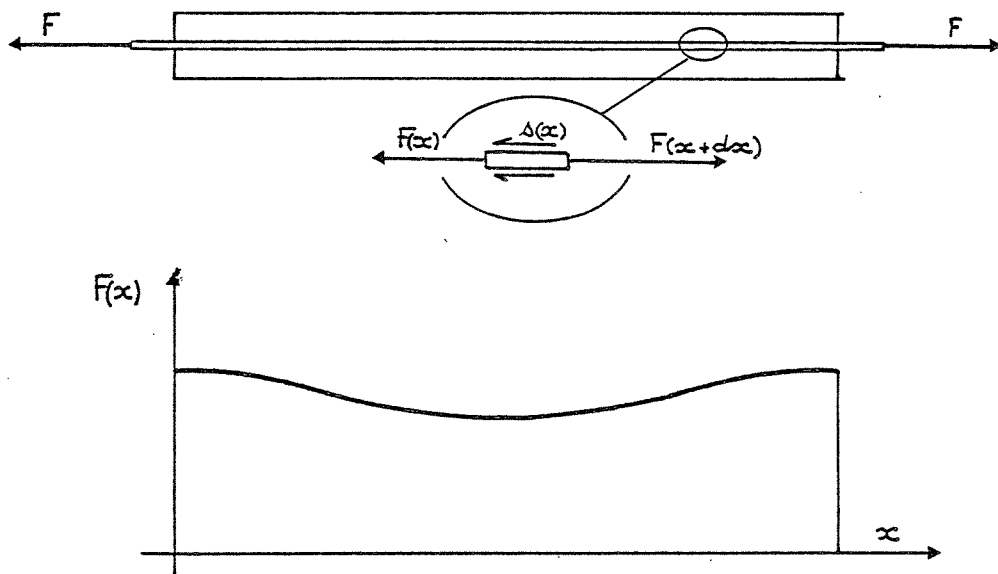
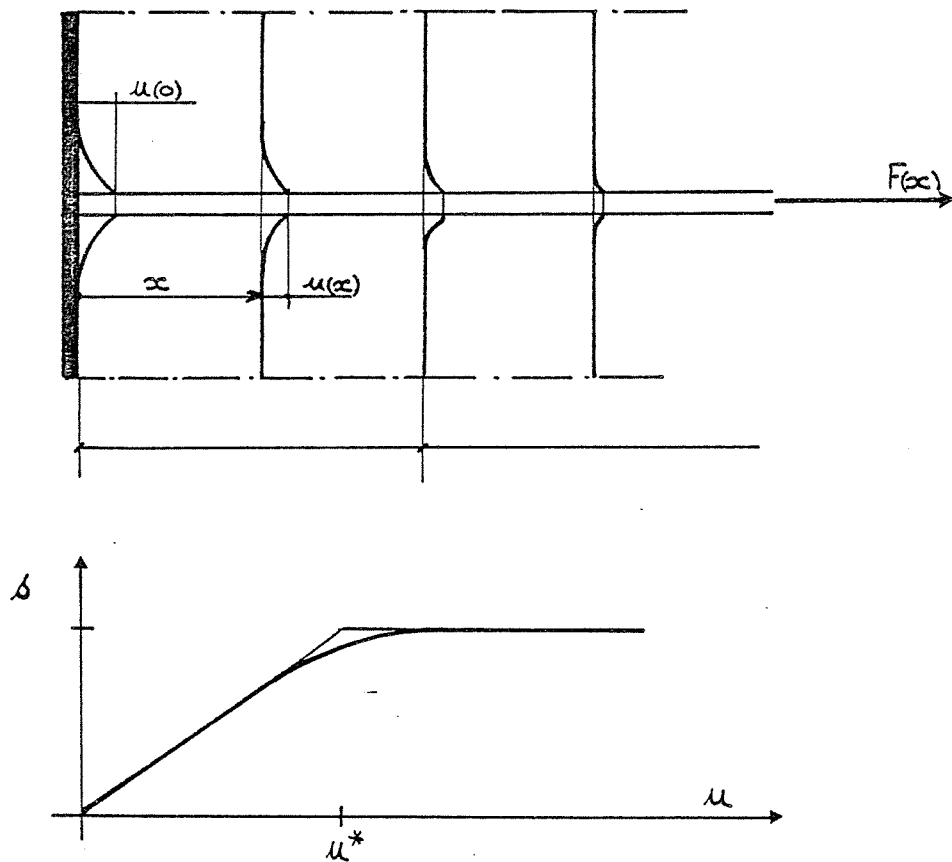


fig. 5.28 b Modélisation du déplacement relatif armature-béton  $u(x)$  et évolution de l'effort d'adhérence  $s(u)$ .



comme origine des abscisses).

Par suite de la liaison acier béton, les sections droites de béton se sont déformées axialement suivant des amplitudes  $u(x)$ . (figure 5.28 b).

L'effort initial de tension du câble étant suffisamment grand, il existe une section  $x^*$  qui a subi la déformation critique  $u^*$  frontière des états de liaison élastique et de liaison par frottement ; par ailleurs, il est évident que  $u(x)$  décroît quand  $x$  croît ; la section origine subit elle une déformation  $u_0$  (bien sûr, supérieure à  $u^*$ ).

\* Etude du domaine "liaison par frottement" :  $x \leq x^*$

Il est aisé de traduire l'équilibre, on peut, par exemple écrire :  $\forall x \leq x^* \quad s(x) dx = nAd \int_a(x) \quad (1)$

Aux deux extrémités, on a dans les armatures :

$$\begin{aligned} \int_a(0) &= 0 \\ \int_a(x^*) &= \int_a^* = \frac{1}{nA} \int_0^{x^*} n \pi \phi \tau_d dx \end{aligned}$$

\* Etude du domaine "liaison élastique" :  $x > x^*$

Etablissons les déformations d'un élément de poutre de longueur initiale  $dx$ . Il subit un raccourcissement dû à la compression

du béton :  $\frac{d(dx)}{dx} = \frac{nA \int_a(x)}{B' E_b}$  et il devient donc

$$(dx)_1 = dx \left( 1 - \frac{nA \int_a(x)}{B' E_b} \right).$$

Dans ce même élément de poutre, l'armature a désormais une longueur  $(dx)_2$  telle que :



$$(dx)_2 = (dx)_1 - [u(x) - u(x + dx)]$$

Son raccourcissement est donc :

$$dx - (dx)_2 = \frac{nA \sigma_a(x)}{B' E_b} dx + [u(x) - u(x + dx)]$$

Ce raccourcissement résulte de la variation de contrainte dans l'armature (soit  $\sigma_a^0$  la contrainte due à la tension initiale des câbles). On a donc :

$$\frac{\sigma_a^0 - \sigma_a(x)}{E_a} = \frac{nA \sigma_a(x)}{B' E_b} + \frac{[u(x) - u(x + dx)]}{dx} \quad (3)$$

c'est-à-dire

$$\sigma_a(x) = \frac{\sigma_a^0}{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}} + \frac{E_a}{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}} \cdot \frac{du(x)}{dx} \quad (3)'$$

Remarquons, lorsque  $x$  est suffisamment grand, que  $\frac{du(x)}{dx} \rightarrow 0$ , et  $\sigma_a(x)$  atteint alors la valeur limite  $\sigma_a^m$  telle que :

$$\sigma_a^m = \frac{\sigma_a^0}{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}} \quad (4)$$

L'équation précédente devient alors :

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^m + \frac{E_a}{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}} \frac{du(x)}{dx} \quad (4)'$$

Etant en zone dite "élastique", on a  $s(x) = k u(x)$

( $k$  est une constante ; admettons l'injection uniforme dans cette zone).

Rappelons aussi que  $s(x) = nA \frac{d\sigma_a(x)}{dx}$  (d'après la relation 1)

On en déduit la relation différentielle suivante :

$$\frac{d^2 \sigma_a(x)}{dx^2} - \frac{k (1 + \frac{nA E_a}{B' E_b})}{nA E_a} \sigma_a(x) + \frac{k (1 + \frac{nA E_a}{E_b B'})}{nA E_a} \sigma_a^m = 0 \quad (5)$$



qui a pour solution :

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^m + M e^{\lambda x} + N e^{-\lambda x}$$

en posant  $\lambda^2 = \frac{k(1 + \frac{nA E_a}{B' E_a})}{nA E_a}$

(remarquons que  $\frac{1}{\lambda}$  a la dimension d'une longueur.)

Il est bien évident que, physiquement,  $\sigma_a(x)$  ne peut tendre vers l'infini quand  $x$  croît indéfiniment d'où  $M = 0$ .

Par ailleurs, pour  $x = x^*$ , on a :

$$\sigma_a(x^*) = \sigma_a^* = \sigma_a^m + N e^{-\lambda x^*}$$

d'où 
$$N = \frac{\sigma_a^* - \sigma_a^m}{e^{-\lambda x^*}}$$

Il vient donc :

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^m + (\sigma_a^* - \sigma_a^m) e^{-\lambda(x - x^*)} \quad (6)$$

qui peut aussi s'écrire :

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^m [1 - e^{-\lambda(x - x^*)}] + \sigma_a^* e^{-\lambda(x - x^*)} \quad (7)$$

1.2.4 Définition de la "longueur d'ancrage (A)" et de la "rentrée de fil"  $n(0)$  et relation fondamentale  $n = f(A)$ .

Observons que pour  $x - x^* = \frac{4}{\lambda}$ , on a  $\sigma_a(x) = \dots \sigma_a^m = \sigma_a^m$

On peut donc dire que la longueur :

$$A = x + \frac{4}{\lambda} \quad (8)$$

constitue donc, pour le câble, une longueur d'ancrage.

Or, lors de la découpe thermique d'un câble de précontrainte, la seule valeur mesurable est, dans certaines conditions, la rentrée des fils dans la section initiale ( $n(0)$ ).

Essayons d'établir la relation entre cette rentrée de fils (mesurable) et la longueur d'ancrage à partir de laquelle, comme nous

venons de le voir, on connaîtra le nouvel état de précontrainte réelle dans la poutre.

Pour cela, reprenons l'équation (3), le glissement  $u$  entre l'acier et le béton est obtenu par intégration de

$$\left( \frac{\sigma_a^0 - \sigma_a(x)}{E_a} - \frac{nA \sigma_a(x)}{B'E_b} \right) dx.$$

Par ailleurs, on a vu que  $\sigma_a^m = \frac{\sigma_a^0}{1 + \frac{nA E_a}{B'E_b}}$

$$d'où \quad r(0) = \int_0^l \frac{\left(1 + \frac{nA E_a}{B'E_b}\right)}{E_a} \left[ \sigma_a^m - \sigma_a(x) \right] dx \quad (9)$$

Or pour  $0 < x \leq x^*$

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^* \frac{x}{x^*} \quad d'où \quad (\sigma_a^m - \sigma_a(x)) = (\sigma_a^m - \sigma_a^* \frac{x}{x^*}) \quad (10)$$

et pour  $x > x^*$

$$\sigma_a(x) = \sigma_a^m - (\sigma_a^m - \sigma_a^*) e^{-\lambda(x - x^*)}$$

d'où

$$(\sigma_a^m - \sigma_a(x)) = (\sigma_a^m - \sigma_a^*) e^{-\lambda(x - x^*)} \quad (11)$$

Les relations (9), (10) et (11) conduisent à l'intégrale :

$$r(0) = \frac{1 + \frac{nA E_a}{B'E_b}}{E_a} \left[ \int_0^{x^*} (\sigma_a^m - \sigma_a^* \frac{x}{x^*}) dx + \int_{x^*}^l (\sigma_a^m - \sigma_a^*) e^{-\lambda(x - x^*)} dx \right] \quad (12)$$

En intégrant, on obtient donc l'expression de la rentrée de fil à l'origine :

$$r(0) = \frac{1 + \frac{nA E_a}{B'E_b}}{E_a} \left[ \sigma_a^m x^* - \sigma_a^* \frac{x^*}{2} - \frac{1}{\lambda} (\sigma_a^m - \sigma_a^*) (e^{-\lambda(l - x^*)} - 1) \right] \quad (13)$$

Pour toute poutre de béton armé, on a :

$$l \gg x^* \Rightarrow 1 - e^{-\lambda(l-x^*)} \approx 1$$

d'où, il vient, en rappelant l'expression réelle de  $\lambda$ .

$$r(0) = \frac{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}}{E_a} \left[ \int_a^m \left( x^* + \frac{1}{\sqrt{k \frac{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}}{nA E_a}}}} \right) - \int_a^{\frac{x^*}{2}} \left( \frac{x^*}{2} + \frac{1}{\sqrt{k \frac{1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}}{nA E_a}}}} \right) \right]$$

(14)

Dans le cas général, la valeur de  $r(0)$  ne peut être déterminée complètement car on ignore la valeur de  $k$  (celle-ci devrait donc être établie expérimentalement).

On peut cependant poursuivre notre calcul dans les deux hypothèses extrêmes de fonctionnement de la liaison (frottement ou élastique). On calculera ainsi les deux bornes extrêmes de l'intervalle dans lequel se situe la valeur réelle.

1er cas : la liaison se fait totalement par frottement :

$$\text{A la limite, on a donc } \int_a^m = \int_a^m$$

Ceci conduit (dans 14) à la valeur de  $r_f(0)$  correspondante,

$$r_f(0) = \frac{\left(1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}\right) x^*}{2 E_a} \int_a^m$$

La longueur d'ancrage correspondante est  $A_f = x^*$

d'où

$$A_f = \frac{2 E_a}{\left(1 + \frac{nA E_a}{B' E_b}\right) \int_a^m} r(0) \quad (15)$$

2ème cas : la liaison est totalement élastique :

$$\text{On a donc, à la limite : } x^* = 0 ; \int_a^m = 0$$

Ceci conduit (dans 14) à la valeur de  $r_e(0)$  correspondante :

$$r_e(0) = \frac{\left(1 + \frac{nAE_a}{B'E_b}\right) nA E_a}{E_a \sqrt{k \left(1 + \frac{nAE_a}{B'E_b}\right)}} \int_a^m$$

La longueur d'ancrage correspondante est, cette fois, (d'après 8) :

$$A_e = \frac{4}{\sqrt{k \left(1 + \frac{nAE_a}{B'E_b}\right)}}$$

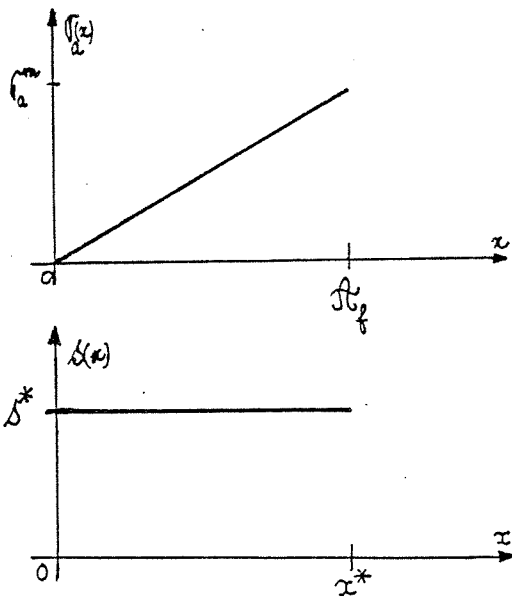
d'où :

$$A_e = \frac{4 E_a}{\left(1 + \frac{nAE_a}{B'E_b}\right) \int_a^m} \cdot r(0)$$

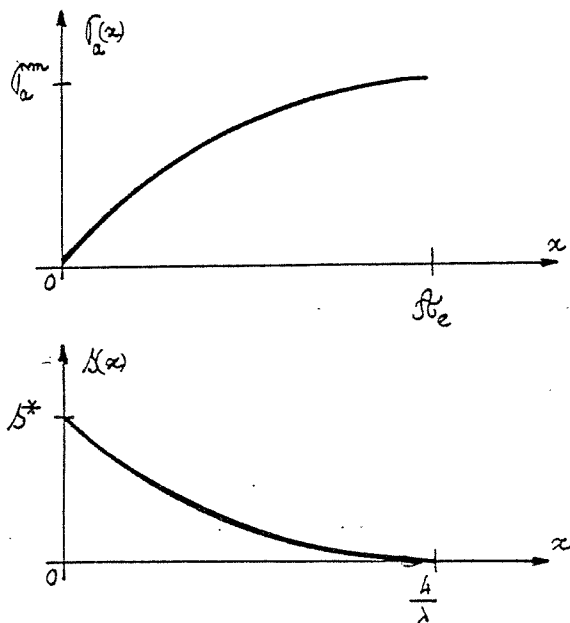
(16)

A. CAS LIMITES

A 1. Liaison par frottement

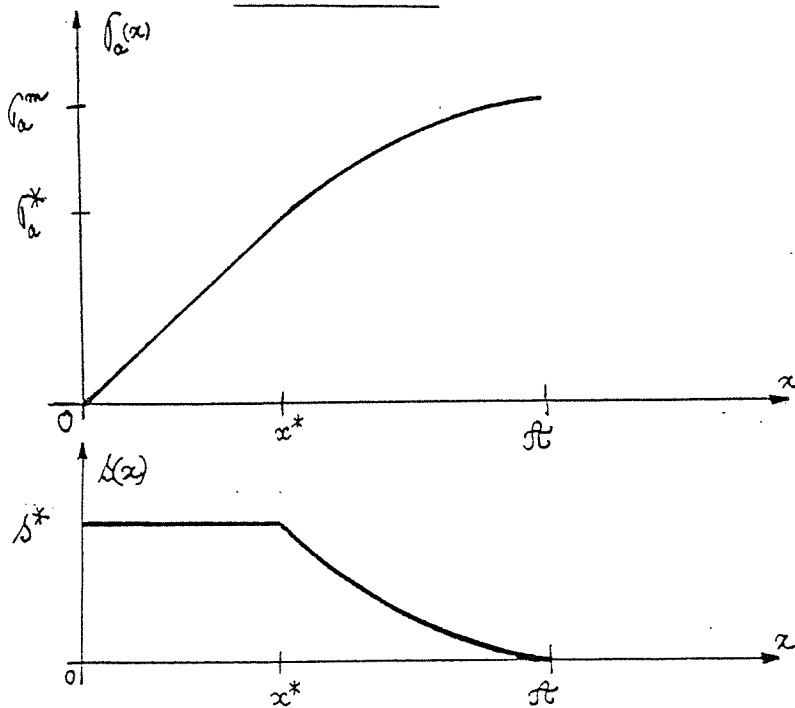


A 2. Liaison élastique



B. CAS PROBABLE

Liaison mixte



### 1.2.5 Interprétation des résultats et conclusions.

On a représenté (figure 5.35 a) les graphes des fonctions  $\int_a(x)$  et  $s(x)$  correspondant aux deux cas limites de liaison. Ils permettent d'observer, notamment, les valeurs extrêmes des longueurs d'ancrage  $A_f$  (frottement) et  $A_e$  (l.élastique).

Analysons maintenant (figure 5.35 b) l'établissement du graphe des fonctions  $\int_a(x)$  et  $s(x)$  qui correspondent au cas réel d'une liaison mixte.

Imaginons qu'à partir de l'instant de la coupe thermique, la détente du câble puisse s'effectuer lentement. Elle va transférer un effort croissant dans le béton à partir de la section découpée prise comme origine des abscisses.

Tant que la contrainte  $\int_a(x)$  reste inférieure à  $(\int_a^m - \int_a^*)$  la liaison est de type élastique.

$$\int_a(x) = \int_a^m - \int_a^* ; \text{ on a alors } s(0) = s^*$$

La gaine de béton autour du câble est rompue à l'origine et, dans cette zone, la liaison est désormais de "type frottement", alors qu'elle reste "élastique" au-delà de cette zone.

La zone de frottement va se propager dans le sens des  $x$  croissants jusqu'à la valeur  $x^*$  correspondant à la contrainte  $\int_a^m$  et donc à l'ancrage total (on peut observer, donc, en abscisse, les valeurs privilégiées  $x^*$  et  $A$  correspondant aux contraintes  $\int_a^*$  et  $\int_a^m$ ).

Remarquons que nous sommes partis d'un état initial de sollicitation dû à la seule précontrainte. En réalité, notre élément de structure est sollicité par les actions de tous les éléments adjacents, par son poids propre et par les charges qui lui sont direc-

tement appliquées.

Dans le cas d'une sollicitation simple de traction, par exemple, le graphe  $\int_a(x) = f(x)$  reste vrai, il suffit de lui faire subir une translation suivant son ordonnée (cf. étude ci-après).

-----

L'intérêt de tels résultats est évident puisqu'il nous permet, à partir de la seule mesure de rentrée de câble dans les sections découpées :

1) de savoir dans quel cas d'injection nous nous trouvons :

- la rentrée est grande (supérieure au centimètre)

il n'y a pas eu d'ancrage, c'est le cas n° 1 ;

- la rentrée est petite (quelques millimètres) :

il y a donc ancrage, c'est le cas n° 2.

2) de connaître les bornes entre lesquelles se situe la longueur d'ancrage et donc d'établir parfaitement l'état mécanique probable du nouvel élément précontraint.

Notons, cependant, que les résultats établis par cette méthode ne donnent que des valeurs moyennes puisque nous avons admis, dans le calcul, que l'injection était uniforme sur des longueurs finies de l'élément.

Bien qu'il nous ait fallu proposer, sans autres assurances, de tels résultats lors de l'étude de la destruction du plus grand ouvrage en béton précontraint jamais démoli en Europe (cf. chapitre suivant), il nous a paru indispensable de vérifier expérimentalement, avec précision, (justement sur ce même ouvrage, lors de l'exécution) la validité de nos lois.

### 1.3 L'étude expérimentale du comportement de la liaison lors du découpage.

Décidée et programmée à notre initiative, cette étude expérimentale fut, en fait, conduite avec les moyens expérimentaux du Laboratoire Central (Paris) et des Laboratoires Régionaux (Lyon et Orly) des Ponts et Chaussées. Les résultats de ces mesures pouvaient établir un préliminaire à une étude plus approfondie se rapportant notamment aux démolitions de ponts en béton précontraint d'où l'intérêt des Services de l'Equipement pour ces travaux.

L'expérimentation fut d'ailleurs prolongée vers l'analyse des causes de la rupture des éléments précontraints -fissuration, corrosion, etc...- et a fait l'objet d'une publication séparée [49].

#### 1.3.1 Le corps d'épreuve.

Les mesures furent effectuées sur des tirants préfabriqués appartenant à une poutre échelle (figure 5.47 c).

Leur configuration est donnée sur la fig. 5.39.a. En service (c'est-à-dire au moment où nous les avons découpés), ils étaient sollicités par leur poids propre (faible et partiellement compensé par un dispositif mécanique que nous avons mis en place) et surtout par l'effort de traction que leur appliquait le reste de la structure et par l'effort de précontrainte dû à un câble, B.B.R. 22  $\emptyset$ 7, tendu à 80 000 daN (valeur annoncée).

#### 1.3.2 Les moyens de mesure.

La mesure était réalisée dans douze sections qui étaient équipées de jauges de déformation. Deux ou quatre jauges étaient montées symétriquement dans chaque section pour tenir compte du poids



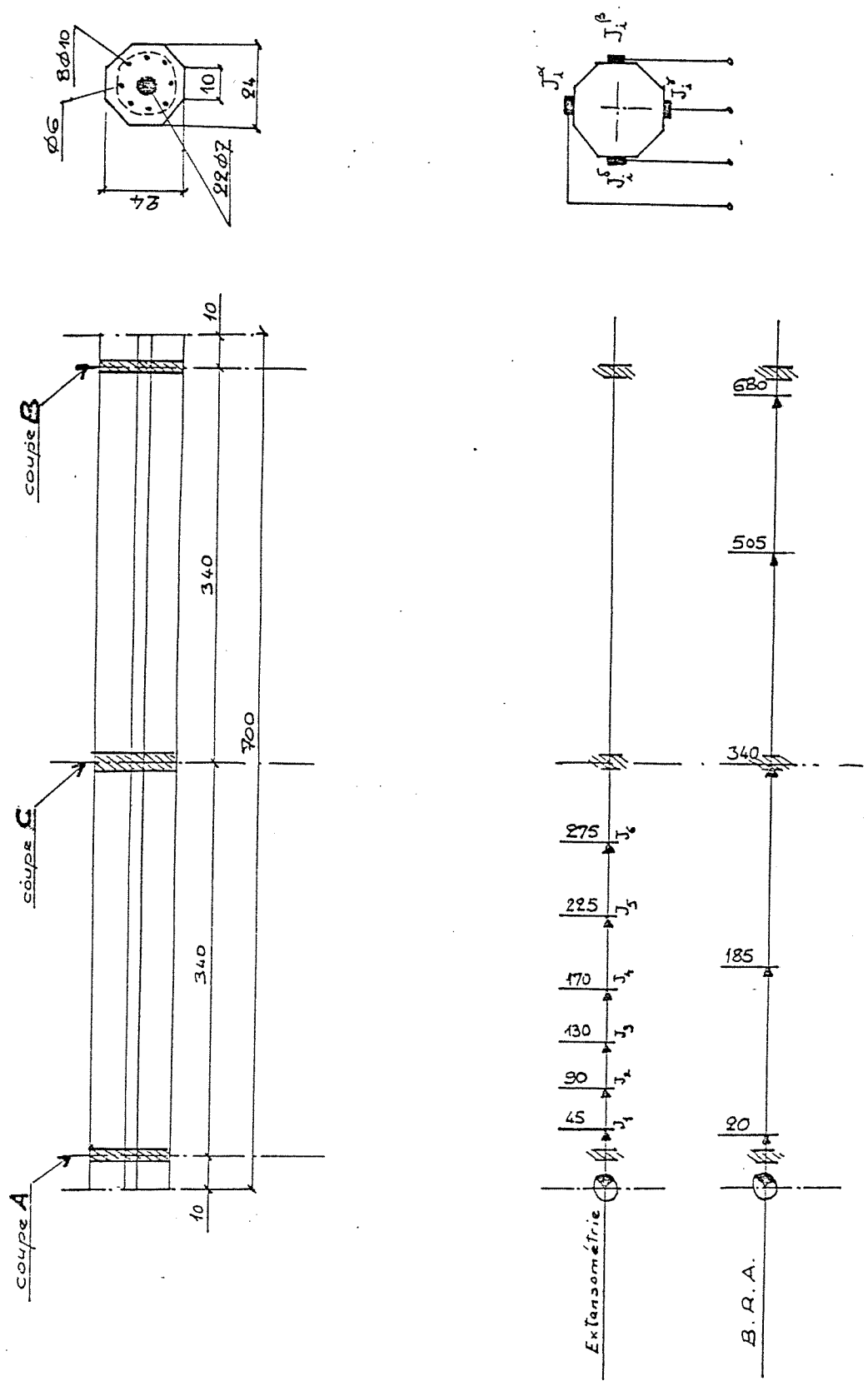


fig. 5.39 Définition du tirant en béton précontraint - Positions des points de mesures.

propre et d'un éventuel excentrement du câble axial.

Par ailleurs, étaient programmées, dans cinq sections, des mesures de biréfringence acoustique B.R.A. (émetteur et récepteur sur deux faces opposées).

Enfin, des essais de "libération de contrainte" et des prélèvements de carottes devaient nous permettre d'annuler les contraintes résiduelles et d'étalonner ainsi nos jauges.

### 1.3.3. Le processus de dépouillement.

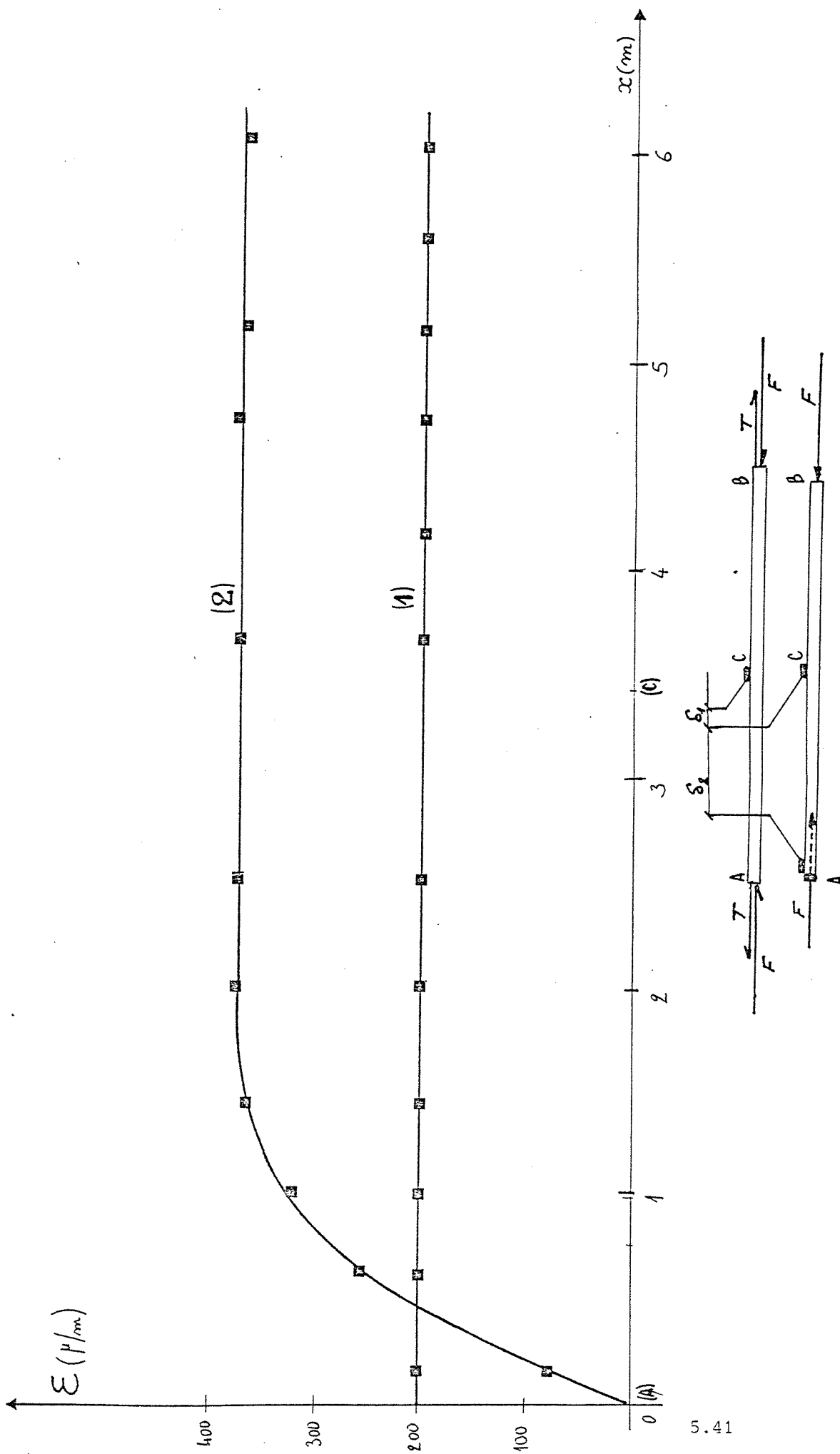
Observons les résultats obtenus sur l'un des tirants. L'état initial est celui en service (effort de traction + effort de précontrainte) (le zéro des jauges).

Effectuons la coupe dans la section inférieure A. La partie courante du tirant subit des raccourcissements importants au-delà d'une longueur de scellement de l'ordre de 1,40 mètre (voir fig. 5.41). Sur cette longueur, la loi d'évolution est conforme, dans son allure, aux résultats du calcul.

Par ailleurs, la deuxième conséquence de la coupe A est évidemment d'avoir supprimé l'effort de traction (dû à la structure) dans le tirant. En section courante, il n'est donc plus soumis qu'à la seule précontrainte (les variations des jauges nous permettent donc de connaître cet effort de traction) et à son poids propre partiellement compensé.

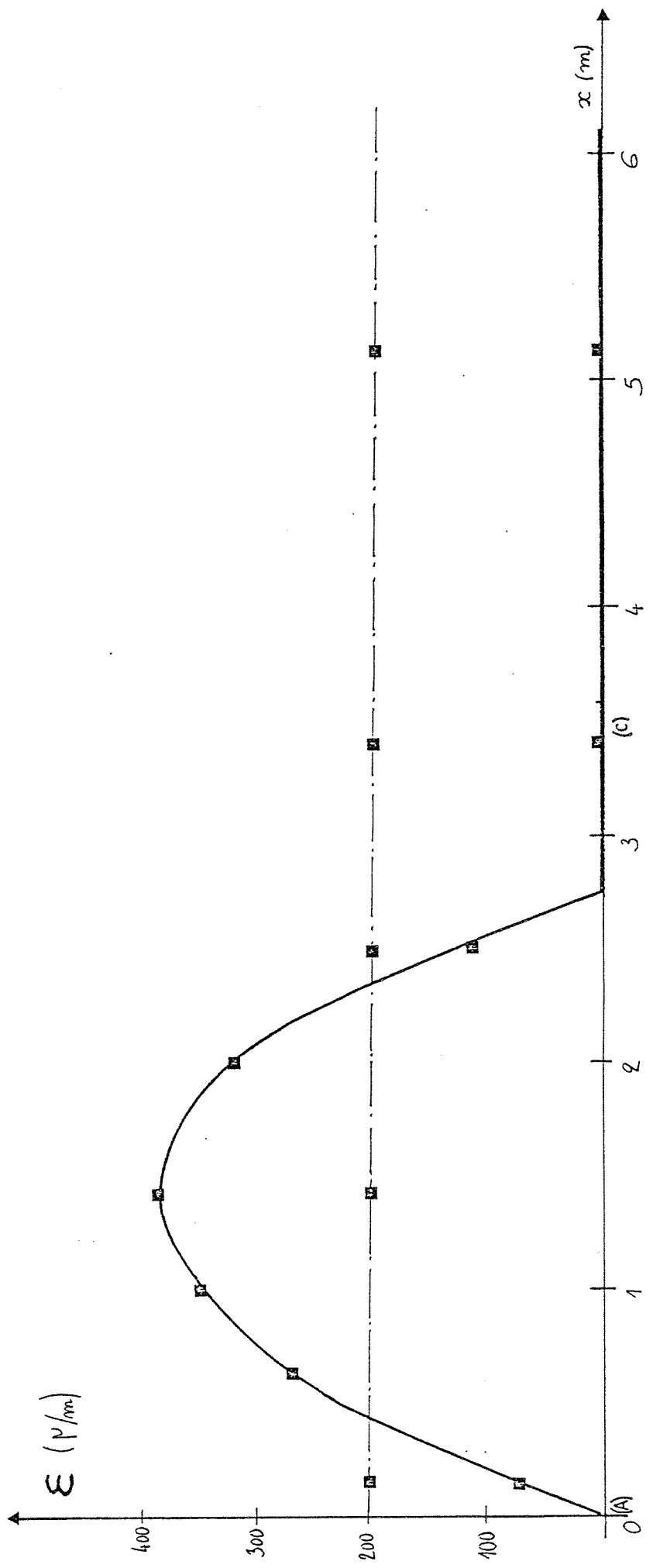
Effectuons maintenant un second découpage dans la section haute B. Il provoque des déformations symétriques dans la moitié inférieure de l'élément (figure 5.42).

Ceci conduit à un nouvel ancrage dans cette zone (avec une qualité d'injection identique à la précédente) et une



5.41

fig. 5.41 Etat initial de référence (courbe 1) et déformation du tirant après la première coupe (courbe 2).



5.42



fig. 5.42 Déformation du tirant après seconde (B) et troisième (C) coupes.

absence d'injection dans toute la moitié supérieure (une légère variation de l'indication des jauges dans la zone inférieure est sans doute dû au nouvel état d'équilibre de la poutre maintenant totalement détachée de la structure -compensation insuffisante du poids propre-).

Enfin, pour confirmer cela, une coupe (ou plutôt un trou au niveau du câble axial) effectuée au centre de l'élément (point C) ne change aucune des indications des jauges.

#### 1.3.4 Les résultats.

Les courbes (1) et (2) ne permettent pas de déterminer avec précision les seuils  $\sigma_a^*$  et  $x^*$  frontières entre la liaison par frottement et la liaison élastique (difficulté de séparer la partie rectiligne de la partie exponentielle).

De plus, pour quantifier nos valeurs expérimentales en contraintes, on a déterminé, après prélèvement de carottes, le module de déformation longitudinale du béton.  $E_D = 407\ 000$  bars.

On détermine successivement :

1) la valeur de la force de traction dans le tirant à l'instant de la coupe (la structure est alors sollicitée essentiellement par son seul poids propre, en effet, les surcharges sont nulles et le vent très faible à cet instant).

$$\varepsilon = 175 \mu/m$$

$$T = \varepsilon \cdot E \cdot B = 175 \times 407\ 000 \times 490 = 35\ 000 \text{ daN.}$$

2) la valeur de la force réelle de précontrainte :

(on a prolongé les courbes  $\hat{\varepsilon}(x)$  jusqu'à  $x = 0$  pour définir une ordonnée origine)

$$\varepsilon = 375 \mu/m$$

$$F = 375 \times 407\ 000 \times 490 = 75\ 000 \text{ daN.}$$

3) la valeur des longueurs d'ancrage obtenues.

$$A(A) = 140 \text{ cm (coupe A)}$$

$$A(B) = 135 \text{ cm (coupe B)}$$

Le calcul des bornes du domaine des longueurs d'ancrage à partir de la rentrée des fils mesurée  $r(0)$  nous donnerait, par application des expressions 15 et 16.

$$15 \rightarrow A_f = \frac{2 E_a}{nAE \left(1 + \frac{a}{B'E_b}\right) \int_a^m} r(0) = 86 \text{ cm}$$

$$16 \rightarrow A_e = \frac{4 E_a}{nA E_a \left(1 + \frac{a}{B'E_b}\right) \int_a^m} r(0) = 172 \text{ cm}$$

et on vérifie pour les deux valeurs mesurées le calcul théorique

$$A_f < A_{rel} < A_e$$
$$86 \text{ cm} < \begin{matrix} 140 \text{ cm} \\ 135 \text{ cm} \end{matrix} < 172 \text{ cm}$$

On peut penser qu'une analyse statistique des résultats obtenus sur un grand nombre d'expériences permettrait de réduire encore le domaine (Cette structure notamment comportait 50 tirants identiques en géométrie et sollicitation mais les délais n'ont pas permis un nombre suffisant de mesures.

Cependant, déjà, ce domaine est satisfaisant pour la résolution de la plupart des structures (même très hyperstatiques) avec une assez bonne précision.

4) la valeur de l'excentrement accidentel des câbles.

C'est aussi un élément important dans la mesure où il va conduire à des sollicitations parasites de flexion qui peuvent se révéler particulièrement graves sur les éléments découpés encore précontraints.



Il suffit alors d'explorer les jauges diamétralement opposées dans une même section droite de la zone où la précontrainte est totalement ancrée.

A partir d'un état initial de précontrainte totale, on "libère" les contraintes dans le béton au voisinage des jauges (en sciant mécaniquement le béton sur une profondeur de quelques centimètres de part et d'autre de la jauge).

On trouve ainsi des déformations différentes entre deux faces opposées ; il est facile d'en déduire l'excentrement par un calcul élémentaire.

On a trouvé ici, dans une section d'abscisse  $x = 170$  cm un excentrement  $e = 1,03$  cm.

Cette valeur permet de quantifier le moment de flexion parasite en résultant. Représentative des écarts moyennement relevés lors de nos travaux de démolition d'éléments précontraints, elle constitue, au même titre que la tension du câble, un facteur important lors de l'étude du démantèlement.

## 2. La démolition d'une structure précontrainte par post tension. [50]

L'étude que nous venons de rapporter dans les pages précédentes a été conduite lors de la réalisation d'une opération de démolition particulièrement exceptionnelle : en effet, du fait de la nature de l'ouvrage (structure, à poutres, précontrainte dans les trois dimensions) et, aussi, de conditions très particulières imposées (conservation du service dans le bâtiment, délais, nuisances, etc...) a constitué, dans ce domaine, une expérience alors sans équivalent en Europe et Amérique du Nord.

## 2.1. Présentation du problème.

### 2.1.1. Description de l'ouvrage.

Il s'agit de démolir (et reconstruire) la couverture de l'entrepôt de tri et d'expédition des NOUVELLES MESSAGERIES DE LA PRESSE PARISIENNE (N. M. P. P.). D'une superficie totale de 11 000 m<sup>2</sup>, situé à Paris, il est utilisé par 600 personnes manipulant 150 chariots élévateurs et recevant les 300 camions et wagons nécessaires à l'expédition quotidienne de 500 tonnes de journaux et revues.

La structure à démolir longue de 260 mètres environ, est constituée de 29 sheeds-portiques en béton ayant chacun 40 mètres de largeur, 10 mètres de hauteur et 9 mètres de longueur. (fig. 5.47)

L'ossature est précontrainte par des câbles tendus à 600 000N.

La nouvelle couverture mise en place doit être supportée par des poutres en bois lamellé collé de 42 mètres de portée.

La démolition de cette construction a été décidée à la suite de la rupture des câbles principaux d'une poutre-treillis, entraînant l'affaissement brutal d'une travée (20 à 30 centimètres) et des désordres notables dans les deux travées adjacentes (figure 5.49). Des investigations très poussées (gammagraphies, etc...) avaient alors révélé de graves défauts d'injection et un état avancé de corrosion des câbles rendant ainsi nulles toutes possibilités de consolidation de l'ancrage .

### 2.1.2. Les contraintes de l'opération.

Elles étaient particulièrement nombreuses et délicates.

Nous examinerons les principales d'entre-elles.



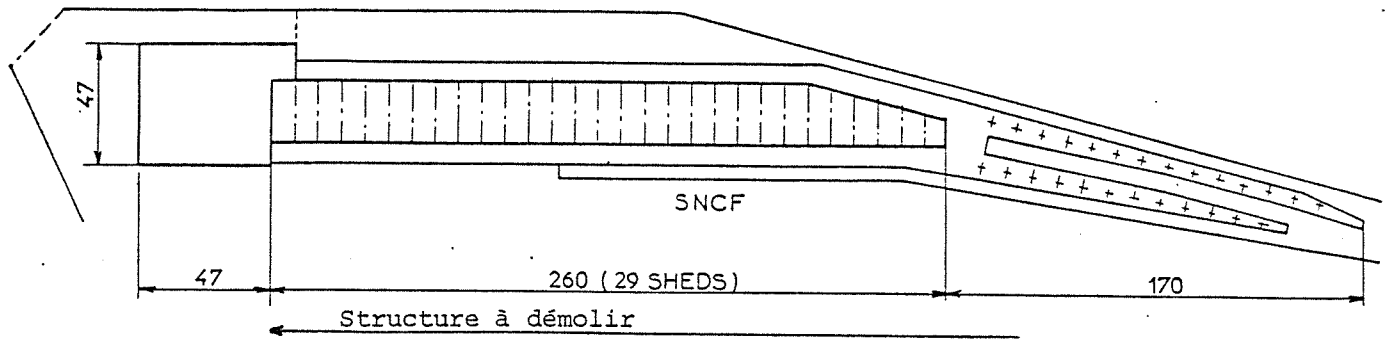


fig.5.47a Les entrepôts

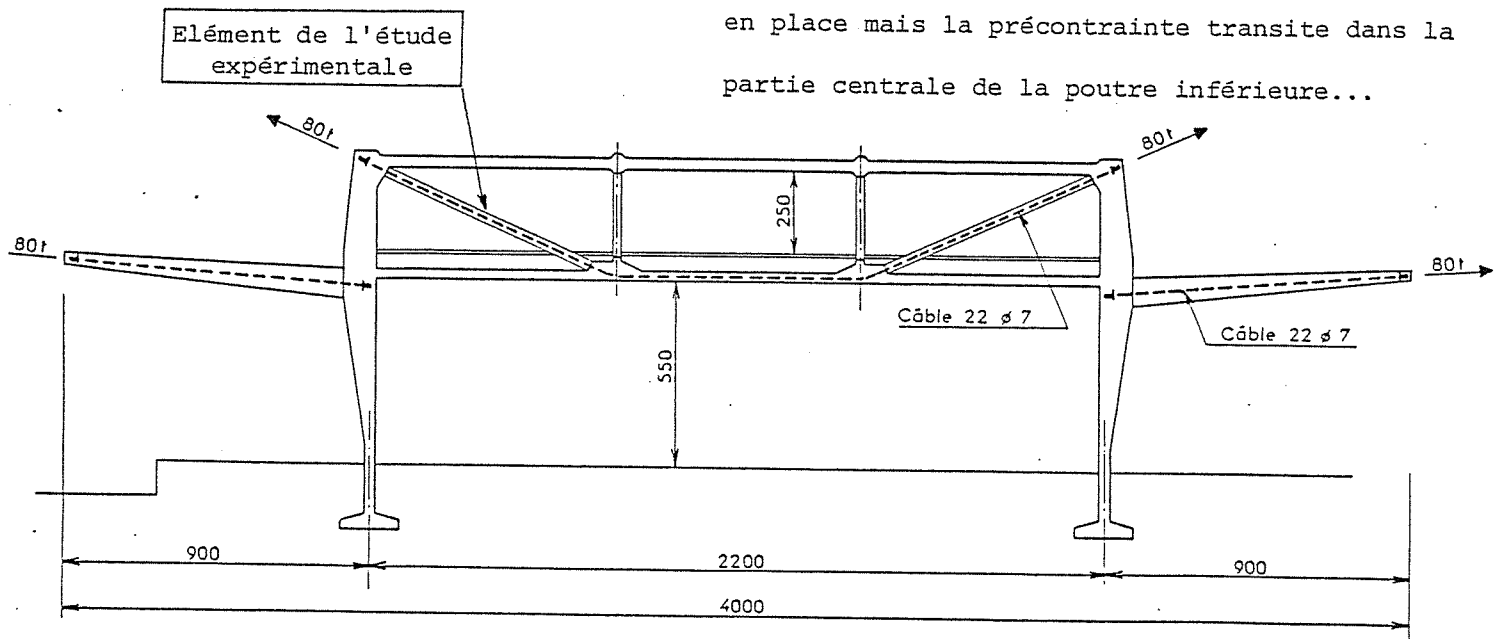
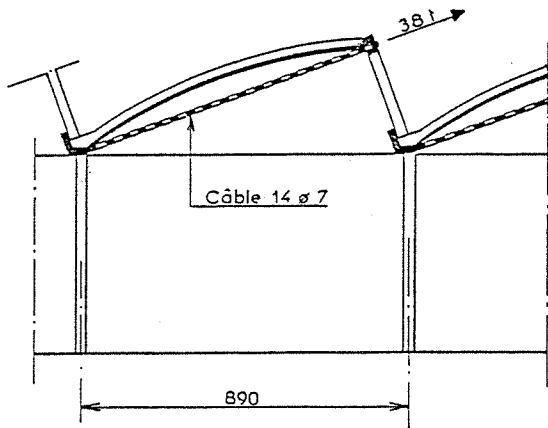
continuaient à fonctionner pendant les travaux qui occupaient 4 sheds (2 en démolition, 2 en reconstruction en Lamelle-collé) et avançaient au rythme de 2 sheds par semaine.

fig.5.47b La coupe longitudinale du bâtiment

présente un cas intéressant de coque mince (béton de 6 cm d'épaisseur) précontrainte extérieurement.

fig.5.47c La structure proteuse de la couverture

est doublement mixte : les consoles C, les tirants D et les potelets P sont préfabriqués. Les consoles et les tirants sont précontraints. Le reste est en béton armé coulé en place mais la précontrainte transite dans la partie centrale de la poutre inférieure...



2.1.2.1. la conservation impérative du service de l'entrepôt dans 24 travées sur 29.

Seules donc, cinq travées pouvaient être consacrées au chantier. Elles devaient l'être dans l'ordre suivant.

- une à l'arrêt et au démontage des réseaux d'équipement technique,
- une à la démolition du béton armé et précontraint (poutres, voiles, coques),
- une au stockage des matériaux et matériels nécessaires à la démolition et à la reconstruction,
- une à la reconstruction de la charpente et de la couverture,
- une au remontage et à la mise en service des réseaux d'équipements.

2.1.2.2. les délais d'exécution.

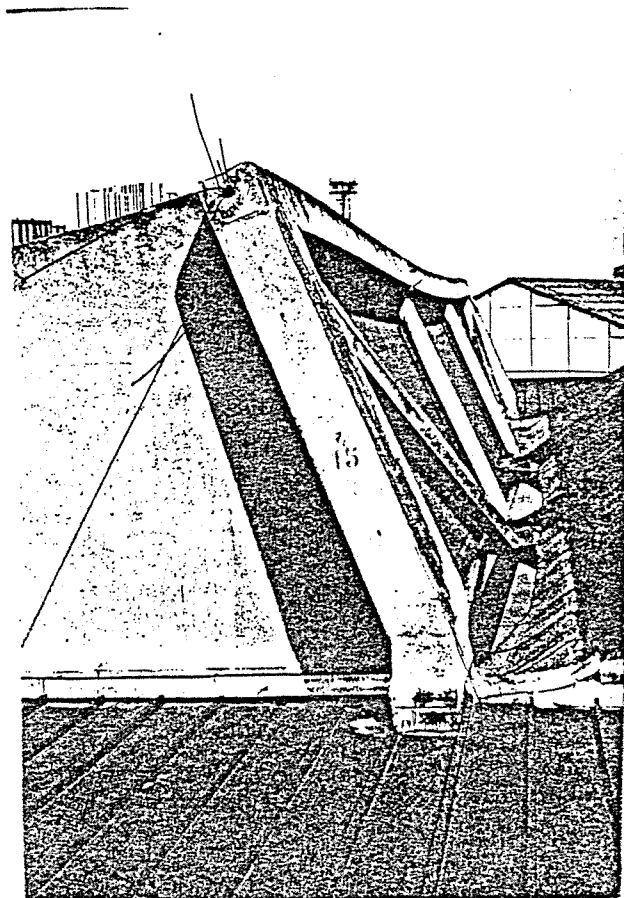
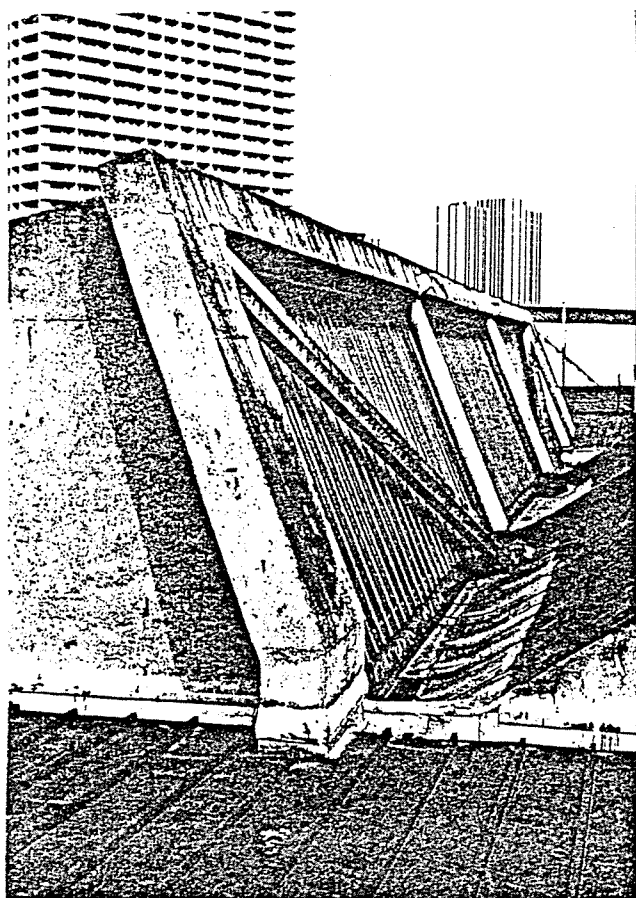
Ce chantier mobile de cinq travées devait impérativement se déplacer au rythme de deux travées par semaine.

Les opérations de réception et de transfert ne pouvaient s'effectuer que le samedi matin durant un horaire précis aménagé dans le planning du service des N. M. P. P.

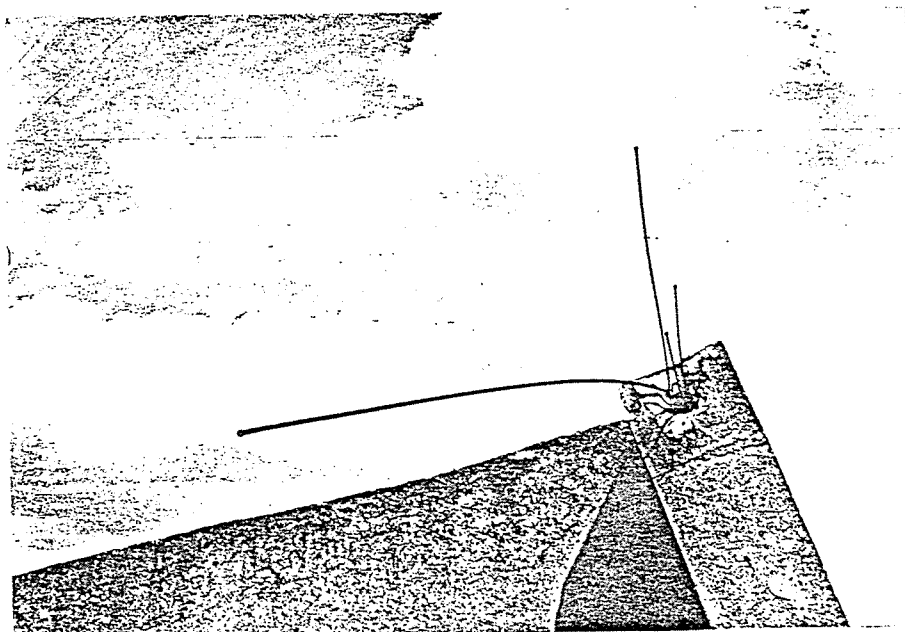
Une telle contrainte nécessitait que les opérations de démolition du béton armé et du béton précontraint soient parfaitement planifiées et conduites suivant un horaire très strict qui, par ailleurs, devait rester absolument compatible avec toutes les autres opérations du chantier, avec les consignes strictes de sécurité et avec le programme d'utilisation de l'engin de levage.

Un planning établi suivant la METHODE PERT, à partir des temps unitaires, devait conduire chaque phase de l'opération "démolition-recons-à trente minutes près.

Avant rupture



Après rupture



#### 2.1.2.3. la démolition des 200 poutres (ou tirants) en béton précontraint

C'était le point le plus original et le plus délicat de l'étude.

La vérification expérimentale des calculs établis dans le paragraphe précédent n'avait pu être effectuée (elle le sera, en fait, pendant la durée de l'opération).

Les gammagraphies, bien que nombreuses, ne permettaient pas non plus d'assurer l'unicité dans le comportement des câbles et des ancrages lors des opérations de découpage... Différentes hypothèses avaient donc été envisagées conformément au § 1.1.

Nous verrons, dans l'examen de la méthode d'exécution quelles conséquences nous avons tiré de ces hypothèses concernant les câbles et les ancrages.

#### 2.1.2.4. la conservation de la structure inférieure.

Du point de vue mécanique, les semelles de fondation et les poteaux (découpés en tête) étaient conservés afin de recevoir la nouvelle couverture. Il fallait que les opérations de démolition (et de reconstruction) évitent toutes sollicitations supplémentaires à ces éléments (problème du contreventement assuré par la couverture, notamment).

Par ailleurs, la plupart des équipements techniques (chauffage par rayonnement entre autres) devaient être conservés en parfait état sur le chantier de démolition afin d'être remis en place après la construction de la nouvelle couverture.

#### 2.1.2.5. l'évacuation et l'approvisionnement du chantier

Ils constituaient une sujétion importante du fait de la faible emprise au sol et des contraintes liées aux circulations routière et ferroviaire de l'entrepôt qui ne laissaient que d'étroits créneaux

pour cette opération.

#### 2.1.2.6. Les nuisances

Le cahier des charges fixait des limites très strictes à l'emploi d'engins mécaniques bruyants sur le chantier. La proximité des employés des N.M.P.P. imposait une réduction maximale de toutes les formes de nuisances propres à ce type de travaux.

#### 2.2 La méthode et l'exécution.

L'idée générale de la méthode que nous avons proposée est de "réduire", après avoir totalement étayé l'ensemble de la couverture, le béton précontraint en béton simplement armé par découpage des câbles.

Compte tenu de la prise en compte simultanée, afin d'éviter tous risques, des trois hypothèses précédemment émises sur le comportement des câbles et des seuls résultats théoriques déterminés en C.1.2. - l'étude expérimentale n'ayant pu être effectuée qu'a posteriori - 28 coupes de câbles par sheeds ont été nécessaires (soient 812 coupes, pour l'ensemble du chantier).

Par ailleurs, les extrémités des poutres étaient toutes munies de blindages destinés à recevoir les têtes de câbles.

Les contrôles des sorties des fils en tête et les mesures de l'évolution des déformations (et des contraintes) dans l'élément précontraint aux instants de la coupe ont permis d'apprécier la qualité des hypothèses émises, et la nécessité d'envisager les différents cas précédemment énoncés.

La précontrainte ainsi neutralisée, la structure était alors partiellement supportée par les étalements. Ceux-ci avaient d'ailleurs dû être très convenablement étudiés pour satisfaire aux conditions de charges, de gabarit (nécessité d'envelopper la coque), de mobilité (l'ensemble, monté sur vérins, devait pouvoir être replié et transféré d'une

travée à l'autre en moins de deux heures) et, bien évidemment, de sécurité des personnels (qui travaillaient constamment à 10 mètres de hauteur environ).

Les dernières opérations de démolition allaient consister, de façon plus ordinaire, en une mise au gabarit de tous les éléments de béton armé (poutres, voiles, tirants, etc...), en vue de leur évacuation par transport routier... Il ne s'agissait plus alors que d'un simple démontage que le découpage thermique permet d'effectuer rapidement et avec précision.

### 2.3 Le bilan de l'opération

L'opération de démolition par découpage thermique a nécessité 78 jours de travail (six hommes), soit exactement le temps annoncé lors de la prévision et inscrit dans le planning du chantier.

Les opérations de reconstruction, s'enclanchant à la même vitesse, conduisaient, chaque semaine, à la réception de deux travées nouvelles.

Le découpage thermique a réclamé, pour cet ouvrage, 24 000 mètres de lances thermiques... 14 000 m<sup>3</sup> d'oxygène ont été nécessaires à leur combustion.

En génie civil, le coût est toujours un élément déterminant qui, quelles que soient la difficulté et l'originalité du problème technique proposé, ne doit pas être ignoré : il est sans doute intéressant de noter que la démolition par découpage thermique a représenté, ici, moins de 9% du montant total de l'opération.

Ainsi, cette opération a été particulièrement représentative de la nature des futurs problèmes de démolition, parce que conduite dans le plus strict respect de conditions draconiennes de planification, de nuisances et de sécurité. Elle a, de plus, pu constituer, grâce au concours du Département BETONS ET METAUX du L. C. P. C., un champ original

de "recherches sur modèles en vraies grandeurs", dont les résultats nous paraissent importants dans la perspective des grandes démolitions futures.





CHAPITRE VI

-:-:-

CONCLUSION ET PROSPECTIVE

L'objectif général de notre mémoire était de contribuer à montrer, à travers la méthode que nous avons conçue et développée, que les problèmes de démantèlement des structures en béton ne pouvaient plus, désormais, se dispenser d'une approche scientifique rigoureuse, seule voie permettant de déboucher sur l'élaboration de technologies fiables et optimisées.

Ainsi, notre étude nous a permis de mieux maîtriser les phénomènes de fusion des composés minéralogiques. Nous avons pu, notamment pour le cas des bétons à granulats siliceux et à granulats calcaires, concevoir et élaborer, par la recherche systématique des zones de puits thermiques, un procédé technologique de découpage performant et peu consommateur d'énergie.

Notre détermination des conséquences du découpage thermique sur les propriétés du béton et du béton armé au voisinage de la coupe nous a donné des résultats essentiels : en effet, il a pu être montré que le domaine altéré par le champ de température reste de petite dimension (de dix à quarante millimètres suivant le critère thermique ou mécanique retenu pour exprimer la gravité de cette altération) et qu'il demeure compatible avec les conditions de la plupart des applications industrielles. Pour quelques cas cependant, l'étude de l'influence de certains paramètres (orientation spatiale de la coupe, âge et teneur en eau du béton, géométries singulières de certains modèles...) s'est avérée indispensable au choix rationnel d'une méthode d'exécution (renforcements d'ouvrages, poutres en béton précontraint, etc...).

Enfin, en prolongement naturel de nos études théoriques et de nos travaux de laboratoire, nos " expériences en dimensions réelles " ont constitué le banc d'essai le plus probant pour vérifier la validité de nos résultats. Elles furent bien souvent la source d'interrogations nouvelles, la cause de nécessaires retours au laboratoire et l'origine de collaborations avec de nombreux chercheurs... Outre les opérations prototypes qu'elles ont pu élaborer dans le domaine du béton armé, elles nous ont aussi permis de contribuer, avec succès, à l'ouverture de cet immense "chantier" que va constituer, dans les années futures, à travers le monde, la démolition des ouvrages en béton précontraint. Ainsi, elles ont pu apporter la preuve que le découpage thermique, au-delà du laboratoire de recherche, était désormais un procédé technologique économiquement et techniquement fiable.

Avant de conclure, nous reviendrons sur notre conception de la démolition pour dire combien il nous paraît essentiel que se développent encore les méthodes nouvelles. Pendant longtemps, dans ce domaine, d'ailleurs à juste titre, on a pu se satisfaire d'un certain empirisme. Cela est désormais devenu insuffisant!

En effet, les évolutions successives de la construction à travers ces trois domaines que sont la maçonnerie, le béton armé et le béton précontraint sont autant d'orientations conduisant à des comportements des structures fondamentalement différents lors de leur démolition ... Utiliser directement, dans l'un de ces trois domaines, les "règles de l'art" consciencieusement établies et admises pour l'un des deux autres, ne manque pas d'avoir des conséquences graves. La construction s'est depuis

longtemps rationalisée; il faut que la démolition suive, à la même vitesse, le même chemin! Nous croyons que c'est à ce prix que nous obtiendrons l'indispensable sécurité du chantier et la nécessaire tranquillité de son voisinage... A une époque où l'amélioration des conditions de travail devient, enfin, une préoccupation prioritaire, l'homme ne peut plus se satisfaire des errements techniques de ces dernières décennies dans ce domaine.

Les prochaines années vont sans doute voir se multiplier les problèmes de démolition dans lesquels interviendront des conditions de nuisances et de sécurité de plus en plus draconiennes. Notre conviction est que la technique que nous avons développée, parce que l'on en connaît bien, désormais, les performances et les rendements, mais aussi, les conséquences et les limites, peut contribuer à la réalisation de ces opérations futures... Notre certitude est aussi, que, dans ce domaine, l'association et la collaboration entre la Recherche et l'Industrie doivent être étroites : ainsi, par exemple, l'expérimentation que nous avons pu conduire, en vraie grandeur, grâce au concours des Services de l'Equipement lors de la démolition de la structure précontrainte des N.M.P.P. est en cela représentative d'une démarche qui pourrait, selon nous, être envisagée lors des grands projets de démantèlement à l'étude actuellement.

Depuis des siècles, l'un des premiers soucis de l'Homme est de construire ... Par contre, il a souvent abandonné au temps, aux catastrophes naturelles et aux actions guerrières ou criminelles, la pénible tâche de détruire.

Ainsi, cette "sélection naturelle" imposée aux constructions anciennes a largement éliminé, au fil du temps, l'inutile, le laid ou le grotesque pour ne nous laisser, le plus souvent, en héritage, que le beau ou le sacré...

Depuis quelques dizaines d'années, cette vérité n'est plus! L'avènement du béton a tout bouleversé en rendant les constructions, toutes les constructions, quasi-indestructibles, qu'elles soient belles ou laides, originales ou grégaires.

Si l'on veut désormais que l'homme garde la maîtrise des facteurs qui conditionnent la qualité de sa propre vie et la richesse de l'héritage qu'il transmettra aux générations futures, il nous paraît nécessaire que, face au développement considérable de l'urbanisme, il se donne les moyens d'intercepter, de modifier, voir de détruire ce qui, au plus profond de son être, ne le satisfait plus.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- (1) J. BENARD  
L'oxydation des métaux, T1 et 2 - Gauthier - Villars - 1964
- (2) J. PAIDASSI  
Le fer (Monographie) Gauthier - Villars - 1964
- (3) HANSEN M, ANDERKO K  
Constitution of Binary Alloys - Mc Graw Hill, 1958
- (4) J. PAIDASSI  
L'oxydation du fer dans l'oxygène aux températures supérieures à 400°C  
(Thèse Paris 1954)
- (5) J. BENARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT et J. TALBOT  
Métallurgie générale - Masson - 1969
- (6) N.L. BOWEN  
Am. J.Sci. 33 - The System Albite-Anorthite
- (7) N.L. BOWEN and J.F. SCHAIRER  
Am. J. Sci., 5th, 1935 - Melting Relations of Olivine
- (8) REIGH and BARTH  
Am. J. Sci. 5th, 1938 - The System Nepheline - Silica
- (9) N.L. BOWEN  
1951 - Equilibrium diagram of the System Anorthite - Diopside.





- (10) BARTH  
Wiley - N.Y. - 1967 - Theoretical Petrology
- (11) HAROLD LATTIMORE ALLING  
Mc Graw - Hill B.C. - N.Y.- 1972 - Intéprétative Petrology of Igneous Rocks
- (12) O. ANDERSEN  
Am. J. Sci., 15, The System Anorthite
- (13) N.L. BOWEN, J.F. SCHAIRER and E. POSNJAK  
Am. J. Sci., sep. 35, The System Ca O - Fe O - Si O<sub>2</sub>
- (14) TURNER and VERHAGEN  
Mc Grill B.C. - N.Y. - 1961 - Igneous and Métamorphic Petrology
- (15) Y. MALIER  
Annales ITBTP sept. 77 - Le Découpage thermique des bétons armés et précon-  
traints
- (16) H. PONCIN  
Université de Paris - 1968 - Cours d'échanges thermiques (D.E.A.)
- (17) H.S. CARSLow and J.C. JAEGER  
Conduction of Heat in Solids - 1973 - Oxford
- (18) P. VERNOTTE  
Thermocinétique générale - P.S.T. Ministère de l'air
- (19) JACOB  
Heat Transfer - Vol. 1 er 2 - J. Wiley.
- (20) H. PONCIN  
Etudes théoriques et expérimentales sur le comportement thermique  
des matériaux - 1975 - I.F.C.E.

- (21) J. C. MARECHAL  
Propriétés thermiques des matériaux - Cahiers de la Thermique - 1975 ch V
- (22) P. DUMEZ  
Propriétés thermiques des matériaux poreux - 1967 - I.F.C.E.
- (23) T.E.W. SCHUMANN, V. VOSS  
Fuel, 1934, 13, n° 8, 249, 56
- (24) M.R. J. WILLIE et P.F. SOUTHWICK  
Journal Petrol. Technol., 1954, 6, 44
- (25) D.KUNII, J.M. SMITH  
A.L. Ch. E. Journal, 1955, 1, 193
- (26) A. ROUSSEY  
Revue générale de Thermique, 1963, 3, 3, 317
- (27) P. CALVET  
Revue générale de Thermique, 1963, 12, 1383
- (28) A. COMBARNOUS  
Transferts de masse au sein des matériaux non métalliques - C.I.S.C., 1, 1977
- (29) A.V. LUIKOV  
Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, 1966, Pergamon
- (30) A.V. LUIKOV and MIKHAILOV  
Théorie of Energie and Mass Transfer, 1961, Prentice Hall
- (31) J.C. MARECHAL  
Mesure de la conductivité thermique des bétons , RILEM 1968, n° 5
- (32) J.C. MARECHAL  
Contribution à l'étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton  
en fonction de la température - I.T.B.T.P. oct. 70

- (33) J.C. MARECHAL  
Propriétés thermiques de matériaux de construction en fonction de la température A.T.P.B. Bruxelles av il 1968 n°2
- (34) J.C. MARECHAL  
Fluage du béton en fonction de la température - A.S.P. 1969 mars
- (35) C.C.B.A. 68  
Règles techniques de conception et de calcul des Ouvrages et constructions en béton armé - juin 1970 - M.E.L.
- (36) F.I.P. - C.E.B.  
Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton - Congrès de la F.I.P. - Prague 1970
- (37) S. SORETZ  
A comparison of beam tests and pull out tests - RILEM n°28 - 1972
- (38) J.C. BONY, G CLAUDE, S. SORETZ  
Comparaison des essais d'adhérence par flexion et par traction - RILEM n°35 - 1973
- (39) L.P. BRICE  
Adhérence des barres d'acier dans le béton - I.T.B.T.P.avril 1951
- (40) KAMMERER  
Contraintes d'origine thermique - Ecole Centrale - 1972
- (41) S.S. MANSON  
Contraintes d'origine thermique - DUNOD
- (42) Y. MALIER  
Le découpage thermique des structures de génie civil - Portland Cement Association - Sherbrooke mai 1978
- (43) Y. MALIER  
Démolition du béton précontraint - Colloque Amer. Concrete Institute Charon avril 1978

- (44) R. ROBINSON et A. BICHARA  
Etude du problème de l'adhérence dans le béton armé - C.S.T.B.1951
- (45) Y. GUYON  
Constructions en béton précontraint - Eyrolles 1968
- (46) LACROIX  
Béton précontraint - E.N.P.C. 1975
- (47) KEUNING SOZEN and SIESS  
A study of anchorage in P.S.C. - Illinois 1962
- (48) BASE  
Cement and Concrete Association, TRA/232 , 8 - 1956
- (49) ACKER, Mc BRACHET, BREVET , MALIER  
Les enseignements à tirer de la démolition d'une construction en béton précontraint par post-tension - B.L. Labo. des Ponts et Chaussées - 1978
- (50) Y. MALIER  
Découpage thermique de la couverture en béton précontraint d'un centre de tri de 11 000m<sup>2</sup> - Construction mai 1978.