

50376  
1991  
218



67174

N° d'ordre 800

50376  
1991  
218

# THESE DE DOCTORAT

Présentée à

l'Université des Sciences et Techniques de Lille

Spécialité

**GENIE CIVIL**



## MISE AU POINT ET EXPLOITATION D'UNE METHODE DE MESURE DE LA CONTRAINTES ABSOLUE DANS LES STRUCTURES EN BETON

Par

**Abdelhamid GHOMRANI**

Soutenue le 6 novembre 1991 devant le Jury composé de :

MM. ABDUNUR C  
BYLE-BODIN  
HENRY JP  
SHAHROUR I  
TONNOIR B

LCPC PARIS  
UNIVERSITE LILLE I  
UNIVERSITE LILLE I  
UNIVERSITE LILLE I  
LRPC LILLE

Rapporteur  
Rapporteur  
Président  
Examinateur  
Examinateur

# RESUME

Le présent rapport décrit l'étude et l'optimisation d'une technique de mesure originale appelée "Mesure de contraintes par libération". Cette méthode, de type semi-destructif s'est fixée comme objectif d'appréhender en un point d'une structure la contrainte totale. Son application est essentiellement dirigée vers le diagnostic des ponts en béton précontraint. La pratique d'un entaillage pour "mesurer" les contraintes est ancienne puisque la méthode a déjà été utilisée dans les matériaux rocheux des mines. Bien que son adaptation au béton soit relativement récente, les premières applications expérimentales ont pu apporter des éléments de réponse positifs concernant par exemple :

- la faisabilité métrologique de la méthode
- le développement de l'essentiel de son matériel prototype.

Notre étude comprend quatre parties :

- la première partie décrit les travaux déjà réalisés en soulignant tous les aspects qui auront, par la suite, une influence directe sur la poursuite de la recherche. Dans cette partie notre objectif est donc, à partir de l'analyse de la bibliographie existante et des travaux déjà réalisés, de cerner les points restant à éclaircir, pour en déduire nos axes de recherche
- la seconde partie présente le programme expérimental : c'est en effet à partir d'essais systématiques pratiqués en conditions rigoureusement contrôlées que l'on a pu mettre en évidence tous les paramètres positifs et négatifs de la méthode. Ce chapitre constitue une grande partie de notre étude
- la troisième partie est d'ordre théorique :  
Elle traite de la modélisation d'un essai par la méthode des éléments finis en élasticité linéaire
- enfin la quatrième partie permet de dégager une méthode-type de dépouillement des mesures et d'exploitation des résultats.

# AVANT-PROPOS

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre des recherches menées par la section "Ouvrages d'Art" du Laboratoire des "Ponts et Chaussées" de Lille sous tutelle du L.C.P.C. de Paris, en collaboration directe de l'Université de Lille.*

*J'exprime ma vive reconnaissance à tout le personnel du groupe "Ouvrages d'Art" pour leur sympathie et leur aide précieuse.*

*Mes remerciements les plus cordiaux vont à Monsieur B. TONNOIR qui m'a dirigé et conseillé avec grande compétence .*

*J'adresse aussi tous mes remerciements à Monsieur Ph. BOILOT Directeur du Laboratoire des Ponts et Chaussées, pour m'avoir accueilli dans son Etablissement et mis à disposition son matériel .*

*Je remercie Monsieur I. SHAHROUR Professeur à l'Ecole Centrale de LILLE qui m'a assuré la Direction de cette thèse, avec une grande disponibilité.*

*Je tiens également à remercier :*

- Monsieur JP. HENRY qui m'a fait un grand honneur d'examiner ce travail et en assurant la Présidence du Jury*
- Messieurs C. ABDUNUR et BYLE-BODIN, Rapporteurs de cette thèse*
- Messieurs les Responsables de l'Université de LILLE I, ainsi qu'à tous les membres de l'équipe doctorale*
- Madame C. VANDERBEKE pour sa disponibilité et les soins apportés à la dactylographie de ce manuscrit.*

*C'est avec plaisir que j'adresse tous mes remerciements à mes Collègues et amis et à l'ensemble des services tant du Laboratoire que de l'Ecole Centrale de Lille pour le soutien moral et matériel qu'ils m'ont apporté pendant toute la durée de ce travail, et particulièrement Madame D. TONNOIR et Monsieur Ph. DUNEZ.*

*J'exprime toute ma gratitude à mon épouse qui m'a été d'un grand secours, dans les moments les plus difficiles.*

*Je remercie enfin tous les professeurs qui, au cours de ma vie scolaire et étudiante ont suscité en moi le goût des sciences et le sens de la réflexion...*

# SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION

NOTATIONS ET CONVENTIONS DE SIGNE .....2

## PREMIERE PARTIE

**1. HISTORIQUE DE LA METHODE** ..... 4

1.1. Principe de la méthode ..... 4

1.2. Domaine d'application ..... 6

1.2.1. *Application à la mécanique des roches* ..... 6

1.2.2. *Application à la maçonnerie* ..... 6

1.2.3. *Application au béton précontraint* ..... 7

1.3. Rappel des travaux antérieurs

1.3.1. *Développement du matériel* ..... 8

1.3.2. *Progrès de la méthodologie* ..... 9

1.3.3. *Premiers résultats obtenus (essais de Rouen)* ..... 9

1.4. Incidence du retrait hydraulique sur la distribution des contraintes dans le béton ..13

1.4.1. *Approche d'une distribution de contraintes de retrait* .....13

1.4.2. *Quelques ordres de grandeur à connaître* .....16

1.5. Conclusion de la première partie .....17

## DEUXIEME PARTIE

**2. ESSAIS EN LABORATOIRE** .....19

2.1. Objectifs .....19

2.2. Matériels utilisés .....19

2.2.1. *Système de libération et de refroidissement* .....19

2.2.2. *Matériels d'extensométrie et d'acquisition* .....20

2.2.3. *Application de la charge* .....21

2.3. <u>Corps d'épreuves</u> .....	21
2.3.1. Définition des différents corps d'épreuves du programme expérimental.	21
2.3.2. Confection et préparation des dalles .....	23
2.3.2.1. <i>Caractéristiques du béton</i> .....	24
2.3.2.2. <i>Préparation et aménagement des dalles</i> .....	24
2.3.3. Instrumentation .....	25
2.4. <u>Mesures</u> .....	27
2.4.1. Déroulement type d'un essai de libération .....	27
2.4.2. Surveillance permanente des données expérimentales .....	27
2.4.3. Conduite de l'essai .....	28
2.5. <u>Dépouillement des résultats expérimentaux</u> .....	30
2.5.1. Exemples .....	31
2.5.2. Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus .....	32
2.5.3. Première synthèse des résultats .....	36
2.5.4. Quelques ordres de grandeurs observés .....	39
2.6. <u>Conclusion de la deuxième partie</u> .....	42

### TROISIEME PARTIE

3. <u>MODELISATION DE L'ESSAI DE "LIBERATION DES CONTRAINTES"</u> .....	45
3.1. <u>Objectifs</u> .....	45
3.2. <u>Paramètres et caractéristiques du champ modélisé</u> .....	45
3.2.1. Modélisation en 2 D .....	45
3.2.1.1. <i>Formulation</i> .....	48
3.2.1.2. <i>Hypothèses de travail</i> .....	48
3.2.1.3. <i>Maillage</i> .....	49
3.3. <u>Résultats de calcul</u> .....	50
3.3.1. Commentaires .....	51
3.3.2. Evaluation directe des contraintes .....	52
3.3.3. Problèmes de la méthode directe .....	57
3.4. <u>Effets du module d'young</u> .....	57
3.4.1. Echantillon d'essai .....	58

3.4.2. Expérimentation - Résultats .....	58
3.4.2.1. <i>Présentation des graphes</i> .....	64
3.4.2.2. <i>Interprétation</i> .....	64
3.4.3. Résultats de calcul .....	66
3.5. <u>Remarques et conclusions</u> .....	67

### **QUATRIEME PARTIE**

#### **4. MISE AU POINT D'UNE METHODE D'EXPLOITATION DES RESULTATS**

4.1. <u>Présentation de la méthode</u> .....	70
Le processus dans le détail .....	71
4.2. <u>Exemple d'utilisation de la méthode</u> .....	72
4.2.1. Principes de la méthode d'adéquation .....	73
4.2.2. Déroulement du programme .....	73
4.2.3. Application de la méthode .....	74
4.3. <u>Possibilités et limites de la méthode</u> .....	82
4.3.1. Convergence du paramètre C .....	82
4.3.2. Précision et effets relatifs de quelques paramètres .....	82
4.4. <u>Remarques et conclusions</u> .....	84
 <u>CONCLUSIONS GENERALES</u> .....	 85
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u> .....	88
<u>ANNEXES</u> .....	92

# INTRODUCTION

Le développement de l'extensométrie dans les divers domaines du Génie Civil a permis la mesure des déformations que subit une structure sous l'effet d'une variation des actions extérieures et ainsi l'estimation des sollicitations qui en résultent.

La variation des contraintes s'obtient par le recours à une loi de comportement qui n'est bien souvent qu'une schématisation du fonctionnement réel du matériau : de fait, l'extensométrie classique ne permet pas de déterminer la valeur absolue des contraintes. Pourtant, dans la plupart des cas, c'est cette contrainte absolue qui est importante et qui est un élément essentiel du diagnostic de résistance.

Afin de mieux appréhender la distribution des contraintes dans ce matériau complexe qu'est le béton, une méthode dite de "Libération des contraintes" a été mise au point par

Ch. Abdunur (LCPC PARIS).

Cette méthode consiste en une suppression locale des contraintes, par enlèvement mécanique de matériau, suivi d'une compensation contrôlée des déplacements à l'aide d'un vérin plat épousant au mieux la forme de l'entaille réalisée :

Le champ des déplacements en surface étant surveillé par des bases de mesures extensométriques, l'entaille est ensuite pratiquée dans un plan normal à l'une des directions principales de l'élément à tester. Le vérin est alors introduit afin de permettre le rétablissement du champ initial de déplacements au bord des lèvres de l'entaille ; la mesure de la pression de "compensation des déplacements" nous indiquera alors une valeur approchée de la contrainte de compression initiale.

Bien que le principe en soit simple, la méthode est néanmoins fort complexe. En effet l'hétérogénéité du béton ainsi que ses fortes contraintes résiduelles et thermiques ont une influence directe sur la justesse des mesures. De plus, l'expérimentation pose des problèmes technologiques spécifiques. La méthode de "Libération des Contraintes" ne pouvait déboucher sur des résultats positifs sans la définition d'un mode opératoire efficace, ce qui a été un souci permanent dans notre travail.

## NOTATIONS ET CONVENTIONS DE SIGNE

- $S_j$  : Numéro d'ordre des entailles pratiquées sur une même dalle ( $j = 1, 2, 3$ )  
: Orientation de l'entaille par rapport à la direction des contraintes extérieures appliquées
- $z_i$  : Profondeurs successives de l'entaille  
 $z_i = 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  mm (11 niveaux) pour  $i$  de 1 à 11
- $b_k$  : Bases d'extensométrie, d'amplitude  $k$  perpendiculaire à  $S_j$ ,  $k = 20, 60, 100$  mm
- $\delta$  : Déplacement en ( $\mu\text{m}$ ) mesuré sur les  $b_k$ , comptés positivement pour une contraction, négativement pour une extension (libération d'une traction)
- $S_{ik}$  : Déplacement brut de libération, à une profondeur  $z_i$
- $C_{ij}(k)$  : Coefficients d'influence relatifs aux déplacements des bases (1, 2 et 3)
- $P_V$  : Pression des vérins en (MPa)
- $P_T$  : Pression de rétablissement
- $\sigma_j$  : Contrainte absolue initiale  
comptée - pour une traction  
+ pour une compression
- $\Sigma$  : Compression appliquée en MPa
- $\epsilon$  : Déformation des jauges en  $\mu\text{m}/\text{m}$  (ou " $10^{-6}$ ")
- $E$  : Module d'young du béton testé (MPa)
- $\nu$  : Coefficient de poisson du béton testé
- $\theta_0$  : Température initiale ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta$  : Température finale ( $^{\circ}\text{C}$ )

# **PREMIERE PARTIE**

## **1. HISTORIQUE DE LA METHODE**

### **1.1. Principe de la méthode**

### **1.2. Domaine d'application**

*1.2.1. Application à la mécanique des roches*

*1.2.2. Application à la maçonnerie*

*1.2.3. Application au béton précontraint*

### **1.3. Rappel des travaux antérieurs**

*1.3.1. Développement du matériel*

*1.3.2. Progrès de la méthodologie*

*1.3.3. Premiers résultats obtenus (essais de Rouen)*

### **1.4. Incidence du retrait hydraulique sur la distribution des contraintes dans le béton**

*1.4.1. Approche d'une distribution de contraintes de retrait*

*1.4.2. Quelques ordres de grandeur à connaître*

### **1.5. Conclusion de la première partie**

## **1. HISTORIQUE DE LA METHODE**

Dans ce chapitre, notre objectif est donc, à partir de l'état d'avancement de la méthode, de dégager les points restant à éclaircir, pour bâtir nos expérimentations.

### **1.1. Principe de la méthode de "Libération de Contraintes"**

A notre connaissance, il n'existe encore aucun moyen non dommageable de mesure directe des contraintes absolues dans les milieux en béton ou en maçonnerie. C'est pour cela qu'une méthode dite de "Libération des Contraintes" a été imaginée. Elle avait l'avantage, a priori, de ne pas faire appel aux lois de comportement.

Considérons la dalle en béton précomprimée de la figure 1.1. Cette dalle est déjà instrumentée par des bases de mesures extensométriques chevauchant l'entaille à des distances de 20, 60 et 100 mm qui permettent à tout moment, avant et après l'opération, l'enregistrement du champ cinématique de déplacement suivant les directions principales des contraintes. On va ensuite entailler la dalle avec une fraise disque, dans la direction perpendiculaire à l'axe de la précontrainte extérieure (Fig. 1.2.). Lorsqu'on évide ainsi la dalle, les lèvres de l'entaille ont naturellement tendance à se rapprocher l'une de l'autre du fait de la précontrainte appliquée.

L'entaillage se fait par passes successives, avec attente et mesures à différents niveaux de profondeur (de 20 à 80 mm). A partir de la profondeur de 20 mm, on introduit dans l'entaille un vérin ultra plat à la forme et aux dimensions "exactes" de l'évidement, que l'on gonfle progressivement de manière à obtenir et à dépasser légèrement le rétablissement du champ de déformation initial. La figure 1.3. représente les trois bases de mesures principales, au voisinage de l'entaille.

La pression admise dans les vérins pour rétablir le champ cinématique est appelée pression de rétablissement. Notons que cette opération est effectuée après chaque profondeur d'entaillage de 20 à 80 mm.

Naturellement, tout porte à croire que cette pression de rétablissement correspond approximativement à la contrainte de compression moyenne "libérée" par l'entaillage. Malheureusement on montrera que des phénomènes parasites font que cette hypothèse simpliste est fautive, et que la contrainte réelle existante est souvent très différente de la pression de rétablissement mesurée. On pourra cependant trouver une corrélation entre pression de rétablissement et contrainte réelle libérée.

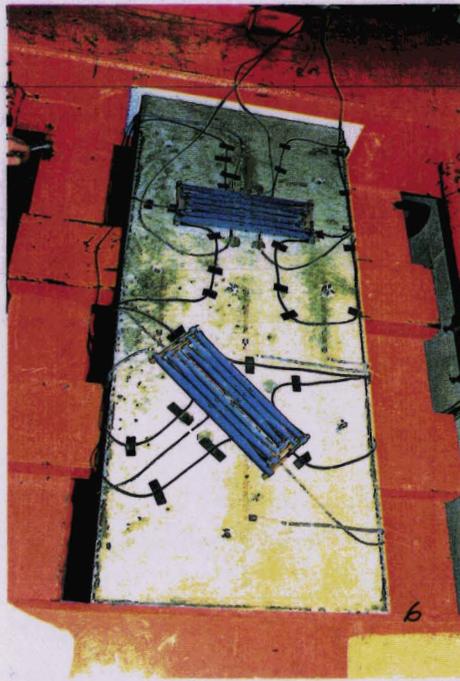


Fig. 1.1. Dalette instrumentée sous précontrainte

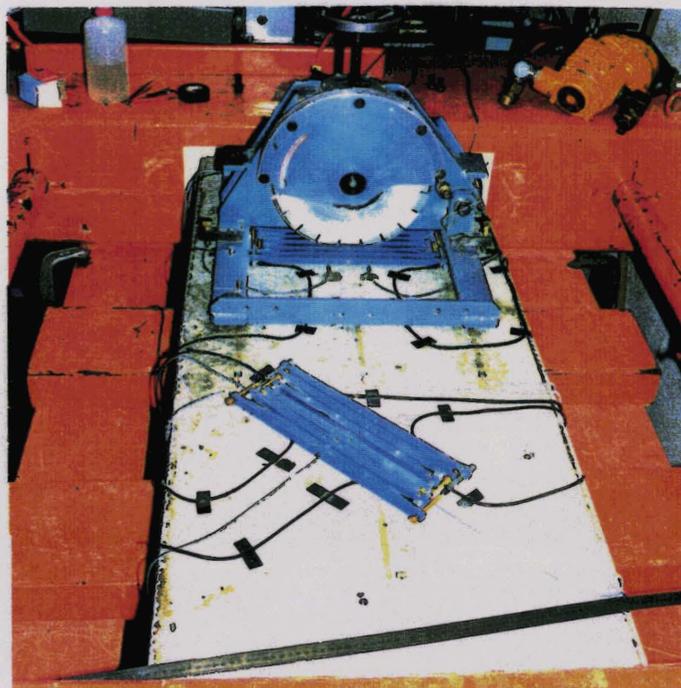


Fig. 1.2. Champ opératoire des essais de "Libération des Contraintes".  
Les opérations d'entailages sont en cours

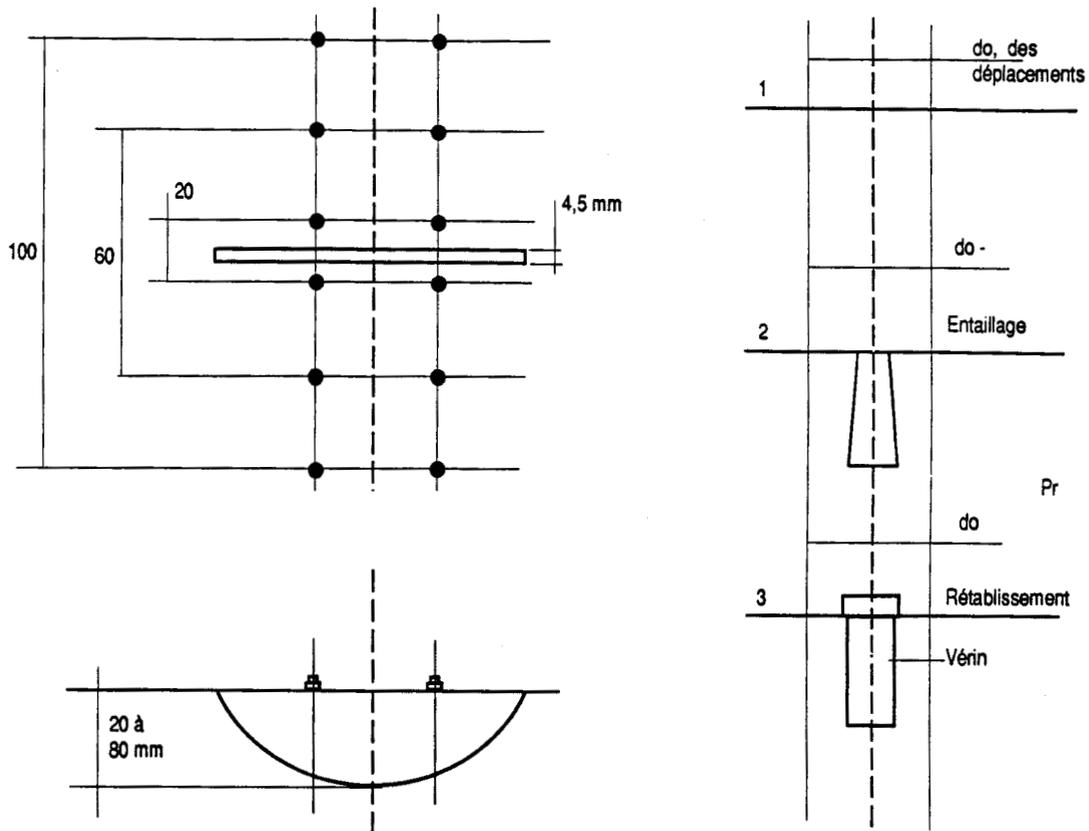


Fig. 1.3. Mesure de contrainte dans le béton.  
Principe de l'essai de "Libération des Contraintes"

## 1.2. Domaines d'application

### 1.2.1. Application à la mécanique des roches

La méthode de libération de contrainte appliquée aux milieux rocheux a fait ses preuves. En effet, l'homogénéité du matériau ausculté (roche), et les très faibles variations de contraintes parasites existantes ont facilité l'accès à des valeurs de contraintes absolues relativement précises (Abdunur 1984).

### 1.2.2. Application à la maçonnerie

Les contraintes de retrait dans la maçonnerie sont faibles, ce qui devrait permettre d'accéder facilement aux composantes de la contrainte absolue. Cet avantage est cependant neutralisé par le fait que le milieu est composite (joints très souples et fragiles), et que la distribution des contraintes est une fonction complexe de positions testées (Abdunur 1984).

### 1.2.3. Application au béton précontraint

Bien que la méthode soit relativement ancienne en Mécanique des roches, une simple transposition au béton ne pouvait conduire qu'à l'échec, du fait de l'hétérogénéité et des lois de comportements particulières du béton. Afin de répondre aux besoins d'auscultation du matériau béton, plusieurs impératifs ont guidé l'étude :

- Analyse du comportement mécanique pur :  
Au voisinage de l'entaille, des incertitudes planaient sur le comportement réel du béton
- Impératifs de miniaturisation :  
Les dimensions transversales habituelles de structures en béton interdisent la réalisation d'entailles de même dimensions que dans les roches. En contrepartie, une trop grande miniaturisation entraîne une sensibilité accrue à l'hétérogénéité du béton, à la présence de microfissures, à la netteté de la coupe et surtout, complique la réalisation du vérin plat.
- Libération à sec et stabilité thermique :  
L'arrosage pendant le sciage ne peut que fausser complètement la mesure, par mouillage, gonflement au voisinage de l'entaille, de même que le refroidissement à l'air ambiant (non deshydraté)
- Mesure d'une traction :  
Lorsque les contraintes dues aux actions extérieures sont des compressions faibles, les contraintes internes dues au retrait, aux effets thermiques ou hygrométriques sont prédominantes : la résultante peut être une traction que la méthode doit également pouvoir "mesurer"
- Séparation des composantes :  
La contrainte absolue mesurée étant une grandeur à composantes multiples, il est souhaitable de séparer les effets des actions extérieures des contraintes résiduelles locales et des distributions non uniformes dans l'épaisseur des pièces
- Présence d'armatures passives :  
Dans des cas isolés la coupure d'une barre d'acier ne peut pas être évitée pendant le sciage. Il pourra alors être nécessaire d'en évaluer l'incidence sur les résultats de mesure.  
Afin de lever ces différents obstacles et rendre la méthode de Libération applicable aux structures en béton, le programme de cette phase a consisté en grande partie à développer et à perfectionner le matériel prototype, à jeter les premières bases théoriques et à effectuer des applications simples sur des modèles en béton.

### 1.3. Rappel des travaux antérieurs

La résolution des difficultés technologiques a été un préalable à toute tentative d'emploi de la méthode.

### 1.3.1. Développement du matériel

#### - Dispositif de Libération

Le sciage se fait par passes successives qui alternent avec les mesures. Cela implique la possibilité d'enlever la scie, puis de la remettre en place avec une grande précision (0,1 mm) au moins ; un dispositif spécial d'adaptation a été mis au point (Fig. 1.4). La coupe obtenue est très nette et d'une largeur uniforme de 4,5 mm.

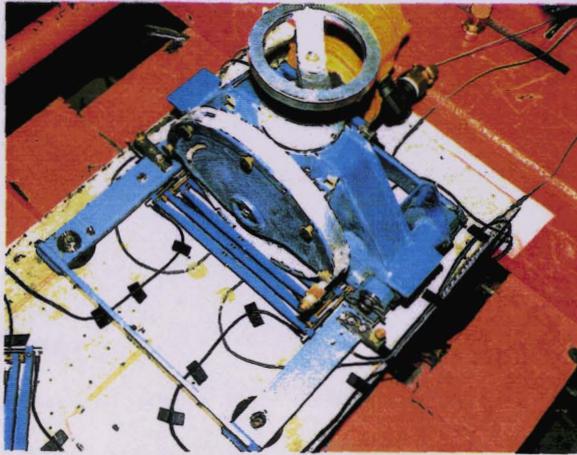


Fig. 1.4. Dispositif de Libération

#### - Vérin de compensation

Les vérins de compensation ont eux aussi demandé une étude particulière unique dans leur genre. Ils ont été conçus exclusivement pour ce projet et sont d'ailleurs brevetés. D'une épaisseur de 4,0 mm environ, ils épousent "parfaitement" la forme de l'entaille. Leur résistance en milieu confiné (dans l'entaille) est de 10 MPa au minimum. Pour des raisons pratiques, le plus petit des vérins mesure 20 mm de hauteur, les autres correspondent aux profondeurs d'entaillage de 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm. Pour les entailles de profondeur inférieure à 20 mm (soit 2, 5, 10 et 15 mm), on ne dispose pas de vérin, et il est impossible de relever la pression de rétablissement.

Notons par ailleurs que la souplesse des bords des vérins a été particulièrement soignée (Fig. 1.5).



Fig. 1.5. Gamme de vérins plats

- Bases d'extensométrie :

Issue d'une analyse numérique et de deux études par photoélasticité et moiré, la disposition des points de mesures tient compte de leur sensibilité respective à la libération et au refroidissement du champ cinématique. Le traçage des épures des déplacements est ainsi facilité. Le système est composé de trois bases de mesure chevauchant l'entaille d'amplitude respective 20, 60 et 100 mm, matérialisées par les paires de pions collés au voisinage de l'entaille de la figure (1.6.).

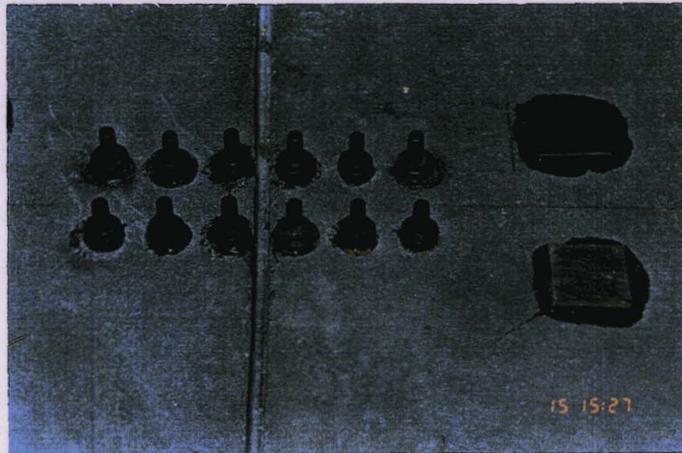


Fig. 1.6. Disposition des trois files de pions, formant les bases  $b_{20}$ ,  $b_{60}$ ,  $b_{100}$

### 1.3.2. Progrès de la méthodologie

Les travaux de la première phase de développement du matériel étant achevés, quelques applications de la méthode de "Libération des Contraintes" ont été réalisées sur des ouvrages en service afin de confirmer la faisabilité et mettre au point la méthodologie d'exécution.

- Premiers essais de Libération

. Les bipoutres du Laboratoire Régional de Trappes.

Ce sont des poutres isostatiques, précontraintes depuis 1980, et soumises à une forte flexion constante selon un profil triangulaire de contraintes (+ 12,6/0 MPa), qu'il s'agissait de comparer aux contraintes calculées par libération.

Les mesures ont été effectuées sur les deux faces, de la manière habituelle par plusieurs passes successives.

Sur la face comprimée, il y a un grand écart entre les pressions de rétablissement successivement les trois bases tenant compte du retrait, l'erreur maximale sur les contraintes appliquées est de - 12 % pour les  $b_{20}$  et + 7 % pour les  $b_{100}$ , le rétablissement des  $b_{60}$  donne des valeurs beaucoup plus précises.

## . Le viaduc de Charmaix

Cet ouvrage courbe, sur piles creuses, se trouve confronté à un glissement de terrain susceptible d'entraîner une flexion des appuis. Les contraintes ont été mesurées sur l'une des piles, ce qui a permis de remonter au moment fléchissant. En chaque point, les mesures ont été réalisées à chaque profondeur d'entaillage et ce jusqu'à 80 mm. Il a été possible de tirer des valeurs mesurées une estimation réaliste des moments fléchissants. Enfin quelques hypothèses ont été avancées en ce qui concerne le profil de contraintes existant dans la structure.

### 1.3.3. Essais de Rouen :

Les premiers essais de "Libération des Contraintes" ont été réalisés en 1986 par le Laboratoire Régional de Rouen. En effet c'est pour la première fois que des essais de Libération se font sur corps d'épreuves (dallettes) sous précontrainte contrôlée. Trois dalles en béton de différentes épaisseurs (8, 10 et 16 cm) ont été confectionnées et enduites de résine sur les faces latérales. La dalle d'épaisseur 8 cm a été soumise à une précontrainte de 12,5 MPa dès l'âge de trois jours. La largeur des dalles devait être suffisante pour assurer la stabilité de la structure après libération des contraintes sous chargement, ce qui a conduit à la valeur de 40 cm.

La longueur a été préfixée à 80 cm, les résultats numériques ayant montré que cette valeur est suffisante pour une stabilité cohérente des contraintes dans la zone centrale de la dalle.

#### - Expérimentation :

Avant libération des contraintes, la surface de la dalle à ausculter est minutieusement traitée, car c'est cette surface qui est destinée à la libération par sciage. Les essais se sont déroulés de la façon suivante :

- 1) création d'une entaille
  - 2) introduction d'un vérin plat
  - 3) application d'une pression
  - 4) mesures des déplacements
  - 5) approfondissement de l'entaille
- retour en 2 ou fin

#### - Représentation graphique des résultats obtenus

L'exploitation graphique des déplacements et pressions en fonction de la profondeur d'entaille, observés sur des dalles en béton de différentes épaisseurs, avec et sans précontrainte sont illustrées par des courbes de référence sur les figures 1.7, 1.8, 1.9, et 1.10.

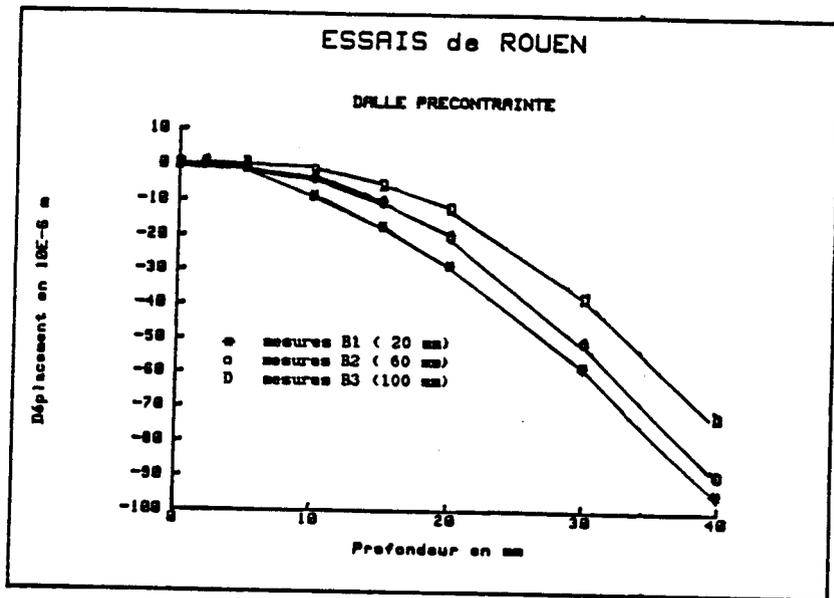


Fig. 1.7. Résultats obtenus sur la dalle d'épaisseur 8 cm (précontrainte de 12,5 MPa)

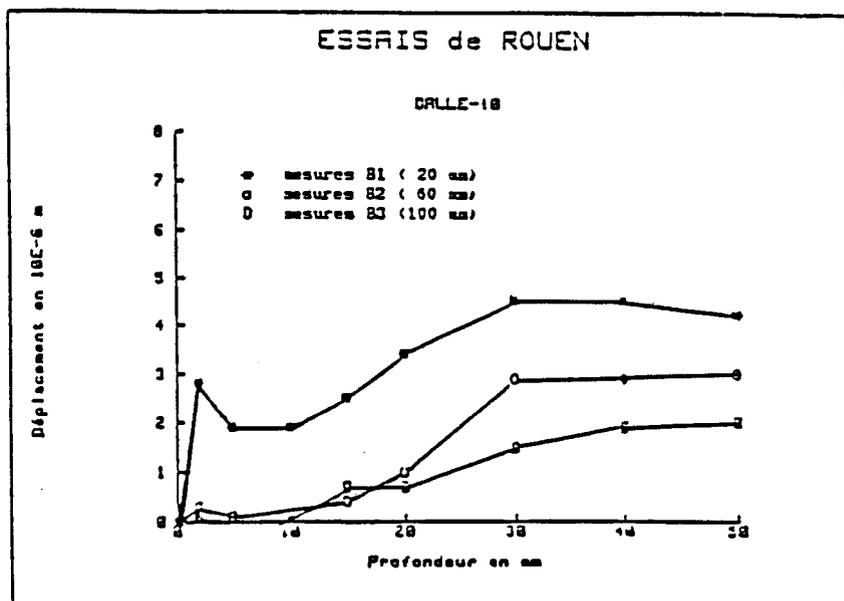


Fig. 1.8. Résultats obtenus sur la dalle d'épaisseur 10 cm (sans précontrainte)

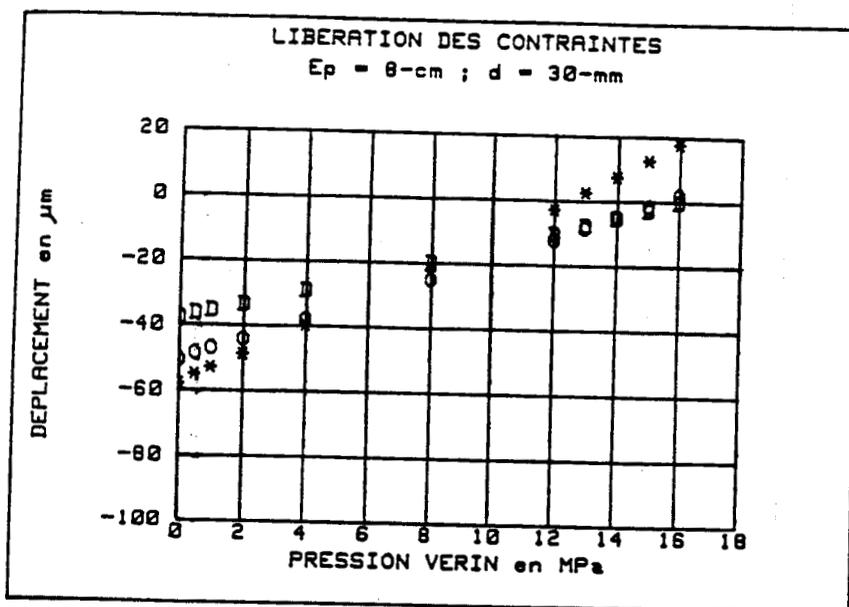


Fig. 1.9. Résultats obtenus sur la dalle d'épaisseur 8 cm (précontrainte de 12,5 MPa) ; à 30 mm de profondeur d'entaille

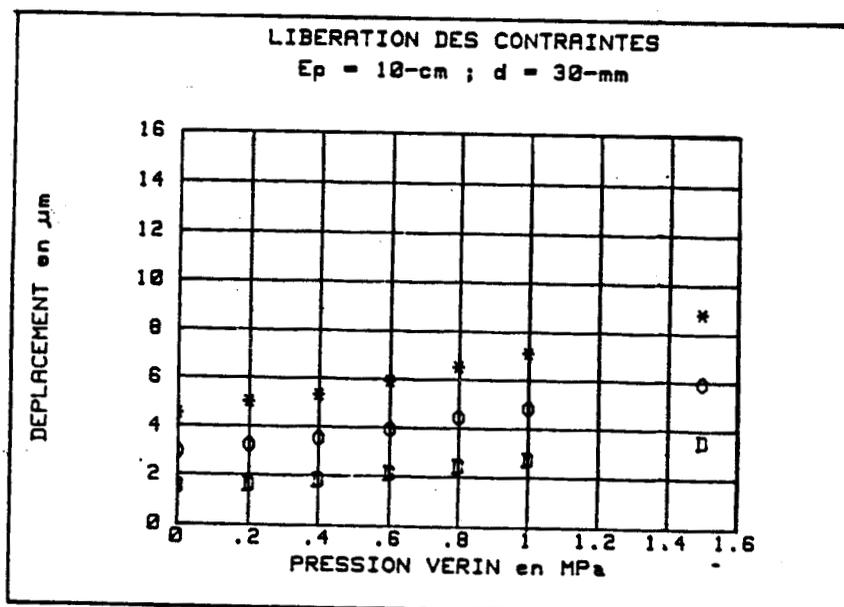


Fig. 1.10. Résultats obtenus sur la dalle d'épaisseur 10 cm (sans précontrainte) à 30 mm de profondeur d'entaille

- Commentaires

Sur l'ensemble des résultats obtenus, quels que soient l'épaisseur, la profondeur d'entaille et le chargement extérieur, quelques points fondamentaux ont été constatés :

- apparition d'une ouverture conséquente des lèvres de l'entaille au début de sa création. Ceci met en évidence l'importance de la contrainte de traction due au séchage du béton.
- la linéarité du comportement de la structure sous l'effet d'une compression dans l'entaille.

Il semble donc que l'endommagement en traction du matériau n'a pratiquement pas d'influence sur son comportement en compression.

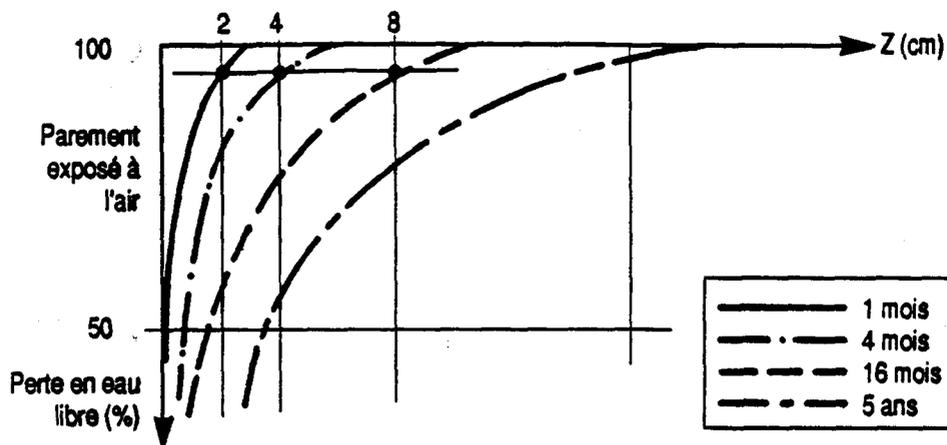
1.4. Incidence du retrait hydraulique sur la distribution des contraintes dans le béton

Dans ses travaux sur le comportement mécanique du béton, P.Acker. (1988), a pu confirmer quelques résultats sur la cinétique de séchage et ses conséquences sur le comportement mécanique instantané et différé du matériau. En effet le retrait dans les structures en béton est proportionnel à la déperdition d'eau d'où les problèmes de fissuration qui affectent les parements d'un béton exposés à l'air libre.

1.4.1. *Approche d'une distribution de contraintes de Retrait*

Cette approche, développée par P. Acker, s'appuie sur le fait que la distribution de la teneur en eau libre a une allure exponentielle, en fonction de t. De même elle est fonction de l'âge et de l'épaisseur de la structure (Fig. 1.11, Fig. 1.12).

La distribution des contraintes de retrait dans une pièce en béton est représentée par les figures 1.13 et 1.14, de même que la profondeur de fissuration qui en résulte.



$$\text{Perte en \%} = 100 (1 - \exp(-K(t) * Z))$$

Fig. 1.11 Distribution des teneurs en eau libre dans un béton, à partir du parement exposé à l'air libre

La figure 1.11 représente la distribution de la teneur en eau à partir d'un parement exposé à l'air libre à différentes profondeurs.

Cette distribution est une exponentielle en fonction du temps.

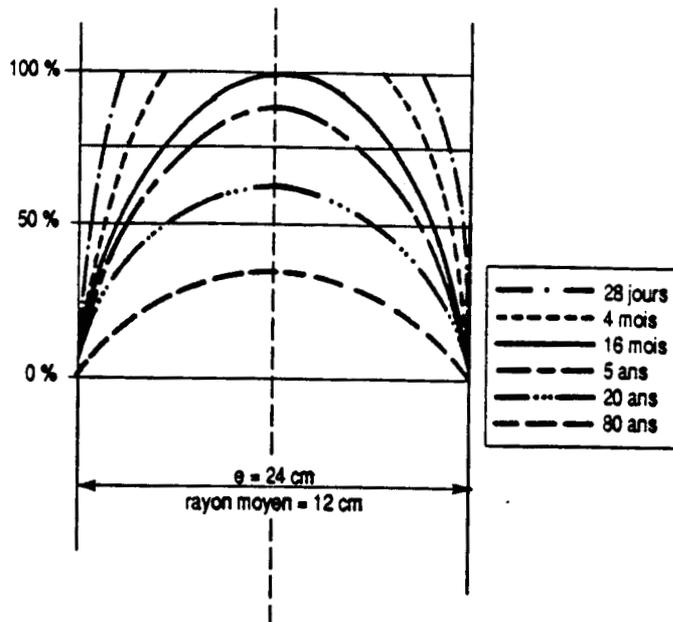


Fig. 1.12. Distributions des teneurs en eau dans une pièce dont 2 faces sont exposées à l'air

On représente par la figure 1.12 l'évolution dans le temps de la distribution de la teneur en eau dans une pièce semi-infinie dont les 2 faces opposées sont exposées à l'air.

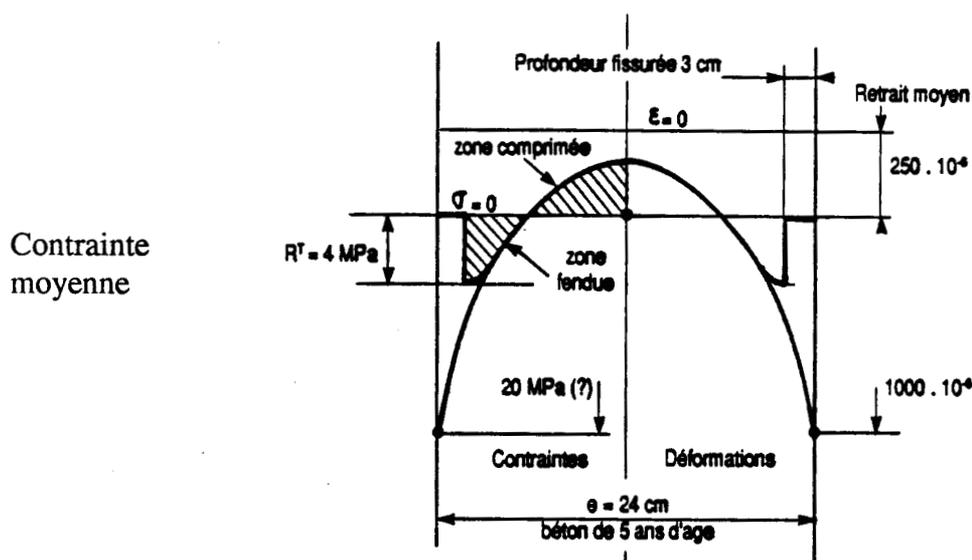


Fig. 1.13. Déformations et contraintes de retrait  
( $\sigma_{\text{moy}} = 0$ )

La figure 1.13 représente une pièce en béton de 5 ans d'âge de 24 cm d'épaisseur non chargée. D'un côté de l'axe on représente le champ de contrainte, de l'autre côté le champ de déformation.

On remarque que la profondeur de fissuration est de l'ordre de 3 cm.

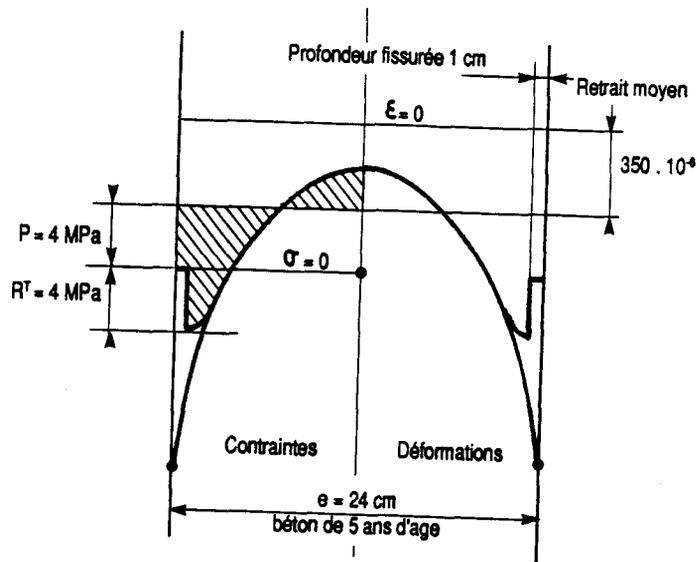


Fig. 1.14. Déformations et contraintes de retrait  
(béton précontraint)

La figure 1.14 représente une pièce en béton mais cette fois-ci précontrainte, la compression limite la profondeur de fissuration à 1 cm.

### 1.4.2. Quelques ordres de grandeur à connaître

Tableau 1.1. : Estimation des contraintes de retrait gêné.  
Dans une pièce de 16 cm d'épaisseur non contrainte et  $\rho = 8$  cm

Contraintes (MPa)	7 j	28 j	4 m	15 m	5 a	20 a	80 a
Fissuré 2 mm	3.5	8.0	10.5	11.0	8.5	5.0	2.5
Fissuré 5 mm	.5	3.5	7.0	8.5	7.0	4.5	3.0
Fissuré 10 mm	0	1.5	4.5	6.5	6.0	4.0	2.5
Fissuré 15 mm	0	.5	2.0	5.0	5.0	4.0	2.5
Retrait moyen f2	.02	.04	.013	.28	.48	.70	.85
Retrait moyen f15	.01	.02	.09	.20	.42	.64	.79

A partir du programme Pickett (Acker 88) nous avons estimé les contraintes de retrait gêné dans une pièce de 16 cm d'épaisseur.

Le tableau 1.1 reprend les valeurs de contrainte de retrait gêné selon l'âge d'un béton ayant été fissuré à une profondeur donnée. En effet à 7 jours la fissuration est de 2 mm, le béton peut supporter 3.5 MPa, à 4 mois la fissure est de 10 mm, le béton supporte 4.5 MPa de contrainte de traction. A 15 mois d'âge la fissure se stabilise à 15 mm et le béton peut supporter 5 MPa jusqu'à 80 ans où les contraintes de tractions diminuent pour atteindre 2.5 MPa.

Tableau 1.2. Valeurs des profondeurs fissurées, en fonction de la contrainte générale et du rayon moyen  $\rho$ .

Prof. fissurée (cm)	7 j	28 j	4 m	15 m	5 a	20 a	80 a
$\rho \downarrow, \sigma = 0$	.4	.8	1.5	3	6	12	24
$\rho \downarrow, \sigma = -10$ MPa	.2	.4	.8	1.5	3	6	12
$\rho = 8$ cm, $\sigma = 0$	0	.4	.6	1.2	1.2	1.2	1.2
$\rho = 8$ cm, $\sigma = -10$ MPa	0	0	0.3	.3	.3	.3	.3

Pour une pièce infinie et un béton de 80 ans, sans charge, la profondeur de la fissure est de 24 cm. Cette même fissure passe à 12 cm sous précontrainte et à 0.3 cm pour un rayon moyen de 8 cm et sous charge, d'où la fermeture des fissures pour un béton précontraint.

#### Caractéristiques courantes d'un béton :

##### Dans le béton frais :

Teneur totale en eau de gâchage : 0.18 (180 l/m<sup>3</sup>)

Dont :

- . Eau strictement nécessaire à l'hydratation du ciment : 0.08 (80 l/400 kg)
- . Eau excédentaire, de maniabilité : eau libre : 0.10 (100 l/m<sup>3</sup>).

## Dans le béton durci

La teneur en eau libre peut être représentée par une courbe exponentielle dont le coefficient dépend de l'âge du béton (tableau 1.3). A titre indicatif, ce coefficient peut prendre les valeurs suivantes :

Age du béton	7 j	28 j	4 m	16 m	5 a	20 a
Coefficient (k(t))	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1
Z max* concernée (cm)	1.5	3	6	12	24	48

(K (t) de la formule ; perte en % =  $100 (1 - \exp(K(t) * Z))$ )

\* Z max tel que  $\exp (K (t) * Z \text{ max}) < 0.01$  (moins de 1 % de l'eau évacuée)

Tableau 1.3. Coefficient k (t) en fonction de l'âge et de la profondeur du béton

### Retraits potentiels observés :

. sur pâte de ciment durcie (P.C.D.)

Retrait linéique final  $\approx 10^{-2}$

. sur béton (concentration en granulats 0.65 à 0.75)

Retrait potentiel  $\approx 10^{-3}$

Retrait observé 2 à 3  $10^{-4}$

### 1.5. Conclusion de la première partie

- Les essais de "Libération des Contraintes" sur dalle en béton ont donné une idée de l'importance des contraintes de retrait sur la surface d'un béton jeune
- Au début de la création d'une entaille, les deux lèvres s'écartent, même faiblement sous précontrainte.  
Après libération des contraintes et sous pression de compensation dans l'entaille, le comportement de la structure est nettement linéaire d'où le domaine de résolution du problème "Elasticité linéaire"
- La répartition des contraintes dues au séchage du béton ont été mises en évidence (P. Acker et B.Miao)

Le bilan des premiers travaux de recherche est plutôt positif, mais l'objectif premier de la méthode n'est toujours pas atteint. En effet le nombre insuffisant d'expérimentations sur les modèles en béton réalisés jusqu'à présent ne peut en aucun cas renseigner sur la nécessité de la justesse des mesures vis à vis des contraintes absolues recherchées.

La mise au point de la méthode doit donc passer par une étude minutieuse d'un programme expérimental qui nous paraît la voie la plus prometteuse.

## **DEUXIEME PARTIE**

### **2. ESSAIS EN LABORATOIRE**

#### **2.1. Objectifs**

#### **2.2. Matériels utilisés**

2.2.1. Système de libération et de refroidissement

2.2.2. Matériels d'extensométrie et d'acquisition

2.2.3. Application de la charge

#### **2.3. Corps d'épreuves**

2.3.1. Définition des différents corps d'épreuves du programme expérimental

2.3.2. Confection et préparation des dalles

*2.3.2.1. Caractéristiques du béton*

*2.3.2.2. Préparation et aménagement des dalles*

2.3.3. Instrumentation

#### **2.4. Mesures**

2.4.1. Déroulement type d'un essai de libération

2.4.2. Surveillance permanente des données expérimentales

2.4.3. Conduite de l'essai

#### **2.5. Dépouillement des résultats expérimentaux**

2.5.1. Exemples

2.5.2. Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus

2.5.3. Première synthèse des résultats

2.5.4. Quelques ordres de grandeurs observés

#### **2.6. Conclusion de la deuxième partie**

## 2. ESSAIS EN LABORATOIRE

Le programme expérimental a consisté à mettre au point un dispositif de mesure et un mode opératoire efficaces, de manière à s'assurer le mieux possible de la justesse des mesures brutes.

En effet plusieurs paramètres ont une influence négative sur les résultats d'un essai de "Libération".

### 2.1. Objectifs

Nous citerons, parmi les obstacles auxquels le mode opératoire se trouve confronté :

- l'effet des variations de la température dues au dispositif de libération sur les résultats du champ cinématique des déplacements (incidence du sciage)
- l'effet du retrait sur les pressions de rétablissement apparentes.

L'objet premier de cette partie est d'améliorer et finalement valider un mode opératoire, qui fournisse des résultats fiables, justes et précis. Notre programme expérimental aura comporté vingt huit essais de "Libération des Contraintes" sur béton, comprenant des expérimentations en laboratoire et in situ.

### 2.2. Matériels utilisés

#### 2.2.1. Système de Libération et de refroidissement

Afin d'éviter toute perturbation du champ des déplacements due à une variation de la teneur en eau du béton lors du sciage, un système de refroidissement a été mis au point pour permettre le sciage à sec.

Il consiste à faire passer de l'air dans un bain d'azote liquide qui le refroidit à  $-120^{\circ}\text{C}$  avant de le diriger sur plusieurs points précis de la lame. La sensibilité thermique est obtenue par une vanne thermostatique figure 2.1.

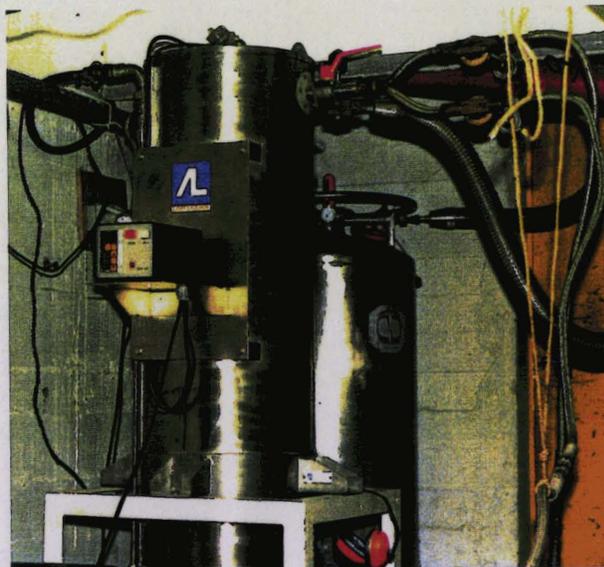


Fig. 2.1. Echangeur d'air comprimé-azote.  
Au premier plan, le dispositif de régulation automatique de la température de l'air

## 2.2.2. Matériels d'extensométrie et d'acquisition

### - Bases d'extensométrie :

La mesure des déplacements s'effectue par des capteurs inductifs de grande sensibilité disposés sur des supports (ou barrettes) enfilés sur des pions collés sur le béton.

#### . *Pions :*

Un gabarit de pose est utilisé pour coller les pions en inox sur le béton. Ces pions sont disposés par paire avec un écartement de 20 mm.

#### . *Barrettes :*

Trois paires de barrettes en aluminium de longueur (370 mm, 335 mm, 323 mm) forment les bases 1, 2 et 3 d'envergure respective 20, 60 et 100 mm.

Ces barrettes situées de part et d'autre de l'entaille à réaliser, servent de supports aux capteurs fixés à leurs extrémités. Chaque barrette est reliée à la structure par deux pions collés au préalable sur le parement du béton figure 2.2.

#### . *Capteurs de déplacement :*

Les déplacements sont mesurés par l'intermédiaire de capteurs du type Tesa câblés en 1/2 pont inductif dont la sensibilité utile est de  $10^{-7}$  m. Ces capteurs sont fixés aux deux extrémités de la barrette. Leur extrémité (ou palpeur) vient en butée sur la barrette en vis à vis.

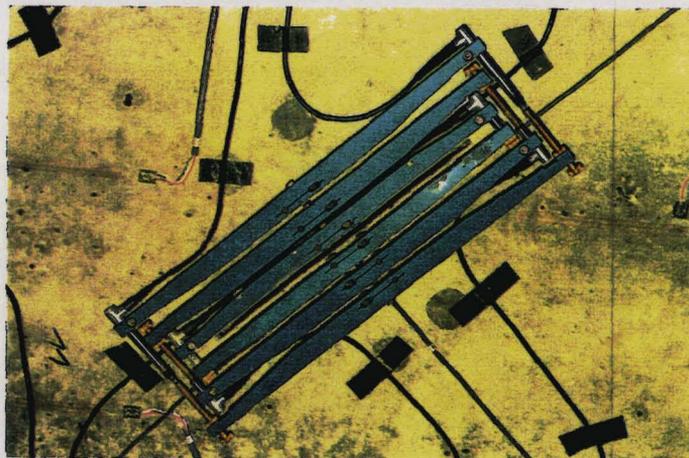


Fig. 2.2. Bases d'extensométrie complètes :  
pions, barrettes et capteurs de déplacement

### - capteur de pression :

La pression dans les vérins de "Libération" est mesurée à l'aide d'un capteur de pression de 10 MPa. C'est un capteur soudé en acier inoxydable avec des jauges métalliques collées sur la membrane quasi-affleurante, une compensation en température du pont de wheatstone est incluse

- acquisition des mesures :

Pour la mesure des pressions de compensation admises dans les vérins de "Libération" et des valeurs de déplacement en cours d'entaillage, une centrale de mesure universelle du type UPM 60 a été utilisée. Elle permet la scrutation de 60 voies de différents types, d'en traiter les signaux et de les éditer. Une carte de commutation UMH 3209 permet de connecter jusqu'à 10 capteurs à jauges ; une autre sortie du même type câblée en demi-pont inductif a servi à relier les capteurs de déplacement.

Enfin, la surveillance du champ opératoire est réalisée par l'emploi d'un micro-ordinateur communiquant directement avec la centrale d'acquisition.

### 2.2.3. Application de la charge

La charge appliquée aux corps d'épreuves est assurée par deux barres en acier, par l'intermédiaire de deux chevêtres rigides. La force de traction dans les barres est régulièrement contrôlée jusqu'au jour de l'essai.

### 2.3. Corps d'épreuve

Il s'agit de modèles d'essais en béton (dallettes) fabriqués au laboratoire.

#### 2.3.1. Définition des différents corps d'épreuves du programme expérimental

Désignation des dalles (exemple : RD 2.NR.90°).

Chaque désignation est constituée de quatre membres :

- RS ou RD

\* RS : Retrait symétrique : le phénomène de retrait dû à la dessiccation du béton est subi de façon identique d'un côté comme de l'autre de la dalle

\* RD : Retrait dissymétrique : une couche de résine est appliquée sur une des faces de la dalle dès les premières heures du décoffrage, d'où une dessiccation du béton d'un seul côté

- les chiffres 0, 1, 2 :

Ils indiquent la compression appliquée et contrôlée pendant tout l'essai de libération, les valeurs correspondantes sont respectivement de : 0,6 et 12 MPa.

- R ou NR

\* NR : Non revêtu : l'entaille en question est faite :  
sur une face quelconque, s'il s'agit d'une dalle RS  
sur une face non revêtue de résine pour une dalle RD

\* R : Revêtu : l'entaille est faite du côté revêtu de résine dans une dalle RD

- 45° ou 90° :

Ces valeurs indiquent l'angle que fait la direction de l'entaille avec l'axe de la dalle, figure 2.3.

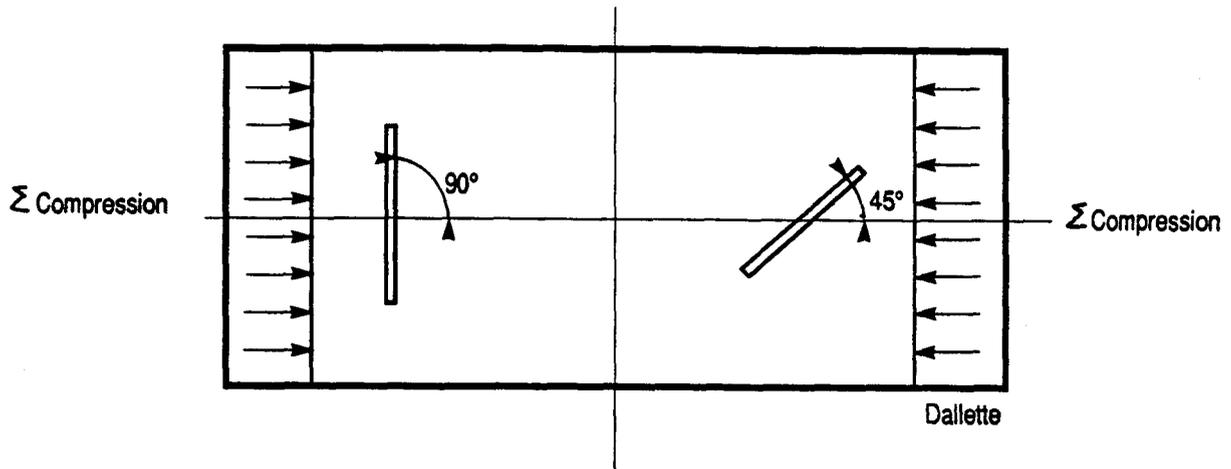


Fig.2.3. Position des entailles

Toutes les dalles ont été entaillées à 90° et 45° dans le but de distinguer contrainte appliquée et "contrainte de retrait", en s'appuyant sur une propriété du cercle de Mohr. La combinaison des résultats obtenus sur les entailles à 90° et 45° d'une même dalle sera explicitée dans la suite du texte.

On présente sur le tableau 2.1. les désignations de tous les corps d'épreuves de notre programme expérimental.

Type d'ouvrage	Modèles	Profondeur d'entaille Z (mm)	Précontrainte ou compression uniforme (MPa)
Retrait symétrique	RS0.1.E 45°	80 mm	0.0
	RS0.2.E 90°	80 mm	0.0
	RS1.1.E 45°	80 mm	6.0
	RS1.2.E 90°	80 mm	6.0
	RS2.1.E 45°	80 mm	12.0
	RS2.2.E 90°	80 mm	12.0
Retrait dissymétrique	RD0.1.NR.45°	80 mm	0.0
	RD0.2.NR.90°	80 mm	0.0
	RD0.3.R.90°	80 mm	0.0
	RD1.1.NR.45°	80 mm	6.0
	RD1.2.NR.90°	80 mm	6.0
	RD1.3.R.90°	80 mm	6.0
	RD2.1.NR.45°	80 mm	12.0
	RD2.2.NR.90°	80 mm	12.0
RD2.3.R.90°	80 mm	12.0	
Poutre Vauban	VB1.A 90°	60 mm	Recherchée
	VB2.A 90°	60 mm	"
Poutre Lille	VB3.HS.45°	60 mm	"
	PR.HS.90°	80 mm	"
	PR.A.90°	60 mm	"
Dallettes Bourget	LB.NCH.90°	70 mm	"
	LB.CH.90°	70 mm	"
	LB.NCH.90°	50 mm	"
	LB.NCH.45°	30 mm	"
	LB.CH.90°	30 mm	"
Eprouvette	Epr.CS.45°	40 mm	0.0
	Epr.CS.90°	40 mm	0.0
	Epr.CS.90°	60 mm	0.0

Tableau 2.1. Désignation des différents corps d'épreuves

### 2.3.2. Confection et préparation des dalles

Le programme a nécessité la fabrication de 6 modèles identiques.

Différentes considérations technologiques ont conduit à un dimensionnement de dalles de : 60 x 15 cm de section et 140 cm de longueur.

### 2.3.2.1. Caractéristiques du béton

- Formule théorique utilisée (pour 1 m<sup>3</sup>)

Ciment CPA 55 Dannes	400 kg
Sable d'Oise 0/5	730 kg
Gravillon calcaire Gaurain 6/20	1130 kg
Eau de gâchage	210 litres
  
- Fabrication du béton
  - . Mélange en malaxeur à train valseur Couvrot Lainé MTV 150
  - . Serrage par pervibrateurs électriques  $\phi$  25 mm
  
- Caractéristiques du béton confectionné
  - . Affaissement au cône d'Abrams à  $t_0 = 5.5$  cm
  - . Caractéristiques béton durci
    - Module d'young  $E = 40000$  MPa (vérifié lors de la précontrainte des dalles)
    - Résistance à la rupture  $\sigma_{28} = 45$  MPa.

### 2.3.2.2. Préparation et aménagement des dalles

- Traitements de surface

Juste après le décoffrage, les modèles d'essais sont recouverts d'une couche de résine sur les quatre facettes latérales sur lesquelles on colle une autre couche protectrice d'aluminium.

Le même procédé est employé sur une des grandes faces des dalles RD.
  
- Conservation

Les dalles sont conservées sous abri, au même endroit, dans les mêmes conditions ambiantes.
  
- Compression permanente
  - . Quelques jours avant les essais six jauges du type PL 120  $\Omega$  sont collées sur chaque face de la dalle
  
  - . Deux plaques en téflon à chaque extrémité assurent la répartition de la charge et évitent le frottement latéral
  
  - . Pendant trois mois avant la date d'exécution de l'essai, une compression uniforme connue sera maintenue et même dépassée afin d'éviter les problèmes de fluage en cours d'essai
  
  - . Les essais de libération seront pratiqués à 4 mois d'âge pour chaque modèle. Les entailles sur un même modèle se succéderont à moins de 24 heures d'intervalle.
  
- Essais préalables

Le jour des essais, on ajuste la précontrainte afin de vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesure et déterminer ainsi le module d'young ( $E$ ), figure 2.4.

Notons qu'avant l'instrumentation, la planéité de surface est localement rétablie par un ponçage fin dans les zones concernées.

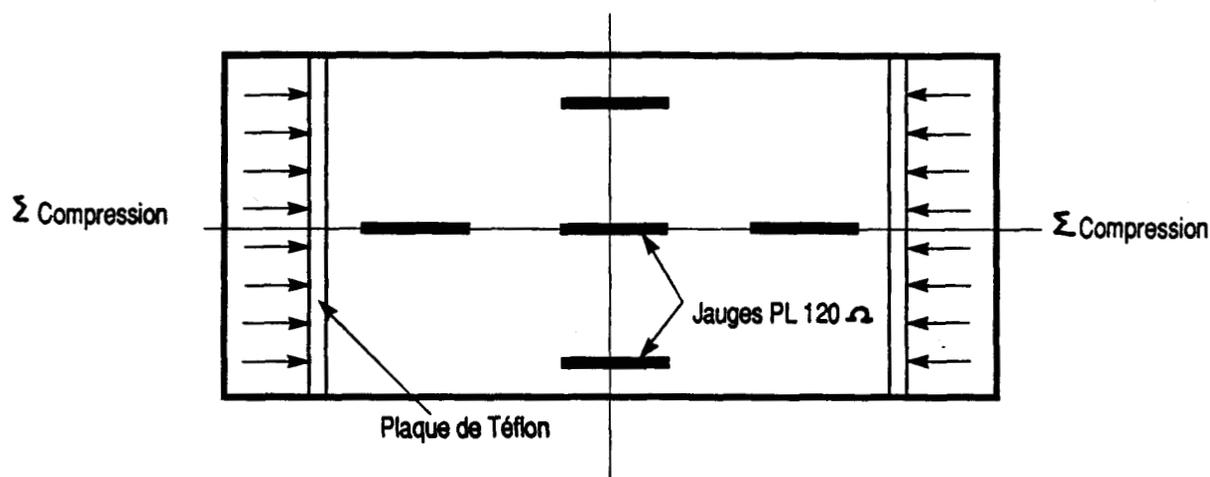


Fig. 2.4. Mise en compression de la dalle

### 2.3.3. Instrumentation

L'instrumentation des dalles consiste à disposer l'appareillage déjà cité au paragraphe 2.2.2., on y ajoute :

- 2 sondes de température du type Pt 100  $\Omega$  à 30 et 60 mm de profondeur de part et d'autre de l'entaille
- 1 sonde placée sur le parement du béton au voisinage de l'entaille
- 1 autre sonde collée à une barrette de la première paire.

Rappelons que pour les dalles RS0 et RD0, l'essai se fait "non chargé".

En revanche, pour les RS1 et RD1 la compression sera de 6 MPa et de 12 MPa pour les RS2 et RD2. Ainsi, dans le cas d'une dalle RD1, deux entailles à 45° et 90° seront exécutées du côté non revêtu et une autre à 90° juste au milieu de la face revêtue figure 2.5.

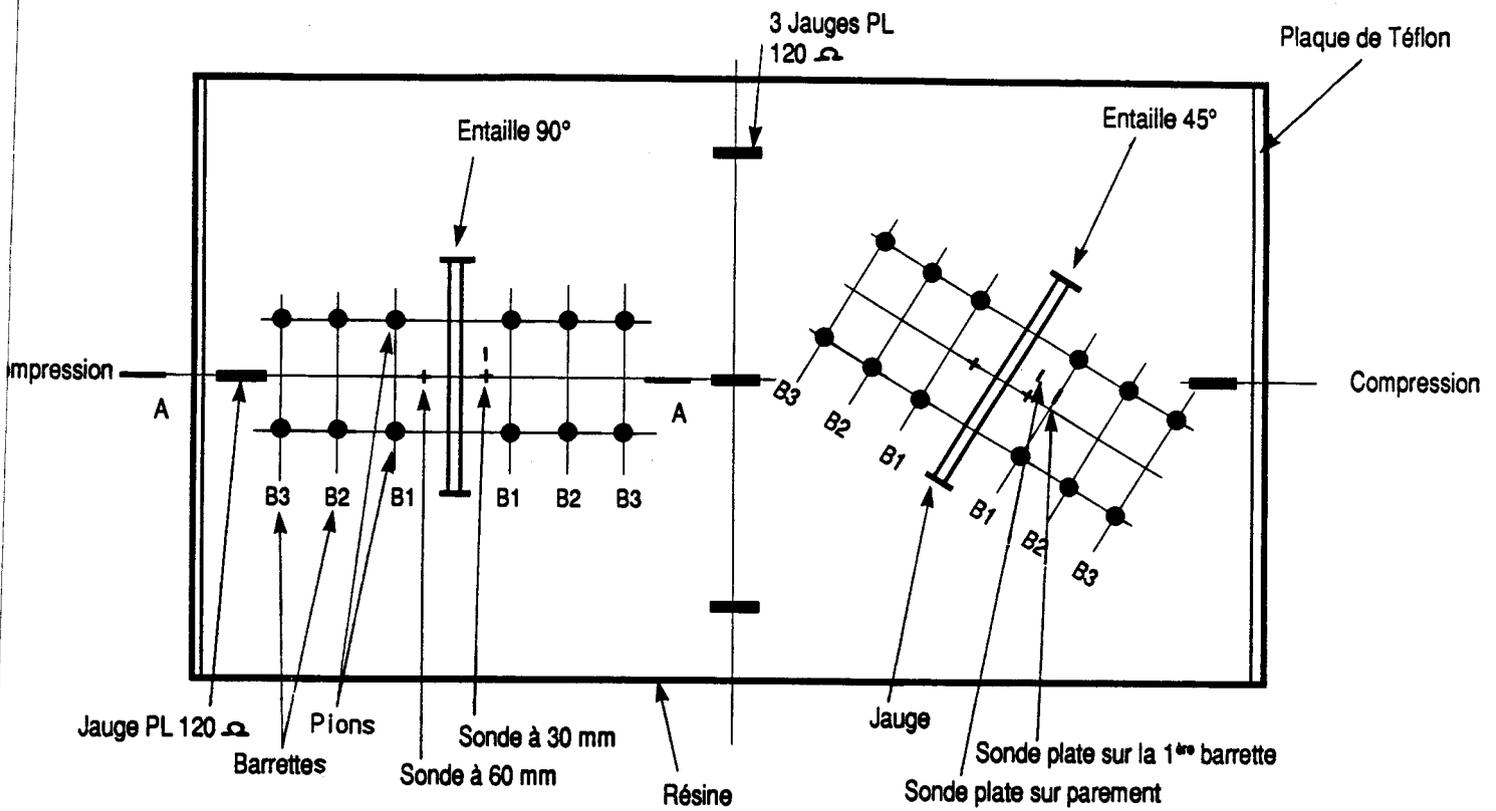
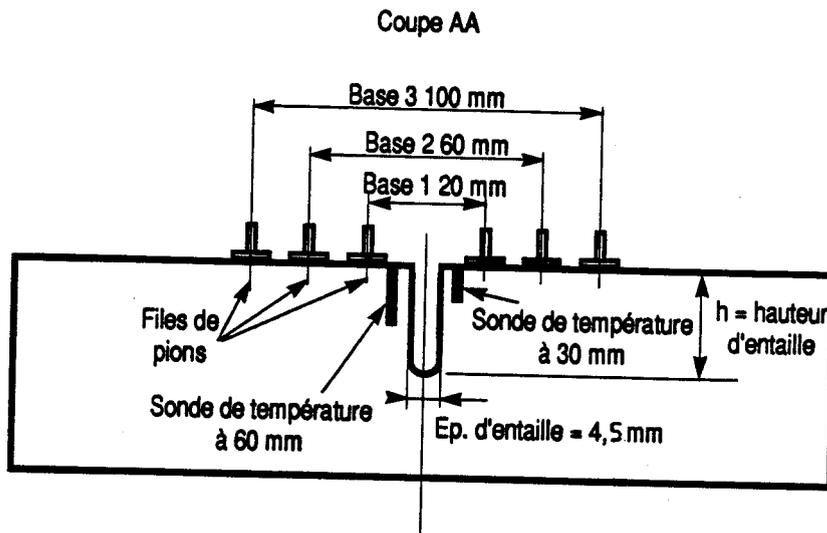


Fig. 2.5. Equipement d'une dallette



## 2.4. Mesures

### 2.4.1. Déroulement type d'un essai de "Libération"

- le jour du sciage, la base extensométrique (pions, barrettes, capteurs) est posée au voisinage de l'endroit à entailler
- lorsqu'il y a lieu, l'entaille à 45° est la première à être pratiquée. La transversale, déjà instrumentée, servira dans les 24 heures au plus tard
- les quatre sondes placées aux abords de l'entaille, permettent une visualisation permanente des variations de température.  
Lors de l'acquisition des mesures, les températures finales doivent correspondre aux températures initiales
- l'opération consiste à :
  - . entailler à une profondeur  $z = 2$  mm et enregistrer les déplacements des bases ( $b_1$ ,  $b_2$  et  $b_3$ ). On procèdera ensuite à une alternance de libération et de mesures à  $z = 2, 5, 10, 15$  mm
  - .  $z = 20 \dots \dots 80$  mm  
mesure des déplacements  $\delta$  ( $\mu\text{m}$ ) avant et après application de la pression  $P_v$  du vérin plat correspondant.  
Enfin mesure des  $\delta$  ( $\mu\text{m}$ ) à chaque  $P_v$  jusqu'à léger dépassement du rétablissement des déplacements
- afin de prévenir les effets du fluage, à la fin de chaque passe d'entaillage, un vérin de hauteur juste inférieure est introduit dans l'entaille et gonflé à une pression voisine de la dernière pression de rétablissement mesurée.

### 2.4.2. Surveillance permanente des données expérimentales

Vu l'irréversibilité du processus, la qualité des mesures est systématiquement contrôlée, après libération, à chaque profondeur.

Quinze grandeurs doivent pouvoir simultanément s'afficher pendant l'opération :

- les quatre températures en surface et en profondeur, pour contrôler les variations thermiques
- les six déplacements  $\delta_1$  et  $\delta_2$  de la base 20 mm,  $\delta_3$  et  $\delta_4$  pour la base 60 mm et enfin  $\delta_5$  et  $\delta_6$  pour la base de 100 mm, ainsi que la moyenne des valeurs données par les deux capteurs d'une même base

- la pression dans le vérin  $P_v$
- la profondeur  $z$  (mm) de l'entaille
- la déformation  $\epsilon$  de la dalle afin de contrôler la compression
- $E$  app module apparent du béton
- la valeur de la contrainte de traction dans les tirants.

Ces mesures sont réalisées par une centrale d'acquisition universelle du type UPM 60. Elle permet la scrutation de 60 voies de différents types.

La surveillance du champ opératoire a été facilitée par l'emploi d'un micro-ordinateur qui commande la centrale d'acquisition (programme d'acquisition présenté en annexe 1). Le fait que les valeurs soient affichées sur l'écran de l'ordinateur permet de suivre en temps réel le refroidissement de l'entaille. Toutes les valeurs ne sont pas intéressantes, mais grâce à cette technique on peut sélectionner les valeurs révélatrices d'un état stable au voisinage de l'entaille.

### 2.4.3. Conduite de l'essai

Parmi les mesures acquises par la centrale, un certain nombre sont stockées sur disquettes puis sorties sur imprimante.

A chaque saisie, les valeurs nous intéressant sont :

- $z$  : profondeur actuelle de l'entaille en mm
- $P_v$  : pression admise dans le vérin au moment de la mesure (s'il y a lieu)
- les quatre valeurs de température aux abords de l'entaille
- les deux valeurs en ( $\mu\text{m}$ ) des déplacements d'une même base extensométrique suivies de leur moyenne : ceci pour les trois bases 1, 2 et 3.

#### Les quatre premières entailles :

Pour les entailles de 2-5-10-15 mm, on ne note sur le listing que les déplacements aux lèvres puisque  $P_r = 0$  (pas de vérin pour ces entailles).

#### A partir de l'entaille à $z = 20$ mm :

Après entaillage et homogénéisation de la température sur les quatre sondes, on place le vérin correspondant dans l'entaille.

Dès lors on envoie la pression dans celui-ci par pas successifs (0.5 ou 1 MPa). A chaque pas, on effectue une saisie de mesures.

L'opération consiste alors à surveiller les capteurs de déplacement et arrêter dès que ceux-ci indiquent le dépassement du rétablissement. Le champ cinématique autour de l'entaille est alors revenu près de son état initial.

La pression indiquée est voisine de la pression de rétablissement.

Il ne reste alors qu'à dégonfler le vérin, l'enlever de l'entaille et recommencer un nouveau cycle (Libération et mesure) jusqu'à  $z = 80$  mm.

On représente en tableau 2.2. un extrait du listing des mesures obtenues pour une entaille à  $90^\circ$ .

Valeurs des températures au moment  
de la mesure ( °C)

Profondeur actuelle de l' entaille (mm)

Pression dans le vérin (bars)

Déplacement des  
capteurs 1 et 2  
de la base 1

Moyenne des  
2 valeurs

Déformation des  
jauges

Le :06-09-1988 (11:42:16) N°: 1 P = 0.0 z = 20 F = 279/ 275/ 554/  
B 1: -15.7/ -0.9/ -8.3/ B 2: -7.0/ -1.0/ -4.0/ B 3: -4.4/ 0.8/ -1.2/  
Températures mesurées : 18.8 /19.3 /19.9 /19.2 /  
Def1 = -138 Def2 = -144 Defmoy = -146 Essp = 42000

Le :06-09-1988 (11:42:46) N°: 1 P = 0.0 z = 20 F = 279/ 274/ 554/  
B 1: -15.7/ -0.9/ -8.3/ B 2: -7.1/ -1.0/ -4.0/ B 3: -4.4/ 0.8/ -1.8/  
Températures mesurées : 18.8 /19.3 /19.9 /19.2 /  
Def1 = -138 Def2 = -144 Defmoy = -145 Essp = 42300

Le :06-09-1988 (11:43:10) N°: 2 P = 10.0 z = 20 F = 279/ 275/ 554/  
B 1: -14.2/ -0.1/ -7.1/ B 2: -6.3/ -0.8/ -3.6/ B 3: -3.9/ -0.9/ -1.5/  
Températures mesurées : 18.8 /19.3 /19.8 /19.2 /  
Def1 = -139 Def2 = -145 Defmoy = -146 Essp = 42200

Le :06-09-1988 (11:43:43) N°: 3 P = 20.0 z = 20 F = 279/ 275/ 553/  
B 1: -13.0/ 2.5/ -5.3/ B 2: -5.3/ -0.1/ -2.7/ B 3: -3.3/ 1.0/ -1.1/  
Températures mesurées : 18.8 /19.2 /19.8 /19.2 /  
Def1 = -139 Def2 = -145 Defmoy = -146 Essp = 42100

Le :06-09-1988 (11:44:22) N°: 4 P = 30.0 z = 20 F = 279/ 275/ 554/  
B 1: -11.5/ 5.0/ -3.3/ B 2: -4.3/ 0.7/ -1.8/ B 3: -2.6/ 1.3/ -0.6/  
Températures mesurées : 18.8 /19.2 /19.8 /19.3 /  
Def1 = -139 Def2 = -146 Defmoy = -146 Essp = 42200

Le :06-09-1988 (11:45:05) N°: 5 P = 40.0 z = 20 F = 279/ 275/ 554/  
B 1: -9.7/ 7.7/ -1.0/ B 2: -3.2/ 1.6/ -0.8/ B 3: -1.9/ 1.7/ -0.1/  
Températures mesurées : 18.8 /19.2 /19.7 /19.3 /  
Def1 = -139 Def2 = -145 Defmoy = -146 Essp = 42200

Le :06-09-1988 (11:47:02) N°: 6 P = 45.0 z = 20 F = 278/ 274/ 552/  
B 1: -9.0/ 9.1/ 0.1/ B 2: -2.7/ 1.9/ -0.4/ B 3: -1.6/ 1.9/ 0.1/  
Températures mesurées : 18.6 /19.1 /19.6 /19.2 /  
Def1 = -140 Def2 = -146 Defmoy = -147 Essp = 41700

Le :06-09-1988 (11:48:03) N°: 7 P = 0.0 z = 20 F = 278/ 274/ 553/  
B 1: -16.1/ -1.2/ -8.7/ B 2: -7.4/ -1.5/ -4.5/ B 3: -4.6/ 0.8/ -1.9/  
Températures mesurées : 18.7 /19.1 /19.6 /19.3 /  
Def1 = -140 Def2 = -146 Defmoy = -146 Essp = 42200

Le :06-09-1988 (11:48:24) N°: 8 P = 2.0 z = 20 F = 278/ 274/ 552/  
B 1: -16.1/ -1.3/ -8.7/ B 2: -7.3/ -1.6/ -4.5/ B 3: -4.6/ 0.7/ -1.9/  
Températures mesurées : 13.7 /19.1 /19.5 /19.2 /  
Def1 = -139 Def2 = -146 Defmoy = -145 Essp = 42300

Le :06-09-1988 (11:48:52) N°: 9 P = 5.0 z = 20 F = 278/ 274/ 552/  
B 1: -15.7/ -0.8/ -8.2/ B 2: -7.1/ -1.4/ -4.2/ B 3: -4.5/ 0.7/ -1.9/  
Températures mesurées : 18.6 /19.1 /19.5 /19.2 /  
Def1 = -139 Def2 = -146 Defmoy = -145 Essp = 42300

Le :06-09-1988 (11:49:25) N°: 10 P = 0.0 z = 20 F = 278/ 274/ 552/  
B 1: -16.2/ -1.3/ -8.8/ B 2: -7.5/ -1.6/ -4.6/ B 3: -4.7/ 0.7/ -2.0/  
Températures mesurées : 18.6 /19.0 /19.5 /19.3 /  
Def1 = -140 Def2 = -147 Defmoy = -145 Essp = 42200

Tableau 2.2. Extrait du listing de mesure d'une entaille réalisée sur la  
dallette RD1.R.90°.

## 2.5. Dépouillement des résultats expérimentaux

### 2.5.1. Exemples

Le dépouillement consiste à apporter une correction sur les déplacements bruts obtenus après les entaillages successifs. On commence par tracer, pour chaque profondeur d'entaille comprise entre 20 et 80 mm, les courbes de déplacement en fonction de la pression au vérin figure 2.6. Ces graphiques sont établis pour chacune des trois bases de mesure.

Ils permettent de déterminer les raideurs globales des entailles (en fait la pente de la droite du déplacement en fonction de la pression de rétablissement) aux profondeurs de 20 à 80 mm (soit en  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ ), et de pondérer, ou "normaliser" les déplacements. Au cours de nos nombreux essais, on a en effet pu mettre en évidence que les valeurs brutes obtenues peuvent être affectées de deux effets perturbateurs principaux :

- le fluage du béton à proximité de l'entaille, phénomène d'autant plus sensible que l'entaille est profonde et que les contraintes libérées sont élevées
- le défaut de linéarité du comportement de l'entaille sous l'effet de la pression qui est d'autant plus important que l'entaille est peu profonde, et que, là encore, les contraintes libérées sont élevées.

La figure 2.6. met en évidence les déplacements bruts et "linéarisés" correspondant à chaque profondeur de l'entaille, ainsi que la pente de la droite  $\delta (\mu\text{m}) = f(Pv)$  qui est égale à la "raideur apparente" pour une profondeur d'entaille considérée. L'intersection des droites avec l'axe des abscisses détermine la valeur des pressions de rétablissement apparentes.

L'intersection avec l'axe des ordonnées détermine le déplacement dénommé "linéarisé".

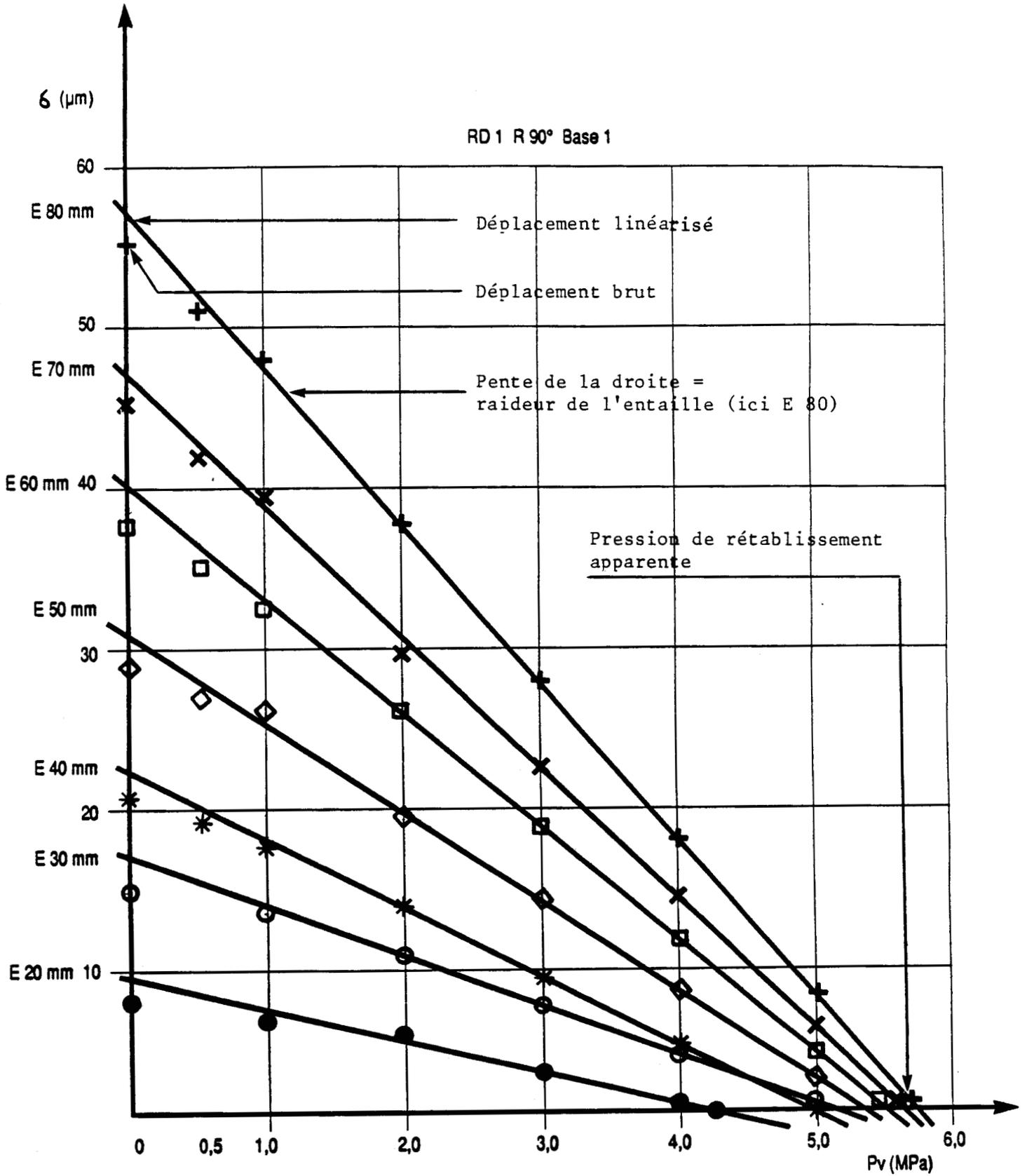


Fig. 2.6. Déplacements obtenus en fonction de la pression dans les vérins d'une dalle précontrainte de 6 MPa.

L'exploitation de ces graphiques donne lieu aux tableaux de synthèse tels que présentés en (2.3., 2.4. et 2.5.).

Soit par exemple un déplacement brut de 47.7  $\mu\text{m}$ , linéarisé à 51.2  $\mu\text{m}$  et une raideur de 112.5  $\mu\text{m}/10\text{MPa}$  pour une entaille de profondeur 80 mm, sur la base 1 (Tableau 2.3.).

Les valeurs entre parenthèses des profondeurs de 2 à 15 mm sont des déplacements bruts non corrigés, faute de vérin de ces dimensions.

### ESSAI DE LIBERATION DE CONTRAINTES SUR BETON

Tableau 2.3. récapitulatif des résultats obtenus pour une entaille

22/06/88

Ouvrage : RD 1			Élément :						Repère : 2 ; 90° . NR .		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )
1	2	2	-0.5	(-0.5)		-0.3	(-0.3)		-0.2	-0.2	
2	3	5	-2.4	(-2.4)		-0.1	(-0.1)		-0.5	-0.5	
3	5	10	-1.7	(-1.7)		0.4	(0.4)		-0.2	-0.2	
4	5	15	1.3	(1.7)		2.2	(2.3)		0.3	0.3	
5	5	20	3.3	4.0	16.7	5.1	5.2	9.0	3.5	3.4	4.9
6	10	30	9.3	11.0	36.4	11.2	11.7	23.9	6.7	6.8	12.8
7	10	40	16.4	19.8	53.4	13.6	20.6	40.4	13.7	14.0	24.2
8	10	50	23.2	24.8	64.4	27.1	28.1	54.8	18.6	18.7	36.8
9	10	60	30.5	33.0	79.5	36.4	37.7	71.3	28.1	29.8	52.4
10	10	70	38.9	41.2	91.6	45.8	47.6	97.3	35.6	37.0	64.8
11	10	80	47.7	51.2	112.5	54.6	56.7	105.0	44.0	45.5	81.2

### ESSAI DE LIBERATION DE CONTRAINTES SUR BETON

Tableau 2.4. récapitulatif des résultats obtenus pour une entaille

09/05/88

Ouvrage : RD1			Élément :						Repère : 3 ; 90° . R .		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	Déplacements Bruts ( $\mu\text{m}$ )	Déplacements Linéaires ( $\mu\text{m}$ )	Raideur apparente ( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )
1	2	2	0.1	(0.1)		-0.2	(-0.2)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	0.4	(0.4)		-0.3	(-0.3)		-0.3	(-0.3)	
3	5	10	1.6	(1.6)		0.0	(0.0)		-0.3	(-0.3)	
4	5	15	5.2	(5.9)		1.9	(2.1)		0.4	(0.6)	
5	5	20	8.3	9.6	21.6	4.0	4.4	9.0	1.8	(2.2)	5.3
6	10	30	15.0	16.3	32.0	11.8	12.2	21.9	10.1	(9.5)	14.0
7	10	40	21.1	22.2	44.4	18.4	19.0	35.1	15.8	16.0	24.8
8	10	50	29.4	30.6	59.3	26.5	27.4	49.6	22.0	22.3	35.8
9	10	60	38.0	39.9	71.9	36.4	37.9	64.8	32.8	33.8	51.2
10	10	70	46.5	47.5	84.1	44.5	45.7	77.7	38.4	39.4	62.4
11	10	80	56.3	57.3	102.3	55.8	56.8	95.5	50.6	50.8	78.0

ESSAI DE LIBERATION DE CONTRAINTES SUR BETON  
Tableau 2.5. Récapitulatif des résultats obtenus pour une entaille

22/06/88

Ouvrage : RDI			Élément :						Repère : I ; 45° . NR .		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	- 1.0	(- 1.0)		- 0.3	(- 0.3)		- 0.1	(- 0.1)	
2	3	5	- 0.9	(- 0.8)		- 0.3	(- 0.3)		- 0.2	(- 0.2)	
3	5	10	2.0	(2.0)		0.3	(0.3)		- 0.2	(- 0.2)	
4	5	15	3.0	(3.5)		1.5	(1.7)		0.3	(0.4)	
5	5	20	3.6	4.6	20.9	1.7	2.0	7.9	2.1	2.2	6.0
6	10	30	6.5	7.6	36.2	3.9	4.4	20.9	3.1	3.4	12.0
7	10	40	9.1	10.3	47.9	6.8	7.2	34.0	5.4	5.9	23.6
8	10	50	12.4	14.1	64.7	9.8	10.6	48.6	8.0	8.9	36.0
9	10	60	16.6	18.8	81.7	14.2	15.2	64.7	12.6	13.3	50.0
10	10	70	21.7	23.3	91.0	19.1	20.3	79.0	17.6	19.1	66.0
11	10	80	26.8	29.2	113.2	24.3	25.6	98.1	23.1	24.5	84.4

Ensuite, on trace sur un même graphique pour les trois bases, l'évolution des déformations "linéarisées" en fonction de la profondeur d'entaille figure (2.7., 2.8., 2.9.). Ce travail permet de juger, par base de mesure, de la fiabilité des différentes valeurs de déplacement, qui sont parfois perturbées de dérives ou de ressauts non significatifs.

Ainsi on remarque bien que l'évolution des déplacements des trois bases en fonction de la profondeur d'entaille sont quasiment parallèles et décalées d'environ 5 µm. Ainsi, en cas de défaillance des mesures sur la base 1, dans l'exploitation des mesures on tiendra compte des déplacements de la base 2, et si par malchance ces derniers sont à leur tour perturbés, on se référera aux valeurs de déplacement de la base 3, en d'autres termes, ces trois bases sont "interchangeables".

Les résultats obtenus sur chaque base sont contestés ou validés par comparaison avec les deux autres bases. L'ensemble de ces valeurs forment les coordonnées des vecteurs-colonnes de déplacement, appelés Dep 1, Dep 2, Dep 3.

Notons que pour les premières entailles (2 à 15 mm), on considère les valeurs de déplacement mesurées, sans correction possible.

**LIBERATION DE CONTRAINTES SUR BETON**  
**Graphes des déplacements corrigés en fonction de**  
**la profondeur de l'entaille**

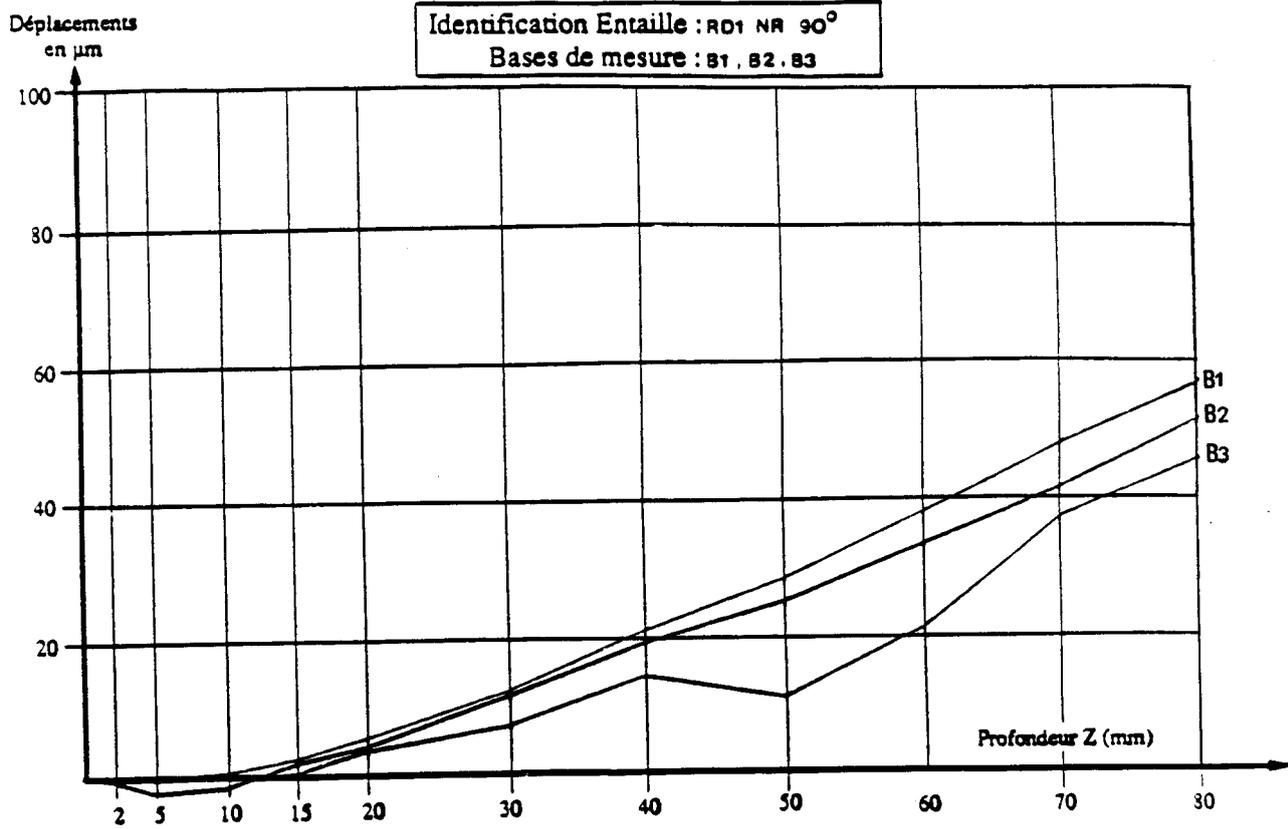


Fig. 2.7. Résultats obtenus sur une dalle précontrainte de 6 MPa

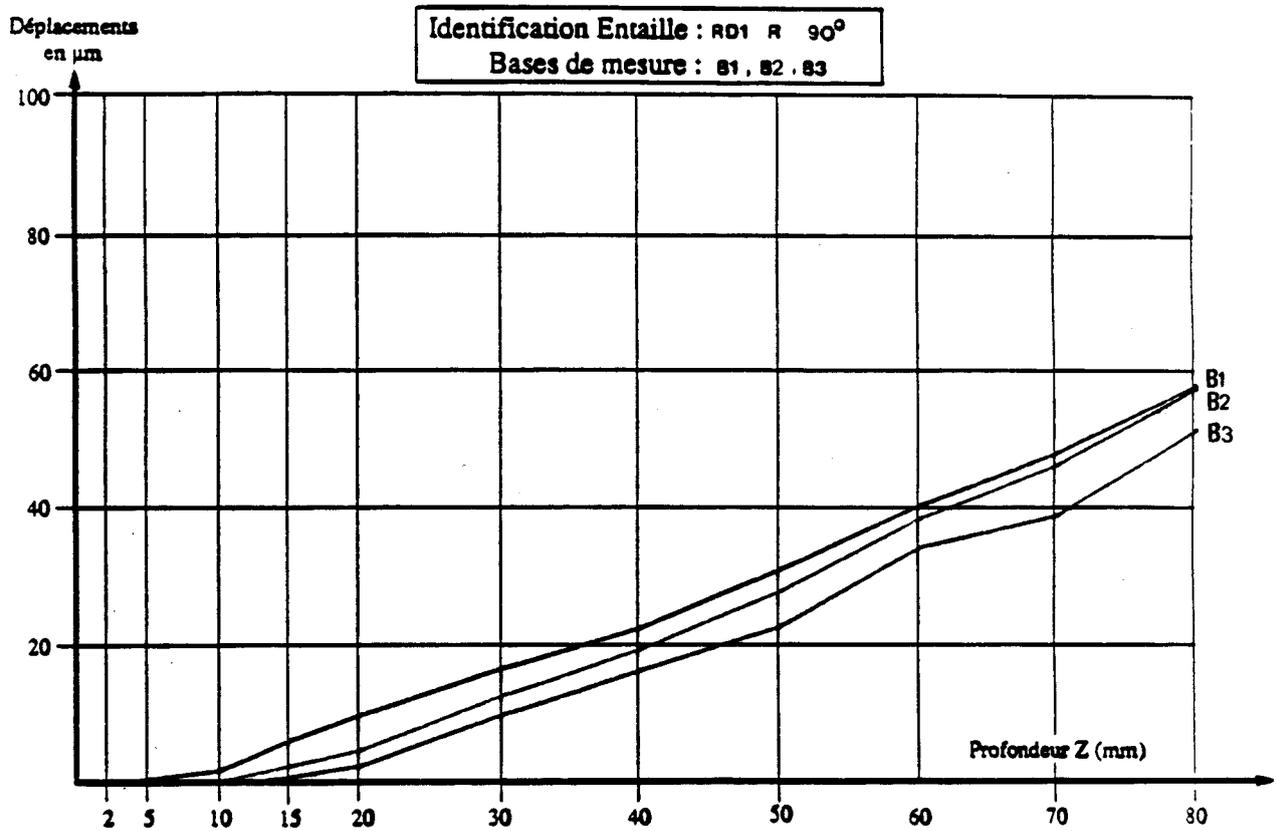


Fig. 2.8. Résultats obtenus sur une dalle précontrainte de 6 MPa

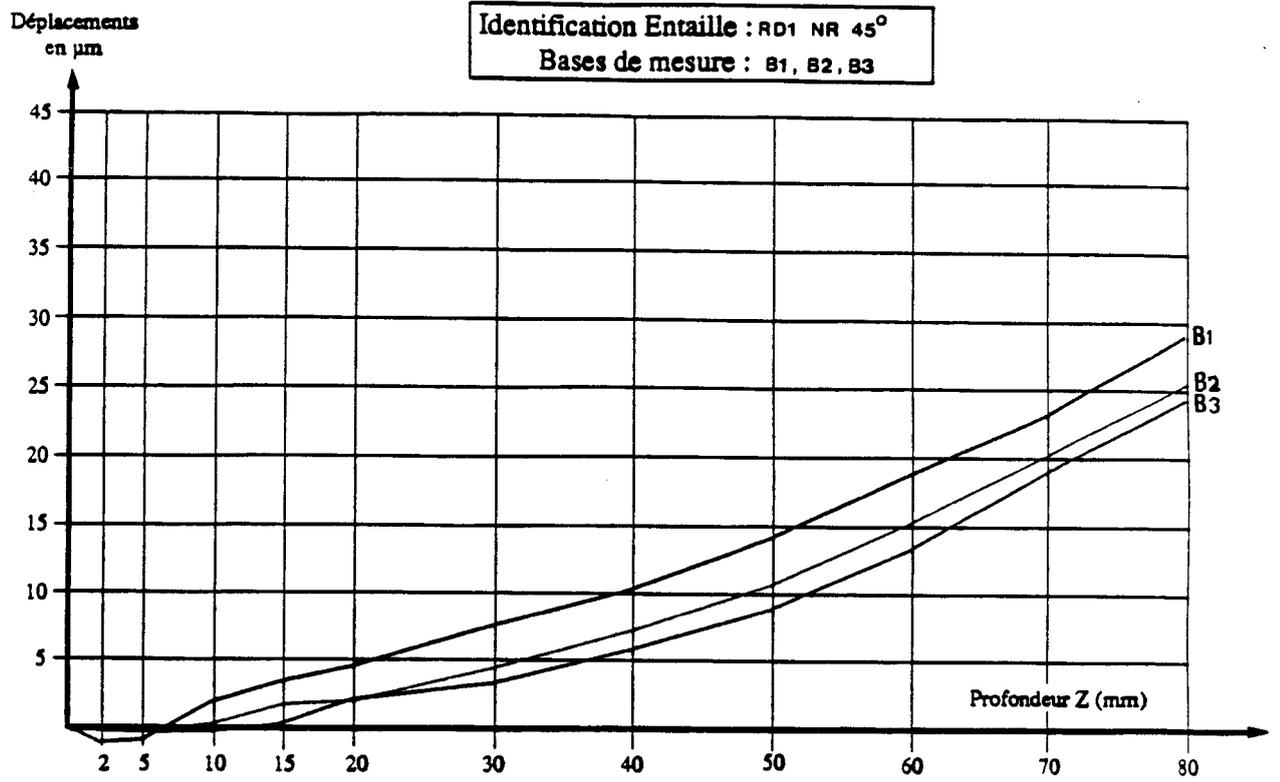


Fig. 2.9. Résultats obtenus sur une dalle précontrainte de 6 MPa

### 2.5.3. Première synthèse des résultats

Le tableau 2.6. présente les différentes valeurs des pressions de rétablissement apparentes obtenues pour des entailles de profondeur 20 à 80 mm, pratiquées dans un béton soumis à une compression de 0,6 ou 12 MPa. (Dans le sens perpendiculaire à l'entaille).

Élément testé		Pression de rétablissement apparente $P_r$ (MPa) Entaille 90° ; Base 1							Pression de rétablissement apparente $P_r$ (MPa) Entaille 45° ; Base 1						
Daliette	C (MPa)	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm
RS0	0.0	-1.7	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.9	-0.7	-1.7	-1.5	-1.1	-1.1	-0.8	-0.8	-0.9
RD0.NR	0.0	-1.8	-1.4	-1.3	-1.0	-0.7	-0.6	-0.4	-2.0	-1.7	-1.6	-1.4	-1.0	-1.0	-0.8
RS1	6.0	4.9	4.5	4.5	4.6	4.9	5.1	5.0	1.3	1.7	1.6	1.6	1.9	2.1	1.6
RD1.NR	6.0	2.4	3.0	3.5	3.8	4.1	4.5	4.6	2.2	2.1	2.1	2.2	2.3	2.6	2.6
RS2	12.0	8.9	8.4	8.5	9.0	9.4	10.1	9.8	4.2	4.2	4.0	4.1	4.6	4.8	4.6
RD2.NR	12.0	8.7	7.9	8.1	8.4	8.8	9.4	9.2	2.6	3.1	3.2	3.6	3.8	4.1	3.9

Tableau 2.6. Pressions de rétablissement en fonction de la profondeur d'entaille

Élément testé		Pression de rétablissement apparente $P_r$ (C) MPa Entaille 90° ; Base 1							Pression de rétablissement apparente $P_r$ (R) MPa Entaille 45° ; Base 1						
Daliette	C (MPa)	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm	80 mm
RS0	0.0	0.0	-0.2	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	0.4	-1.7	-1.4	-0.8	-1.0	-0.7	-0.7	-1.1
RD0.NR	0.0	0.4	0.6	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.3	-1.4	-1.2
RS1	6.0	7.2	5.6	5.8	6.0	6.0	6.0	6.8	-2.3	-1.1	-1.3	-1.4	-1.1	-0.9	-1.8
RD1.NR	6.0	0.4	1.8	2.8	3.2	3.6	3.8	4.0	2.0	1.2	0.7	0.6	0.5	0.7	0.6
RS2	12.0	9.4	8.4	9.0	9.8	9.6	10.6	10.4	-0.5	0.0	-0.5	-0.8	-0.2	-0.5	-0.6
RD2.NR	12.0	12.2	13.6	9.8	9.6	10.0	10.6	10.6	-3.5	-1.7	-1.7	1.2	-1.2	-1.2	-1.4

Tableau 2.7. Pressions de rétablissement relatives à la contrainte seule et au retrait seul en fonction de la profondeur d'entaille pour différents types de chargement (Base 1).

Le tableau 2.7. comporte deux parties :

La première qui tente d'éliminer l'effet du retrait en s'appuyant sur les propriétés du cercle de Mohr, afin de remonter aux seules contraintes appliquées. La seconde permet de mettre en évidence l'effet du seul retrait. On applique ici le principe de superposition non pas aux contraintes en un point, mais aux effets globaux des distributions de contraintes soit supposée uniforme (C), soit à fort gradient (R) sur les pressions de rétablissement. Il s'agit donc d'une extrapolation un peu hasardeuse des propriétés du cercle de Mohr. Figure 2.10.

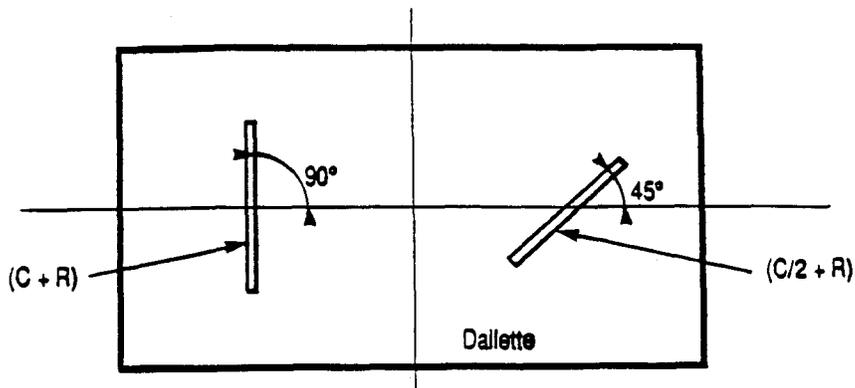


Fig. 2.10 Cumul supposé des effets C (contrainte générale appliquée)  
et R (retrait) : C + R sur l'entaille à 90° et C/2 + R sur l'entaille à 45°.

R, a un effet supposé "isotrope", en revanche l'effet de la précontrainte sur la facette faisant 45° avec la direction de la contrainte principale est C/2. On a donc :

$$P_r(E 90^\circ) = P_r(C) + P_r(R)$$

$$P_r(E 45^\circ) = P_r(C/2) + P_r(R) = \frac{1}{2} P_r(C) + P_r(R)$$

$$\text{d'où } P_r(C) = 2 * (P_r(E 90^\circ) - P_r(E 45^\circ))$$

$$P_r(R) = 2 * P_r(E 45^\circ) - P_r(E 90^\circ).$$

Bien que la méthode soit approximative (calcul non sur les contraintes, mais sur leurs effets cinématiques), les  $P_r(C)$  ainsi trouvées sont voisines des contraintes recherchées, tel qu'on peut le constater sur la figure 2.11.

Ainsi :

- . pour une précontrainte nulle ( $RS_\phi$ ,  $RD_\phi$ ), les  $P_r(C)$  sont comprises entre - 0.6 et 0.8 MPa (pour 0.0 MPa attendu)
- . sous une contrainte contrôlée de 6 MPa, seule  $RS1$  donne des résultats cohérents, de 5,6 à 7,2 MPa. Pour  $RD1$ , la méthode ne fonctionne pas
- . pour une précontrainte de 12 MPa, les résultats deviennent corrects pour les entailles de 70 à 80 mm de profondeur (10.4 à 10.6 MPa), mais la différence est cependant encore importante par rapport à la contrainte recherchée de 12 MPa.

Soulignons ici que la justesse des valeurs trouvées dépend directement du rendement des vérins, et qu'un écart de l'ordre de 10 % pourrait peut être s'expliquer de ce seul fait : c'est pourquoi nous usons de l'appellation "Pression de rétablissement APPARENTE"

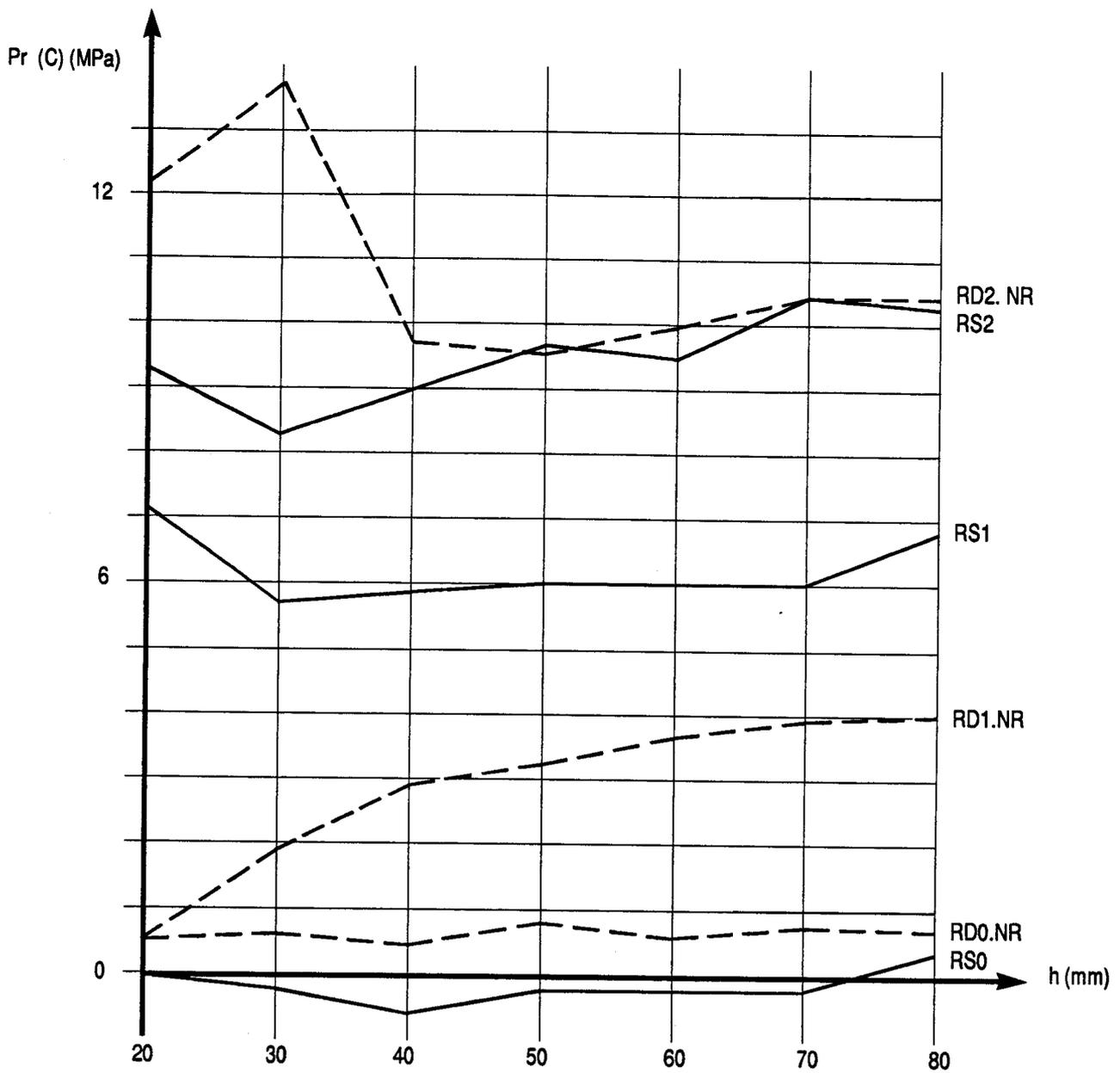


Fig.2.11 Pressions de rétablissement relatives à la contrainte seule en fonction de la profondeur d'entaille

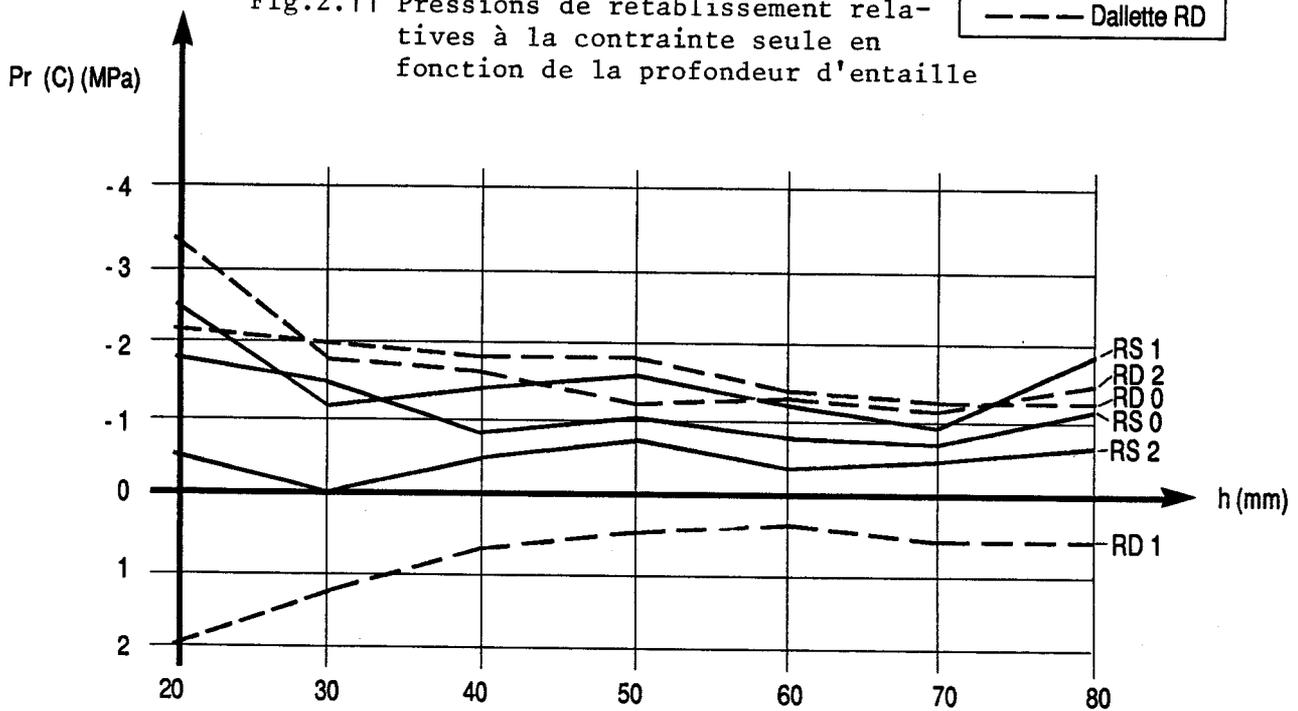


Fig.2.12 Effet du retrait sur les pressions de rétablissement apparentes

. pour ce qui concerne l'effet du retrait, les valeurs de  $P_r$  (R) sont illustrées par la figure 2.12.  $P_r$  (R) apparaît bien évidemment d'autant plus grand que la profondeur d'entaille est faible.

Le schéma en figure 2.13 représente les valeurs moyennes par profondeurs, soit un effet sur les pressions apparentes qui décroît de 2.0 MPa pour E 20 mm à 0.8 MPa pour E 80 mm.

On signalera également pour le retrait les résultats anormaux de la dalle RD1, très en dehors du fuseau des autres résultats.

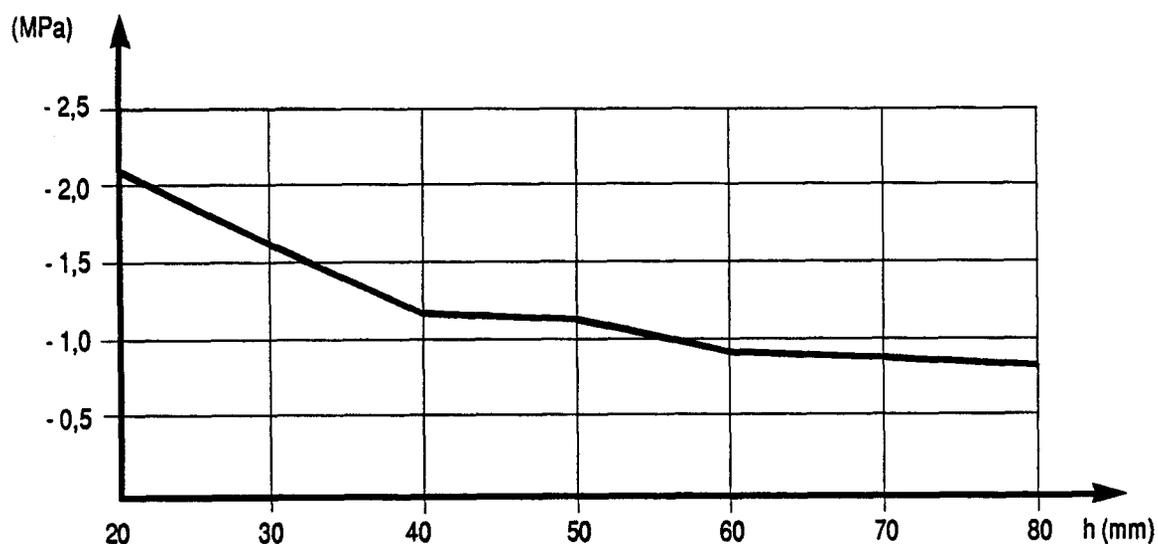


Fig. 2.13 Effet du retrait sur les pressions de rétablissement

#### 2.5.4. Quelques ordres de grandeur observés

En préambule à la conclusion de cette partie, nous avons ici rassemblé quelques résultats moyens obtenus sur les dalles testées en conditions contrôlées (précontrainte et module notamment).

### 2.5.4.1. Déplacements aux lèvres des entailles

On donne dans le tableau 2.8. les déplacements moyens enregistrés aux lèvres d'entailles à 90° et 45° à différentes profondeurs, pratiquées dans un béton de module 40000 MPa et soumis à une contrainte de 0 à 12 MPa.

Par ailleurs, on constate bien qu'à partir d'une entaille de 60 mm les valeurs de déplacement de la base 2, finissent par dépasser légèrement les déplacements de la base 1.

$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )		Déplacement E 90°			Déplacement ( $\mu\text{m}$ ) E 45°		
Profondeur d'entaille z (mm)	Contrainte (MPa)	Base 1	Base 2	Base 3	Base 1	Base 2	Base 3
2	0.0	-1	0	0	-1	0	
	6.0	0	0	0	0	0	0
	12.0	0	0	0	-1	0	0
5	0.0	-2	0	0	-1	0	
	6.0	0	0	0	0	0	0
	12.0	1	0	0	-1	0	0
10	0.0	-3	0		-3	-1	
	6.0	1	0	0	1	0	0
	12.0	5	3	2	3	1	0
15	0.0	-4	-1		-5	-1	
	6.0	4	1	0	2	1	0
	12.0	15	7	3	7	4	2
20	0.0	-4	-1		-4	-2	
	6.0	9	6	4	4	1	2
	12.0	22	13	8	10	6	4
30	0.0	-6	-2		-6	-2	
	6.0	16	13	10	7	5	6
	12.0	34	26	16	17	12	10
40	0.0	-7	-3		-7	-3	
	6.0	23	21	16	10	8	7
	12.0	47	41	29	22	17	12
50	0.0	-7	-4		-8	-4	
	6.0	30	30	24	13	11	10
	12.0	61	58	43	30	27	20
60	0.0	-7	-4		-8	-5	
	6.0	40	40	31	18	16	15
	12.0	77	76	58	40	38	33
70	0.0	-7	-3		-8	-6	
	6.0	47	50	40	22	21	21
	12.0	93	94	77	48	48	44
80	0.0	-7	-4		-9	-7	
	6.0	57	59	50	25	24	23
	12.0	111	114	96	56	56	50

Tableau 2.8. Déplacements moyens obtenus sur une dizaine d'entailles à différentes profondeurs.

### 2.5.4.2. Raideur moyenne des entailles

Le tableau 2.9. donne les valeurs de raideur moyennées sur une dizaine d'entailles relatives à quelques profondeurs en  $\mu\text{m}/10\text{ MPa}$  figure 2.13. La mesure du comportement d'une entaille pourrait constituer une manière indirecte de tester la qualité du béton en place, sachant que les valeurs du tableau ci-dessous ont été obtenus pour des bétons de module moyen  $E = 40000\text{ MPa}$ .

Profondeur d'entaille z (mm)	Base 1	Base 2	Base 3
20	22	10	6
30	37	24	15
40	52	40	26
50	66	55	38
60	81	71	54
70	92	86	67
80	113	104	83

Tableau 2.9. Valeurs des raideurs moyennes sur une dizaine d'entailles en fonction de la profondeur

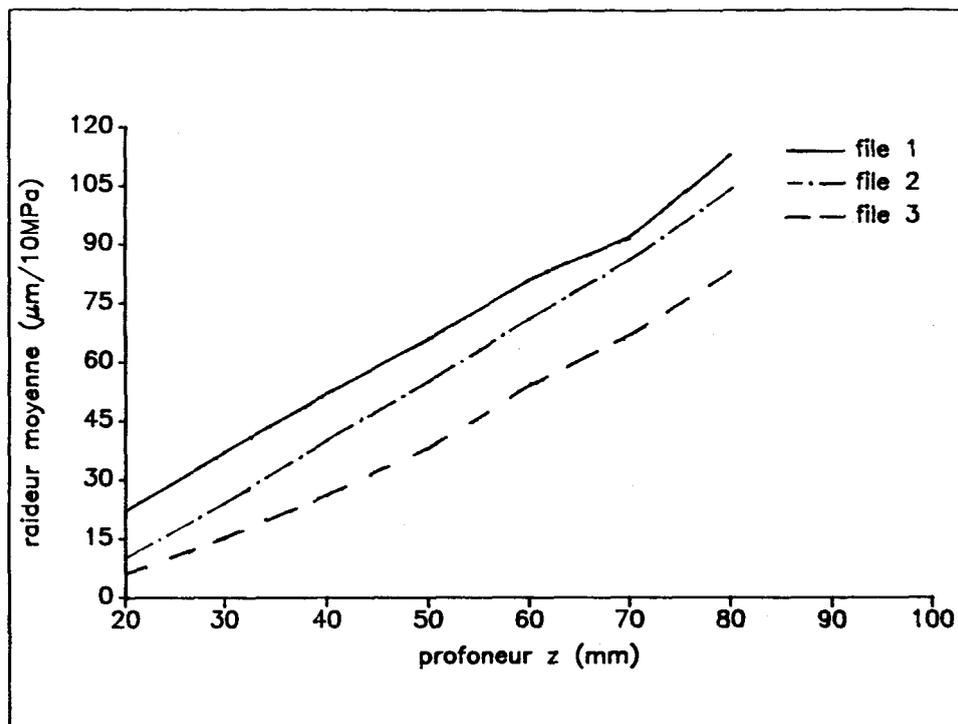


Figure 2.13. Raideur moyenne en fonction de la profondeur d'entaille.

## 2.6. Conclusion de la deuxième partie

Au terme de ce chapitre plusieurs remarques sont à faire :

- . Les évolutions des déplacements aux bases 1, 2 et 3 sont quasiment parallèles. Ainsi, il faut une profondeur d'entaillage "minimale" pour que les déplacements en base 2, et surtout en base 3 deviennent sensibles.  
Au delà, l'approfondissement de l'entaille contribue à des variations de déplacement presque égales sur chacune des 3 bases
- . Les valeurs des déplacements mesurés sur la base 3 sont donc très faibles pour les premières passes d'entaillage. On verra au chapitre 4 que cela va compromettre l'exploitation précise des résultats relatifs à cette base
- . Afin de visualiser l'effet du retrait sur les pressions de rétablissement apparentes, nous avons porté sur les graphiques, figures 2.17, 2.18, l'ensemble des points représentatifs des couples pression de rétablissement, contrainte appliquée ( $P_r$ , C) pour 15 entailles exécutées en conditions contrôlées. Ces points s'inscrivent dans des fuseaux relativement étroits, dont l'intérêt est de pouvoir servir à une pré-exploitation rapide sur site des pressions de rétablissement obtenues.  
Le décalage entre la droite  $PR = C$  et la droite moyenne du fuseau représente l'effet global des contraintes de retrait sur les pressions de rétablissement, soit les valeurs du tableau suivant :

	Effet du retrait sur les $P_r$
Base 1	1.0 à 2.5 MPa
Base 2	1.0 à 1.5 MPa

Ces résultats sont à comparer à ceux obtenus en 2.5.3., soit 0.8 à 2.1 MPa.

Pressions de rétablissement mesurées à une profondeur d'entailage de 80 mm, sur des dallettes soumises à précontrainte contrôlée (0, 3, 6 et 12 MPa).  
Base 1, Base 2

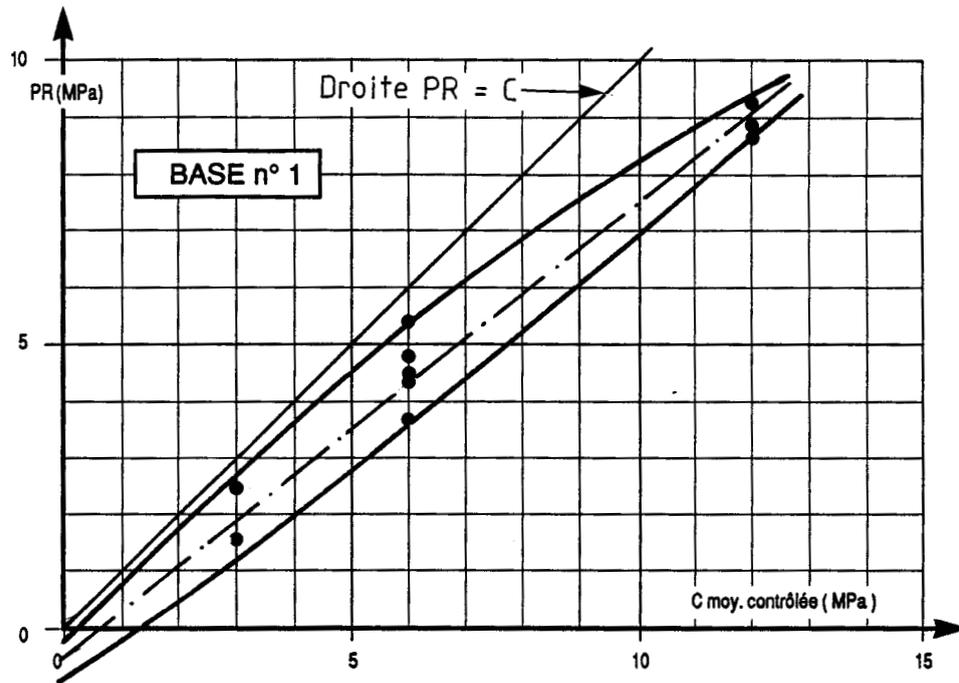


Fig. 2.17 Ensemble des points représentatifs des couples pression de rétablissement, contrainte appliquée (Pr, C) pour 15 entailles. Base 1

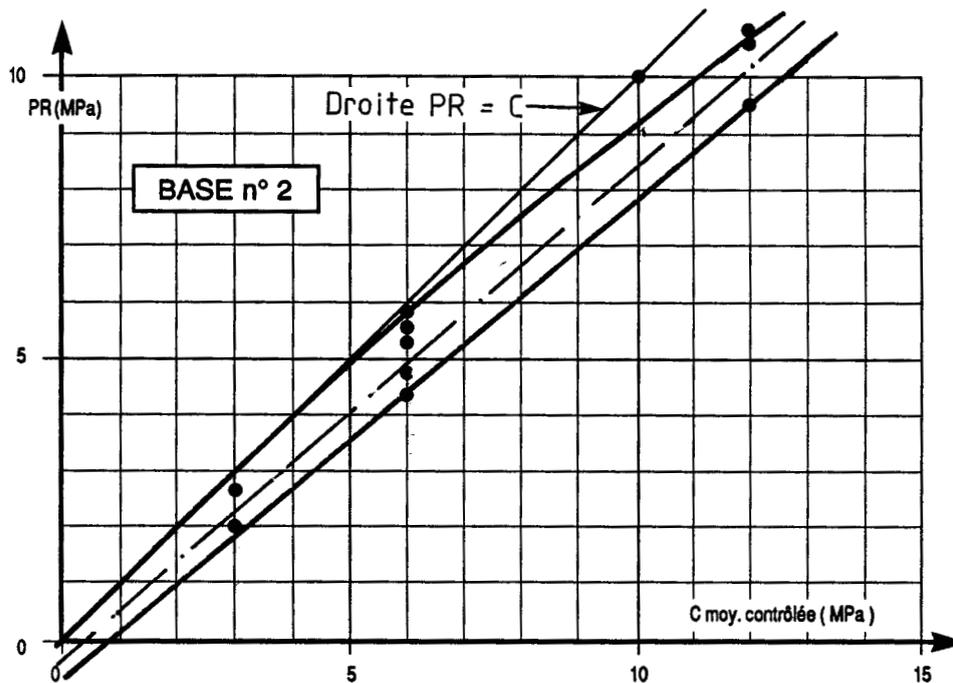


Fig. 2.18 Ensemble des points représentatifs des couples pressions de rétablissement, contrainte appliquée (Pr, C) pour 15 entailles. Base 2.

## **TROISIEME PARTIE**

### **3. MODELISATION DE L'ESSAI DE "LIBERATION DES CONTRAINTES"**

#### **3.1. Objectifs**

#### **3.2. Paramètres et caractéristiques du champ modelisé**

##### **3.2.1. Modelisation en 2 D**

###### ***3.2.1.1. Formulation***

###### ***3.2.1.2. Hypothèses de travail***

###### ***3.2.1.3. Maillage***

#### **3.3. Résultats de calcul**

##### **3.3.1. Commentaires**

##### **3.3.2. Evaluation directe des contraintes**

##### **3.3.3. Problèmes de la méthode directe**

#### **3.4. Effets du module d'young**

##### **3.4.1. Echantillon d'essai**

##### **3.4.2. Expérimentation - Résultats**

###### ***3.4.2.1. Présentation des graphes***

###### ***3.4.2.2. Interprétation***

##### **3.4.3. Résultats de calcul**

#### **3.5. Remarques et conclusions**

### **3. MODELISATION DE L'ESSAI DE "LIBERATION DES CONTRAINTES"**

Dans le domaine des structures, comme dans d'autres domaines, la méthode des éléments finis est la plus utilisée en calcul numérique. Nombreux sont les logiciels de calcul créés à base de cette méthode ainsi que les ouvrages qui lui ont été consacrés.

Il s'est avéré que cette méthode maîtrise bien le calcul des structures soumises à des chargements statiques.

#### **3.1. Objectifs**

- l'objet premier de cette approche numérique est d'obtenir une estimation de l'ordre de grandeur des déplacements en parement lorsqu'on ouvre une entaille de profondeur  $Z$  (mm) dans un béton de module  $E$  soumis à une contrainte. En d'autres termes, quelle est la sensibilité de la méthode de "Libération".

Un autre objectif est de valider ou réorienter le mode opératoire, par l'utilisation des coefficients d'influence (déplacements sur les files 1, 2 et 3 déterminés par la méthode des éléments finis)

- on verra par la suite au paragraphe 3.3.2. L'utilisation de ces coefficients, dans l'exploitation des résultats bruts par la méthode dite "DIRECTE", de déterminer le vecteur contrainte à partir du vecteur déplacement.

#### **3.2. Caractéristiques du champ modelisé**

- Interprétation en élasticité linéaire, car il s'agit d'un matériau dur (béton) valable en première approximation pour un matériau dur soumis à des contraintes de niveau limité

- Dans nos calculs aux éléments finis, nous tentons de simplifier le problème réel (en général tridimensionnel) en problème bidimensionnel, pour des raisons déjà citées au paragraphe 3.1.

- Discrétisation du problème : on divise la profondeur de l'entaille en "tranches". Pour une entaille de 80 mm, il y a 11 tranches d'épaisseur 2, 3, 5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, et 10 mm.

##### **3.2.1. Modélisation en 2 D**

Les champs opératoires de nos essais en laboratoire, peuvent être schématisés en deux dimensions. De façon générale la modélisation de tous les essais de "Libération des Contraintes" va se limiter à une section au voisinage de l'entaille représentée par la figure 3.1.

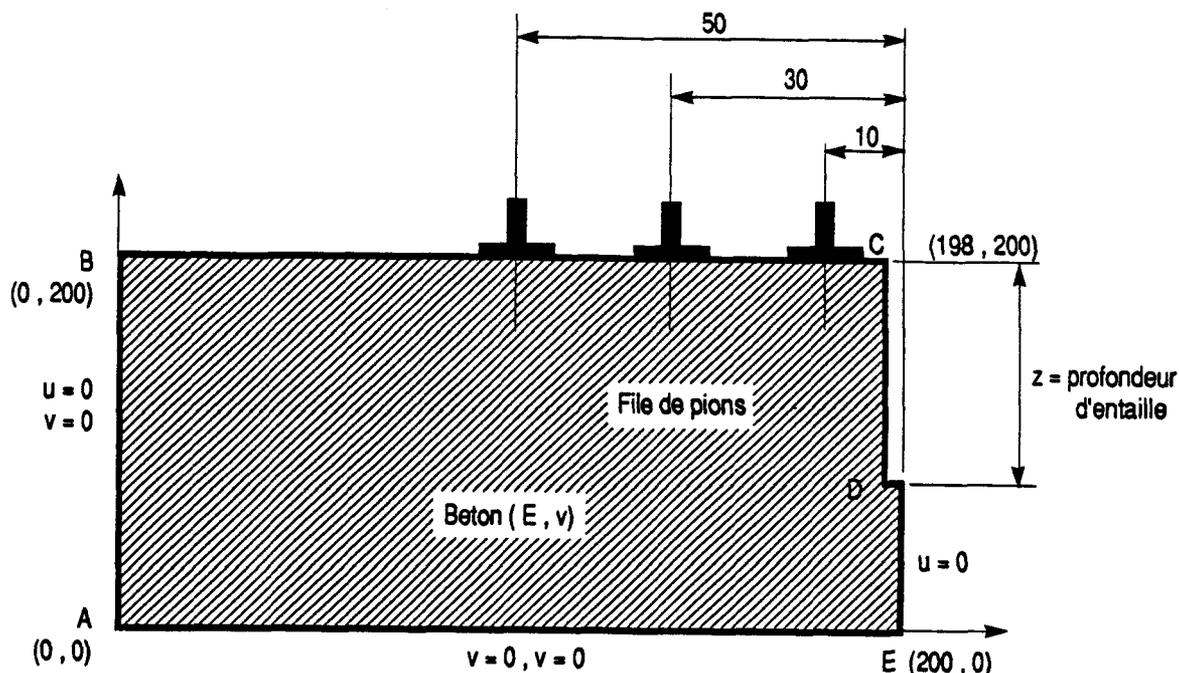


Fig. 3.1. Modèle bidimensionnel d'une section de dalle au voisinage de l'entaille destinée au calcul par éléments finis

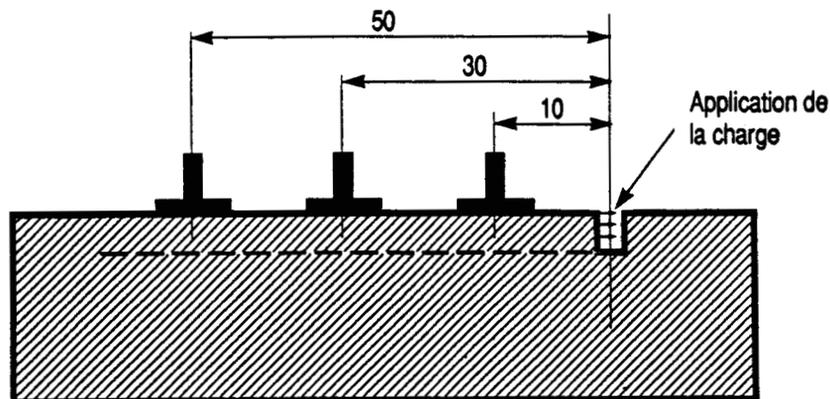
Grâce à un logiciel de calcul de structures par éléments finis en bidimensionnel, nous pouvons étudier le comportement de l'entaille en déformation plane et obtenir les déplacements de chaque file de pions sous différents cas de charge.

On définit à l'aide du logiciel, une structure maillée représentant une section de dalle. Ensuite on simule la pression de compensation des vérins, par une contrainte constante de 10 MPa, appliquée sur l'épaisseur de la tranche considérée. Le programme calcule alors la déformation qui s'ensuit et donne le déplacement relatif aux pions collés sur le parement et constituant la base extensométrique.

Notons que ces déplacements sont calculés pour chaque tranche de l'entaille. On obtient donc un ensemble de valeurs que l'on range dans trois matrices (Mat 1, Mat 2, Mat 3) correspondant respectivement aux matrices des coefficients d'influence  $k_f$  des files 1, 2, 3.

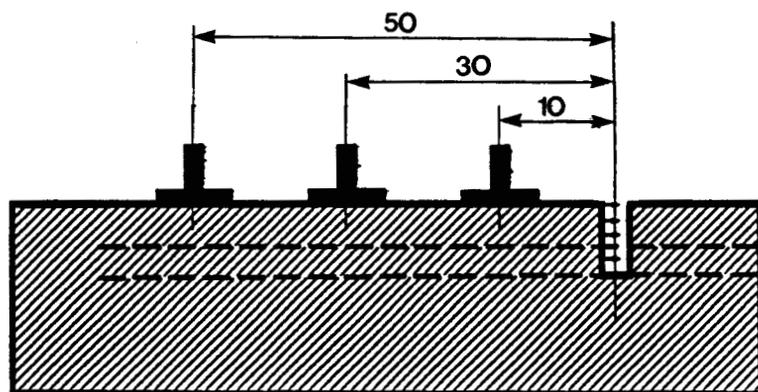
Exemple :

. Entaille de 2 mm



On note les trois valeurs de déplacement des pions dus aux 10 MPa appliqués sur la tranche.

. Entaille de 5 mm



On réapplique 10 MPa sur la première tranche, la raideur de l'entaille étant différente de la précédente. Le déplacement des bases est lui-même modifié (d'où trois nouvelles valeurs). Ensuite on applique de nouveau 10 MPa sur la deuxième tranche, d'où trois autres valeurs de déplacement.

On agit de la sorte pour les 11 tranches de (2 à 80 mm), et l'on obtient ainsi 3 matrices triangulaires inférieures relatives aux 3 bases.

	1ère tranche	2ème tranche	3ème tranche	4ème tranche	5ème tranche	6ème tranche	7ème tranche	8ème tranche	9ème tranche	10ème tranche	11ème tranche
Entaille 2 mm	C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entaille 5 mm	C21	C22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entaille 10 mm	.	C32	C33	0	0	0	0	0	0	0	0
Entaille 15 mm	.	.	.	.	0	0	0	0	0	0	0
Entaille 20 mm	.	.	.	.	.	0	0	0	0	0	0
Entaille 30 mm	.	.	.	.	.	.	0	0	0	0	0
Entaille 40 mm	.	.	.	Cij	.	.	.	0	0	0	0
Entaille 50 mm	.	.	.	.	.	.	.	.	0	0	0
Entaille 60 mm	.	.	.	.	.	.	.	.	0	0	0
Entaille 70 mm	C101	C102	C103	C104	C105	C106	C107	C108	C109	C1010	0
Entaille 80 mm	C111	C112	C113	C114	C115	C116	C117	C118	C119	C1110	C1111

où cij = valeur du déplacement de la 1ère base lorsqu'on applique 10 MPa sur la jème tranche d'une entaille constituée de i tranches.  
L'unité des coefficients cij est le  $\mu\text{m}/10 \text{ MPa}$

### 3.2.1.1. Formulation

L'accès au profil des contraintes serait théoriquement possible par la résolution du système linéaire suivant :

$$C_{ij}(k) \times \sigma_j = \delta_i(k)$$

- $\sigma_j$  : Contraintes recherchées
- $\delta_i(k)$  : Déplacements mesurés en surface pour des profondeurs successives  $Z_i$  de l'entaille
- $C_{ij}(k)$  : Matrice de compliance dont chaque élément représente le déplacement  $\delta$ , en surface sur la base k, sous une contrainte de 10 MPa, appliquée à une tranche de profondeur  $Z_j$ , d'une entaille de profondeur  $Z_i$   
 $i = 1, 11 ; j = 1, i ; k = 1, 2, 3$  (b 20, b 60, b 100)  
 $Z_i = 2 \dots \dots \dots 80 \text{ mm}$

### 3.2.1.2. Hypothèses de travail

. H1 - Dimensionnement :

Le calcul qui a été effectué pour tous les cas de charge est limité à une section au voisinage de l'entaille de dimensions suivantes :

- Section de longueur :  $L = 200 \text{ mm}$
- et de largeur :  $l = 200 \text{ mm}$
- demi-épaisseur de l'entaille :  $e = 2 \text{ mm}$

. H2 - Caractéristiques mécaniques

On suppose que notre matériau est élastique linéaire isotrope, avec :  
le module d'young à l'âge de 4 mois (âge des essais en laboratoire)  $E = 40000 \text{ MPa}$   
le coefficient de poisson  $\nu = 0.20$

. H3 - Conditions aux limites

Rappelons que par raison de symétrie le modèle à étudier décrit au paragraphe 3.1 représente une demi-section du champ modelisé :

- sur le contour AB :  $u = 0, v = 0$
- sur le contour AE :  $u = 0, v = 0$
- sur le contour DE :  $u = 0$  par symétrie

. H4 - Charges

La pression de compensation des vérins appliquée dans une entaille est supposée uniformément répartie sur toute la hauteur de l'entaille considérée. Dans notre cas les déformations sont obtenues pour une charge de 10 MPa constante sur toute la hauteur de la tranche.

3.2.1.3. Maillage en 2 D

La figure 3.2 montre le maillage type que l'on a adopté pour la structure. Les éléments choisis sont des triangles. Au voisinage de l'entaille le maillage est relativement fin pour s'adapter aux gradients de contraintes.

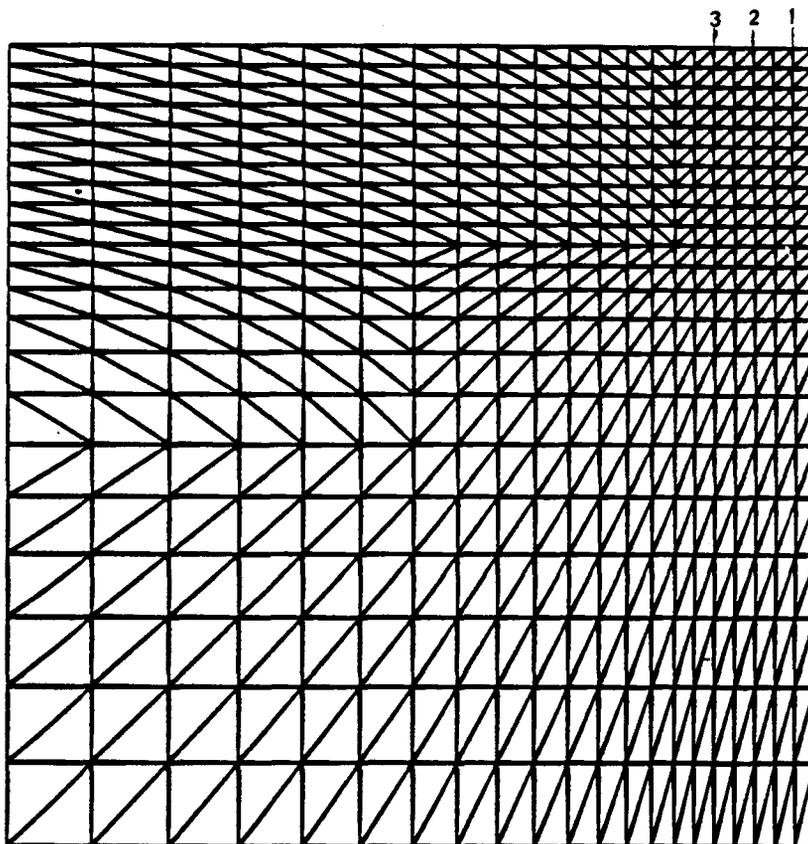


Fig. 3.2. Maillage en 2D d'une demi-section de dalle

L'obtention des coefficients  $C_{ijk}$  nécessite de nombreux calculs bidimensionnels. En effet, chaque pas de profondeur de l'entaille provoque une modification de la géométrie de notre dalle et, bien sûr, des conditions aux limites. On doit donc prévoir un maillage pour chaque profondeur d'entaille pour les différents cas de charge.

### 3.3. Résultats de calcul

Toutes ces informations, citées au paragraphe 3.2.1.1.2., sont nécessaires à construire le jeu de données pour utiliser le programme de calcul aux éléments finis. Voici quelques images de calcul en 2D obtenus Figure 3 (3.4), les autres résultats font l'objet de la pièce annexe 3.

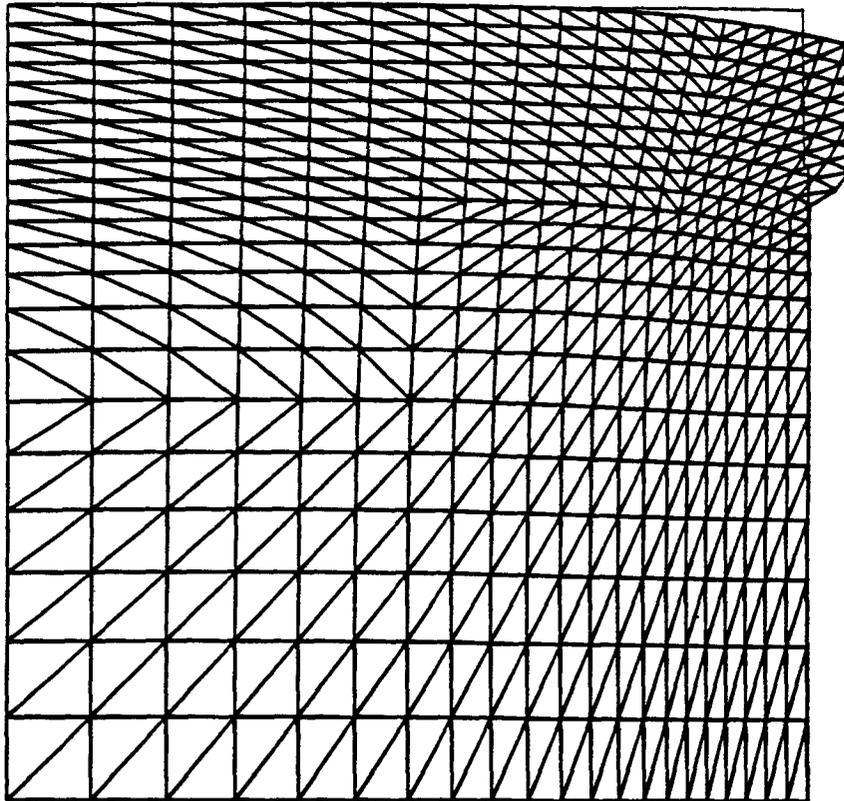


Fig. 3.3. Déformée de la structure au voisinage de l'entaille lors de la libération d'une contrainte homogène de 10 MPa

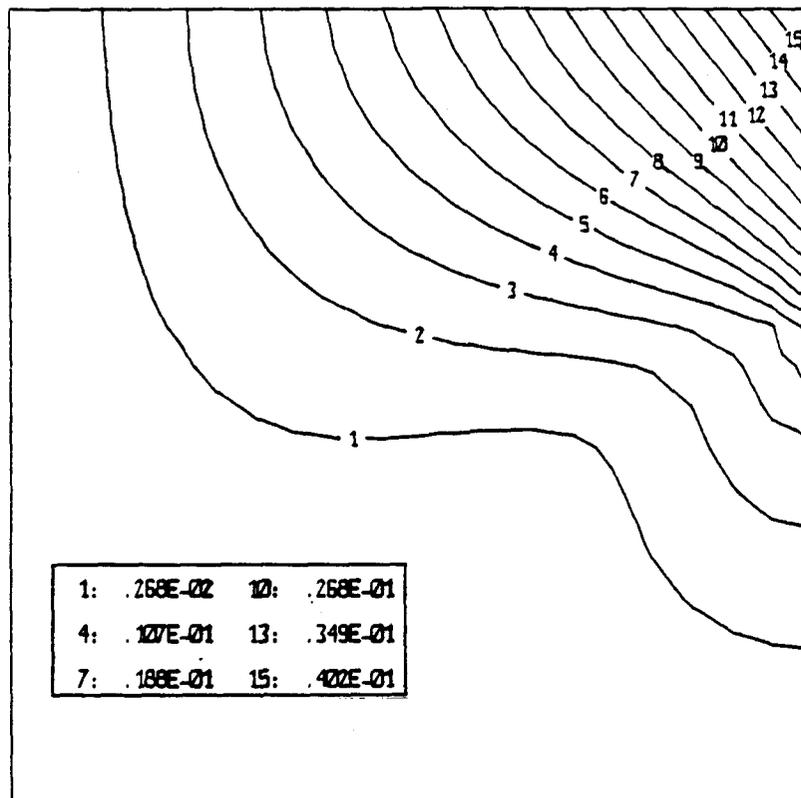


Fig. 3.4. Isovaleurs de déplacement total obtenus dans les conditions de la fig. 3.3.

Le tableau 3.1. reprend toutes les valeurs des coefficients d'influence  $C_{ij}(k)$  obtenues à différentes profondeurs d'entaille et pour les trois files de pions (les 3 matrices sont ici imbriquées).

i	hmm	k	j : 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	1	0.290										
		2	0.100										
		3	0.070										
2	3	1	0.730	0.630									
		2	0.260	0.240									
		3	0.150	0.140									
3	5	1	1.300	1.600	1.300								
		2	0.520	0.670	0.630								
		3	0.300	0.390	0.380								
4	5	1	1.700	2.200	2.500	1.100							
		2	0.750	1.000	1.400	0.700							
		3	0.450	0.610	0.830	0.440							
5	5	1	2.000	2.600	3.200	1.900	0.790						
		2	0.930	1.500	1.800	1.300	0.630						
		3	0.560	0.780	1.100	0.860	0.420						
6	10	1	2.400	3.200	4.200	3.000	2.100	2.000					
		2	1.300	1.800	2.700	2.300	1.800	1.800					
		3	0.810	1.200	1.800	1.500	1.300	1.300					
7	10	1	2.600	3.500	4.700	3.600	2.700	3.700	1.500				
		2	1.500	2.100	3.200	2.800	2.400	3.400	1.500				
		3	0.990	1.400	2.200	2.000	1.800	2.700	1.200				
8	10	1	2.800	3.700	5.100	4.000	3.100	4.500	2.800	1.200			
		2	1.600	2.400	3.600	3.200	2.800	4.300	2.800	1.200			
		3	1.100	1.600	2.500	2.300	2.100	3.500	2.400	1.100			
9	10	1	2.900	3.900	5.400	4.200	3.400	5.100	3.400	2.200	0.940		
		2	1.700	2.500	3.900	3.500	3.000	4.900	3.400	2.200	0.960		
		3	1.200	1.800	2.800	2.600	2.400	4.000	3.000	2.100	0.930		
10	10	1	2.900	4.000	5.500	4.400	3.500	5.500	3.800	2.700	1.800	0.750	
		2	1.800	2.500	4.000	3.600	3.200	5.200	3.900	2.700	1.800	0.770	
		3	1.300	1.900	2.900	2.700	2.500	4.400	3.500	2.600	1.800	0.770	
11	10	1	3.000	4.000	5.600	4.500	3.700	5.700	4.100	3.000	2.100	1.400	0.610
		2	1.900	2.700	4.100	3.700	3.300	5.500	4.100	3.100	2.200	1.400	0.620
		3	1.300	1.900	3.100	2.900	2.600	4.600	3.700	2.900	2.100	1.400	0.630

Tableau 3.1. Matrices des coefficients d'influence  $C_{ij}(k)$   
BIDIMENSIONNELS, E = constante (files 1, 2 et 3)

### 3.3.1. Commentaires

La simulation par un calcul aux éléments finis en 2 D permet de trouver, dans l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire, les champs de déplacements par l'application de pression dans l'entaille.

Cependant deux constatations, pour ce qui concerne le champ cinématique des déplacements, sont à faire :

#### . Sensibilité des différentes tranches

On remarque bien les faibles valeurs obtenues sur les premières entailles de 2 à 5 mm. Ceci coïncide bien avec les problèmes rencontrés lors de nos essais en laboratoire, car en plus des problèmes de fissuration de peau s'ajoute la raideur d'entaille.

#### . Effets au niveau des différentes files

On peut remarquer l'écart important qui existe entre les différentes valeurs de déplacement des bases (1, 2 et 3). La première file est la plus sensible et au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entaille les déformations sont de plus en plus faibles.

### 3.3.2. Evaluation directe des contraintes

#### - Pondération des matrices de compliance

Les matrices des coefficients décrites au tableau 3.1. sont le fruit de calculs numériques. On ne peut donc pas les appliquer directement à des résultats expérimentaux, soumis à d'éventuelles erreurs. Il est de ce fait nécessaire de les pondérer en fonction de la raideur d'entaille ainsi que des rendements du vérin.

. L'opération consiste schématiquement, en une règle de 3 effectuée entre les coefficients d'une même ligne de la matrice et la raideur d'entaille correspondante à cette ligne.

#### Exemple :

	T1	T2	T3	T4	T5	(Tranche)
Entaille 20 mm :	C <sub>51</sub>	C <sub>52</sub>	C <sub>53</sub>	C <sub>54</sub>	C <sub>55</sub>	

Si  $\Sigma_{j=1}^5 C_{5j} = 25 \mu\text{m}/10 \text{ MPa}$  (déplacement global de l'entaille)

La ligne, une fois pondérée, sera du type :

$(C_{51} \times 30)/25 \ (C_{52} \times 30)/25 \ (C_{53} \times 30)/25 \ (C_{54} \times 30)/25 \ (C_{55} \times 30)/25$

. Dans une seconde phase, nous faisons intervenir le rendement du vérin. Tout porte à croire que celui-ci (de par sa forme et sa fabrication) ne restitue pas 100 % de sa pression interne jusqu'au niveau de ses bords extrêmes. Des pertes sont quasi certaines dans les zones de transition de la partie supérieure et en périphérie (au niveau des soudures). C'est pourquoi on a pensé subdiviser le vérin en différentes tranches qui ont chacune leur propre rendement figure 3.5.

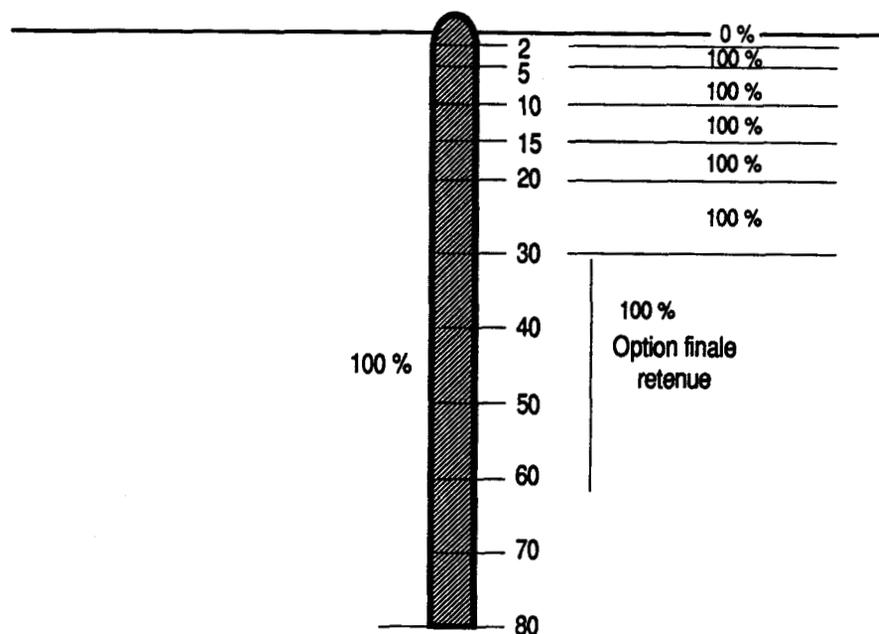


Fig. 3.5. Coupe du vérin et subdivision par tranches de rendement

- Calcul de contraintes (méthode directe)

Connaissant la matrice pondérée et le vecteur colonne de déplacement  $DEP_1$ , il est théoriquement aisé de calculer le vecteur colonne de contrainte  $CONT_1$ . Il suffit pour cela de multiplier l'inverse de la matrice pondérée par le vecteur colonne de déplacement linéarisé obtenu lors de l'expérimentation.

Si  $Dep_1 = (Mat_1) * CONT_1$ , alors

$$(Mat_1^{-1}) * Dep_1 = CONT_1$$

$$(C_{ijk})^{-1} * (\delta_i(k)) = \sigma_j \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} (C_{ijk})^{-1} : (\text{MPa}/\mu\text{m}) \\ (\delta_i(k)) : (\mu\text{m}) \\ \sigma_j : (\text{MPa}) \end{array}$$

Un des corps d'épreuve de cette étude est la dalle RD1, sous précontrainte de 6 MPa et comprenant trois entailles. On donne en pages suivantes les différentes valeurs de contraintes calculées par la méthode directe à différentes profondeurs d'entaille pour les trois bases de mesure.

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RDI NR 90° (File 1)		Déplacement	Contrainte
an		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)	
2	1	175.30											-0.50	-47.65	
5	2	-203.13	80.70										-2.40	-92.10	
0	3	74.70	-99.32	39.11									-1.70	134.53	
5	4	-34.44	64.33	-88.88	46.22								1.70	92.49	
0	5v	4.97	-18.00	55.35	-111.15	64.35							4.00	15.07	
0	6v	4.22	1.86	-6.93	47.39	-67.57	19.92						11.00	34.58	
0	7v	-0.64	-3.67	8.22	-27.73	50.84	-49.13	25.41					18.80	88.56	
0	8v	-12.56	6.95	-6.15	20.10	-31.48	39.95	-59.28	33.39				24.80	61.19	
0	9v	17.55	0.35	-5.52	-8.28	23.63	-23.85	46.85	-78.14	40.13			33.00	85.18	
0	10v	11.99	-16.34	20.84	-11.89	-5.77	16.30	-27.75	67.34	-96.31	48.62		41.20	106.74	
0	11v	-53.26	26.65	-28.23	33.82	-13.94	-7.65	23.19	-49.75	82.89	-111.58	52.77	51.20	-29.57	

Cont. moy = 5.05

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RDI NR 90° (File 2)		Déplacement	Contrainte
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)	
2	1	325.29											-0.30	-97.59	
5	2	-376.92	149.74										-0.10	98.18	
10	3	138.61	-184.29	72.56									0.40	5.87	
15	4	-63.91	119.37	-164.92	89.76								2.30	138.51	
20	5v	9.21	-33.40	102.71	-206.25	119.41							5.20	188.21	
30	6v	7.83	3.45	-12.85	87.93	-129.38	30.33						11.70	-102.66	
40	7v	-1.18	-6.81	15.26	-51.45	94.33	-74.83	33.58					20.68	195.63	
50	8v	-23.30	12.90	-11.42	37.29	-58.41	60.84	-78.36	39.23				28.10	-16.69	
60	9v	32.56	0.64	-10.24	-15.37	43.85	-36.32	61.92	-91.82	44.75			37.70	136.05	
70	10v	22.25	-30.31	38.68	-22.05	-10.70	24.82	-36.68	79.13	-107.39	51.01		47.60	43.50	
80	11v	-98.83	49.46	-52.39	62.76	-25.87	-11.65	30.65	-58.46	92.43	-117.08	56.53	56.70	-16.96	

Cont. moy = 6.86

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RDI NR 90° (File 3)		Déplacement	Contrainte
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)	
2	1	597.47											-0.20	-119.49	
5	2	-692.30	275.02										-0.50	0.95	
10	3	254.68	-338.49	133.28									-0.20	91.67	
15	4	-117.38	219.25	-302.91	137.51								0.30	21.69	
20	5v	16.92	-61.35	188.65	-378.83	219.32							3.40	621.61	
30	6v	14.37	6.33	-23.60	161.58	-230.29	56.64						6.80	-358.78	
40	7v	-2.17	-12.51	28.03	-96.57	173.27	-139.71	56.06					14.00	396.63	
50	8v	-42.88	23.69	-20.97	68.49	-107.29	113.60	-130.81	58.42				19.70	-251.23	
60	9v	59.80	1.18	-18.81	-28.23	88.56	-67.82	103.37	-136.74	68.89			29.80	363.30	
70	10v	40.86	-58.68	71.04	-40.51	-19.65	46.34	-61.23	117.84	-146.13	68.72		37.00	-109.86	
80	11v	-181.53	90.84	-96.23	115.28	-47.52	-21.75	51.17	-87.06	125.76	-157.73	73.18	45.50	-25.34	

Cont. moy = 9.97

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 R 90° (Pile 1)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	135.54											0.10	13.55
5	2	-157.05	62.39										0.40	9.25
10	3	57.76	-76.79	30.24									1.60	23.44
15	4	-26.63	49.74	-68.72	35.73								5.90	113.11
20	5v	3.84	-13.92	42.80	-85.94	49.75							9.60	31.89
30	6v	3.26	1.44	-5.35	36.64	-52.24	22.66						16.30	76.27
40	7v	-0.49	-2.84	6.36	-21.44	39.31	-55.89	30.56					22.20	27.23
50	8v	-9.71	5.37	-4.76	15.54	-24.34	45.44	-71.30	36.26				30.60	111.90
60	9v	13.57	0.27	-4.27	-6.40	18.27	-27.13	56.34	-84.86	44.37			39.90	114.79
70	10v	9.27	-12.63	16.12	-9.19	-4.46	18.54	-33.37	73.13	-106.50	52.95		47.50	-10.21
80	11v	-41.18	28.61	-21.83	26.15	-10.78	-6.70	27.89	-54.02	91.66	-121.53	58.93	57.30	53.38

Cont. moy = 5.94

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 R 90° (Pile 2)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	325.29											-0.20	-65.06
5	2	-376.92	149.74										-0.30	30.46
10	3	138.61	-184.29	72.56									0.30	27.56
15	4	-63.91	119.37	-164.92	85.76								2.10	157.06
20	5v	9.21	-33.40	102.71	-206.25	119.41							4.40	100.45
30	6v	7.83	3.45	-12.85	87.93	-125.38	33.11						12.20	34.26
40	7v	-1.18	-6.81	15.26	-51.45	94.33	-81.66	38.65					19.00	47.43
50	8v	-33.30	12.90	-11.42	37.29	-58.41	66.39	-90.19	43.35				27.40	126.25
60	9v	32.56	0.64	-18.24	-15.37	43.85	-39.64	71.27	-101.45	49.23			37.90	110.79
70	10v	22.25	-38.31	38.68	-22.85	-18.78	27.89	-42.22	87.43	-118.16	57.31		45.70	-23.90
80	11v	-98.83	49.46	-52.39	62.76	-25.87	-12.71	35.28	-64.59	101.70	-121.54	62.16	56.80	141.78

Cont. moy = 6.75

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 R 90° (Pile 3)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	552.37											-0.10	-55.24
5	2	-640.05	258.27										-0.30	-12.27
10	3	235.38	-312.94	123.22									-0.30	33.38
15	4	-108.53	202.70	-280.05	145.63								0.60	121.43
20	5v	15.65	-56.72	174.41	-322.24	292.77							2.20	199.08
30	6v	13.29	5.86	-21.82	149.31	-212.91	51.79						9.50	116.61
40	7v	-2.51	-11.57	25.91	-47.38	160.19	-127.74	54.70					16.00	-42.16
50	8v	-39.57	21.90	-19.39	63.32	-99.19	103.96	-127.64	60.06				22.30	106.59
60	9v	55.29	1.09	-17.39	-26.10	74.46	-62.01	100.87	-140.56	62.31			33.80	144.17
70	10v	37.78	-51.48	65.68	-37.45	-18.17	42.37	-59.75	121.13	-149.55	71.37		39.40	-165.59
80	11v	-167.83	83.98	-88.96	106.58	-43.93	-19.89	49.93	-69.49	128.71	-163.79	76.10	50.30	162.94

Cont. moy = 6.61

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 NR 45° (File 1)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	140.08											-1.00	-140.08
5	2	-162.31	64.48										-0.80	110.73
10	3	59.69	-79.36	31.25									2.00	66.29
15	4	-27.52	51.40	-71.02	36.93								3.50	-26.38
20	5v	3.97	-14.38	44.23	-88.82	51.42							4.60	21.67
30	6v	3.37	1.49	-5.53	37.86	-53.99	20.03						7.60	20.75
40	7v	-0.51	-2.93	6.57	-22.16	40.62	-49.40	28.32					10.30	41.58
50	8v	-10.03	5.55	-4.92	16.06	-25.15	40.17	-66.09	33.23				14.10	29.37
60	9v	14.02	0.28	-4.41	-6.62	18.88	-23.98	52.23	-77.77	39.05			18.80	33.85
70	10v	9.58	-13.05	16.66	-9.50	-4.61	16.39	-30.93	67.03	-93.72	48.94		23.30	109.02
80	11v	-42.56	21.30	-22.56	27.03	-11.14	-7.69	25.85	-49.52	80.66	-112.32	52.44	29.20	-35.93
													Cont. moy =	331

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 NR 45° (File 2)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	370.58											-0.30	-111.17
5	2	-429.40	170.58										-0.30	77.65
10	3	157.92	-209.95	82.67									0.30	40.41
15	4	-72.81	135.99	-187.88	97.70								1.70	90.77
20	5v	10.50	-38.05	117.01	-234.97	136.04							2.00	-84.01
30	6v	8.92	3.93	-14.64	100.17	-142.88	34.69						4.40	29.00
40	7v	-1.35	-7.76	17.39	-58.62	107.47	-85.57	39.90					7.20	34.84
50	8v	-26.55	14.70	-13.01	42.48	-66.54	69.57	-93.10	44.24				10.60	43.47
60	9v	37.09	0.73	-12.67	-17.51	49.95	-41.54	73.58	-103.54	49.31			15.20	54.32
70	10v	25.34	-34.54	44.06	-25.13	-12.19	28.38	-43.58	89.23	-118.35	56.37		20.30	51.30
80	11v	-112.60	56.34	-59.68	71.50	-29.47	-13.32	36.42	-65.92	101.86	-129.38	60.51	25.60	37.36
													Cont. moy =	231

		Matrice inverse pondérée (N-1)										RD1 NR 45° (File 3)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	487.93											-0.10	-48.79
5	2	-569.38	224.68										-0.20	11.62
10	3	207.92	-276.43	108.85									-0.20	12.73
15	4	-95.86	179.05	-247.38	128.64								0.40	74.71
20	5v	13.82	-50.10	154.06	-309.38	179.11							2.20	248.12
30	6v	11.74	5.17	-19.28	131.89	-188.87	60.42						3.40	-153.93
40	7v	-1.78	-10.22	22.89	-77.18	141.50	-149.03	57.49					5.90	110.54
50	8v	-34.95	19.35	-17.12	55.93	-87.62	121.17	-134.13	59.72				8.90	-15.22
60	9v	48.84	0.97	-15.36	-23.06	65.77	-72.34	106.00	-139.78	63.81			13.30	117.57
70	10v	33.37	-45.47	58.02	-33.08	-16.05	49.43	-62.79	120.46	-153.14	67.47		19.10	67.35
80	11v	-148.25	74.18	-78.58	94.15	-38.81	-23.20	52.47	-88.99	131.80	-154.86	70.33	24.50	-75.09
													Cont. moy =	501

### 3.3.3. Problèmes de la méthode directe

Parmi toutes les valeurs de contraintes trouvées précédemment aucune n'approche la contrainte recherchée qui avoisine les 6 MPa : dans la plupart des cas l'écart est considérable. On peut citer deux facteurs qui ont une incidence directe sur la dispersion des valeurs :

- grande sensibilité des tranches supérieures les plus influencées par le retrait. Ce problème a été déjà cité au paragraphe 3.3.1.
- nécessité d'une très grande précision sur les déplacements (au 1/100<sup>e</sup> de micron), ce qui est impossible et exigerait un matériel et une méthodologie inaccessibles. Notons que la sensibilité pratique de nos mesures est de 1/10 de micron
- exemple de calcul d'erreur :

$$\text{à } z = 80 \text{ mm, on a } C_{11} = \sum_{i=1}^{11} k_{11,i}^{-1} \delta_{11,i}$$

$$\text{d'où } d(c) = \sum_{i=1}^{11} k_{11,i}^{-1} d(\delta_{11,i})$$

Si l'erreur type d'une mesure de déplacement est de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$ , l'erreur potentielle sur la contrainte estimée par la méthode directe est de :

$$d(c) = 1 \mu\text{m} * \sum_{i=1}^{11} (k_{11,i})^{-1} \quad (\text{valeur absolue})$$

à une profondeur de 80 mm sur la dernière tranche de 10 mm.

Exemple : pour RD 1.NR.90. Base 1, on obtient  $C = - 3.0 \text{ MPa} \pm 38 \text{ MPa}$  c'est-à-dire que la contrainte recherchée peut varier entre - 35 et + 41 pour MPa !

### 3.4. Effets du module d'young

Les valeurs de contraintes trouvées ne sont pas uniquement affectées par les problèmes technologiques ou par le rendement des vérins ; il y a aussi le comportement du matériau béton. Au chapitre 1 nous avons cité les travaux de P. Acker en ce qui concerne les problèmes de dessiccation du béton et ses conséquences sur la perturbation du champ de contrainte. A partir de là notre objectif a été de caractériser l'évolution de la qualité du béton dans l'épaisseur d'un parement exposé à la dessiccation, ce qui revient à déterminer la variation du module d'élasticité du béton à différentes profondeurs d'une section de béton.

Notons que tous les essais effectués sur les rondelles suivent les mêmes étapes :

- évaporation des eaux de carottage et sciage (parements secs)
- détermination de la masse (g)
- mesure de e et d
- détermination de N
- calcul du module E par la formule suivante,

tous calculs faits :

$$E = 5.2 \times 10^6 * \frac{m.d^2}{G^2.e^3}$$

Tableau 3.2. : Variation du module de déformation du béton en fonction de sa distance au parement exposé à la dessiccation

Eprouvette n° 1

$$E1 \# 5,2.10^6 * \frac{m.d^2}{G^2.e^3}$$

Provenance : RDφ

		Masse (g)	Diamètre (mm)	em (mm)	μ (g/cm <sup>3</sup> )	Grindo	E (MPa)	d moy au par.	
Le : 3/4/89	T0	441.7	147.7	11.38		1015	33000	10.7	
Obs : séchées à l'air libre	T1	579.3	"	14.64	1077.9	742	38000	27.7	
	T2	442.3	2063.6 g	11.16	cm <sup>3</sup>	946	40400	44.6	
	T3	517.1	"	13.07		822	38900	60.7	
	T4	524.7	"	13.26		811	38800	77.9	
Le :	T0	455.4				927	40800	+ 7800	
Obs : laissées dans l'eau 10 jours (béton saturé)	T1	593.1				712	42300	+ 4200	
	T2	452.1	2109.3			915	44000	+ 3600	+ 8.4 %
	T3	528.5	(+ 45.7g)	+ 5 %		800	42000	+ 3100	
	T4	535.2	893.18cm <sup>3</sup>	)		785	42300	+ 3500	
Le :	T0	435.1		11.38		966	35900		
Obs : béton séché dans une étuve à 60° pendant 3 jours	T1	569.5	-110.5 g	14.64		745	37100		
	T2	432.1	-10.25 %	11.16		956	38600	- 12 %	
	T3	505.0		13.07		832	37100		
	T4	512.5		13.26		818	37300		
Le :	T0	429.8				1048	30800		
Obs : béton séché dans une étuve à 110° pendant 24 H	T1	558.7				804	31200		
	T2	426.7	-123.1 g			1035	32500	- 25.8 %	
	T3	497.2	- 13.8 %			891	31800		
	T4	503.9				888	31100		
Le :	T0								
Obs :	T1								
	T2								
	T3								
	T4								

Tableau 3.3. : Variation du module de déformation du béton en fonction de sa distance au parement exposé à la dessiccation

Eprouvette n° 2

E1 #  $5,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{m \cdot d^2}{G^2 \cdot e^3}$

Provenance : RD $\phi$

$G^2 \cdot e^3$

		Masse (g)	Diamètre (mm)	em (mm)	$\mu$ (g/cm <sup>3</sup> )	Grindo	E (MPa)	d moy au par.	
Le : 3/4/89	T0	235.6	147.7	6.32		2250	20900	3.2	
Obs : séchées à l'air libre	T1	606.7	"	15.29	877.9 cm <sup>3</sup>	732	35900	18.0	
	T2	597.0	"	14.93		718	39500	37.1	
	T3	581.3	"	14.70		753	36600	55.9	
	T4								
Le :	T0	248.7				1880	31600	+ 10700	
Obs : 10 jours dans l'eau (béton saturé)	T1	622.7				694	41000	+ 5100	)
	T2	609.3	+ 42.1 g	) + 5.5%		698	42600	+ 3100	) + 10 %
	T3	595.1	769.65cm <sup>3</sup>	)		717	41300	+ 4700	)
	T4								
Le :	T0	233.1	)	6.32		2116	23400		
Obs : béton séché dans une étuve à 60° pendant 3 jours	T1	595.1	) - 77.1 g	15.29	)	715	37000	)	
	T2	584.3	) - 10.27 %	14.93	) 750.5cm <sup>3</sup>	728	37600	) + 11.6%	
	T3	570.2	)	14.70	)	754	35800	)	
	T4								
Le :	T0	231.7				2348	18900		
Obs : béton séché dans une étuve à 110° pendant 24 H	T1	587.5	)			772	31300	)	
	T2	574.4	) - 104.9 g			781	32100	) - 25.3 %	
	T3	560.3	) - 14.0 %			817	30000	)	
	T4								
Le :	T0								
Obs :	T1								
	T2								
	T3								
	T4								

### 3.4.1. Echantillon d'essai

5 carottages  $\phi$  150 sont pratiqués dans une dalle en béton âgé d'1 an, cette dernière ayant servi de modèle expérimental pour des essais de "Libération des contraintes". On obtient ainsi 5 éprouvettes d'essai de ( $\phi$  150 x h 150). Pour chaque éprouvette, on pratique un sciage transversal et on débite ainsi 5 rondelles d'épaisseur 10 mm chacune Figure 3.6.

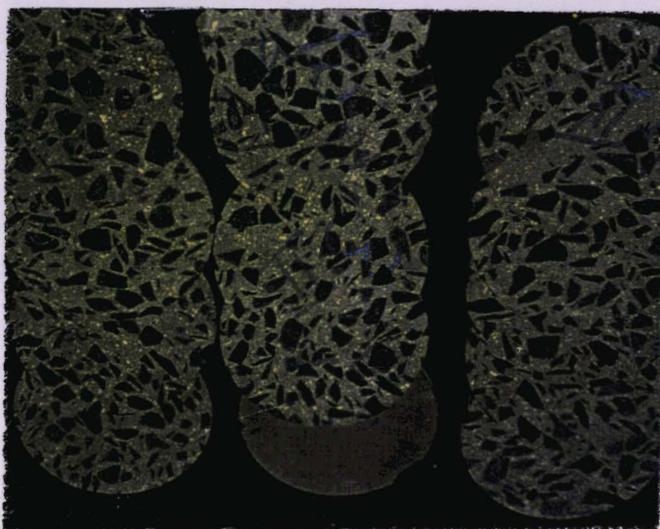


Fig. 3.6. Différentes rondelles obtenues

Le module d'élasticité peut être calculé d'après la fréquence de vibration naturelle de l'objet. On utilise donc un fréquencesmètre qui analyse les vibrations naturelles de l'objet suite à une excitation par choc.

### 3.4.2. Expérimentation - Résultats

L'expérimentation a eu pour objet de tracer les courbes de référence du module de déformation élastique du béton en fonction de la profondeur par rapport au parement exposé à la dessiccation.

$$E \text{ (GPa)} = f \text{ (p.mm)}.$$

La fréquence d'une "rondelle" de béton est liée au module théorique par la formule :

$$E = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{N^2}{(6.09)^2} \cdot \frac{m \cdot \phi^4}{e^2} (1 - \nu^2)$$

avec :

N : fréquence propre donnée par le fréquencesmètre

m : masse de la rondelle (g)

G : affichage du fréquencesmètre : double période de vibration

d : diamètre moyen de la rondelle en (mm)

e : épaisseur moyenne de la rondelle en (mm).

Tableau 3.4. : Variation du module de déformation du béton en fonction de sa distance au parement exposé à la dessiccation

Eprouvette n° 3

E1 #  $5,2.10^6 * \frac{m.d^2}{G^2.e^3}$

Provenance : RDφ

		Masse (g)	Diamètre (mm)	em (mm)	$\mu$ (g/cm <sup>3</sup> )	Grindo	E (MPa)	d moy au par.	
Le : 3/4/89	T0	3522		8.94		13.4	32900	4.5	
Obs : Sortie de l'eau (humide)	T1	424.6		10.69		960	42800	18.3	
	T2	492.0		12.08		870	41800	33.7	
	T3	687.0		16.74		627	42300	52.1	
	T4	644.3		15.51		665	44300	72.2	
Le : 3/4/89	T0	351.1		9.16		1309	30800		
Obs : teinte mate	T1	424.0		10.74		951	42900		
	T2	491.2		12.27		862	40600		
	T3	686.2		16.74		626	42300		
	T4	693.6		15.66		664	43100		
Le :	T0	353.0				1290	31300	+ 1100	
Obs : Béton gorgé d'eau (saturé)	T1	429.9				980	40500	- 1400	
	T2	492.0				854	41400	+ 800	
	T3	687.3				619	43400	+ 1700	
	T4	645.3				657	44200	+ 1100	
Le :	T0	331.9		9.16		1375	25900		
Obs : béton séché dans une étuve à 60° pendant 3 jours	T1	404.2	) - 101.7 g	10.74	)	1007	36500	)	
	T2	466.1	)	12.27	)	900	35300	) - 12.6 %	
	T3	659.1	) - 10.7 %	16.74	) 949.4cm <sup>3</sup>	649	37800	)	
	T4	618.1	)	15.66	)	689	38500	)	
Le :	T0	329.6				1580	19500		
Obs : béton séché dans une étuve à 110° pendant 24 H	T1	398.2	)			1065	32100	)	
	T2	460.2	) - 133 g			979	29500	) - 25.1 %	
	T3	646.7	) - 14.0 %			701	31800	)	
	T4	606.9	)			736	33100	)	

Tableau 3.5. : Variation du module de déformation du béton en fonction de sa distance au parement exposé à la dessiccation

Eprouvette n° 4

E1 # 5,2.10<sup>6</sup> \* m.d<sup>2</sup>

Provenance : RDφ

G<sup>2</sup>.e<sup>3</sup>

		Masse (g)	Diamètre (mm)	em (mm)	μ (g/cm <sup>3</sup> )	Grindo	E (MPa)	d moy au par.	
Le :	T0	461.5		11.34		1005	35500	5.7	
Obs : sortie de l'eau (humide)	T1	434.7		10.56		956	45800	20.6	
	T2	401.9		9.76		1041	47600	34.8	
	T3	616.1		15.00		684	44300	51.2	
	T4	614.6		15.14		691	42100	70.1	
Le :	T0	460.8		11.66		995	33300		
Obs : béton séché à l'air libre	T1	434.1		10.76		964	44500		
	T2	401.4		9.97		1010	42300		
	T3	615.6		15.05		684	43800		
	T4	614.0		15.49		692	39100		
Le :	T0	462.3				962	35700	+ 2400	
Obs : béton gorgé d'eau (saturé)	T1	434.7				949	44000	- 500	
	T2	402.0				1024	43900	+ 1600	
	T3	617.0				679	43100	- 700	
	T4	616.0				690	39500	+ 400	
Le :	T0	437.3		11.66		1026	28700		
Obs : béton séché dans une étude à 60° pendant 3 jours	T1	415.7	)- 88.8 g	10.76	)	979	39500	)	
	T2	381.8	)	9.97	)878.4cm <sup>3</sup>	1053	39400	)- 9.3 %	
	T3	592.4	)- 10.1 %	15.05	)	701	40100	)	
	T4	591.0	)	15.49	)	711	35700	)	
Le :	T0	433.5				1136	24000		
Obs : béton séché dans une étude à 60° pendant 3 jours	T1	409.0	)- 119.1 g			1057	33300	)	
	T2	377.3	)- 13.6 %			1141	33200	)- 22.3 %	
	T3	581.2	)			748	34600	)	
	T4	578.5	)			758	30700	)	

Tableau 3.6. : Variation du module de déformation du béton en fonction de sa distance au parement exposé à la dessiccation

Eprouvette n° 5

E1 #  $5,2 \cdot 10^6 * \frac{m \cdot d^2}{G^2 \cdot e^3}$

Provenance : RD $\phi$

$G^2 \cdot e^3$

		Masse (g)	Diamètre (mm)	em (mm)	$\mu$ (g/cm <sup>3</sup> )	Grindo	E (MPa)	d moy au par.	
Le : 3/4/89	T0	352.8	147.7	8.83		1350	31900	4.4	
Obs : sortie de l'eau	T1	402.4		9.84		1056	43000	17.8	
	T2	423.8		10.28		982	45900	31.8	
	T3	581.8		14.17		726	44000	48.0	
	T4	589.1		14.47		720	42600	66.4	
Le : 3/4/89	T0	352.1		9.18		1352	28200		
Obs : séchées à teinte mate	T1	402.0		9.89		1046	43100		
	T2	423.2		10.45		980	43800		
	T3	581.2		14.31		726	42700		
	T4	588.4		14.49		720	42300		
Le :	T0	353.5				1259	32700	+ 4500	
Obs : béton saturé	T1	402.6				1028	44700	+ 1600	
	T2	424.1				976	44300	+ 500	
	T3	583.2				716	44000	+ 1300	
	T4	590.2				718	42700	+ 400	
Le :	T0	331.9		9.18		1368	26000		
Obs : béton séché dans une étude à 60°C	T1	382.8	)	9.89	)	1056	40300	)	
	T2	403.3	) - 90.8 g	10.45	) 841.9cm <sup>3</sup>	991	40800	)	
	T3	558.6	) - 10.35 %	14.31	)	737	39800	) - 8.7 %	
	T4	564.5	)	14.49	)	730	39500	)	
Le :	T0	329.5				1536	20500		
Obs : béton séché dans une étude à 110° pendant 24 H	T1	378.8	) - 111.9 g			1153	33400		
	T2	398.8	)			1075	34300	21.5 %	
	T3	549.7	) - 13.3 %			791	34000		
	T4	555.6	) 10.3 %			790	33200	10.8 %	

### 3.4.2.1. Présentation des graphes

Estimation du module de déformation du béton par la mesure de la fréquence propre de rondelles débitées dans des échantillons carottés :

- les rondelles ont été découpées dans 5 éprouvettes différentes carottées dans une dalle de 15 cm d'épaisseur, âgée d'environ 1 an
- chacun des 4 graphes représente l'évolution du module de déformation moyen d'une rondelle, en fonction de sa distance moyenne au parement soumis à dessiccation figure 3.7.

#### Graphe I :

Les carottes ont été prélevées, tronçonnées et testées dans le même temps. Le béton est supposé avoir conservé une teneur en eau libre "naturelle".

#### Graphe II :

Les rondelles ont été immergées dans l'eau pendant 3 semaines. Le béton est supposé à sa teneur en eau libre maximale.

#### Graphe III :

Les rondelles ont été (partiellement) séchées en étuve à 60°.

#### Graphe IV :

Les rondelles ont été (totalement) séchées en étuve à 110°.

### 3.4.2.2. Interprétation des résultats

Sur ces graphes  $E$  (GPa) =  $P$  (mm) on remarquera que chacun des états (I, II, III, IV) correspond à des teneurs en eau moyennes mesurées sur toutes les rondelles qui sont respectivement de - 5 %, 0 %, - 10 % et - 14 % par rapport à l'état de saturation.

On peut observer :

1. L'effet de la teneur en eau de l'éprouvette ; le module moyen estimé au fréquencesmètre passe de 43.5 GPa, à saturation, à 33 GPa pour une perte de 14 % d'eau.
2. L'effet de la proximité du parement soumis à dessiccation : dans tous les états (I à IV) de la figure 3.7. on remarque une chute spectaculaire du module de déformation dans les 15 premiers millimètres comptés à partir du parement :
  - sur béton saturé, on a l'enveloppe supérieure  $b$ ,  $b'$ ,  $b''$  et sur béton sec, l'enveloppe inférieure  $a$ ,  $a'$ ,  $a''$ . Dans l'état naturel d'une pièce de béton il semblerait bien que la courbe d'évolution du module à partir du parement soit voisine de  $a$ ,  $a'$  (+),  $b''$  (-) ... soit un module qui varierait du simple au double sur quelques mm

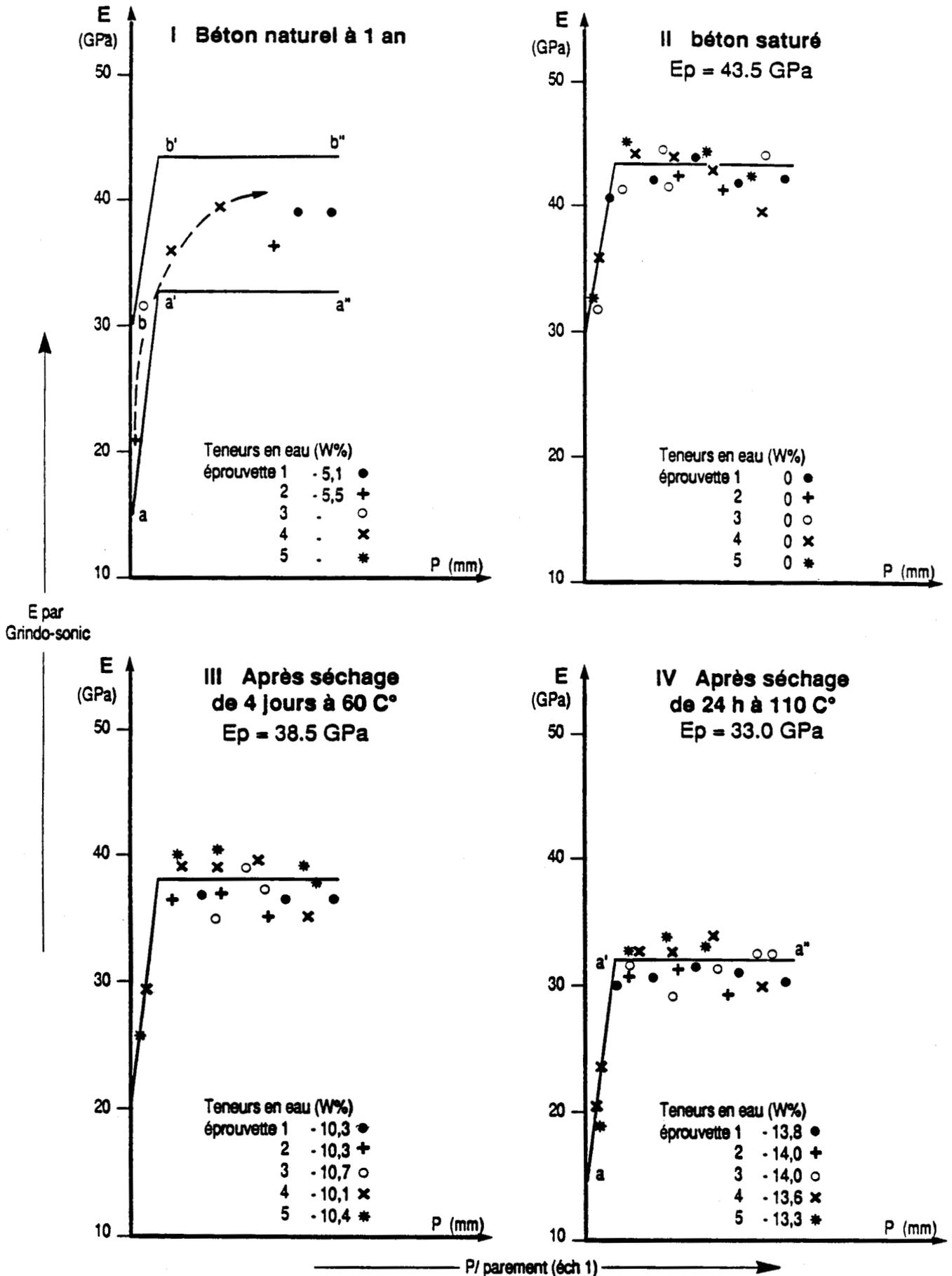


Fig. 3.7. représente l'évolution du module de déformation moyen d'une pièce en béton (épreuve), en fonction de la distance moyenne au parement soumis à dessiccation.

- à proximité du parement pendant la phase du durcissement du béton, l'eau libre a tendance à s'échapper vers l'atmosphère plutôt que de se combiner au ciment. La densité des hydrates de ciment qui détermine la solidité des liaisons inter-granulaires (donc le "module" du matériau) est certainement plus faible dans les premiers mm : il y a probablement déficit des liaisons proches du parement
- enfin après exploitation des résultats d'essais une variation du module d'young a été mise au point, pour un béton de module  $E = 40$  GPa "à coeur".

Soit les valeurs suivantes :

profondeur (mm) :	2	5	10	15	20 au delà de 20 mm
module (GPa) :	20	24	29	34	37 40 GPa

Nous tenterons au paragraphe 3.4.3. ci-après d'évaluer l'incidence de cette variation de module sur les coefficients d'influence.

On peut en effet penser que la prise en compte de cette distribution particulière du module puisse aboutir à des valeurs de contraintes plus réalistes.

### 3.4.3. Résultats de calcul

On donne dans le tableau 3.7. les valeurs des coefficients d'influence  $C_{ij}$  (k) relatifs aux trois files de pions, obtenues sur un béton à module variable par un calcul aux éléments finis.

Notons que notre modèle bidimensionnel est représenté par la figure 3.1. L'évaluation des contraintes est illustrée en Annexe 3.

Tableau 3.7. Matrices des coefficients d'influence Cij (k)  
bidimensionnels, E = variable (files 1, 2 et 3)

i	hmm	k	j:1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	1	0.420										
		2	0.110										
		3	0.060										
2	3	1	1.000	0.850									
		2	0.290	0.260									
		3	0.150	0.140									
3	5	1	1.800	2.100	1.700								
		2	0.570	0.730	0.680								
		3	0.300	0.390	0.380								
4	5	1	2.300	2.900	3.200	1.300							
		2	0.830	1.100	1.500	0.750							
		3	0.450	0.610	0.830	0.440							
5	5	1	2.600	3.300	3.900	2.300	0.900						
		2	1.000	1.400	2.000	1.400	0.670						
		3	0.570	0.800	1.100	0.860	0.420						
6	10	1	3.100	4.000	5.200	3.600	2.400	2.200					
		2	1.400	2.000	3.000	2.500	2.000	1.900					
		3	0.850	1.200	1.800	1.600	1.3000	1.400					
7	10	1	3.400	4.500	5.900	4.300	3.200	4.200	1.700				
		2	1.700	2.400	3.700	3.200	2.700	3.800	1.600				
		3	1.100	1.500	2.400	2.100	1.900	2.900	1.300				
8	10	1	3.600	4.700	6.300	4.700	3.600	5.200	3.100	1.300			
		2	1.900	2.700	4.100	3.600	3.100	4.800	3.100	1.300			
		3	1.200	1.800	2.800	2.500	2.300	3.800	2.600	1.200			
9	10	1	3.700	4.900	6.600	5.000	3.900	5.800	3.800	2.400	1.000		
		2	2.000	2.900	4.400	3.900	3.400	5.400	3.800	2.500	1.000		
		3	1.300	1.900	3.000	2.800	2.600	4.400	3.300	2.300	1.000		
10	10	1	3.700	5.000	6.800	5.200	4.100	6.200	4.300	3.000	1.900	0.820	
		2	2.100	3.000	4.600	4.100	3.600	5.900	4.300	3.000	2.000	0.840	
		3	1.400	2.000	3.200	3.000	2.800	4.800	3.800	2.800	1.900	0.840	
11	10	1	3.800	5.100	6.900	5.300	4.300	6.500	4.600	3.300	2.300	1.500	0.650
		2	2.100	3.100	4.700	4.300	3.800	6.200	4.600	3.400	2.400	1.600	0.670
		3	1.500	2.100	3.400	3.100	2.900	5.100	4.100	3.200	2.300	1.600	0.680

### 3.5. Remarques et conclusions

La simulation d'un essai de "Libération des contraintes" par un calcul aux éléments finis, nous a permis :

- de confirmer les ordres de grandeur des déplacements obtenus lors des essais, ainsi :  
10 MPa libérés par une entaille de 80 mm provoquent un déplacement de 75  $\mu\text{m}$  sur B<sub>1</sub>  
10 MPa libérés par une entaille de 20 mm provoquent un déplacement de 21  $\mu\text{m}$  sur B<sub>1</sub>
- de noter la faible sensibilité des déplacements à l'ouverture d'entailles peu profondes, ainsi :  
10 MPa libérés par une entaille de 5 mm donne un déplacement de 3  $\mu\text{m}$  seulement. De même on constate une faible sensibilité des déplacements à la libération des contraintes en profondeur. En effet 10 MPa libérés sur la 11ème tranche d'une entaille de 80 mm donnent un déplacement de l'ordre de 1.2  $\mu\text{m}$
- de montrer que la méthode directe par utilisation de la matrice inverse est inapplicable du fait des problèmes de sensibilité cités ci-avant : on a abouti à un vecteur de contraintes tout à fait incohérent dans tous les cas.

Enfin, même si l'hypothèse du module variable est réaliste, elle n'affecte cependant que très peu le tableau des coefficients d'influence : de fait, on ne constate qu'une redistribution très faible des coefficients d'une même ligne. L'estimation des contraintes initiales nécessite par conséquent une autre méthode qui sera développée au chapitre IV.

## **QUATRIEME PARTIE**

### **4. MISE AU POINT D'UNE METHODE D'EXPLOITATION DES RESULTATS**

#### **4.1. Présentation de la méthode**

Le processus dans le détail

#### **4.2. Exemple d'utilisation de la méthode**

4.2.1. Principes de la méthode d'adéquation

4.2.2. Déroulement du programme

4.2.3. Application de la méthode

#### **4.3. Possibilités et limites de la méthode**

4.3.1. Convergence du paramètre C

4.3.2. Précision et effets relatifs de quelques paramètres

#### **4.4. Remarques et conclusions**

#### 4. MISE AU POINT D'UNE METHODE D'EXPLOITATION DES RESULTATS

On a pu montrer au chapitre précédent que la méthode directe par inversion de la matrice de compliance est inapplicable, parce que cette méthode se trouve confrontée au problème de la faible sensibilité des déplacements à la libération des contraintes en profondeur. De plus, si on admet les hypothèses suivantes (confirmées par P. Acker) : 1988

- la distribution des teneurs en eau libre dans un béton d'un âge donné est d'allure exponentielle (figure 4.1.)
- les potentialités de retrait sont proportionnelles à la perte en eau libre
- les autocontraintes sont proportionnelles au retrait gêné.

Alors, on peut en déduire que la distribution des contraintes dans les premiers centimètres de l'épaisseur d'une pièce en béton est de la forme :

$$\sigma = A - B * \exp(-C * Z)$$

Ce sont ces considérations qui ont motivé notre méthode d'exploitation.

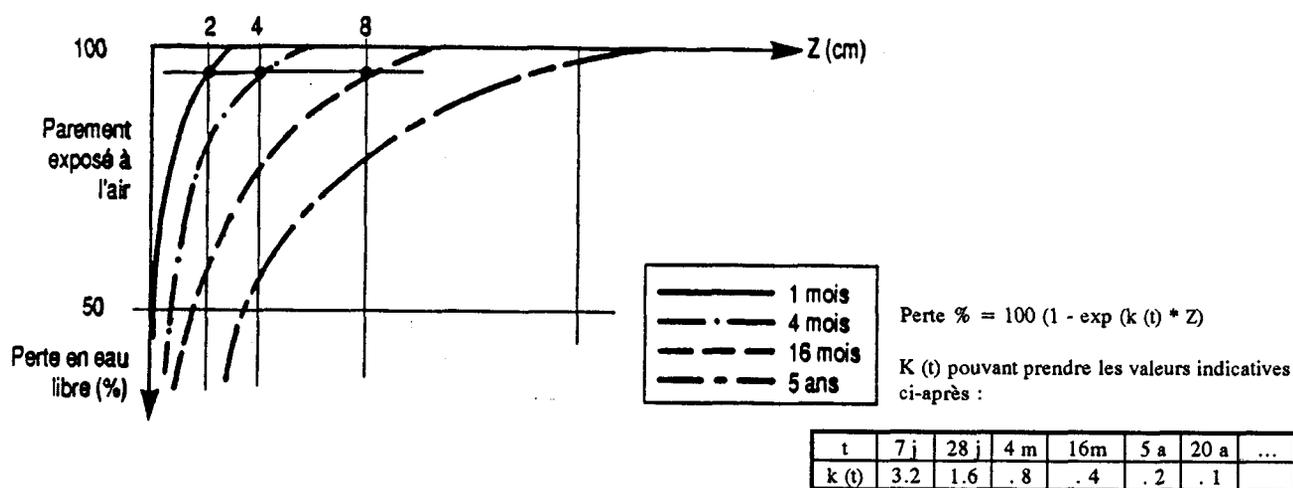


Fig. 4.1. Courbes de dessiccation d'un béton exposé à l'air

- à une profondeur donnée, l'évolution de la teneur en eau est une fonction "puissance" du temps, ce qui implique, en particulier que :

\* L'on retrouve un état de dessiccation à une profondeur double (\* 2) au bout d'un temps quadruple (\* 2<sup>2</sup>)

\* De même, il faut un temps quadruple pour que "le front de dessiccation" atteigne une profondeur double. Ainsi ce front, caractérisé par le fait que la perte en eau est inférieure à 1 %, atteint respectivement des profondeurs de 3 cm à 1 mois, 6 cm à 4 mois, 12 cm à 16 mois, etc...

En extrapolant cette loi, on pourrait en déduire que la perte en eau d'une structure en béton est quasiment nulle à des profondeurs supérieures à 50 cm et ce, jusqu'à un âge avancé (80 ans dans notre exemple, donc supérieur à la durée de vie théorique d'un ouvrage).

Les coefficients  $K(t)$  de l'exponentielle sont ici donnés à titre indicatif : ils sont susceptibles de varier de - 50 à + 100 %. Ils dépendent de fait beaucoup de la porosité du béton, de sa formule, des conditions de son mûrissement et de sa conservation, etc...

Il faut cependant souligner les coefficients "attendus" dans les deux cas suivants, pour une profondeur  $Z$  exprimée en centimètres :

- dalles de nos expérimentations (âgées de 4 mois) : 0.8 probable, fourchette attendue 0.4 - 1.6
- béton d'ouvrage ancien (pont Vauban par exemple) de 20 ans d'âge ou plus : autour d'une valeur de 0.1, tant que les fronts de dessiccation des parements opposés ne se rejoignent pas.

#### 4.1. Présentation de la méthode

L'exploitation des résultats est réalisée de manière indépendante pour chaque base de mesure. Elle fait appel aux coefficients d'influence déterminés au chapitre 3. Ces coefficients sont regroupés en trois matrices "de compliance" relatives à chacune des trois bases de mesure.

La procédure d'exploitation, répétée pour chaque base de mesure, est alors la suivante :

- . Pondération, ligne à ligne, des coefficients théoriques de la matrice, par les coefficients de raideur mesurés. A défaut de valeur mesurée pour les profondeurs de 2 à 15 mm (les vérins de cette hauteur n'existent pas), c'est la raideur (relative) de l'entaille de 20 mm qui est considérée
- . Recherche d'une distribution de contraintes qui fournisse, par multiplication avec la matrice de compliance pondérée, le "vecteur-colonne déplacement" le plus proche de celui effectivement mesuré. Cette opération consiste en pratique à choisir la forme générale de la distribution, d'équation  $\sigma = A - B * \exp(-C * Z)$ , et à rechercher les coefficients  $A$ ,  $B$  et  $C$  de manière à minimiser la distance entre les vecteurs déplacements théoriques et réels, par une méthode classique des moindres carrés.

Cette méthode converge assez correctement et rapidement lorsque les mesures ne sont pas trop imprécises et que l'entaillage a été mené jusqu'à une profondeur suffisante.

L'adéquation numérique, assez longue, est bien entendu réalisée sur micro-ordinateur. Enfin le programme permet l'étude de distributions particulières. Ainsi, la présence d'une fissure de peau peut être simulée par un forçage des contraintes à zéro sur l'épaisseur voulue. De même, un gradient de module éventuel (voir chapitre 3 "gradient de qualité") peut être pris en compte facilement par le programme. Un exemple de ce type de résolution en sera donné dans ce chapitre (RS $\phi$ ).

#### Le processus dans le détail

On suppose donc que la distribution générale des contraintes dans le béton est de la forme :

$$\sigma (Z) = A - B * \exp (- C * Z)$$

Avec  $\sigma$  = contrainte en (MPa)  
 $Z$  = profondeur en (mm)  
 $A, B$  = paramètres à rechercher en (MPa)  
 $C$  (sans unité), correspond au coefficient  $k (t)$  donné dans le tableau de la figure 4.1.

-  $A$  est une valeur limite correspondant à la contrainte maximale dans la dalle (contrainte pour  $Z$  supérieure à la profondeur du front de dessiccation, soit, dans les cas courants à mi-épaisseur de la pièce testée).

La droite  $y = A$  est asymptote à la courbe  $y = \sigma (Z)$

-  $B$  correspond à l'effet maximum de retrait

-  $C$  traduit le gradient de contrainte lié à l'âge du béton. Plus le béton est jeune, plus  $C$  est grand.  $C$  définit aussi l'allure générale de la courbe. Inversement, plus  $C$  est petit, plus la courbe  $y = \sigma (Z)$  se rapproche d'une droite.

Le choix de la formule des contraintes en fonction de la profondeur, permet de définir le vecteur colonne des contraintes moyennes dans chaque tranche, d'où le vecteur colonne des déplacements  $Dep_2$  (en multipliant la matrice pondérée par ce vecteur de contraintes).

Il s'agit alors de minimiser, par tâtonnements successifs, la différence entre les deux vecteurs  $Dep_1$  (pris ici comme référence) et  $Dep_2$  (calculé par la méthode décrite dans ce paragraphe). Le vecteur de contrainte recherché sera donc celui correspondant à un vecteur  $Dep_2$  dont la différence avec  $Dep_1$  sera minimale.

On a  $Dep_1$  et on cherche  $Cont_2$  tel que :  $Mat_1 \times Cont_2 = Dep_2$  et  $Dep_1 - Dep_2 \approx 0$ . Pour passer du vecteur de contrainte à la contrainte moyenne dans la dalle, il suffit de multiplier chacun de ces coefficients par la valeur de sa tranche, d'en faire la somme et de diviser ce résultat par la valeur du rayon moyen.

#### 4.2. Exemple d'utilisation de la méthode

L'exploitation des différents paramètres A, B, C à faire varier, implique de longues séries de calculs de toutes sortes (en particulier matriciels), qui sont réalisés par l'utilisation d'un tableur programmable.

- organisation du tableur :

Le tableau "Libco 80", conçu pour les entailles d'une profondeur de 80 mm, gère les trois bases pour lesquelles on retrouve :

- . la matrice des coefficients
- . la matrice pondérée
- . la matrice pondérée inversée
- . le tableau partiel 4.1. présente tous les renseignements concernant l'entaille et mentionne en particulier la valeur de la contrainte générale obtenue.

Notons que les raideurs ainsi que le vecteur  $\overrightarrow{DEP}_1$  sont ici les données du problème.  $C_{moy}$  est calculée à partir du rayon moyen de la pièce testée (ici 75 mm), et la "distance" par la formule  $d = \frac{80}{\sum_{20} \text{Deltadep}^2}^{1/2}$

paramètres	Raideurs ( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )	Cont $\Leftarrow$ Dep	RD1-NR-90° Base 2 Deltadep	Dep $\Leftarrow$ Cont	PP Corrigée			
1	A = 65.5	-911.1	-0.3	0.3	30.0			
2	B = 38.0	404.3	-0.1	0.2	35.7			
3	C = 0.7	-690.7	0.4	0.6	42.9			
4		489.8	2.2	0.3	49.6			
5	V20	9.0	-86.0	5.2	-0.7	4.5	54.3	48.8
6	V30	23.9	19.5	11.7	0.5	12.2	58.8	43.5
7	V40	40.4	133.8	20.6	0.1	20.7	62.2	47.4
8	V50	54.8	3.9	28.1	0.1	28.2	63.8	49.2
9	V60	71.3	98.7	37.7	-0.1	37.6	64.7	51.0
10	V70	87.3	107.9	47.6	-0.7	46.9	65.1	52.8
11	V80	105.0	-171.5	56.7	0.5	57.2	65.1	52.4
		Deltadep :	moyenne distance	-0.05 1.31	Rmoy 75.0	Cmoy 58.3 bars		

Diagram annotations:

- vecteur  $\overrightarrow{DEP}_1$  (points to Raideurs)
- vecteur  $\overrightarrow{CONT}_1$  (points to Cont  $\Leftarrow$  Dep)
- vecteur  $\overrightarrow{DEP}_2$  (points to Deltadep)
- vecteur  $\overrightarrow{CONT}_2$  (points to Dep  $\Leftarrow$  Cont)
- pression rétablir corrigée (points to PP Corrigée)
- nom de l'entaille (points to V20-V80)
- n° de la base extensométrique (points to V20-V80)
- raideurs (points to Raideurs)
- différence entre  $\overrightarrow{DEP}_1$  et  $\overrightarrow{DEP}_2$  (points to Deltadep)
- contrainte moyenne dans la dalle (points to Cmoy)

Tableau 4.1. Exploitation automatique des mesures. RD1.NR.90° Base 2

#### 4.2.1. Principes de la méthode d'adéquation

##### - 1er type d'optimisation

On entend par optimisation le fait de minimiser la distance  $d$ . En effet une valeur faible de distance est synonyme d'une bonne adéquation des vecteurs  $DEP_1$  et  $DEP_2$ , ce qui implique a priori une valeur plus juste de la contrainte moyenne. Dans un premier temps, cette optimisation s'est faite par tâtonnements hasardeux. En effet il s'agissait de fixer A et B à des valeurs plus ou moins quelconques, de faire varier C jusqu'à tomber dans un minimum de distance ; puis fixant C, on optimisait A, puis B, puis si nécessaire on revenait sur A et C. Cette méthode, bien que grossière, portait déjà ses fruits en donnant des contraintes "relativement" proches de celles attendues. Cela dit, le pourcentage d'erreur sur les résultats restait quand même trop élevé.

##### - 2ème type d'optimisation

On procède à une nouvelle optimisation d'une entaille, de la même façon que nous le faisons auparavant, mais en modifiant les valeurs A et B de départ, le résultat obtenu pour la distance était meilleur. Cela prouvait qu'il ne fallait pas se fier au premier minimum trouvé car il pouvait n'être que local et non absolu. Il fallait donc optimiser l'entaille pour plusieurs valeurs de C (fixant C, il ne reste plus qu'à faire varier A et B). En partant d'une petite valeur de C et en l'incrémentant par pas successifs, on obtenait en fin de compte, une multitude d'opérations. Il suffisait alors de suivre la variation de la distance en fonction de C pour déterminer celle qui correspondait à un  $d$  minimum. Une fois choisie, il ne restait plus qu'à optimiser de nouveau en utilisant des pas d'incrémentation plus fins. Cette méthode assez efficace (il se pouvait malgré tout que l'on passe au dessus d'autres points minimum à cause du pas d'incrémentation trop grand, par exemple) était cependant laborieux. Ainsi, l'optimisation "manuelle" complète d'une entaille aurait demandé au moins 3 heures.

##### - Automatisation des calculs

Devant cette situation, il était nécessaire d'automatiser l'optimisation. Le tableau de "SMART" permet l'édition de "Fichiers projets" qui sont en fait, de véritables programmes écrits dans un langage propre au logiciel.

#### 4.2.2. Déroulement du programme

On définit tout d'abord les bornes inférieures et supérieures des paramètres ainsi que la valeur du "grand" pas d'incrémentation (recherche rapide) et du pas "fin" (recherche approfondie).

On commence à optimiser à partir de valeurs A, B, C très petites. L'ordinateur entame alors une procédure de calculs (calcul de  $CONT_2$ ,  $DEP_2$ , Delta DEP, C moy et distance) qu'il exécutera à chaque fois qu'un paramètre change. Il incrémente ensuite B du "grand" pas, dans un premier temps, refait les calculs et obtient donc à nouveau une valeur de distance. Tant que celle-ci diminue il continue de la sorte. Dès qu'elle réaugmente, l'ordinateur replace B un pas en arrière (là où d est au minimum actuel).

A ce moment, il commute de pas (pas "fin") et suivant les valeurs de distances obtenues et stockées précédemment, il détermine le sens d'incrementation (positif ou négatif) du pas "fin". L'optimisation continue alors avec ce nouveau pas jusqu'à ce qu'il détermine la valeur minimale de distance (les valeurs de A et de C n'ont toujours pas changé à ce moment là).

Ensuite, il incrémente A du "grand" pas et recommence toute la procédure sur le paramètre B. Lorsqu'au moins trois valeurs de A ont été exécutées, l'ordinateur est en mesure de faire des comparaisons entre elles afin de définir au changement de pas sur A le sens d'incrementation. Lorsque A et B sont optimisés définitivement, il reste à incrémenter de la même façon C et ré-entamer une procédure complète d'optimisation de A et B avec la nouvelle valeur de C. Lorsque trois valeurs de C auront été traitées et que l'ordinateur trouvera un minimum de distance pour C, il sera là aussi capable, en changeant de pas, de décider du sens d'incrementation. Lorsque les paramètres C, A et B donnant la plus petite distance sont trouvés, une sortie du tableau sur imprimante est automatiquement déclenchée. La méthode est actuellement bien rodée. Il nous faut environ 5 minutes pour obtenir la contrainte moyenne d'une dalle pour une base extensométrique donnée, d'où un gain de temps considérable.

On représente en annexe 4 le listing du Fichier Projet LC 80 F1 que nous avons conçu dans le cadre de cette étude.

#### 4.2.3. Application de la méthode

Après avoir mis au point cette méthode d'adéquation numérique, nous l'avons appliquée aux 28 entailles réalisées lors de notre programme expérimental. On donne ci-après quelques exemples de résultats obtenus sur les dalles RD1, RS1 et RS0. Les autres résultats sont donnés en (annexe 5).

Les résultats sont présentés dans les tableaux 4 (2, 3, 4, 5). Ce sont les tableaux finaux sur lesquels le programme d'exploitation automatique a convergé. Les coefficients A, B et C de l'équation théorique des contraintes,  $\sigma = A - B * \exp(-C * \vartheta)$  figurent en haut à gauche de chaque tableau. Ils ont été optimisés de manière à rendre minimale la distance d ( $\mu\text{m}$ ). Il faut souligner que, pour chacun des tableaux, l'écart "deltadep" entre déplacements mesurés et calculés reste très faible, le plus souvent inférieur à  $1 \mu\text{m}$ .

Tableau 4.2. Exploitation automatique des résultats de mesure de la dallette RD1.NR.90° Base 1 (béton fissuré)

RD1 NR 90°								
Bidim ( 15 - 80 )	E=Cte	Raideurs ( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )	Cont <== Dep	Base 1 Deltadep	Dep <== Cont	PR Corrigée		
1	A =	70.0	-207.9	-0.5	0.5	0.0	0.0	
2	B =	118.5	77.1	-2.4	2.4	0.0	-3.1	
3	C =	1.4	74.7	-1.7	2.4	0.7	27.7	
4			139.6	1.7	0.4	2.1	49.0	
5	V20	16.7	-19.8	4.0	-0.1	3.9	59.6	18.7
6	V30	36.4	38.5	11.0	0.3	11.3	66.1	25.0
7	V40	53.4	144.8	18.8	-0.1	18.7	69.0	31.3
8	V50	64.4	-59.3	24.8	-0.2	24.6	69.8	36.1
9	V60	79.5	468.6	33.0	-0.2	32.8	69.9	38.8
10	V70	91.6	-472.2	41.2	-0.9	40.3	70.0	42.4
11	V80	112.5	283.7	51.2	1.0	52.2	70.0	43.2
			Deltadep	> moyenne	-0.03	Rmoy	Cmoy	
				> distance	1.43	75.0	5.96 Mpa	

Rappelons que la dallette RD1 était sous précontrainte contrôlée de 6 MPa. La contrainte moyenne trouvée est de 5.96 MPa, la distance "d" est de 1.43  $\mu\text{m}$ . Notons que dans ce cas le béton est supposé fissuré jusqu'à 2 mm de profondeur et que les valeurs de déplacement du vecteur Dep<sub>1</sub> sont pris en compte dans le calcul, à partir d'une entaille de 15 mm de profondeur.

Tableau 4.3. Exploitation automatique des résultats de mesure de la dallette RD1.NR.90° Base 1 (béton non fissuré)

RD1 NR 90°								
Bidim ( 15 - 80 )	E=Cte	Raideurs ( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )	Cont <== Dep	Base 1 Deltadep	Dep <== Cont	PR Corrigée		
1	A =	70.0	-207.9	-0.5	0.4	-0.1	-21.6	
2	B =	105.0	77.1	-2.4	2.1	-0.3	5.2	
3	C =	1.4	74.7	-1.7	2.1	0.4	32.5	
4			139.6	1.7	0.2	1.9	51.4	
5	V20	16.7	-19.8	4.0	-0.3	3.7	60.8	18.7
6	V30	36.4	38.5	11.0	0.3	11.3	66.6	25.0
7	V40	53.4	144.8	18.8	0.0	18.8	69.2	31.3
8	V50	64.4	-59.3	24.8	0.0	24.8	69.8	36.1
9	V60	79.5	468.6	33.0	-0.4	32.6	69.9	38.8
10	V70	91.6	-472.2	41.2	-1.0	40.2	70.0	42.4
11	V80	112.5	283.7	51.2	0.9	52.1	70.0	43.2
			Deltadep	> moyenne	-0.06	Rmoy	Cmoy	
				> distance	1.48	75.0	6.00 Mpa	

Le tableau 4.3. donne la valeur de la contrainte moyenne recherchée qui est effectivement de 6 MPa : ce résultat correspond bien à la valeur de la précontrainte appliquée. C'est quasiment le même lorsque le parement du béton est supposé non fissuré. Ces deux exemples sont donnés afin de montrer l'incidence faible de la fissuration de peau sur la valeur de la contrainte moyenne recherchée. Enfin pour mieux élucider cet effet on représente en figure 4.2. les valeurs des contraintes moyennes au niveau de chaque tranche en fonction de la profondeur d'entaille dans les deux cas où le béton est fissuré ou non. Il faut souligner que l'évolution de la distribution des contraintes est pratiquement identique à coeur, en revanche elle diffère de quelques MPa sur les premiers millimètres. Cependant l'influence de la fissuration de peau a peu d'effet sur la contrainte globale.

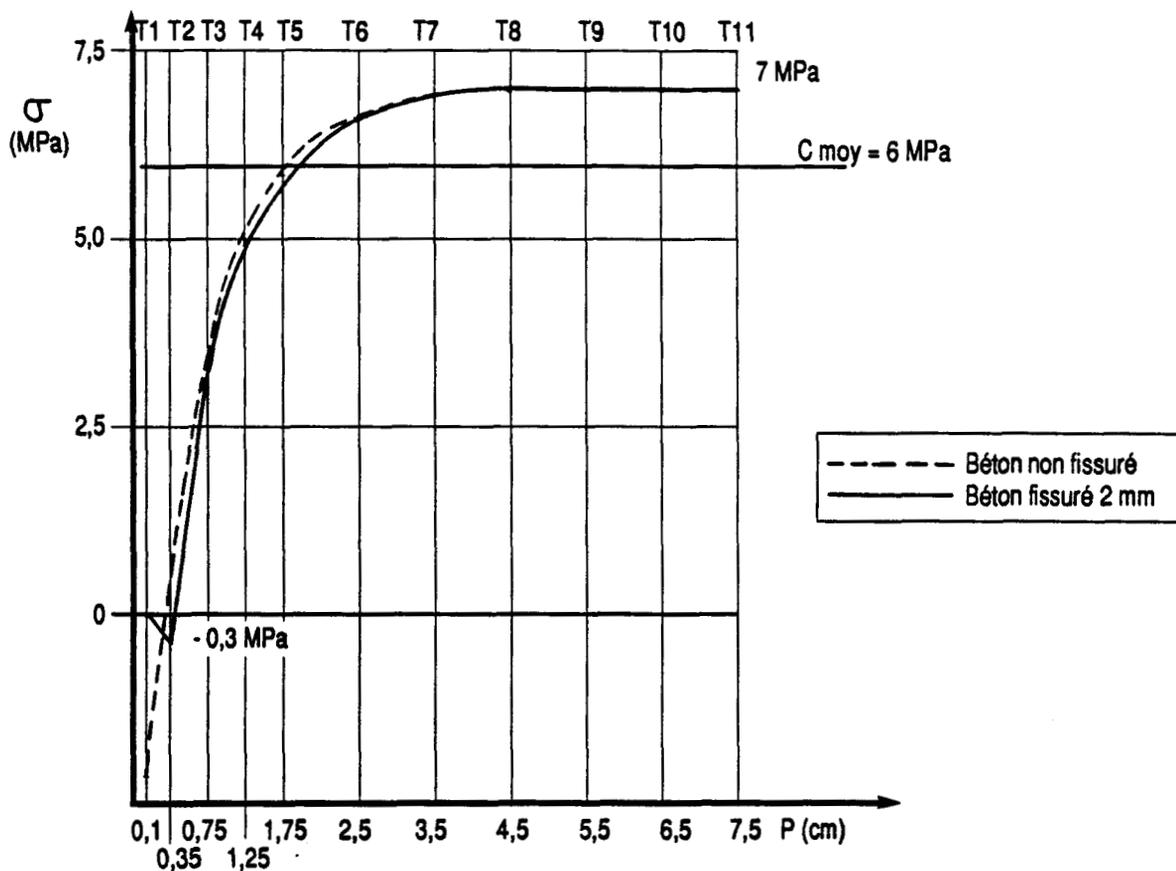


Fig. 4.2. Dalle RD1 (Précontrainte 6 MPa)  
Evolution de la distribution des contraintes moyennes d'un béton supposé fissuré ou pas en fonction de la profondeur d'entaille

RSO NR 90°								
Bidim	E=Cte	Raideurs	Cont <==	Dep	Base 1	Dep <==	Cont	PR
( 20 - 80 )		( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )			Deltadep			Corrigée
1	A =	15.5	-645.9	-2.4	2.4	0.0	0.0	
2	B =	68.0	726.3	-2.4	2.4	0.0	0.0	
3	C =	0.5	-366.9	-4.6	3.2	-1.4	-31.4	
4			217.0	-5.5	2.5	-3.0	-31.0	
5	V20	25.8	16.0	-4.3	-0.1	-4.4	-12.9	-13.0
6	V30	43.6	-49.2	-7.0	0.0	-7.0	-4.2	-13.3
7	V40	60.5	-74.4	-8.3	0.2	-8.1	3.6	-12.2
8	V50	75.7	116.0	-9.2	0.4	-8.8	8.3	-11.4
9	V60	92.4	840.5	-8.4	-0.8	-9.2	11.1	-8.5
10	V70	105.5	*****	-9.2	0.2	-9.0	12.8	-8.2
11	V80	129.0	1 596.8	-9.4	0.0	-9.4	12.8	-6.9
		Deltadep		> moyenne	-0.02	Rmoy	Cmoy	
				> distance	0.96	75.0	0.1 Mpa	

Tableau 4.4. Exploitation automatique des résultats de mesures de la dalle RSO (non chargée) de la base 1 pour un béton non fissuré.

RSO NR 90°								
Bidim	E=Cte	Raideurs	Cont <==	Dep	Base 1	Dep <==	Cont	PR
( 20 - 80 )		( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )			Deltadep			Corrigée
1	A =	50.0	-645.9	-2.4	2.3	-0.1	-18.3	
2	B =	69.0	726.3	-2.4	1.6	-0.8	-16.6	
3	C =	0.1	-366.9	-4.6	1.9	-2.7	-14.0	
4			217.0	-5.5	1.6	-3.9	-10.9	
5	V20	25.8	16.0	-4.3	-0.6	-4.9	-7.9	-13.0
6	V30	43.6	-49.2	-7.0	-0.1	-7.1	-3.8	-13.3
7	V40	60.5	-74.4	-8.3	0.1	-8.2	1.4	-12.2
8	V50	75.7	116.0	-9.2	0.7	-8.5	6.0	-11.4
9	V60	92.4	840.5	-8.4	-0.9	-9.3	10.2	-8.5
10	V70	105.5	*****	-9.2	0.2	-9.0	14.0	-8.2
11	V80	129.0	1 596.8	-9.4	0.2	-9.2	14.0	-6.9
		Deltadep		> moyenne	-0.04	Rmoy	Cmoy	
				> distance	1.31	75.0	0.1 Mpa	

Tableau 4.5. Exploitation automatique des résultats de mesures de la dalle RSO de la Base 1 pour un béton fissuré sur 5 mm de profondeur.

RSO NR 90°								
Bidlm	E=Var	Raideurs	Cont <== Dep	Base 1	Dep <== Cont	PR		
( 20 - 80 )		( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )		Deltadep		Corrigée		
1	A =	69.5	-640.6	-2.4	2.4	0.0	-13.0	
2	B =	96.5	731.8	-2.4	1.8	-0.6	-14.2	
3	C =	0.1	-378.8	-4.6	2.3	-2.3	-14.5	
4			234.2	-5.5	2.0	-3.5	-13.3	
5	V20	25.8	14.4	-4.3	-0.3	-4.6	-10.7	-12.9
6	V30	43.6	-57.9	-7.0	0.1	-6.9	-5.7	-13.2
7	V40	60.5	-76.7	-8.3	0.1	-8.2	1.5	-12.1
8	V50	75.7	134.6	-9.2	0.5	-8.7	7.9	-11.4
9	V60	92.4	967.7	-8.4	-1.0	-9.4	13.8	-8.5
10	V70	105.5	*****	-9.2	0.1	-9.1	19.1	-8.2
11	V80	129.0	1 893.6	-9.4	0.2	-9.2	19.1	-6.9
		Deltadep	> moyenne	-0.05	Rmoy	Cmoy		
			> distance	1.19	75.0	0.3 Mpa		

Tableau 4.6. Exploitation automatique des résultats de mesures obtenus sur la dalle RSO, de la Base 1 pour un béton, à module d'Young variable, et non fissuré.

L'exploitation des mesures de la dalle RSO a pu mettre en évidence les résultats suivants :

- pour un béton fissuré ou pas la valeur de la contrainte moyenne converge bien vers un résultat correspondant à la contrainte recherchée car dans ce cas elle avoisine 0.1 MPa
- de même pour un béton à module variable, les résultats obtenus sont satisfaisants.

On représente sur la figure 4.3. l'allure de la distribution des contraintes moyennes en fonction de la profondeur d'entaille suivant les trois cas des tableaux ci-avant.

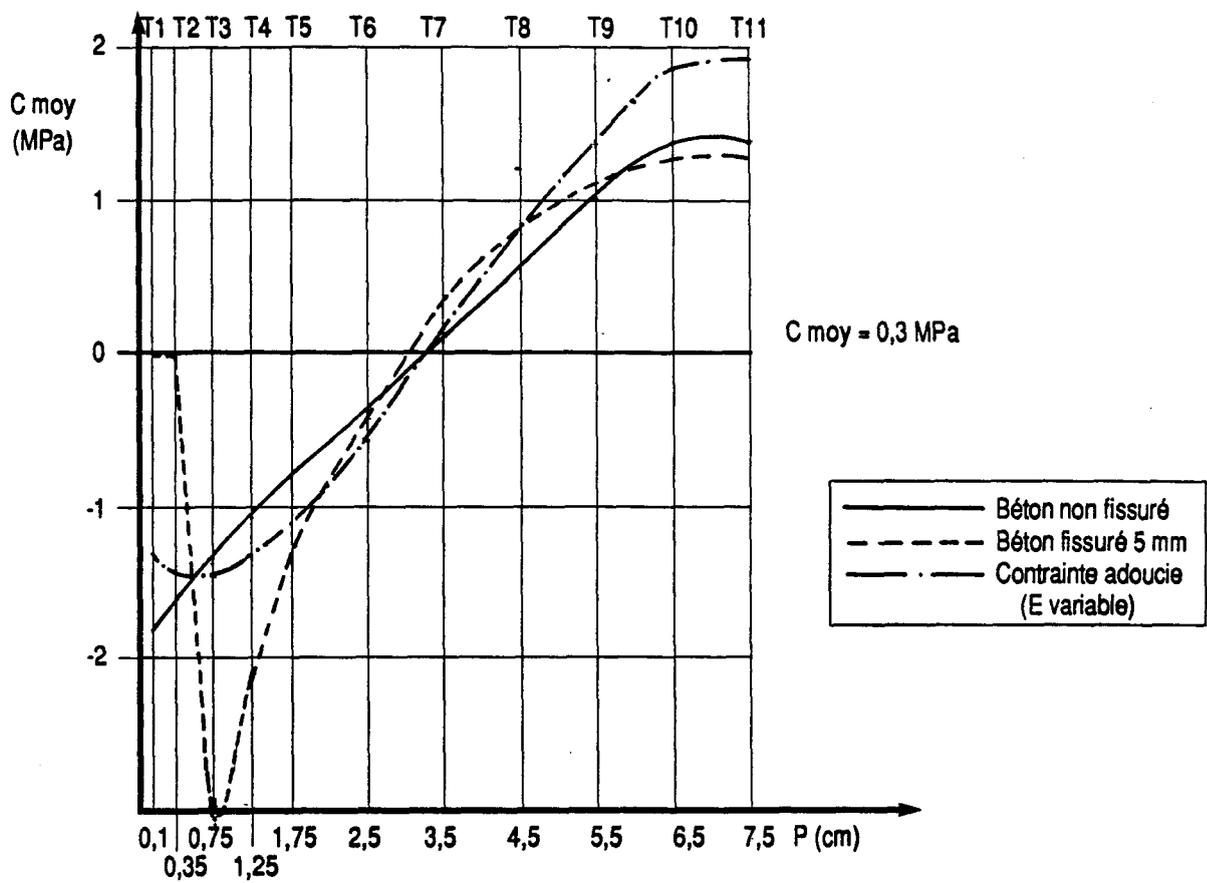


Fig. 4.3. Dallette RS0 (non précontrainte)  
Evolution de la distribution des contraintes moyennes en fonction de la profondeur, et selon l'option de fissuration choisie.

Commentaires :

L'exploitation des résultats de mesures obtenus sur la dallette RS0, a permis de tester, d'une part l'incidence de la fissuration qui affecte les premiers millimètres du parement et d'autre part l'hypothèse de l'adoucissement des contraintes ("gradient de qualité",  $E = \text{variable}$ ), sur la valeur de la contrainte absolue recherchée. La représentation graphique de la distribution des contraintes moyennes au niveau de chaque tranche en fonction de la profondeur d'entaille suivant les trois cas des tableaux 4 (4, 5, 6) représentée sur la figure 4.3 suscite les remarques suivantes :

. béton non fissuré

La valeur de la contrainte recherchée est de 0.1 MPa pour une distance " $d$ " = 1.31. Par ailleurs la valeur du paramètre  $C = 0.1$

. béton fissuré sur 5 mm

Dans ce cas de figure la valeur de la contrainte recherchée est de 0.07 MPa. Elle correspond bien à un chargement nul, de plus la valeur de la distance "d" = 0.96 est faible, avec un paramètre C = 0.5

. béton à module variable

En faisant varier le module d'élasticité du béton, la contrainte moyenne trouvée est de 0.3 MPa pour une distance "d" = 1.19 et un paramètre C = 0.1.

Il faut souligner que si l'allure des distributions de contraintes suivant ces trois cas est différente sur les premiers millimètres, en revanche elle est pratiquement identique en profondeur et aboutit à des valeurs de contraintes moyennes qui avoisinent 0.1 MPa. L'option la plus probable qu'il faut retenir et qui correspond bien à ce que la théorie nous enseigne, c'est le cas où on a supposé que le béton était fissuré sur 5 mm avec un module d'élasticité constant. En effet la distance "d" est très petite avec un paramètre C = 0.5 qui correspond bien à l'âge de la dalle, voisin de 4 mois.

Le tableau 4.7. concerne l'exploitation des résultats obtenus sur la dalle RS1. Il va nous permettre d'aborder la corrélation entre pression de rétablissement dans les vérins et contraintes moyennes au milieu de chaque tranche.

RS1. 90°								
Bidm	E=Cte	Raideurs	Cont <= Dep	Base 1	Dep <= Cont	PR		
( 20 - 80 )		( $\mu\text{m}/100\text{b}$ )		Deltadep		Corrigée		
1	A =	95.0	-25.3	-0.1	0.2	0.1	24.5	
2	B =	46.5	134.0	2.0	-0.8	1.2	30.1	
3	C =	0.1	-77.5	3.9	1.4	5.3	37.6	
4			76.6	5.5	3.2	8.7	45.9	
5	V20	27.4	328.9	13.4	-1.3	12.1	51.8	38.3
6	V30	43.8	-167.6	19.4	0.7	20.1	58.8	36.7
7	V40	60.5	215.2	26.9	0.9	27.8	62.2	39.5
8	V50	75.4	38.5	35.0	-0.2	34.8	65.3	43.6
9	V60	92.2	123.2	44.2	-0.5	44.3	68.2	45.5
10	V70	101.8	-18.3	51.9	-1.4	50.5	70.7	48.1
11	V80	125.4	-47.8	63.2	0.8	64.0	70.7	47.9
			Deltadep	> moyenne	-0.12	Rmoy	Cmoy	
				> distance	2.41	75.0	5.89 Mpa	

Tableau 4.7. Exploitation automatique des résultats de mesures obtenus sur la dalle RS1 précontrainte de 6 MPa de la base 1.

En effet, si la valeur de la contrainte moyenne globale correspond bien à la contrainte recherchée, on peut être frappé d'observer le large écart séparant les graphes représentant, d'une part, la distribution des contraintes moyennes au milieu de chaque tranche et d'autre part, l'évolution des pressions de rétablissement appliquées au centre de gravité des vérins de compensation Figure (4.4.) : il n'y a certes pas lieu de confondre contrainte locale et pression de rétablissement.

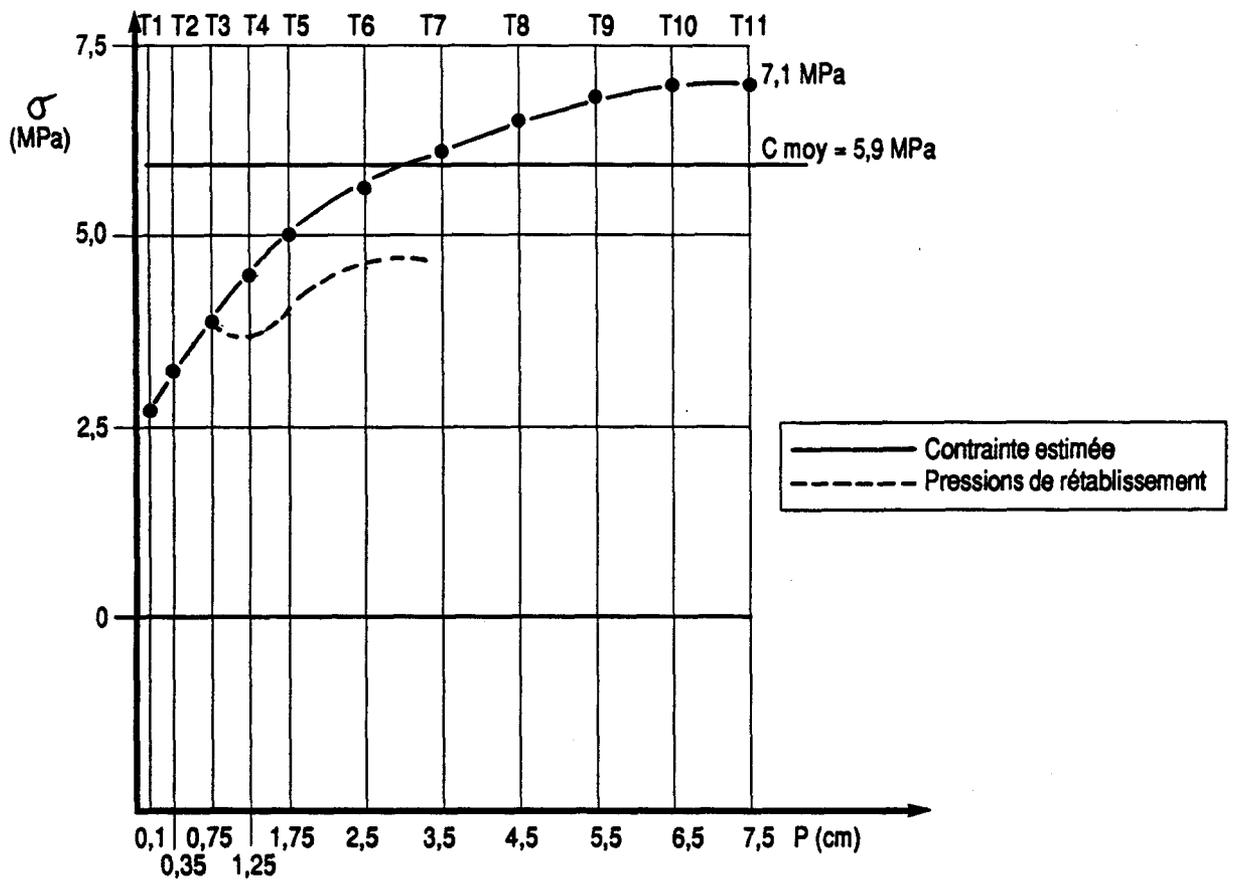


Figure 4.4. Dalle RS1 (Précontrainte 6 MPa)  
Diagramme des contraintes moyennes et pressions de rétablissement en fonction de la profondeur d'entaille de la Base 1.

### 4.3. Possibilités et limites de la méthode

Afin de mieux cerner notre méthode, plusieurs études ont été menées pour essayer de connaître le degré d'influence de certains paramètres sur la contrainte moyenne.

#### 4.3.1. Convergence du paramètre C

Il peut arriver que le paramètre C dans l'équation  $\sigma = A - B * \exp(-C * Z)$ , ne puisse se stabiliser sur une valeur réaliste (c'est-à-dire voisine de celle, purement théorique, qui dépend de l'âge du béton), mais se mette au contraire à tendre vers zéro. Ceci veut dire que la courbe  $y = \sigma(Z)$  se rapproche plutôt d'une droite, alors que dans notre exploitation la distribution des contraintes présumée a une allure plutôt exponentielle. La solution adoptée pour déjouer ce phénomène est de borner inférieurement les valeurs de C. Cependant, il faut être conscient que dans ce cas, on est à la limite de l'application de notre méthode qui trouve contrairement aux hypothèses de base, que la distribution de contraintes la plus "adéquate" est linéaire...

#### 4.3.2. Précision et effets relatifs de quelques paramètres

- justesse des déplacements

Rappelons que la justesse-type des mesures de déplacement est de  $1 \mu\text{m}$ , sachant que :

- . +  $1^\circ\text{C}$  sur l'appareillage de mesure implique une déformation apparente de  $-0.8 \mu\text{m}$
- . +  $1^\circ\text{C}$  sur le béton provoque des déformations de  $+1 \mu\text{m}$  sur une entaille de 30 mm, et  $+2 \mu\text{m}$  sur une entaille de 80 mm
- . Il arrive en effet que dans la colonne Deltadep (voir tableau 4.1.), alors que toutes les valeurs tendent vers zéro, d'autres valeurs restent décalées individuellement de 3 à  $4 \mu\text{m}$ . Dans ce cas de figure le programme d'exploitation permet de les éliminer comme "non significatives"
- . On a pu estimer par simulation les erreurs maximales qui peuvent affecter la contrainte moyenne déterminée par la méthode d'exploitation automatique sur la base extensométrique n° 1, selon la précision type :

Précision type ( $\mu\text{m}$ )	1 micromètre	3 micromètres
Erreur sur la contrainte (MPa)	- 0.3 à 0.8	- 1.1 à 2.2

- dans la plupart des cas étudiés, les erreurs sont en fait limitées à quelques "dizièmes de "MPa"

- . Les erreurs sont indépendantes du niveau de la contrainte recherchée

- justesse des coefficients d'influence

Afin de déterminer l'incidence des coefficients d'influence de la matrice de compliance sur les résultats obtenus, nous avons procédé de la façon suivante :

- . En multipliant les coefficients d'influence des premières tranches d'une entaille de 80 mm par 2, on obtient la courbe ( $C_{21}$ ) de la figure 4.5.
- . En multipliant les coefficients des dernières tranches d'une entaille de 80 mm par 2, on obtient la courbe ( $C_{12}$ )
- . En fixant les coefficients obtenus sur une profondeur de 80 mm à une valeur égale à 1, on obtient la droite  $C_1$ .

Enfin, en exploitant ces résultats et en les comparant avec les résultats obtenus précédemment au (paragraphe 4.2.2.), la contrainte moyenne obtenue avoisine toujours les 6 MPa, et la distance "d" reste inférieure à 1. A partir de là, on peut dire que les coefficients d'influence ont peu d'effet sur les valeurs de contrainte.

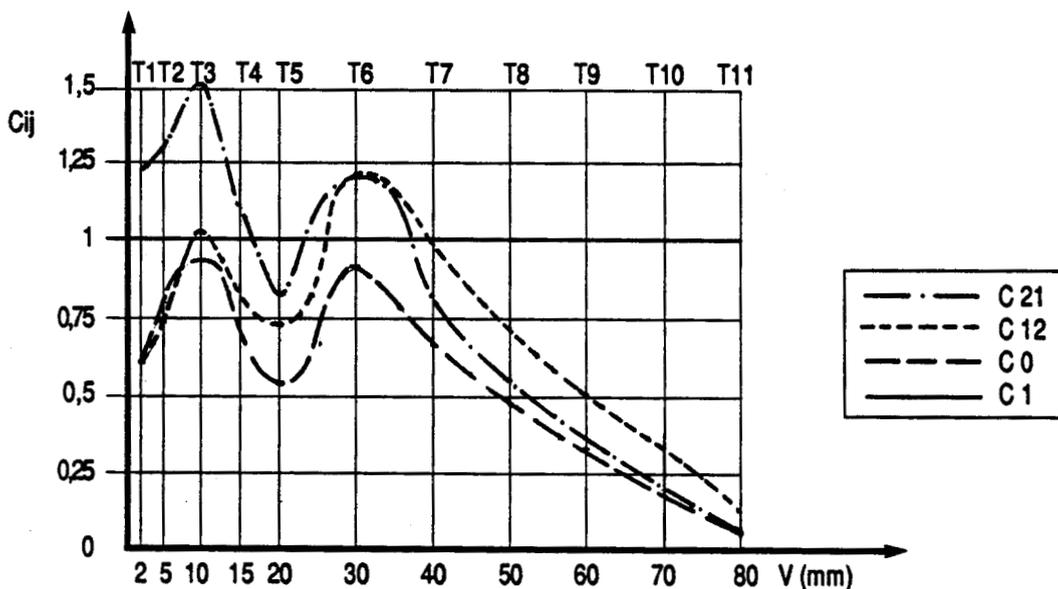


Figure 4.5. Diagrammes des coefficients d'influence en fonction de l'épaisseur de la tranche pour une entaille de 80 mm. Base 1.

$C_{21}$  (2  $C_{i1}$  ; ..... ;  $C_{ij}$ ),  $C_0$  = coefficients d'influence calculés par les éléments finis

$C_{12}$  ( $C_{i1}$  ; ..... ; 2  $C_{ij}$ ),  $C_1$  (1, ..... ; 1)

Tranches Coefficient $C_{ij}$	$T_1$ 2mm	$T_2$ 3	$T_3$ 5	$T_4$ 5	$T_5$ 5	$T_6$ 10	$T_7$ 10	$T_8$ 10	$T_9$ 10	$T_{10}$ 10	$T_{11}$ 10
$C_{21}$	1.24	1.29	1.54	1.10	0.83	1.21	0.83	0.56	0.35	0.19	0.06
$C_{12}$	0.62	0.74	1.03	0.84	0.73	1.22	0.95	0.73	0.52	0.33	0.12
$C_0$	0.62	0.71	0.93	0.71	0.58	0.91	0.66	0.47	0.33	0.18	0.06
$C_1$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Tableau 4.8. Valeurs des coefficients d'influence en fonction des tranches de la Base 1

#### 4.4. Remarques et conclusions

Après avoir exploité tous les résultats de mesures obtenus sur les 28 entailles et pour chaque base de mesure, plusieurs phénomènes restent inexpliqués, notre méthode paraissant incapable d'y apporter une réponse ainsi :

- . On ne peut se prononcer sûrement sur la profondeur de fissuration en parement du béton testé (voir les résultats des tableaux 4 (4, 5) où les contraintes moyennes sont presque identiques quelle que soit la profondeur de fissuration choisie)
- . On ne peut non plus décrire le véritable régime de contrainte à proximité du parement, en d'autres termes : contraintes adoucies ou non (voir tableau 4.6. relatif à un béton de module de déformation variable)
- . La méthode présente cependant quelques moyens d'appréciation de la qualité de l'adéquation réalisée :
  - pour une distance "d" très faible cela implique une grande probabilité que l'on approche de la vraie distribution des contraintes (ex :  $d < 1.00$ )
  - si la valeur du paramètre C tend vers zéro c'est moins satisfaisant que si la méthode converge vers une valeur de C proche de ce que la théorie nous enseigne (ex :  $C = 0.8$  pour un béton de 4 mois, cas des dalles)
- . Par contre, ce que dès à présent la méthode sait faire, c'est déterminer la contrainte moyenne avec une précision fort satisfaisante (quelques dixièmes de MPa), pour peu que les mesures aient été menées soigneusement, et jusqu'à une profondeur maximale de 80 mm.

## CONCLUSION GENERALE

Pour un survol rapide du mémoire présenté et des principaux points abordés, on se reportera aux conclusions figurant à la fin de chaque chapitre. Qu'il nous soit permis, en toute modestie, de rappeler ici les résultats qui nous semblent originaux par rapport aux travaux antérieurs dont nous avons eu connaissance.

La méthode de "libération des contraintes" appliquée au matériau béton, telle qu'elle a été décrite tout au long du chapitre I n'est pas de notre cru. Elle a bien été inventée et développée par Ch. Abdunur (LCPC Paris, section ouvrage d'art).

De plus il revient à son inventeur d'avoir perçu son intérêt potentiel, et d'avoir mené les premiers essais de libération sur des modèles en laboratoire.

Nous avons quant à nous :

- Présenté l'état de la technique, qui a constitué la base de l'orientation de nos recherches
- Exécuté des essais de "Libération des Contraintes" sur des corps d'épreuve, soit au total la réalisation de vingt huit entailles
- Modélisé et traité numériquement la méthode, afin d'appréhender l'ordre de grandeur du champ cinématique de déplacement en parement, lorsqu'on ouvre une entaille de profondeur Z, dans un béton de module E. D'autre part, il convenait de valider et optimiser le mode opératoire, par l'utilisation des coefficients d'influence (déplacements sur les files 1, 2 et 3)
- Exploité tous les résultats obtenus, par l'adéquation systématique d'une distribution exponentielle des contraintes dans l'épaisseur des pièces en béton
- Appliqué la méthode d'exploitation aux vingt huit entailles, y compris les entailles réalisées sur des structures en service.

### **Quelques résultats acquis**

Le mode opératoire de l'exécution d'un essai de "Libération des Contraintes" sur béton est désormais bien réglé. Ainsi la surveillance du champ opératoire par l'utilisation d'un micro-ordinateur pilotant la centrale d'acquisition, permet à tous moments de l'essai, de prendre les précautions nécessaires et d'éviter ainsi les effets des variations de la température sur la justesse des mesures de déplacement, très sensibles à cet égard. L'étude de l'incidence du retrait sur les pressions de rétablissement nous a permis de dégager la distribution des contraintes de retrait au voisinage du parement.

Par ailleurs la modélisation d'un essai de libération et la détermination des coefficients d'influence ont permis de déboucher sur quelques études complémentaires, ainsi :

- la comparaison des ordres de grandeur des déplacements obtenus lors de l'expérimentation avec ceux déterminés par la théorie
- la vérification de la bonne linéarité du comportement de l'entaille sous la pression de compensation
- la contribution des différentes tranches d'une entaille de 80 mm aux déplacements mesurés sur les bases 1, 2 et 3, en cas de contrainte uniforme.  
La détermination des coefficients d'influence a d'ailleurs contribué largement à la mise au point de notre méthode d'exploitation développée au chapitre IV
- l'introduction dans un code de calcul aux éléments finis et, pour la première fois, de l'effet du "gradient de qualité", qui conduit à "l'adoucissement des contraintes"

La valeur de la contrainte recherchée étant très sensible à la précision des déplacements provoqués par la création d'une entaille, la méthode par inversion de matrice s'est avérée pratiquement impossible à appliquer.

En revanche, nous avons mis au point une méthode type d'exploitation et nous avons exploité toutes les mesures réalisées pour les vingt huit entailles et ce, de manière indépendante pour chaque base de mesure. Les valeurs de contrainte obtenues sont très satisfaisantes. De plus, par le recours à l'informatique la partie laborieuse des calculs n'est dorénavant plus un problème.

Enfin, nous avons appliqué et validé notre méthode d'exploitation à des résultats de mesure obtenus sur une poutre du pont Vauban à Strasbourg. Là aussi les valeurs de contraintes sont très significatives de la précontrainte en service, et les possibilités et limites de la méthode ont été bien cernées.

La méthode de "Libération des Contraintes", appliquée aux structures en béton précontraint, donne donc de bons résultats. Elle dépasse même les possibilités qu'on avait pu lui concéder au début. A tel point qu'aujourd'hui, nous puissions affirmer que dans des conditions d'expérimentation optimales, la valeur de la contrainte moyenne dans une section d'un ouvrage peut être donnée avec une précision de ( $\pm 0.3$  MPa).

Toutefois il reste à souligner que la méthode de "libération des Contraintes" est incapable de se prononcer, ni sur la profondeur de fissuration, ni sur le vrai régime des contraintes à proximité du parement.

## **Perspectives**

A notre connaissance, l'objectif qui était assigné à la méthode de "Libération des Contraintes" est dès à présent atteint. La méthode s'oriente maintenant vers l'expertise des structures en service. D'ailleurs, l'équipe d'intervention de la section pathologie des ouvrages d'art du laboratoire des ponts et chaussées de Lille est chargée d'intervenir très prochainement sur un VIPP (Viaduc à travées Indépendantes à Poutres Précontraintes).

Ce sera sans nul doute le début de longues campagnes d'intervention sur ouvrages en France et à l'étranger.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ABDUNUR C.**

Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de Libération miniaturisée.  
*Bulletin de Liaison des LPC, n° 138, juillet 1985.*

**ABDUNUR C.**

Mesures de contraintes par Libération.  
*AER 1.43.21 - Bilan et perspectives. 1985.*

**ABDUNUR C.**

Mesures directes de contraintes sur une pile du viaduc de Charmaix.  
*Rapport d'intervention, juillet 1985.*

**ABDUNUR C., MIAO B., ACKER P., LELIEVRE A.**

Evaluation des contraintes dues au séchage du béton par la méthode de Libération des contraintes.  
*Rapport AFREM. Paris, novembre 1987.*

**ABDUNUR C.**

Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de Libération miniaturisée.  
*Communication présentée à la journée sur les essais non destructifs dans le génie civil de janvier 1984, et publiée dans les cahiers n° 2 du COFREND.*

**ACKER P.**

Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique.  
*Rapport de recherche LPC n° 152, juillet 1988.*

**ACKER P.**

Fissuration à la construction dans les ouvrages d'art.  
Cracking in structures during the Construction Périod.  
*Annales de l'ITBTP, n° 398 (journée d'étude "Les Fissurations des bétons"), série béton 202, octobre 1981.*

**ACKER P.**

Drying of Concrete : Conséquences for the evaluation of creep tests. in "Fundamental Research on Creep and shrinkage of Concrete".  
*Martinus Nijhoff Publishers, 1982.*

**ALVEZ G.**

Etude d'une méthode d'exploitation des résultats des essais de Libération.  
*Rapport de stage, USTL, janvier 1989.*

**BUIL M.**

Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante.  
*Rapport de recherche LCPC, n° 92, décembre 1979.*

**BARON J.**

Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment.  
*Rapport de recherche LCPC, n° 15, mai 1971.*

**BARON J.**

Les retraits de la pâte de ciment.  
*in "Le béton hydraulique", ch.28, Presses de l'ENPC, Paris, 1982.*

**CHHUY S., CANNARD G., ACKER P., ROBERT JL.**

Etude expérimentale de l'endommagement du béton.  
*Bulletin de liaison des LPC, n° 145, septembre 1986.*

**DE LARRARD F.**

Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances.  
*Rapport de recherche LPC n° 149, mars 1988.*

**EHLACHER A.**

Contribution à l'étude thermodynamique de la progression de fissure et à la mécanique de l'endommagement brutal.  
*Thèse d'état, Université Paris VI, 1985.*

**FRIAA F., MENSI R., ACKER P.**

Etude du transfert simultané de la teneur en eau et de la chaleur dans le béton.  
*Proc. Congrès international RILEM, Versailles, Vol.3, Chapman & Halled, septembre 1987.*

**FREYSSINET E.**

Eugène Freyssinet par lui-même.  
*Revue travaux, n° 375, Paris, avril 1966.*

**GHOMRANI A.**

Modélisation et calcul par éléments finis pour la méthode de "Libération des Contraintes"  
*Rapport de DEA, EUDIL, Université de Lille, septembre 1987.*

**HUMBERT P., PIAU JM.**

CESAR - Mode d'emploi - Version 2.0.0.  
*Document LCPC, Paris, septembre 1986.*

**L'HERMITE RG., MAMILLAN M.**

Répartition de la teneur en eau dans le béton durci.  
*Annales de l'ITBTP n° 309-310, octobre 1973.*

**MAZARS J.**

Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure.  
*Thèse de doctorat ès-sciences. Université Paris VI, 1984.*

**MASO JC.**

La liaison pâte-granulats.

*In "Le béton hydraulique", ch 14, presses de l'ENPC, Paris, 1982.*

**MIAO B.**

Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton.

*Thèse de doctorat de l'ENPC, Spécialité : Mécanique et matériaux, Paris, novembre 1988.*

**PICKETT G.**

The effect of change in moisture - Content on creep of concrete under a sustained load.

*ACI journal, Proc. 38, 1942.*

**ROSSI P.**

Fissuration du béton : du matériau à la structure.

Application de la mécanique linéaire de la rupture.

*Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, décembre 1986.*

**SHAHROUR I.**

Initiation aux méthodes numériques. Cours de DEA.

*Modelisation en Génie Civil, décembre 1986.*

**TONNOIR B.**

Méthode de "Libération des Contraintes", dispositif de mesure mécanique. Effets de la température.

*Rapport interne du LRPC Lille, septembre 1987.*

**TONNOIR B., GHOMRANI A.**

Mesures de Libération des Contraintes sur une poutre du pont Vauban à Strasbourg.

*Compte rendu du LRPC Lille, novembre 1989.*

**TONNOIR B., GHOMRANI A.**

Effet de la dessiccation du béton sur les caractéristiques mécaniques de peau.

*Bulletin de Liaison des LPC (à paraître 1992).*

**TORRENTI JM.**

Some Remarks upon concrete softening.

*Matériaux et Constructions, vol. 19, n° 113, sept-oct. 1986.*

**TORRENTI JM.**

A Constitutive Model for Concrete with the Consideration of Water Content.

*In "Constitutive Laws for engineering Materials", Desai C.S.cd., Tucson, janvier 1987.*

**TERRIEN M.**

Etude des contraintes créées par le séchage dans le béton.

*CRT/LCPC, 1985.*

**WITTMAN FH., ROELFSTRA PE.**

Total deformation of loaded drying Concrete.

*Cement and Concrete Research, vol. 10, p 601-610, 1980.*

**WITTMAN FH**

Structure of Concrete with respect to crack formation.

*In "Fracture Mechanics of Concrete", p.43-74, FH. Wittman ed., Elsevier SC. Publ., 1983.*

**WITTMAN FH.**

Creep and shrinkage mechanisms.

*In "Creep and shrinkage in concrete structures" John Wiley & sons Ltd. 1982.*

# ANNEXES

- Annexe 1 : Programme d'acquisition des mesures
- Annexe 2 : Tableaux récapitulatifs des résultats de mesures obtenus.  
Exploitation graphique des déplacements en fonction de la profondeur d'entaille
- Annexe 3 : Modélisation en deux dimensions d'une demi-section de dalle au voisinage de l'entaille
- Annexe 4 : Programme d'exploitation automatique des résultats de mesure (Tableur SMART)
- Annexe 5 : Tableaux récapitulatifs de toutes les contraintes obtenues.



```

affuom:
screen 0,0,2,1:cls
lupm=len(bs):lignes=int(lupm/60)
for i=1 to lignes:locate 9+i,10:print mid$(bs,60*i-59,60)::next i
locate 10+lignes,10:print right$(bs,lupm-60*lignes)
return

```

```

affcapteurs:
locate 4,31:color 0,3:print " CAPTEURS TESA ":color 7,0
locate 7,24:print "JEU N° 1" JEU N° 2"
for i=1 to 5
locate 8+2*i,20:print using "###.#":capteur1(2*i-1)
locate 8+2*i,29:print using "###.#":capteur1(2*i)
'locate 8+2*i,42:print using "###.#":capteur2(2*i-1)
'locate 8+2*i,51:print using "###.#":capteur2(2*i)
next i
return

```

```

affjauges:
locate 6,17:color 0,3:print " MICRODEFORMATIONS DALLETTTE ";
locate 6,61:print " EFFORTS TIRANTS ":color 7,0
for i=1 to 2:locate 9+i,26:print using "#####";microdef(5*i-3):next i
locate 10,66:print using "#####";force(1)::print " kN";
locate 18,66:print using "#####";force(2)::print " kN";
locate 14,66:color 0,3:print using "#####";force(3)::print " kN ":color 7,0
for i=1 to 3
locate 14,18*i-10:print using "#####";microdef(2*i-1)
locate 15,18*i-10:print using "#####";microdef(4+2*i)
next i
for i=1 to 2:locate 17+i,26:print using "#####";microdef(5*i-1):next i
return

```

```

copjauges:
lprint " MICRODEFORMATIONS DALLETTTE (um/m)
TS"
lprint:lprint
lprint spaces(15)::lprint using "#####";microdef(2),microdef(7);
lprint spaces(31);"Tirant a : ";lprint using "#####";force(1)::lprint " kN"
lprint:lprint using "#####";microdef(1),microdef(6)::lprint spaces(7);
lprint using "#####";microdef(3),microdef(8)::lprint spaces(7);
lprint using "#####";microdef(5),microdef(10)::lprint spaces(16);"Tirant b : ";
lprint using "#####";force(3)::lprint " kN":lprint
lprint spaces(15)::lprint using "#####";microdef(4),microdef(9);
lprint spaces(31);"Total a+b : ";lprint using "#####";force(2)::lprint " kN"
lprint:lprint:lprint:lprint:lprint:lprint
return

```

```

affexploite:
screen 0,0,1,1
for i=1 to 3
locate 10+3*i,14:print using "###.#":capteur1(2*i-1)
locate 10+3*i,34:print using "###.#":capteur1(2*i)
locate 10+3*i,24:print using "###.#":(capteur1(2*i-1)+capteur1(2*i))/2
next i
for i=1 to 4:locate 19,37+9*i:print using "##.#":ture(i):next i
for i=1 to 3:locate 12,33+12*i:print using "#####";force(i):next i
locate 15,67:print using "###.#":pression1
return

```

```

affcourt:
screen 0,0,1,1:color 0,3
for i=1 to 3
next i
for i=1 to 4:locate 19,37+9*i:print using "##.#":ture(i):next i
color 7,0
return

```

```

tritotal:
for i=1 to 11:capteur1(i)=val(mid$(bs,15*i-10,8))/10:next i

```

```

for i=1 to 4:ture(i)=val(mid$(bs,15*i+155,8)):next i
pression1=capteur1(11)
for i=1 to 4:tiranta(i)=val(mid$(bs,15*i+215,8)):next i
for i=1 to 4:tirantb(i)=val(mid$(bs,15*i+275,8)):next i
for i=1 to 10:microdef(i)=val(mid$(bs,15*i+365,8)):next i
for i=11 to 12:microdef(i)=val(mid$(bs,15*i+185,8)):next i
return

```

```

tricapteurs:
for i=1 to 10:capteur1(i)=val(mid$(bs,15*i-10,8))/10:next i
return

```

```

trijauges:' TRIER UNE SCRUTATION JAUGES
for i=1 to 4:tirants(i)=val(mid$(b$,15*i-10,8)):next i
for i=1 to 4:tirantb(i)=val(mid$(b$,15*i+50,8)):next i
for i=1 to 10:microdef(i)=val(mid$(b$,15*i+110,8)):next i
return
tricourt:' TRIER UNE SCRUTATION PARTIELLE
for i=1 to 11:capteur1(i)=val(mid$(b$,15*i-10,8))/10:next i
for i=1 to 4:tire(i)=val(mid$(b$,15*i+155,8)):next i
return
,
tridisa:' TRIER UNE SAUVEGARDE DISQUETTE
d$=""
for k=1 to 34:input#2,e$:d$=d$+e$+" ":next k
n=1
plusn:'
numero$=left$(d$,n):if instr(numero$,"/")=0 then n=n+1:goto plusn
numero$=left$(d$,n-1)
dat$=mid$(d$,n+2,10):heures$=mid$(d$,n+15,8):prof$=mid$(d$,n+26,2):cdg=.4*val(pro
f$)
b$=mid$(d$,n+31):gosub tritotal:gosub exploite
defmoy=(microdef(2)+microdef(3)+microdef(4)+microdef(7)+microdef(8)+microdef(9))
/6
def1=((150-cdg)*(microdef(6)+microdef(8))+cdg*(microdef(1)+microdef(3)))/300
def2=((150-cdg)*(microdef(10)+microdef(8))+cdg*(microdef(5)+microdef(3)))/300
Eapp=int(force(3)*1E3/-9/defmoy)*100
return
,
exploite:' EXPLOITATION DES JAUGES
force(1)=1.04400*(tirants(1)+tirants(2)+tirants(3)+tirants(4))/4
force(2)=1.04100*(tirantb(1)+tirantb(2)+tirantb(3)+tirantb(4))/4
force(3)=force(1)+force(2)
return
,
ouvrirupm:' OUVRIR LE COM1 VERS L'UPM
open upm$ as 1:com(1) on
print#1,chr$(18)
return
,
fermerupm:' FERMER LE CANAL RS 232
print#1,"DCL"
close:com(1) off
return
,
valequill:' VALIDATION DE L'EQUILIBRAGE
print#1,ordres
delay 1
return
,
tarage:' FAIRE L'EQUILIBRAGE
ordres$="TAR "+voies
print#1,ordres

delay 1
return
,
tampon:' VIDER LE TAMPON DE COMMUNICATION
b$=""
while loc(1)<10
wend
tamp:
a$=input$(loc(1),1):b$=b$+a$
for i=1 to 1000
if not eof(1) then goto tamp
next i
return
,
voiestotales:' TOUTES LES VOIES
print#1,"MSV 0,49"
gosub tampon
return
,
voiescapteurs:' VOIES CAPTEURS
print#1,"MSV 0,19"
gosub tampon
return
,
voiesjauges:' VOIES JAUGES
print#1,"MSV 30,49"
gosub tampon
return
,

```

```
voiescount:
print#1,"MSV 0,23"
gosub tampon
return
;
```

VOIES PARTIELLES

```
*****
* SOUS MENUS *
*****
```

```
examiner:
locate 23,25:print"A partir de quelle scrutation ";:input enr
call efface(23,23):color 0,3:locate 23,21:print" Frapper S pour Suite, F pour Fi
n ... ";:color 7,0
open fichiers for input as 2
for tri=1 to enr-1:gosub tridis:next tri
do
if a$="f" or a$="F" or eof(2) then exit loop
gosub tridis:gosub affexploite
locate 6,74:print prof$:locate 7,72:print using"****";val( numeros);
call attendstouche("sSfF")
loop
call efface(23,23):close#2
return
```

EXAMINER DES RESULTATS

```
renseigner:
return
```

RENSEIGNER LES LIBELLES

```
gosub ouvrirupm
print#1,"OTR 0"
cs="ITI "+left$(times,2)+mid$(times,4,2)+mid$(times,7,2):delay 1
print#1,cs
call efface(22,25):locate 24,25:print"- mise à l'heure de l'UPM 60 -":delay 3
print#1,"IRC 0"
call efface(24,24):locate 24,29:print"- O2O hors fonction -":delay 3
```

```
print#1,"BMP 0,49"
call efface(24,24):locate 24,25:print"- sélection des voies 0 à 49 -":delay 3
print#1,"IPP 10,18,...0"
call efface(24,24):locate 24,19:print"- saut des voies inutilisées 2ème décade -
":delay 6
print#1,"IPP 24,29,...0"
call efface(24,24):locate 24,19:print"- saut des voies inutilisées 3ème décade -
":delay 6
print#1,"IPP 38,39,...0"
call efface(24,24):locate 24,19:print"- saut des voies inutilisées 4ème décade -
":delay 6
print#1,"IEU 0,9,30"
call efface(24,24):locate 24,26:print"- unité des capteurs TESA -":delay 6
print#1,"IEU 20,23,80"
call efface(24,24):locate 24,26:print"- unité des sondes Pt 100Q -":delay 6
print#1,"IEU 30,37,30
delay 6:print#1,"IEU 40,49,30
call efface(24,24):locate 24,30:print"- unité des jauges -":delay 6
print#1,"IPP 0,9,5,1,1"
call efface(24,24):locate 24,23:print"- alimentation des capteurs TESA -":delay
6
print#1,"IPP 30,37,2,1,1"
delay 6:print#1,"IPP 40,49,2,1,1"
call efface(24,24):locate 24,26:print"- alimentation des jauges -":delay 6
print#1,"ISC 0,3,3,31200"
delay 6:print#1,"ISC 3,9,3,06000"
call efface(24,24):locate 24,28:print"- k des capteurs TESA -":delay 6
print#1,"ISC 30,37,2,00000"
delay 6:print#1,"ISC 40,49,2,13000"
call efface(24,24):locate 24,32:print"- k des jauges -":delay 6
call efface(24,24)
gosub fermerupm
return
```

```
reglerforce:
screen 0,0,2,2:gosub ouvrirupm
locate 21,8:print"- Valider l'équilibre .... 1 - Refaire l'équilibre .... 3
";
locate 22,8:print"- Invalider l'équilibre .. 2 - Afficher une scrutation .. 4
";
locate 23,8:print"- Menu précédent ..... 0 - Copie des résultats ..... 5
";
locate 24,5:color 0,3
print" ATTENTION ! N'équilibrer à zéro que si la précontrainte est nulle ";
color 7,0
call attendstouche("123450"):a$=val(a$)
if a=0 then call efface(6,24):gosub fermerupm:return
if a=5 then gosub fermerupm:gosub copjauges:goto reglerforce
if a=1 then vs="1":gosub valequil
if a=2 then vs="0":gosub valequil
if a=3 then
voies="30,49":gosub tarage
end if
gosub voiesjauges:gosub fermerupm
gosub trijauges:gosub exploite
gosub affjauges
```

```

reglercapteurs:
screen 0,0,2,2:gosub ouvrirupm
locate 21,8:print"- Valider l'équilibrage .... 1 - Refaire l'équilibrage .... 2
";
locate 22,8:print"- Invalider l'équilibrage .. 2 - Afficher une scrutation .. 4
";

locate 23,8:print"- Menu précédent ..... 0";
locate 24,5:color 0,3
print" ATTENTION ! Ne pas équilibrer à zéro au cours du sciage de l'entaille ";
color 7,0
call attendstouche("12340"):a=val(a)
if a=0 then call efface(4,24):gosub fermerupm:return
if a=1 then vs="1":gosub valequil
if a=2 then vs="0":gosub valequil
if a=3 then voies="0,9":gosub tarage
gosub voiescapteurs:gosub fermerupm
gosub tricapteurs:gosub affcapteurs
goto reglercapteurs
,
complete:
sauve=1:gosub ouvrirupm
gosub voiestotales:gosub fermerupm
gosub tritotal:gosub affupm
gosub exploite:gosub affexploite
return
,
partielle:
sauve=0:call efface(22,25):color 0,3
locate 22,12:print" Frapper 'S' pour sortir du mode SCRUTATIONS CONTINUES "
locate 23,12:print" ... ou un chiffre de 4 à 9 pour changer la cadence "
color 0,7:sauve=0:delai=10:gosub ouvrirupm
timing:
on timer(delai) gosub scrutmul
timer on
boucle:
rs=inkeys:if rs="" then goto boucle
gosub cadence
color 7,0:call efface(22,25)
gosub fermerupm
return
,
cadence:
timer off
if rs="s" or rs="S" then return
delai=val(rs):if delai<3 then delai=3
return timing
,
scrutmul:
sevent off
gosub voiescourt:gosub tricourt:gosub affupm
gosub affcourt
sevent on
return
,
voirupm:
screen 0,0,2,2:gosub espace
return
,
sauvegarde:
call efface(22,25)
if sauve=0 then
color 0,3:locate 23,11:print" Effectuer une scrutation COMPLETE avant de sauvega
delay 3:color 7,0:call efface(23,23):return
end if
prof:
locate 23,14:input"Profondeur actuelle de l'entaille (en mm) ":prof
if len(prof)=0 or len(prof)>2 then beep:goto prof
if len(prof)=1 then prof="0"+prof
call efface(23,23):bs=dates+ / "+times+ / "+prof+ / "+bs

```

REGLER LES CAPTEURS

SCRUTATION COMPLETE

SCRUTATION PARTIELLE

Timing

CADENCE DE SCRUTATION

SCRUTATIONS CONTINUES

VISUALISER L'ENVOI DE LA CENTRALE

SAUVEGARDE DERNIERE SCRUTATION



```

menu2:
screen 0,0,0,0
locate 11,32:print "MENU PARAMETRES":call cadre1(10,30,3,19)
locate 20,12:gosub frapper
locate 14,15:print "- Renseigner les paramètres de l'essai, et les"
locate 15,15:print " libellés manquants du tableau ci-dessus .... 1";
locate 16,15:print "- Revenir au menu général ..... 0";
call attendstouche("10"):a=val(a)
if a=0 then call efface(10,20):gosub menu0:return
goto menu2

```

TRACE DU MENU2

TRACE DU MENU3

```

menu3:
screen 0,0,0,0
locate 11,33:print "MENU REGLAGES":call cadre1(10,31,3,17)
locate 20,12:gosub frapper
locate 14,15:print "- Conditionner la centrale ..... 1";
locate 15,15:print "- Régler la force appliquée ..... 2";
locate 16,15:print "- Régler les capteurs TESA ..... 3";
locate 17,15:print "- Revenir au menu général ..... 0";
call attendstouche("1230"):a=val(a)
if a=0 then call efface(10,20):gosub menu0:return
on a gosub conditionner,reglerforce,reglercapteurs
goto menu3

```

TRACE DU MENU4

```

menu4:
screen 0,0,1,1
locate 23,3:print "MENU MESURES":call cadre1(22,1,3,16)
locate 25,20:gosub frapper
locate 22,20:print "- Scrutation complète, unique .. 1 - Sauvegarde ..... 4";
locate 23,20:print "- Surveillance partielle ..... 2 - Commande à l'UPM . 5";
locate 24,20:print "- Afficher l'envoi de l'UPM .... 3 - Menu général ..... 0";
call attendstouche("123450"):a=val(a)
if a=0 then
sauve=0:call efface(22,25)
screen 0,0,2,1:cls:return
end if

```

```

goto menu4
:
: *****
: * DIVERS UTILITAIRES *
: *****
:

```

```

espace:
call efface(22,25)
locate 22,20:print "Frappier la touche ESPACE pour effacer ...";
call attendstouche(" ")
return

```

TOUCHE ESPACE

```

frapper:
color 0,3
print "Frappier la touche correspondant à l'action désirée ...";
color 7,0
return

```

CHOISIR UNE TOUCHE



```

fin:
finfin:
screen 0,0,0,0:cls:end

```

FIN D'UTILISATION

```

:
: *****
: * PROCEDURES *
: *****
:

```

```

sub efface(p,d)
local n
for n=p to d:locate n,1:print string$(79,32)::next n:locate p,1
end sub

```

EFFACEMENT LIGNES

```

sub attendstouche(touches)
shared a$
mauvaisetouche:
a$=inkey$:if a$="" then mauvaisetouche
if instr(touches,a$)=0 then beep:goto mauvaisetouche
end sub

```

ATTENTE D'UNE TOUCHE

```

sub cadre2(y,x,h,1)
local n
locate y,x:print chr$(201)::locate y+h-1,x:print chr$(200);
locate y,x+1-1:print chr$(187)::locate y+h-1,x+1-1:print chr$(188);
for n=1 to h-2:locate y+n,x:print chr$(186)::locate y+n,x+1-1:print chr$(186)::n
ext
locate y,x+1:print string$(1-2,205)::locate y+h-1,x+1:print string$(1-2,205);
end sub

```

TRACE D'UN CADRE DOUBLE

```

sub cadre1(y,x,h,1)
local n
locate y,x:print chr$(218)::locate y+h-1,x:print chr$(192);
locate y,x+1-1:print chr$(191)::locate y+h-1,x+1-1:print chr$(217);
for n=1 to h-2:locate y+n,x:print chr$(179)::locate y+n,x+1-1:print chr$(179)::n
ext
locate y,x+1:print string$(1-2,196)::locate y+h-1,x+1:print string$(1-2,196);
end sub

```

TRACE D'UN CADRE SIMPLE

```

:
: *****
: * FONCTIONS *
: *****
:

```

## ANNEXE 2

- . Tableaux récapitulatifs des résultats de mesure obtenus
- . Exploitation graphique des déplacements en fonction de la profondeur d'entaille

11/02/88

Ouvrage : RSO			Elément :						Repère : 1 ; 45°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.2	(-0.2)		0.2	(0.2)		0.2	(0.2)	
2	3	5	-0.5	(-0.5)		0.0	(0.0)		0.1	(0.1)	
3	5	10	-2.3	(-2.3)		-0.9	(-0.9)		-0.8	(-0.8)	
4	5	15	-3.7	(-3.8)		-1.2	(-1.2)		-0.3	(-0.3)	
5	5	20	-4.0	-4.1	23.5	-2.4	(-2.4)	11.2	-1.9	-1.9	
6	10	30	-5.1	-5.9	39.7	-3.1	-3.5	26.7	-1.3	-1.7	
7	10	40	-5.5	-6.0	55.1	-3.8	-3.9	43.1	-2.7	-2.4	
8	10	50	-6.8	-7.9	69.0	-5.2	-5.6	59.5	-4.3	-4.0	
9	10	60	-7.3	-7.2	84.1	-5.7	-5.7	76.7	-4.5	-4.1	
10	10	70	-7.7	-8.0	96.1	-6.2	-6.3	92.8	-5.0	-4.6	
11	10	80	-9.6	-10.1	117.5	-7.9	-7.9	112.0	-6.2	-5.9	

08/06/88

Ouvrage : RDO			Elément :						Repère : 1 ; 45° NR		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.8	(-0.8)		-0.2	(-0.2)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	-1.3	(-1.3)		-0.2	(-0.2)		-0.2	(-0.2)	
3	5	10	-3.6	(-3.6)		-0.5	(-0.5)		-0.5	(-0.5)	
4	5	15	-5.7	(-6.0)		0.0	(0.3)		3.0	(3.8)	
5	5	20	-3.8	-4.3	21.2	1.0	-1.5	10.1	2.6	4.2	
6	10	30	-5.4	-6.3	35.8	0.2	-0.3	24.0	4.4	3.4	
7	10	40	-7.5	-8.1	49.7	-2.4	-2.6	38.9	0.3	0.1	
8	10	50	-9.2	-8.7	62.2	-3.8	-2.6	53.6	-0.3	-0.3	
9	10	60	-8.5	-7.9	75.9	-4.5	-4.1	69.2	-1.6	-1.4	
10	10	70	-9.7	-9.0	86.7	-5.2	-4.8	83.7	-2.1	-2.0	
11	10	80	-9.7	-8.9	106.0	-6.1	-5.3	101.0	-4.9	-3.9	

12/02/88

Ouvrage : RSO			Élément :						Repère : 2 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-2.4	(-2.4)		-0.3	(-0.3)		-0.3	(-0.3)	
2	3	5	-2.4	(-2.4)		-0.3	(-0.3)		-0.3	(-0.3)	
3	5	10	-4.6	(-4.6)		-0.9	(-0.9)		0.3	(0.3)	
4	5	15	-5.5	(-5.4)		-0.6	(-0.6)		2.4	(2.3)	
5	5	20	-4.6	-4.3	25.8	-0.5	-0.5	10.0	-0.2	-0.4	
6	10	30	-6.3	-7.0	43.6	-2.2	-2.4	2.8	-0.8	0.1	
7	10	40	-8.3	-7.3	60.5	-3.6	-3.6	38.5	-0.4	-0.8	
8	10	50	-8.5	-9.2	75.7	-2.6	-2.8	53.1	-4.4	-3.9	
9	10	60	-8.6	-8.4	92.4	-3.4	-3.4	67.5	-5.2	-4.8	
10	10	70	-9.1	-9.2	105.5	-3.4	-3.5	82.9	0.5	0.1	
11	10	80	-9.3	-9.4	129.0	-5.9	-6.0	100.0	-6.7	-6.6	

08/06/88

Ouvrage : RDO			Élément :						Repère : 2 ; 90° NR.		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-1.0	(-1.0)		-0.2	(-0.2)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	-1.4	(-1.4)		-0.1	(-0.1)		0.0	(0.0)	
3	5	10	-2.6	(-2.6)		0.5	(0.5)		2.3	(2.3)	
4	5	15	-3.5	(-3.8)		-0.4	(-0.4)		0.7	(0.9)	
5	5	20	-2.9	-3.6	20.5	-0.7	-0.8	9.4	-0.1	0.3	
6	10	30	-3.8	-5.0	34.6	-1.2	-1.3	22.4	-0.2	0.1	
7	10	40	-4.6	-6.2	48.0	-2.0	-1.7	36.2	-0.3	0.1	
8	10	50	-5.1	-6.3	60.1	-2.4	-2.6	50.0	-0.2	0.5	
9	10	60	-5.0	-5.2	73.3	-2.1	-1.9	64.5	1.0	2.1	
10	10	70	-4.3	-5.3	83.8	-1.6	-1.5	78.0	0.6	2.2	
11	10	80	-3.6	-4.2	102.4	-1.4	-0.8	94.1	1.1	2.5	

09/06/88

Ouvrage : RDO.R.			Élément :						Repère : 3 ; 90° R.		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.5	(-0.5)		-0.2	(-0.2)		0.1	(0.1)	
2	3	5	-1.2	(-1.2)		-0.6	(-0.6)		-0.1	(-0.1)	
3	5	10	-1.9	(-1.9)		-1.1	(-1.1)		-0.5	(-0.5)	
4	5	15	-3.8	(-3.7)		-1.6	(-1.7)		-0.4	(-0.4)	
5	5	20	-4.8	-4.6	19.2	-2.5	-2.3	9.6	-1.3	-1.3	
6	10	30	-5.4	-4.8	32.4	-4.2	-3.8	22.8	-2.8	-2.7	
7	10	40	-6.5	-5.7	45.0	-4.9	-4.4	37.0	-2.8	-2.5	
8	10	50	-7.3	-6.8	56.4	-5.8	-5.5	51.0	-3.5	-3.2	
9	10	60	-6.5	-5.3	68.7	-5.5	-4.8	65.8	-2.4	-2.3	
10	10	70	-5.9	-5.0	78.5	-5.2	-4.7	79.6	-2.1	-2.0	
11	10	80	-5.8	-5.1	96.0	-5.0	-4.6	96.0	-1.5	-0.8	

28/01/88

Ouvrage : RS1			Élément :						Repère : 1 ; 45°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	- 0.7	(- 0.7)		- 0.3	(- 0.3)		0.1	(0.1)	
2	3	5	- 0.2	(- 0.2)		0.3	(0.3)		0.1	(0.1)	
3	5	10	0.1	(0.1)		0.2	(0.2)		- 0.3	(- 0.3)	
4	5	15	1.1	(1.3)		0.6	(0.6)		- 0.4	(- 0.3)	
5	10	20	2.5	2.9	21.7	0.5	0.6	6.5	2.7	2.4	6.4
6	10	30	6.8	6.9	41.1	6.3	6.4	26.2	9.3	9.2	20.2
7	10	40	9.6	9.7	62.2	8.6	8.6	44.3	7.8	7.9	31.4
8	10	50	12.1	11.6	73.0	12.2	12.2	58.4	10.5	10.6	45.8
9	10	60	17.1	16.6	85.6	16.8	16.8	73.4	16.4	16.4	60.4
10	10	70	21.5	20.4	98.6	21.9	21.9	90.5	23.6	22.7	76.8
11	10	80	21.9	19.9	122.8	23.1	23.0	113.9	21.8	21.0	94.0

22/06/88

Ouvrage : RD1			Élément :						Repère : 1 ; 45° . NR .		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	- 1.0	(1.0)		- 0.3	(- 0.3)		- 0.1	(- 0.1)	
2	3	5	- 0.8	(- 0.8)		- 0.3	(- 0.3)		- 0.2	(- 0.2)	
3	5	10	2.0	(2.0)		0.3	(0.3)		- 0.2	(- 0.2)	
4	5	15	3.0	(3.5)		1.5	(1.7)		0.3	(0.4)	
5	5	20	3.6	4.6	20.9	1.7	2.0	7.9	2.1	2.2	6.0
6	10	30	6.5	7.6	36.2	3.9	4.4	20.9	3.1	3.4	13.0
7	10	40	9.1	10.3	47.9	6.8	7.2	34.0	5.4	5.9	23.6
8	10	50	12.4	14.1	64.7	9.8	10.6	48.6	8.0	8.9	36.0
9	10	60	16.6	18.8	81.7	14.2	15.2	64.7	12.6	13.3	50.0
10	10	70	21.7	23.3	91.0	19.1	20.3	79.0	17.6	19.1	66.0
10	10	80	26.8	29.2	113.2	24.3	25.6	98.1	23.1	24.5	84.4

29/01/88

Ouvrage : RSI			Élément :						Repère : 2 ; 90°			
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3			
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	
			Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		
1	2	2	-0.1	(-0.1)		-0.5	(-0.5)		-0.5	(-0.5)		
2	3	5	2.0	(2.0)		-0.1	(-0.1)		-0.5	(-0.5)		
3	5	10	3.9	(3.9)		-0.1	(-0.1)		-0.8	(-0.8)		
4	5	15	4.8	(5.5)		-0.7	(-0.5)		-1.3	(-0.2)		
5	5	20	12.1	13.4	27.4	7.5	7.8	12.5	2.8	5.0	7.6	
6	10	30	19.4	19.4	43.8	14.3	15.2	27.3	9.5	12.6	17.4	
7	10	40	26.5	26.9	60.3	21.8	22.4	43.1	14.9	16.7	28.3	
8	10	50	34.6	35.0	75.4	33.6	34.1	50.9	24.9	30.6	46.6	
9	10	60	44.1	44.8	92.2	43.2	44.4	78.2	33.1	37.2	59.4	
10	10	70	51.9	51.9	101.8	50.6	51.6	92.1	41.0	42.9	72.2	
11	10	80	63.5	63.2	125.4	61.8	62.2	111.3	49.1	51.0	90.8	

22/06/88

Ouvrage : RDI			Élément :						Repère : 2 ; 90° NRS			
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3			
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	
			Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		
1	2	2	-0.5	(-0.5)		-0.3	(-0.3)		-0.2	(-0.2)		
2	3	5	-2.4	(-2.4)		-0.1	(-0.1)		-0.5	(-0.5)		
3	5	10	-1.7	(-1.7)		0.4	(0.4)		-0.2	(-0.2)		
4	5	15	1.3	(1.7)		2.2	(2.3)		0.3	0.3		
5	5	20	3.3	4.0	16.7	5.1	5.2	9.0	3.5	3.4	4.9	
6	10	30	9.3	11.0	36.4	11.2	11.7	23.9	6.7	6.8	12.8	
7	10	40	16.4	19.8	53.4	13.6	20.6	40.4	13.7	14.0	24.2	
8	10	50	23.2	24.8	64.4	27.1	28.1	54.8	18.6	18.7	36.8	
9	10	60	30.5	33.0	79.5	36.4	37.7	71.3	28.1	20.8	52.4	
10	10	70	38.9	41.2	91.6	45.8	47.6	87.3	35.6	37.0	64.8	
11	10	80	47.7	51.2	112.5	54.6	56.7	105.0	44.0	45.5	81.2	

09/05/88

Ouvrage : RDI			Élément :						Repère : 3 ; 90° . R .			
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3			
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements (µm)		Raideur apparente (µm/10MPa)	
			Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		Bruts	Linéaires		
1	2	2	0.1	(0.1)		-0.2	(-0.2)		-0.1	(-0.1)		
2	3	5	0.4	(0.4)		-0.3	(-0.3)		-0.3	(-0.3)		
3	5	10	1.6	(1.6)		0.0	(0.0)		-0.3	(-0.3)		
4	5	15	5.2	(5.9)		1.9	(2.1)		0.4	(0.6)		
5	5	20	8.3	9.6	21.6	4.0	4.4	9.0	1.8	(2.2)	5.3	
6	10	30	15.0	16.3	32.0	11.8	12.2	21.9	10.1	(9.5)	14.0	
7	10	40	21.1	22.2	44.4	18.4	19.0	35.1	15.8	16.0	24.8	
8	10	50	29.4	30.6	59.3	26.5	27.4	49.6	22.0	22.3	35.8	
9	10	60	38.0	39.9	71.9	36.4	37.9	64.8	32.8	33.8	51.2	
10	10	70	46.5	47.5	84.1	44.5	45.7	77.7	38.4	39.4	62.4	
11	10	80	56.3	57.3	102.3	55.8	56.8	95.5	50.6	50.8	78.0	

11/03/88

Ouvrage : RS2			Élément :						Repère : 2, 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente
			( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )
1	2	2	-0.2	(-0.2)		-0.2	(-0.2)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	1.5	(1.5)		0.1	(0.1)		-0.1	(-0.1)	
3	5	10	7.6	(1.6)		2.3	(2.3)		0.4	(0.4)	
4	5	15	14.3	(14.6)		6.5	(6.9)		0.7	(1.8)	
5	5	20	20.9	21.5	24.0	14.6	(15.3)	13.9	7.6	(9.7)	6.2
6	10	30	34.4	34.4	41.0	28.8	28.4	28.8	16.4	17.7	14.0
7	10	40	49.0	46.9	55.2	46.2	44.0	44.0	28.6	29.9	24.6
8	10	50	64.9	60.6	67.2	65.5	63.0	61.3	44.9	46.6	37.8
9	10	60	82.1	77.9	82.7	84.8	80.8	77.5	57.1	58.7	51.7
10	10	70	97.9	93.2	92.5	103.4	100.5	92.7	76.2	80.5	66.2
11	10	80	117.9	112.0	113.8	127.4	122.5	112.4	102.2	103.0	83.2

25/08/88

Ouvrage : RD2			Élément :						Repère : 2, 90° NR		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente
			( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )
1	2	2	-1.5	(-1.5)		-0.2	(-0.2)		0.0	(0.0)	
2	3	5	-1.0	(-1.0)		0.1	(0.1)		0.1	(0.1)	
3	5	10	6.5	(6.5)		3.6	(3.6)		3.5	(3.5)	
4	5	15	15.2	(16.2)		7.1	(7.3)		3.9	(4.2)	
5	5	20	21.2	23.1	26.6	11.8	12.1	11.0	6.8	7.4	6.2
6	10	30	33.5	34.8	44.3	22.9	23.3	24.4	13.9	14.0	13.7
7	10	40	47.8	48.5	59.9	38.1	38.6	39.8	27.2	28.2	28.4
8	10	50	63.8	64.3	76.1	55.0	56.0	55.9	42.1	44.1	42.5
9	10	60	80.0	81.5	92.1	71.8	74.5	73.5	58.3	60.7	57.3
10	10	70	96.8	97.5	103.3	89.2	90.0	85.6	75.8	78.0	71.5
11	10	80	133.2	115.5	125.5	107.4	107.6	98.5	93.5	94.7	87.7

26/08/88

Ouvrage : RD2			Élément :						Repère : 3, 90° R		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente	Bruts	Linéaires	apparente
			( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}/10\text{MPa}$ )
1	2	2	0.2	(0.2)		0.0	(0.0)		0.1	(0.1)	
2	3	5	2.3	(2.3)		0.7	(0.7)		0.1	(0.1)	
3	5	10	8.0	(8.0)		2.7	(2.7)		1.0	(1.0)	
4	5	15	14.3	(15.4)		6.9	(7.2)		3.0	(3.3)	
5	5	20	19.3	21.4	23.2	11.5	(12.0)	11.9	5.7	6.2	4.9
6	10	30	31.1	33.2	37.2	25.7	26.6	27.4	16.8	17.6	16.3
7	10	40	43.9	45.4	52.5	40.6	41.4	44.0	27.1	28.7	28.7
8	10	50	56.8	57.7	65.7	55.1	55.5	59.7	37.4	38.6	40.2
9	10	60	69.1	71.4	78.6	70.9	72.5	76.0	52.0	53.3	53.6
10	10	70	86.3	88.3	92.8	90.1	91.5	93.0	68.5	71.2	70.0
11	10	80	102.8	106.5	113.3	110.5	111.2	112.9	86.9	88.7	86.7

25/08/88

Ouvrage : RD2			Élément :						Repère : 45 ; 1 ; NR		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.4	(-0.4)		-0.3	(-0.3)		0.3	(0.3)	
2	3	5	-2.3	(-2.3)		-0.5	(-0.3)		-0.5	(-0.5)	
3	5	10	0.4	(0.4)		0.9	(0.9)		1.0	(1.0)	
4	5	15	3.2	(3.8)		3.6	(3.8)		4.3	(4.0)	
5	5	20	5.4	6.6	25.1	5.5	5.8	14.3	5.5	(4.9)	7.5
6	10	30	11.0	12.3	39.9	11.4	11.7	26.8	9.3	10.2	18.8
7	10	40	18.0	18.8	57.7	17.8	18.3	44.4	9.4	10.3	26.3
8	10	50	25.0	25.7	71.8	26.4	27.1	61.6	16.7	18.5	41.3
9	10	60	31.7	33.6	88.9	36.4	37.0	79.6	28.2	31.5	63.8
10	10	70	30.8	41.8	102.0	46.0	47.2	98.0	38.1	41.0	78.5
11	10	80	46.5	47.9	121.6	52.8	53.6	111.7	40.9	42.8	89.8

10/03/88

Ouvrage : RS2			Élément :						Repère : 45 ; 1		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-1.8	(-1.8)		-0.5	(-0.3)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	-0.8	(-0.8)		-0.6	(-0.6)		-0.5	(-0.5)	
3	5	10	6.0	(6.0)		1.1	(1.1)		0.1	(0.1)	
4	5	15	10.0	(10.5)		3.2	(3.3)		0.8	(0.9)	
5	5	20	11.9	12.8	30.8	5.3	5.4	10.8	3.1	3.2	5.4
6	10	30	20.0	21.2	49.1	12.1	12.8	26.6	8.4	8.9	15.8
7	10	40	26.2	25.2	63.6	19.4	16.4	41.7	14.5	14.2	26.8
8	10	50	34.3	33.0	79.9	27.1	27.0	55.6	21.1	21.4	40.0
9	10	60	45.4	45.2	97.2	38.7	38.3	71.6	32.8	34.6	58.6
10	10	70	53.3	54.4	113.8	48.1	48.0	87.9	44.4	45.9	76.4
11	10	80	63.3	63.3	136.1	58.1	57.4	107.3	54.1	57.2	98.6

23/11/88

Ouvrage : LRPC			Élément : Ame						Repère : 2 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.5	(-0.5)		0.3	(0.3)		0.1	(0.1)	
2	3	5	-1.8	(-1.8)		0.1	(0.1)		0.1	(0.1)	
3	5	10	2.5	(2.5)		2.5	(2.5)		3.1	(3.1)	
4	5	15	8.3	(8.8)		6.1	(6.4)		5.9	(6.5)	
5	5	20	6.5	7.5	19.6	7.5	8.2	9.5	5.7	6.9	5.6
6	10	30	9.4	4.0	31.8	9.8	10.4	19.9	6.1	7.9	13.0
7	10	40	12.4	13.2	44.0	13.4	14.0	30.4	9.3	10.2	20.0
8	10	50	21.8	23.2	56.5	25.4	27.9	45.0	20.6	23.5	34.0
9	10	60	25.6	28.6	70.8	30.5	34.0	57.4	25.6	29.0	45.5
10	10	70									
11	10	80									

22/11/88

Ouvrage : LRPC			Elément : Hourdis Supérieur						Repère : 1 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)
1	2	2	-0.8	(-0.8)		-0.2	(-0.2)		0.1	(0.1)	
2	3	5	0.1	(0.1)		-0.1	(-0.1)		-0.2	(-0.2)	
3	5	10	6.6	(6.6)		2.7	(2.7)		3.0	(3.0)	
4	5	15	7.9	(8.5)		4.3	(4.8)		3.9	(4.8)	
5	5	20	7.9	9.1	19.5	6.5	7.4	9.5	4.4	6.1	5.5
6	10	30	11.5	13.6	34.3	9.1	10.1	20.1	5.7	7.4	10.8
7	10	40	17.6	19.1	44.0	14.7	15.3	30.1	10.2	11.5	18.5
8	10	50	22.3	22.8	54.3	23.8	24.0	41.4	20.7	21.4	31.8
9	10	60	27.2	27.6	64.3	27.8	30.1	51.5	24.4	24.2	45.5
10	10	70	30.0	29.9	72.5	27.2	27.8	59.0	22.1	29.7	50.0
11	10	80	34.1	34.6	82.5	30.8	34.8	69.4	24.7	33.2	64.3

13/06/89

Ouvrage : LB			Elément : Dalle chargée						Repère : 1 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)
1	2	2	-0.8	(-0.8)		-0.1	(-0.1)		0.1	(0.1)	
2	3	5	-3.8	(-3.8)		0.0	(0.0)		0.4	(0.4)	
3	5	10	-5.8	(-5.8)		0.3	(0.3)		0.2	(0.2)	
4	5	15	-6.4	(-6.3)		(0.4)	(0.4)		0.3	(0.5)	
5	5	20	-4.1	-3.9		1.8	1.9		0.7	1.0	
6	10	30	-1.5			5.0	5.4		2.7	3.8	
7	10	40									
8	10	50									
9	10	60									
10	10	70									
11	10	80									

14/06/89

Ouvrage : LB			Elément : Dalle non chargée						Repère : 2 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)	Déplacements Bruts (μm)	Déplacements Linéaires (μm)	Raideur apparente (μm/10MPa)
1	2	2	-1.0			-0.5			-0.5		
2	3	5	-4.6			-0.7			-0.7		
3	5	10	-13.9			-1.1			-1.2		
4	5	15	-15.3			-1.8			-1.7		
5	5	20	-16.1			-1.9			-1.5		
6	10	30	-18.8			-3.8			-2.9		
7	10	40	-19.6			-4.3			-3.0		
8	10	50	-22.3			-6.5			-5.1		
9	10	60	-23.8			-7.8			-6.8		
10	10	70	-24.8			-8.5			-7.4		
11	10	80									

14/06/89

Ouvrage : LB			Élément : Dalle non chargée						Repère : 3 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-3.1	(-3.1)		-0.7	(-0.7)		-0.4	(-0.4)	
2	3	5	-11.8	(-11.8)		-1.2	(1.2)		-0.6	(-0.6)	
3	5	10	-14.8	(-14.8)		-2.7	(-2.7)		-1.5	(-1.5)	
4	5	15	-15.1	(-15.5)		-1.0	(-1.0)		(3.5)		
5	5	20	-17.5	-18.2		-4.2	-4.1		-1.6	-0.5	
6	10	30	-21.4	-19.7		-7.4	-6.9		-5.0	-4.3	
7	10	40									
8	10	50									
9	10	60									
10	10	70									
11	10	80									

15/06/89

Ouvrage : LB			Élément : Dalle chargée						Repère : 4 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	2.0	(2.0)		0.0	(0.0)		0.3	(0.3)	
2	3	5	0.0	(0.0)		0.0	(0.0)		0.0	(0.0)	
3	5	10	2.5	(2.5)		-0.4	(-0.4)		-0.1	(-0.1)	
4	5	15	4.5	(3.3)		2.0	(2.0)		2.3	2.1	
5	5	20	6.5	4.5	11.3	2.8	2.7	8.0	1.7	1.3	4.5
6	10	30	11.5	11.1	25.2	8.4	8.9	20.0	5.0	5.5	13.2
7	10	40	17.4	18.5	40.7	16.9	16.4	33.8	12.7	12.4	25.8
8	10	50	26.0	26.5	56.8	24.3	24.2	47.0	18.6	18.7	36.0
9	10	60	34.6	35.0	71.5	33.8	33.8	61.9	28.2	28.2	50.7
10	10	70	41.2	40.3	78.7	41.6	41.8	73.4	36.0	36.0	61.6
11	10	80									

15/06/89

Ouvrage : LB			Élément : Dalle non chargée						Repère : 5 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-1.4	(-1.4)		-0.5	(-0.5)		-0.1	(-0.1)	
2	3	5	-3.0	(-3.0)		-0.6	(-0.6)		0.1	(0.1)	
3	5	10	-5.9	(-5.9)		-2.1	(-2.1)		-0.5	(-0.5)	
4	5	15	-7.8	(-7.6)		-3.8	(-3.5)		-1.7	(-1.4)	
5	5	20	-11.1	-10.7		-6.3	-5.8		-3.4	-2.8	
6	10	30	-15.3	-12.9		-10.4	-8.8		-6.8	-5.0	
7	10	40	-18.5	-16.0		-14.0	-11.9		-10.0	-7.9	
8	10	50	-20.0	-21.5		-15.9	-16.3		-12.8	-11.4	
9	10	60									
10	10	70									
11	10	80									

17/11/88

Ouvrage : Epr. Caus			Elément :						Repère : 1 ; 45°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-1.1			-0.5			-3.1		
2	3	5	-2.5			-0.5			-4.8		
3	5	10	-1.9			0.9			-9.9		
4	5	15	-2.1			0.4			-12.2		
5	5	20	-1.5			0.4			-13.6		
6	10	30	-0.6			0.7			-15.3		
7	10	40	-1.0			0.6			-15.5		
8	10	50									
9	10	60									
10	10	70									
11	10	80									

18/11/88

Ouvrage : Epr. Caus			Elément :						Repère : 2 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.1			-0.1			0.1		
2	3	5	-0.6			-0.2			-0.2		
3	5	10	-2.2			-1.7			-1.9		
4	5	15	-1.5			(-1.0)			-0.7		
5	5	20	-0.6			-0.7			-0.8		
6	10	30	0.1			-0.5			-1.5		
7	10	40	-0.3			-0.3			-1.6		
8	10	50									
9	10	60									
10	10	70									
11	10	80									

17/11/89

Ouvrage : Epr. Caus			Elément :						Repère : 3 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur	Déplacements		Raideur
			Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)	Bruts (µm)	Linéaires (µm)	apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.5	(-0.5)		-0.1	(-0.1)		-0.2	(-0.2)	
2	3	5	-1.7	(-1.7)		-0.3	(-0.3)		-0.6	(-0.6)	
3	5	10	-1.6	(-1.6)		-0.5	(-0.5)		-1.6	(-1.6)	
4	5	15	-0.8	(-0.8)		0.5	(0.5)		(-0.6)	(-0.6)	
5	5	20	-0.7	-0.7		-0.3	(-0.3)		-1.0	-1.0	
6	10	30	0.2	0.2		1.3	1.3		0.1	0.1	
7	10	40	1.0	1.0		1.9	1.9		0.7	0.7	
8	10	50	1.4	1.4		1.8	1.8		0.7	0.7	
9	10	60	1.9	1.9		2.1	2.1		0.9	0.9	
10	10	70									
11	10	80									

27/04/88

Ouvrage : VAUBAN			Élément : Ame						Repère : 1 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	-0.8	(-0.8)		-0.6	(-0.6)		-0.6	(-0.6)	
2	3	5	-0.9	(-0.9)		-1.3	(-1.3)		-1.4	(-1.4)	
3	5	10	2.7	(2.7)		0.6	(0.6)		-0.3	(-0.3)	
4	5	15	7.5	(7.9)		4.4	(4.6)		5.2	(5.4)	
5	5	20	12.8	13.6	20.5	4.6	5.0	9.3	2.4	2.7	4.8
6	10	30	20.8	22.2	31.7	12.8	14.5	21.0	9.9	11.4	12.9
7	10	40	28.1	29.0	40.3	19.9	20.8	29.6	16.2	17.8	21.0
8	10	50	36.0	36.0	52.2	28.6	29.0	41.4	24.8	25.0	30.0
9	10	60	47.1	49.0	64.1	39.2	41.2	52.8	36.5	38.5	40.0
10	10	70									
11	10	80									

28/04/88

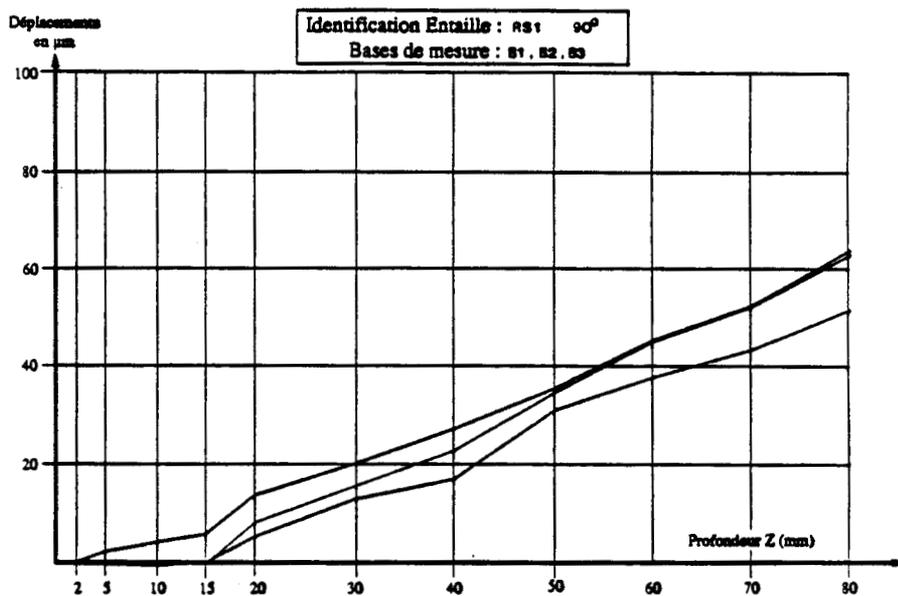
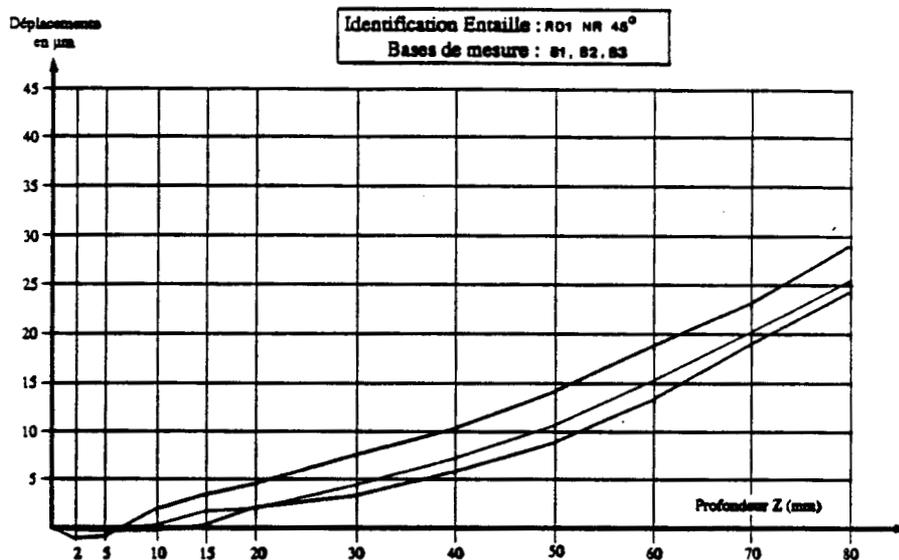
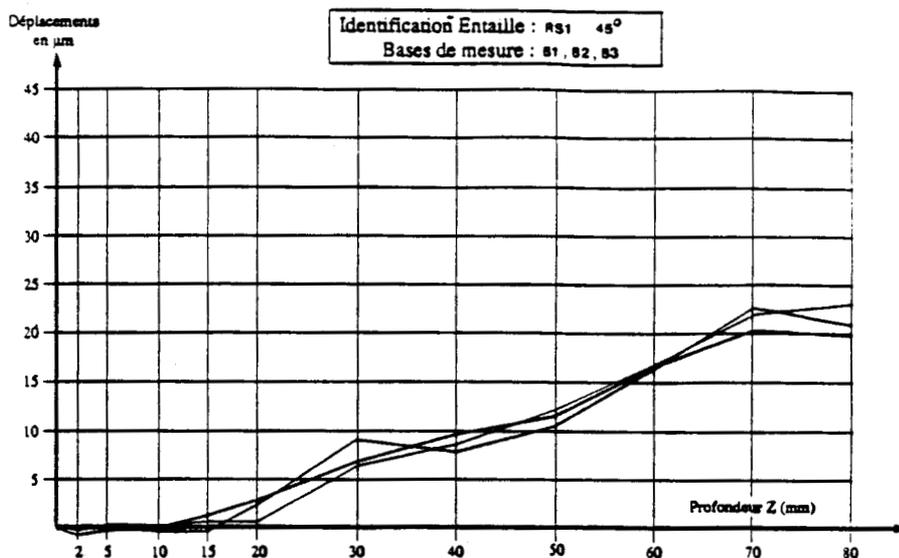
Ouvrage : VAUBAN			Élément : Ame						Repère : 2 ; 90°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	0.1	(0.1)		-0.3	(-0.3)		-0.4	(-0.4)	
2	3	5	1.1	(1.1)		1.2	(1.2)		0.8	(0.8)	
3	5	10	5.0	(5.0)		1.7	(1.7)		-0.4	(-0.4)	
4	5	15	9.8	(10.2)		6.5	(6.7)		5.1	(5.6)	
5	5	20	14.2	14.9	24.4	10.0	10.4	10.4	6.3	7.3	6.1
6	10	30	21.5	21.6	35.8	20.4	21.0	22.5	12.9	13.9	13.3
7	10	40	29.5	30.6	43.5	31.3	32.6	32.3	22.0	23.8	21.6
8	10	50	33.8	37.4	54.2	37.3	40.3	46.2	24.7	26.6	30.0
9	10	60	40.3	44.8	63.1	43.4	46.7	54.6	29.5	31.5	39.8
10	10	70									
11	10	80									

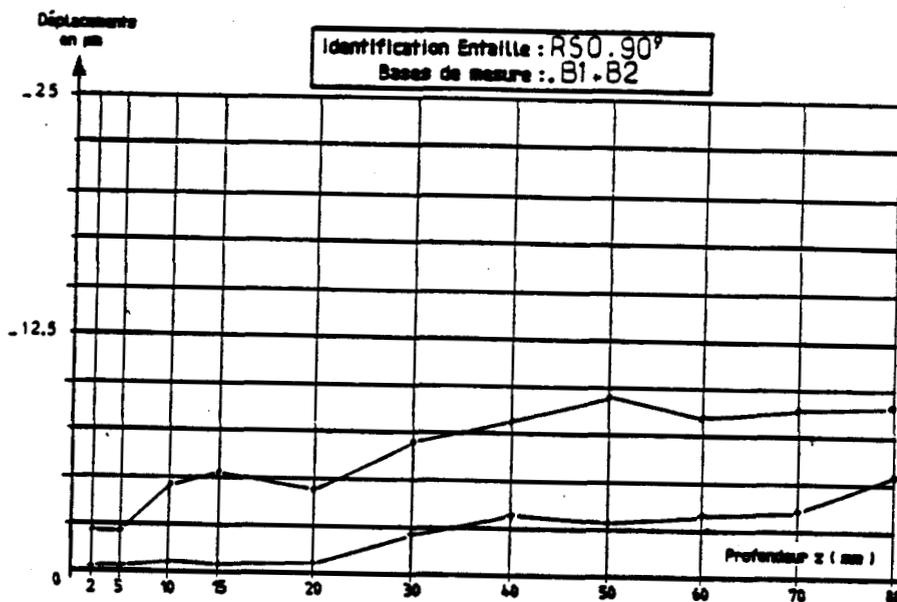
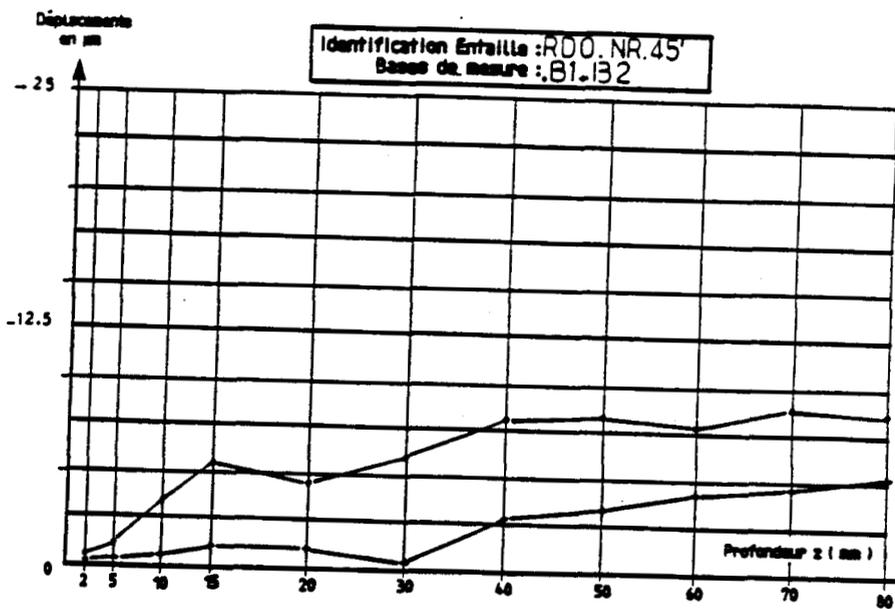
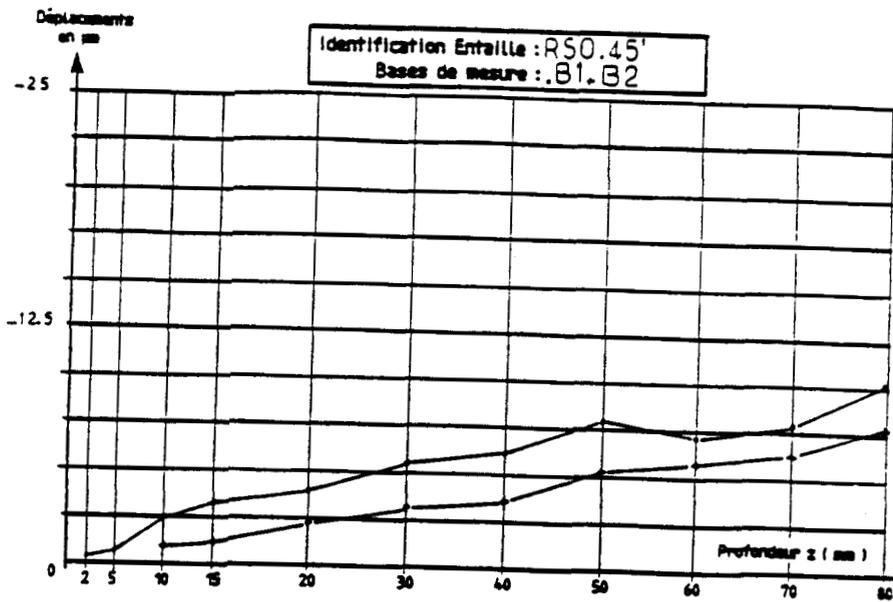
26/04/88

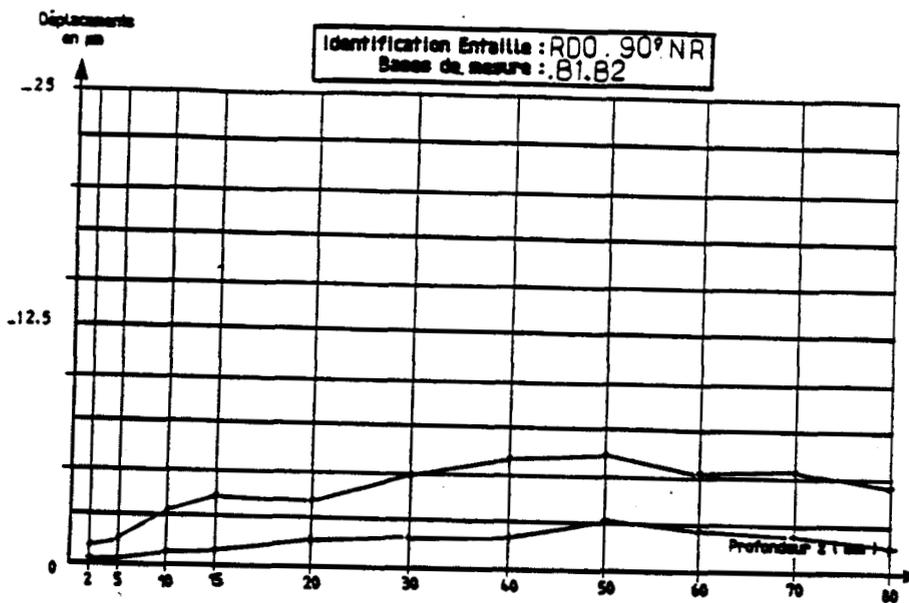
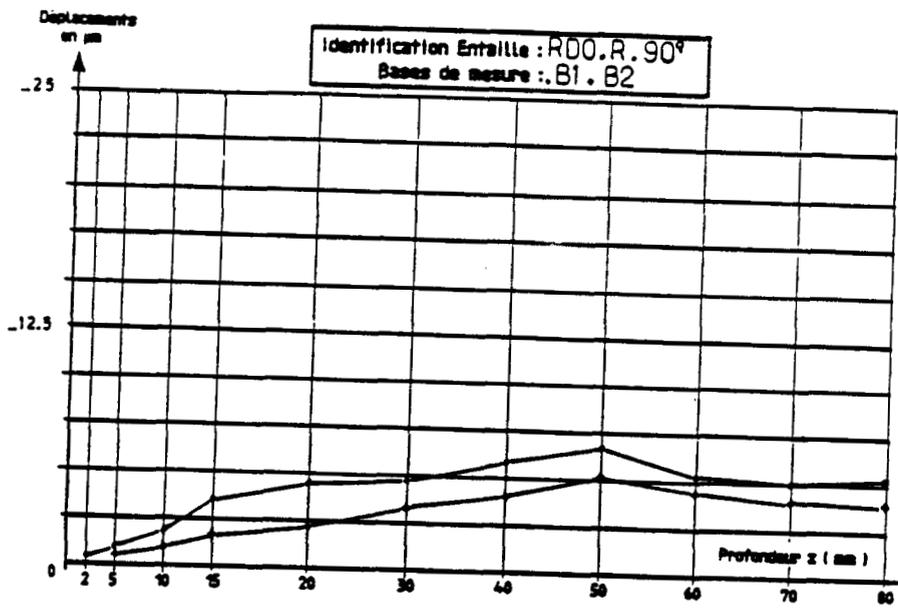
Ouvrage : VAUBAN			Élément : Hourdis supérieur						Repère : 3 ; 45°		
Définition des tranches			Base 1			Base 2			Base 3		
N°	h (mm)	z (mm)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)	Déplacements Bruts (µm)	Déplacements Linéaires (µm)	Raideur apparente (µm/10MPa)
1	2	2	0.4	(0.4)		0.0	(0.0)		-0.6	(-0.6)	
2	3	5	0.1	(0.1)		0.0	(0.0)		-0.9	(-0.9)	
3	5	10	0.7	(0.7)		0.1	(0.1)		-0.3	(-0.3)	
4	5	15	0.9	(0.9)		1.6	(1.7)		1.4	(1.6)	
5	5	20	-1.3	-1.4	15.3	0.5	0.4	6.7	1.4	1.7	
6	10	30	0.0	0.3	25.0	0.4	0.7	15.2	-1.4	-1.1	
7	10	40	-1.7	2.3	38.3	0.0	-0.7	25.0	-3.8	-3.9	
8	10	50	3.7	4.8	47.5	1.3	2.1	36.2	-3.2	-2.4	
9	10	60	-0.2	1.3	65.0	0.1	1.3	50.0	1.1	1.6	
10	10	70									
11	10	80									

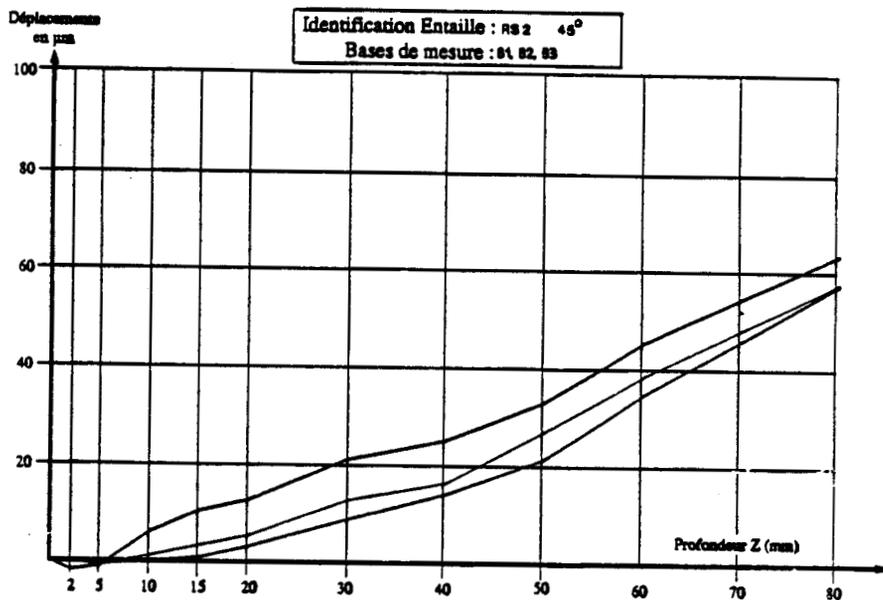
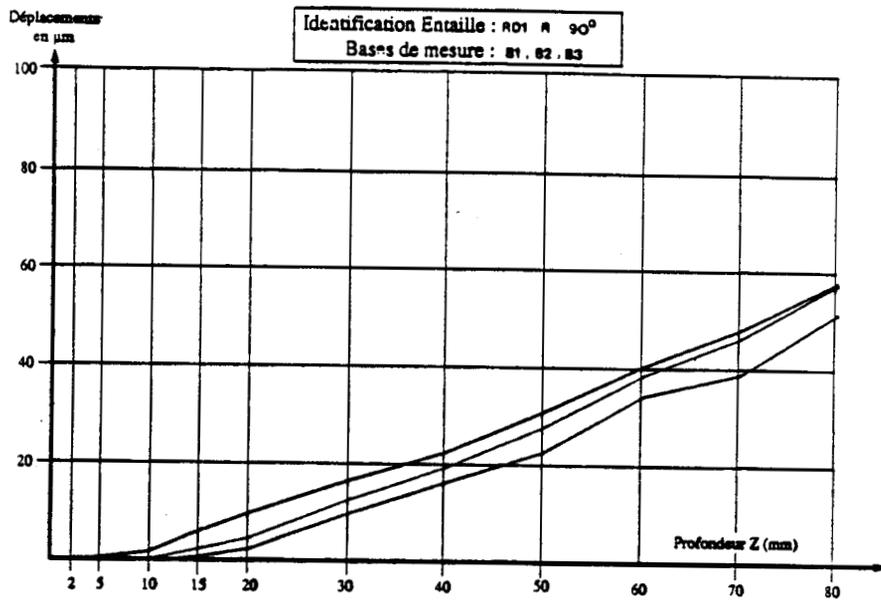
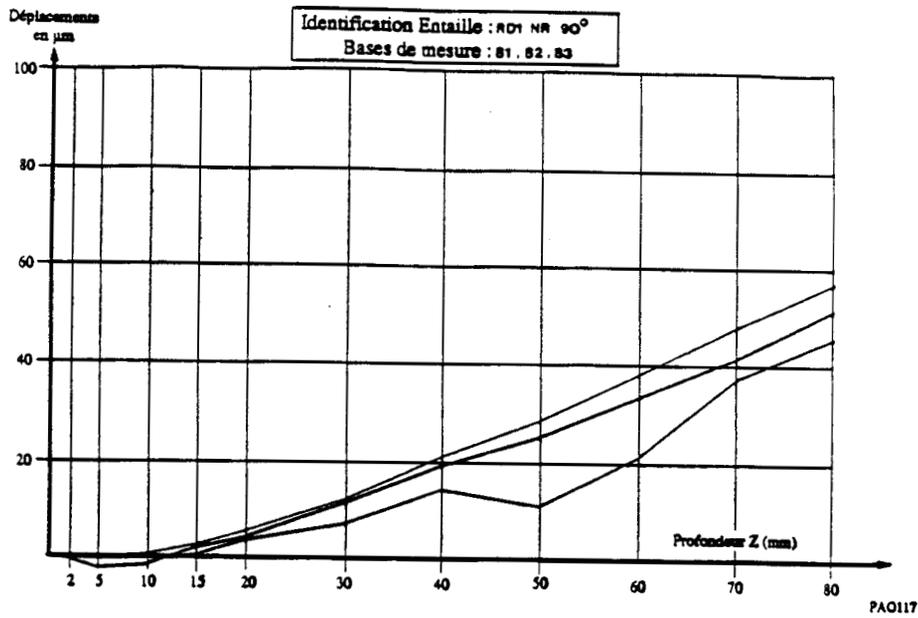
# LIBERATION DE CONTRAINTES SUR BETON

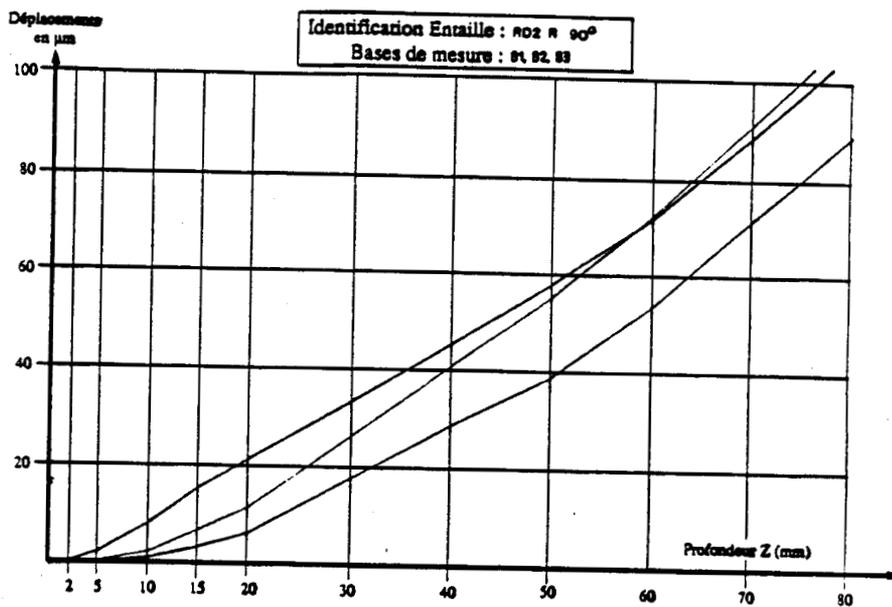
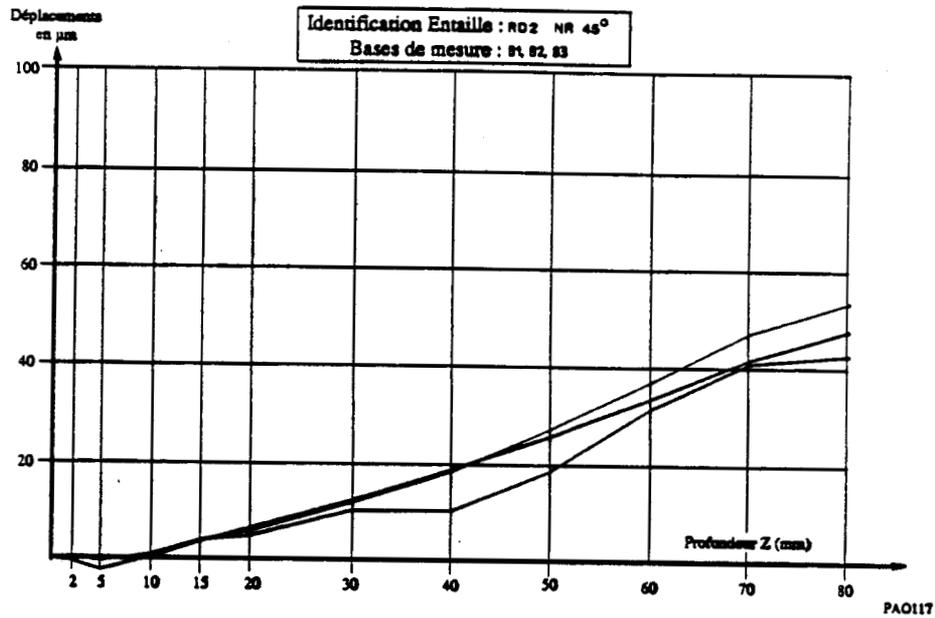
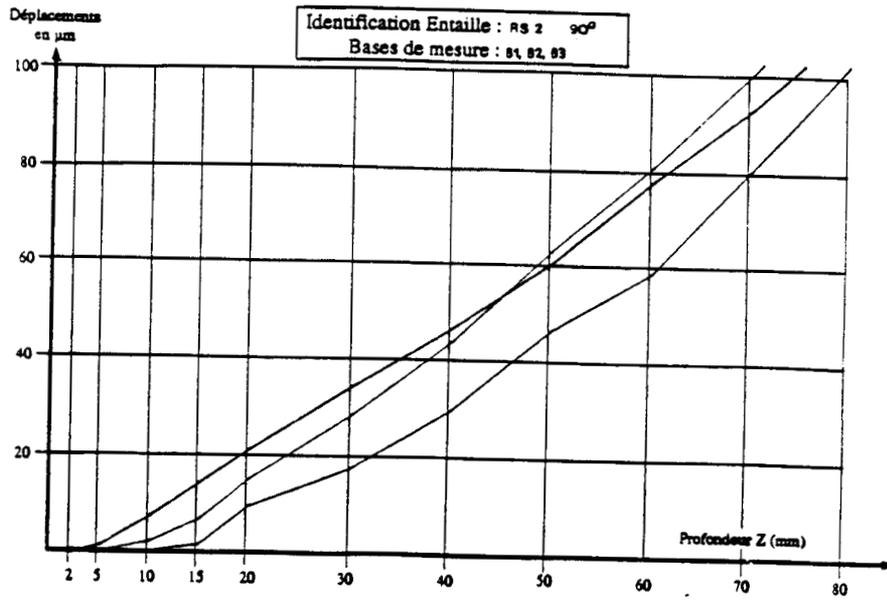
## Graphes des déplacements corrigés en fonction de la profondeur de l'entaille

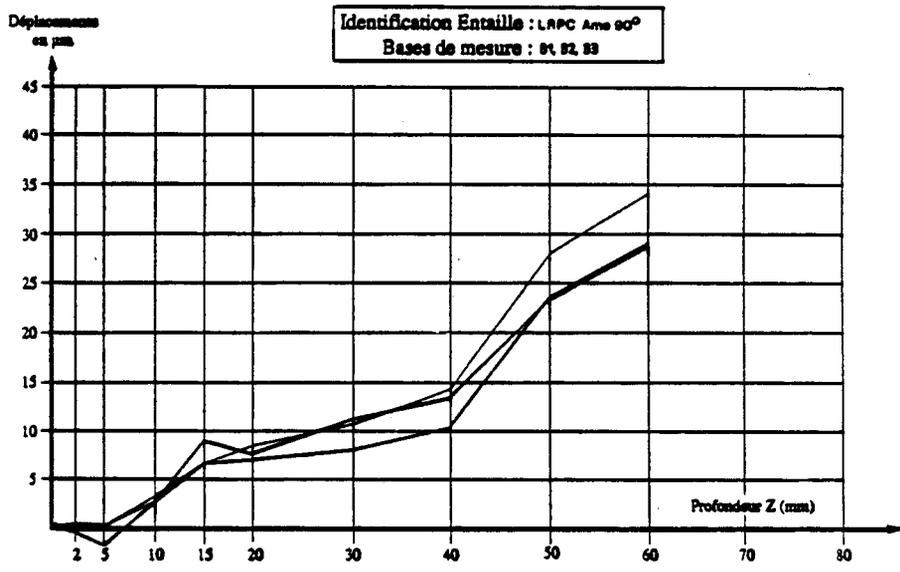
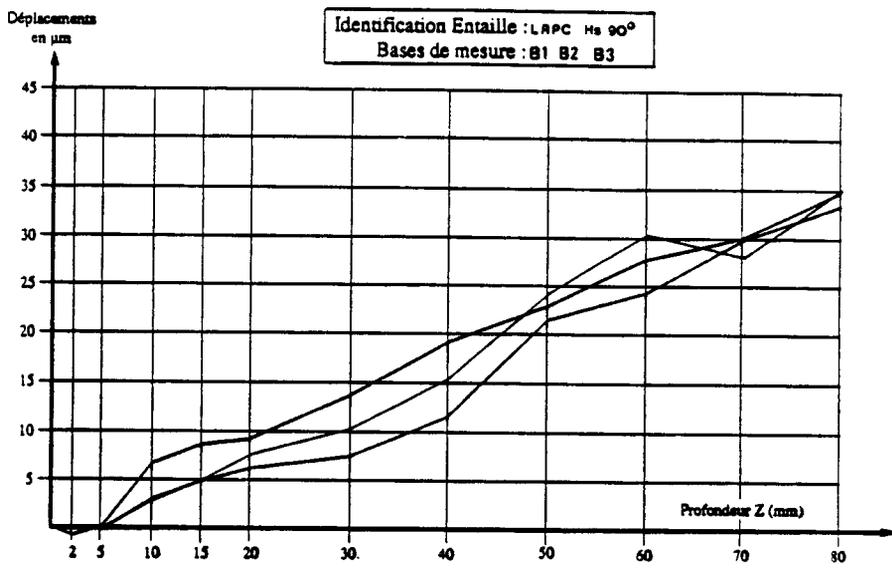
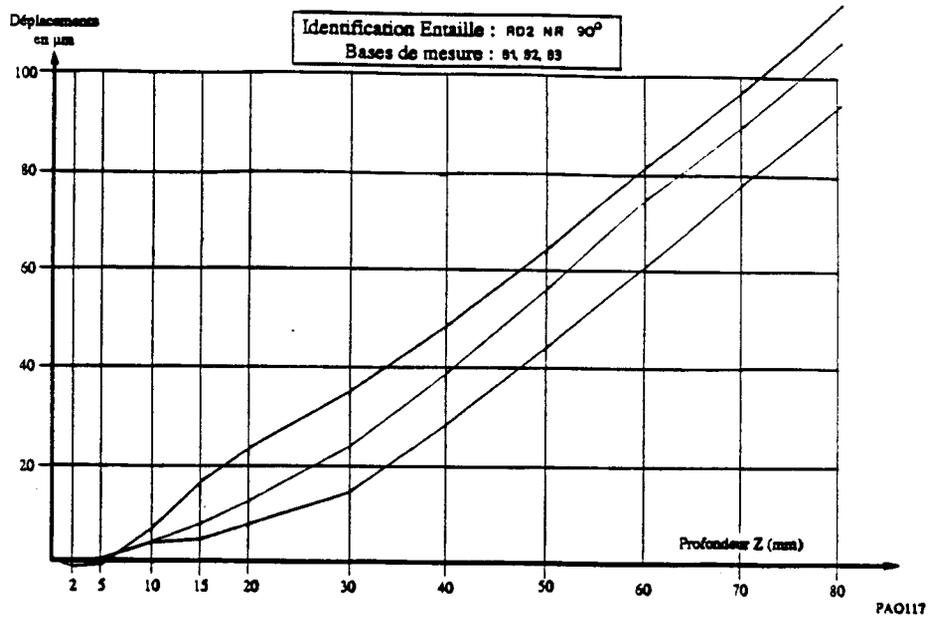


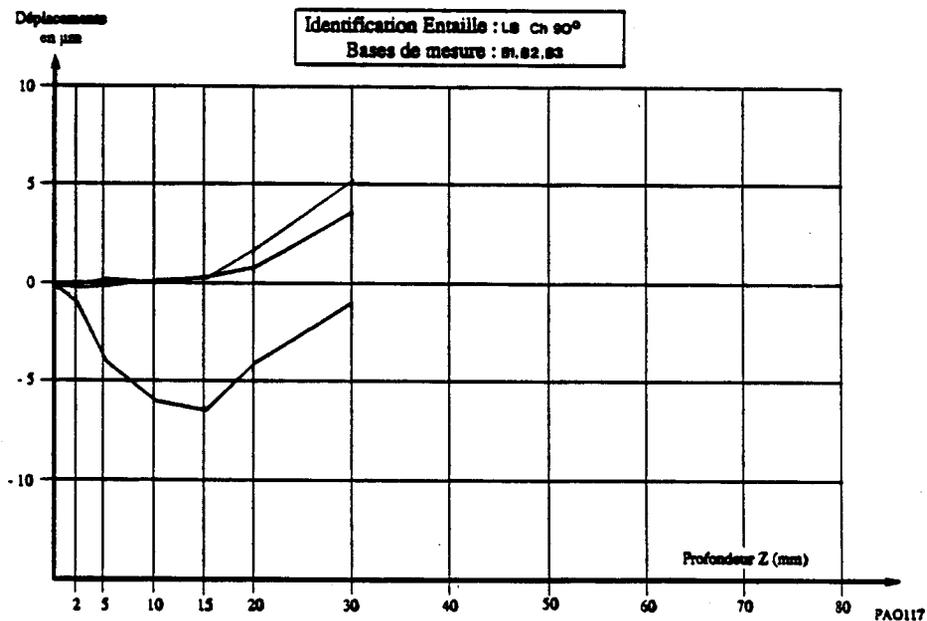
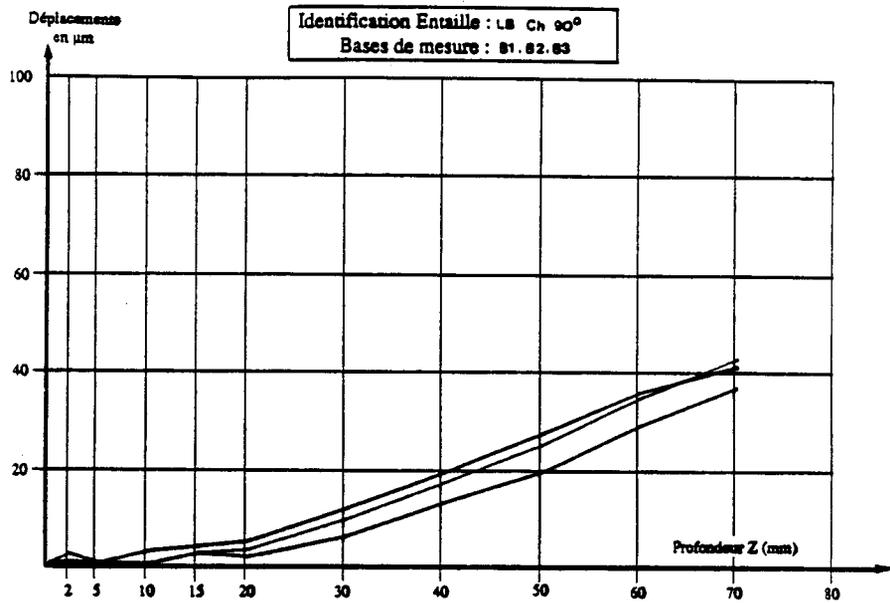
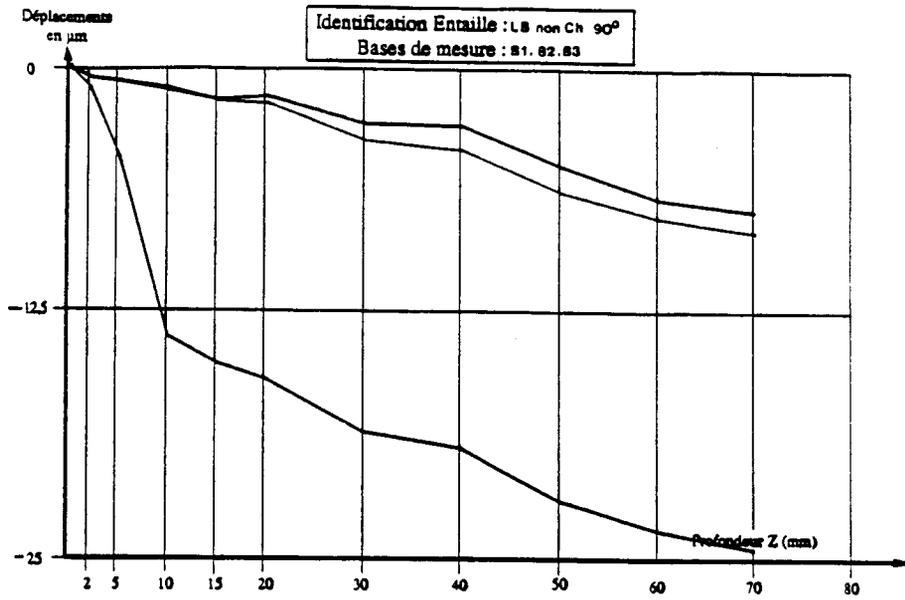


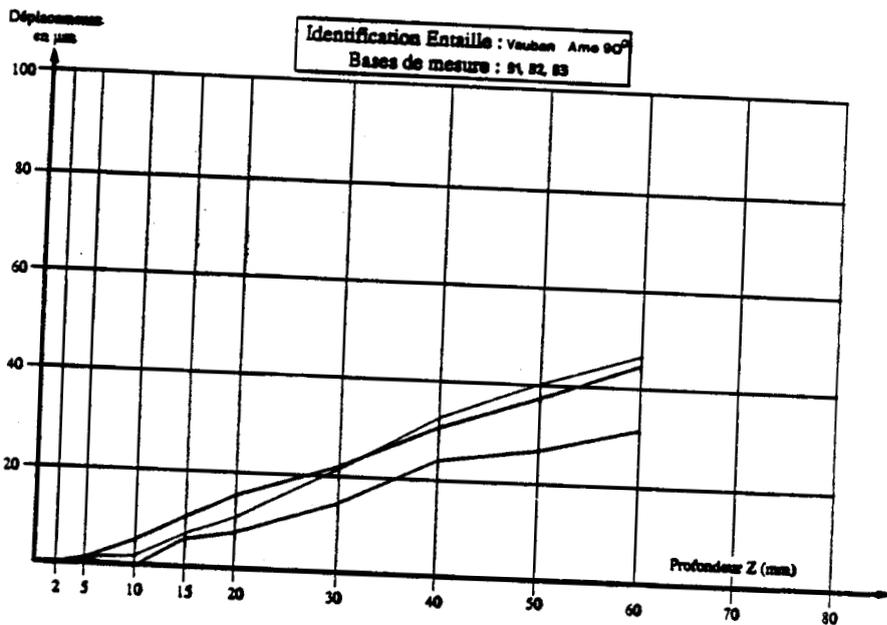
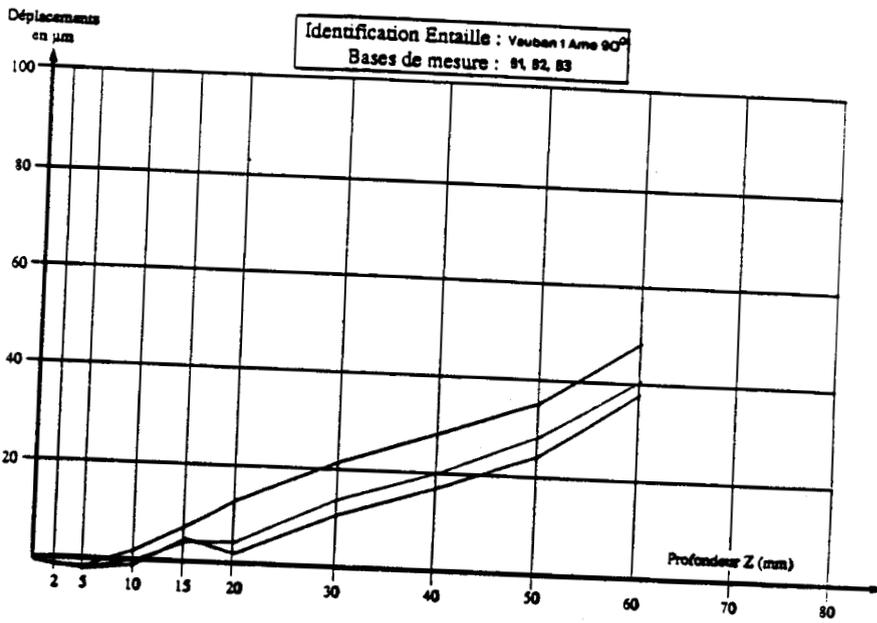
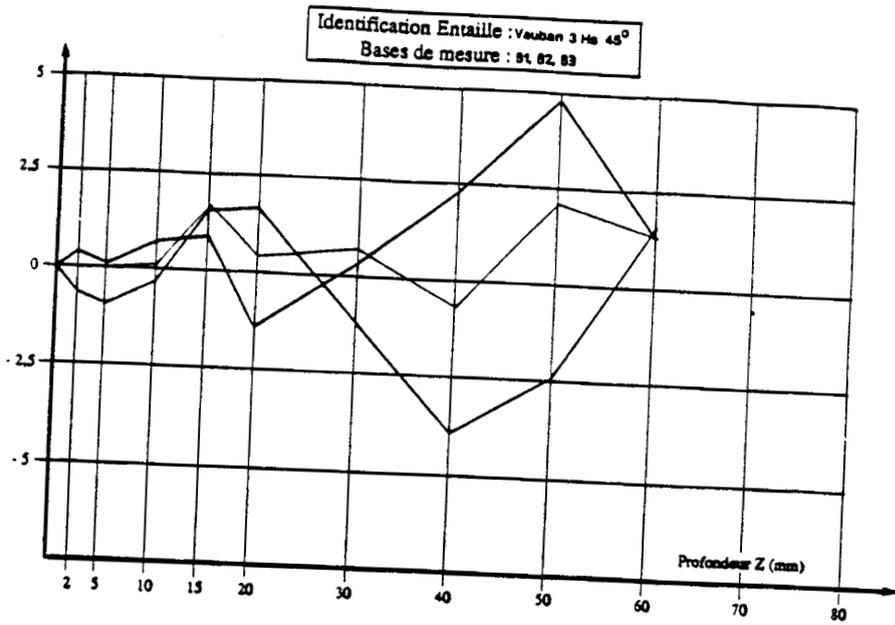


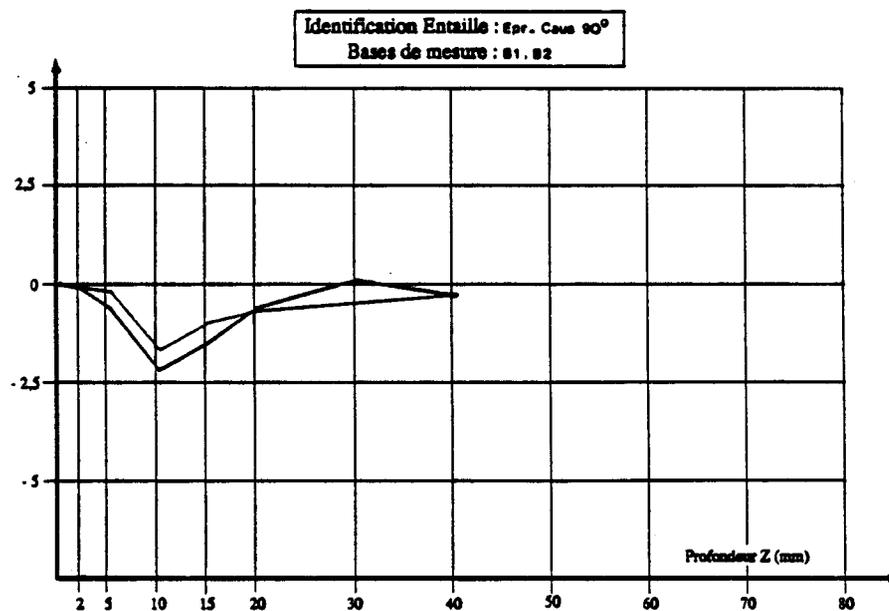
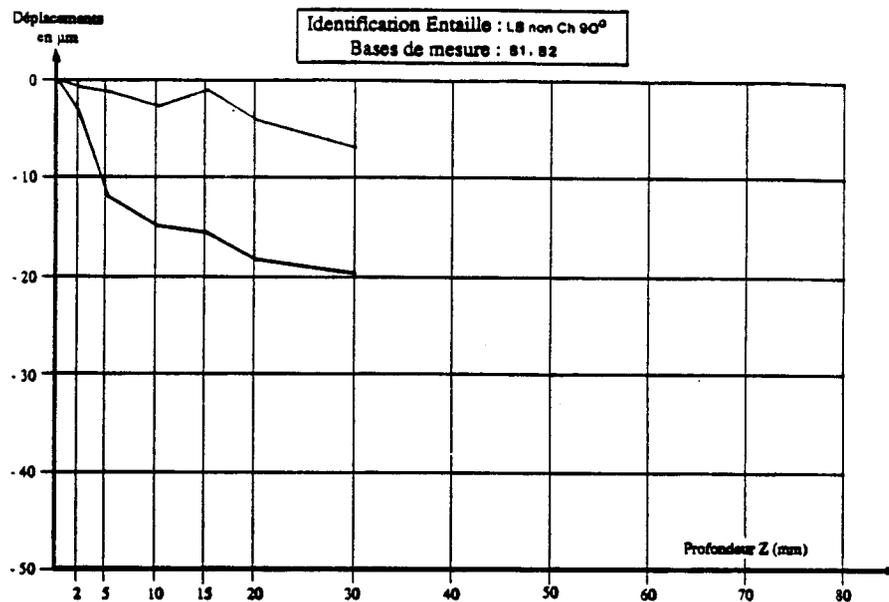
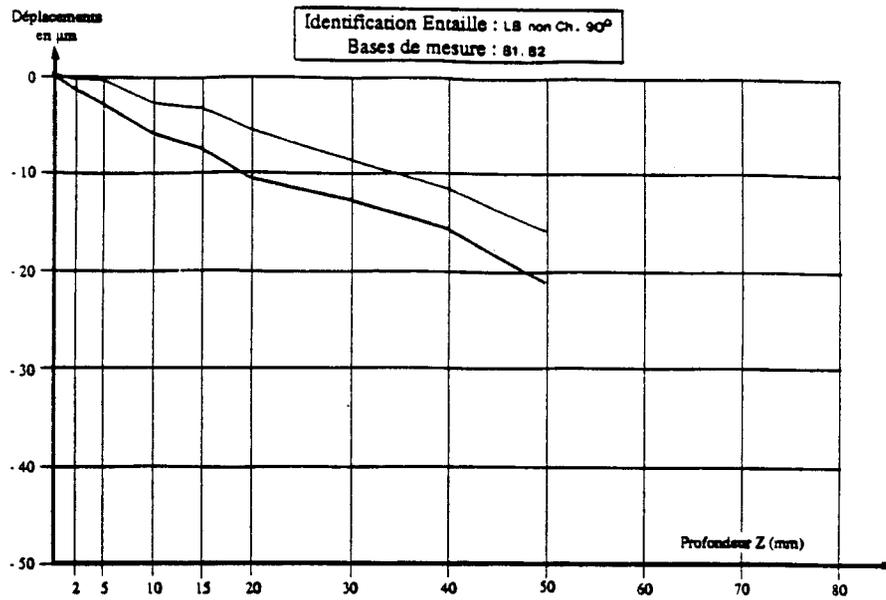




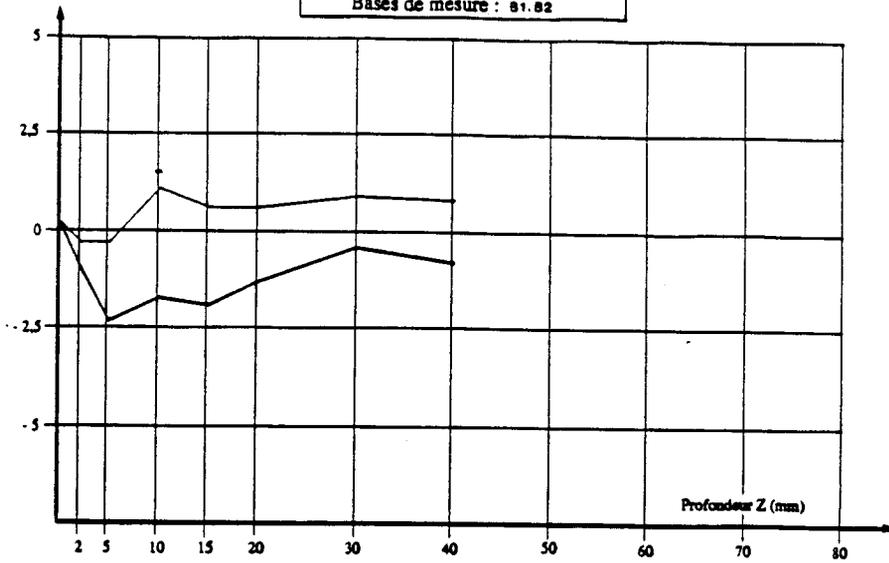




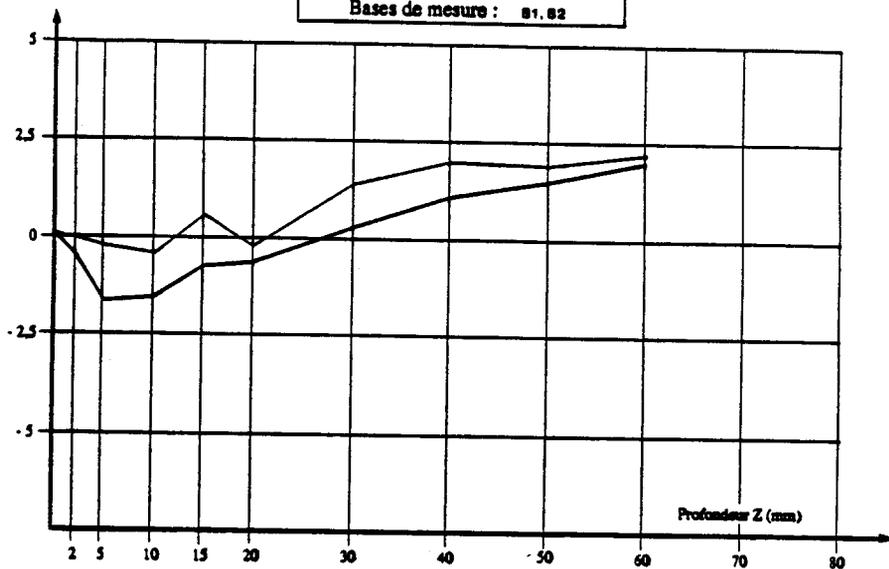




Identification Entaille : Epr. Caus 45°  
Bases de mesure : 81, 82

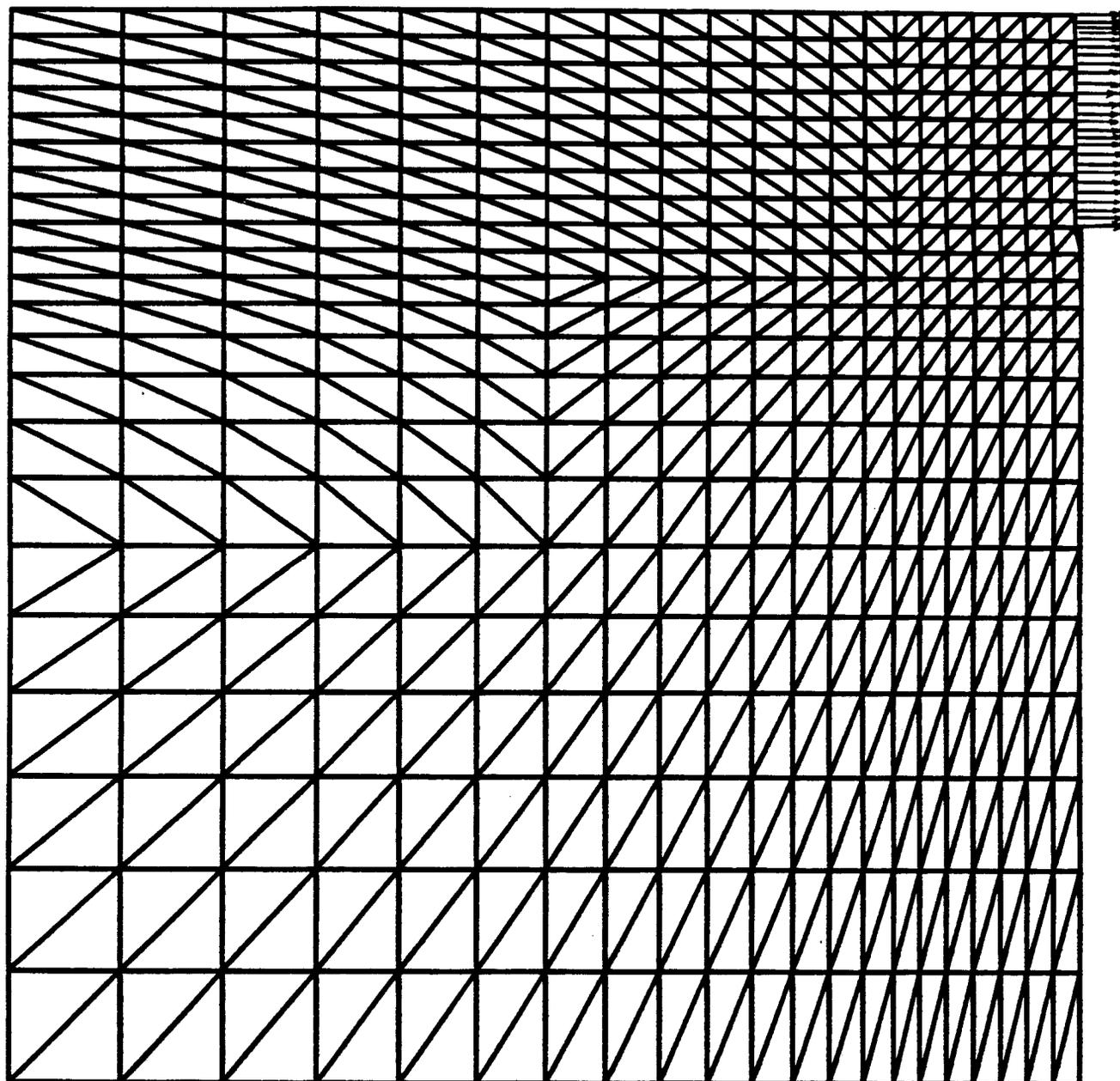


Identification Entaille : Epr. Caus 90°  
Bases de mesure : 81, 82



## **ANNEXE 3**

- . Modelisation en deux dimensions d'une demi-section de dalle au voisinage de l'entaille
- . Exemple des résultats obtenus
- . Evaluation directe des contraintes dans la dalle RD1, en supposant que le module E varie avec la profondeur/parement

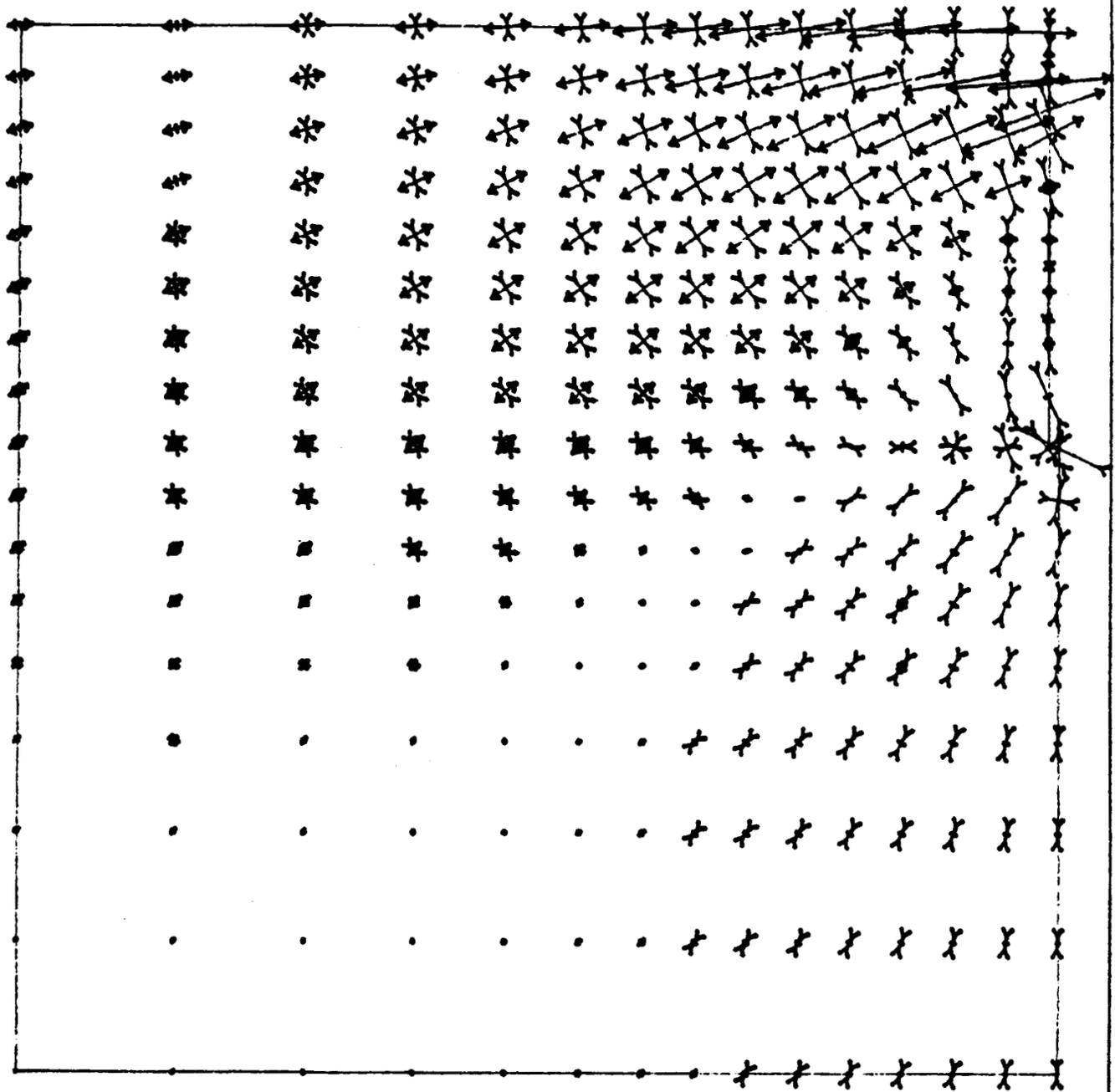


Etude : LIB002 Cas de charge : 1

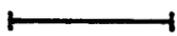
TRACE DE MAILLAGE

ACORD-2D

ITECH



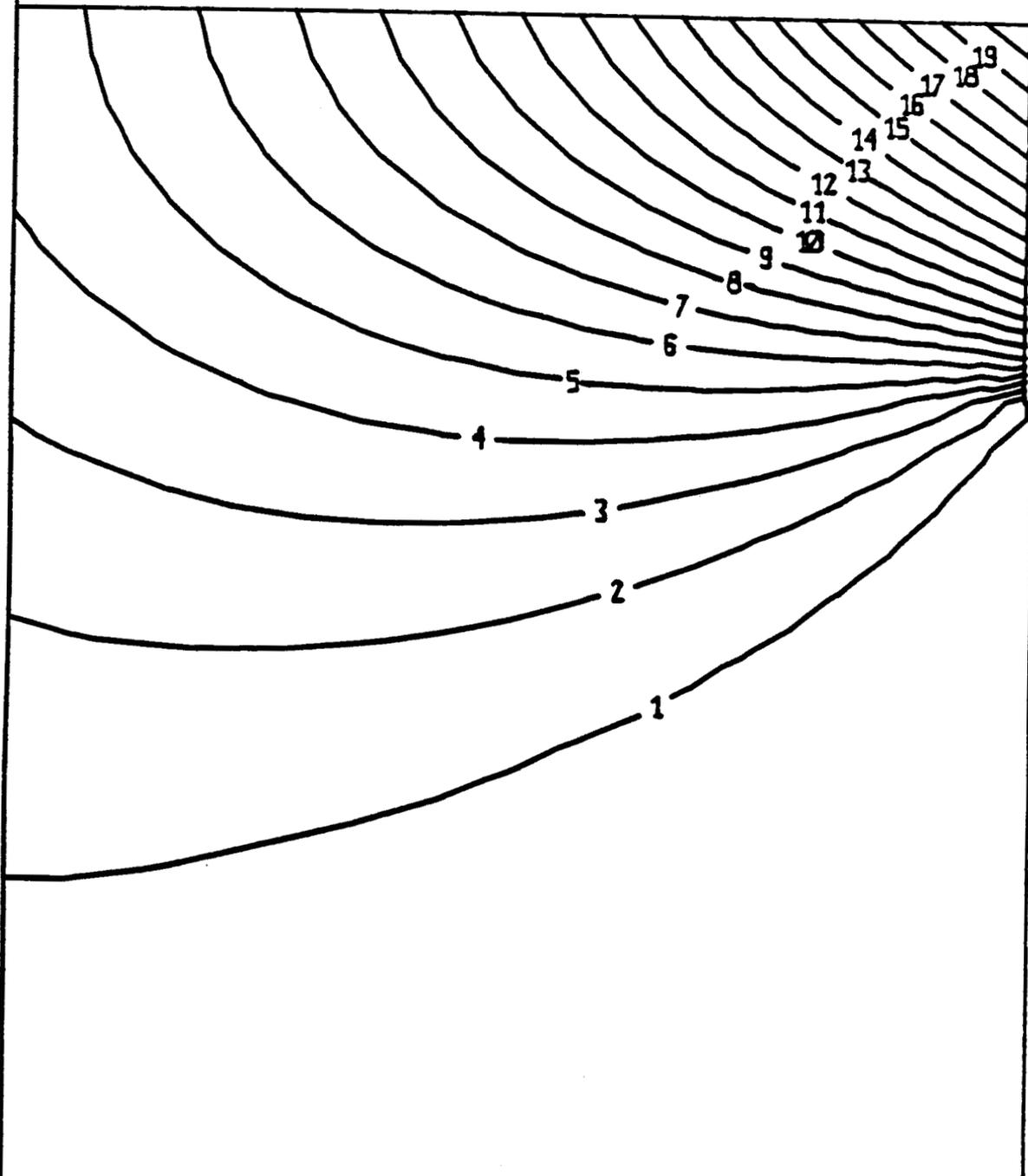
- Echelle -



.245E-03

Etude : LIB003 Cas de charge : 1

DEFORMATIONS PRINCIPALES



1: .169E-02	13: .295E-01
5: .112E-01	17: .388E-01
9: .203E-01	20: .458E-01

Etude : LIBCOZ Cas de charge : 1

ISOVALEURS DE DEPLACEMENT X

		Matrice inverse pondérée (M-1)										RD1 NR 45° (file 1)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	118.48											-1.00	-11.85
5	2	-139.39	58.54										-0.80	9.26
10	3	46.74	-72.32	29.27									2.00	6.97
15	4	-13.72	47.42	-72.05	38.28								3.50	-3.43
20	5v	1.35	-22.46	57.29	-97.82	55.29							4.60	4.32
30	6v	-3.01	11.40	-13.78	44.08	-60.32	21.85						7.60	0.92
40	7v	9.40	-9.81	6.87	-21.58	44.94	-53.98	30.27					10.30	4.49
50	8v	-15.16	7.36	-1.26	7.66	-19.01	41.32	-72.19	36.50				14.10	3.13
60	9v	17.63	-5.57	0.49	-1.90	9.06	-20.78	58.21	-87.60	43.15			18.80	4.05
70	10v	-3.90	5.56	-0.63	2.66	-7.50	14.83	-29.53	69.44	-99.97	52.49		23.30	10.42
80	11v	-5.00	-4.79	-6.92	8.68	1.13	-6.97	14.42	-35.58	78.03	-121.14	57.56	29.20	-5.04

Cont. moy = 3.33

		Matrice inverse pondérée (M-1)										RD1 NR 45° (file 2)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	3459.9											-0.30	-103.80
5	2	-5586.7	761.8										-0.30	144.75
10	3	3038.6	-790.1	114.2									0.30	-64.03
15	4	-1577.7	457.3	-236.5	102.3								1.70	43.90
20	5v	840.9	-215.2	170.5	-233.7	111.3							2.00	-31.13
30	6v	-287.9	78.2	-45.4	109.8	-124.0	31.3						4.40	12.58
40	7v	213.2	-75.3	34.2	-80.6	110.9	-89.5	42.5					7.20	-3.43
50	8v	-189.3	79.3	-22.7	62.6	-77.5	98.2	-123.8	53.9				10.60	8.98
60	9v	255.2	-77.8	15.4	-44.8	59.3	-73.2	142.1	-157.9	64.0			15.20	-0.58
70	10v	-358.9	78.6	-9.0	30.9	-42.3	58.4	-110.2	183.7	-187.6	76.9		20.30	16.84
80	11v	446.5	-75.7	2.1	-18.3	29.3	-43.8	87.5	-143.2	220.0	-226.1	86.2	25.60	-20.31

Cont. moy = 2.35

		Matrice inverse pondérée (M-1)										RD1 NR 45° (file 3)		
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	Déplacement (µm)	Contrainte (MPa)
2	1	5660.0											-0.10	-56.60
5	2	-9763.5	1415.0										-0.20	69.34
10	3	5955.7	-1617.8	188.7									-0.20	-30.97
15	4	-3610.5	1132.7	-415.7	157.7								0.40	28.07
20	5v	1970.2	-608.9	342.0	-359.7	146.3							2.20	3.42
30	6v	-618.2	202.9	-108.4	178.3	-160.6	51.3						3.40	-6.46
40	7v	496.2	-158.6	89.2	-145.3	151.3	-133.1	50.0					5.90	8.15
50	8v	-407.1	130.1	-67.6	116.2	-112.5	137.8	-136.6	57.0				8.90	-0.29
60	9v	280.9	-93.5	51.7	-87.3	85.0	-102.2	149.2	-160.4	65.2			13.30	10.50
70	10v	-124.4	55.7	-40.6	70.8	-66.6	81.6	-114.3	180.4	-186.5	74.1		19.10	3.42
80	11v	-64.2	-6.3	29.5	-58.4	54.2	-64.1	91.6	-139.4	214.2	-214.7	82.9	24.50	-4.22

Cont. moy = 4.21

		RDI NR 90° (file 1)										Déplacement Contrainte		
		Matrice inverse pondérée (M-1)										(µm)	(MPa)	
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10		
2	1	148.27											-0.50	-7.41
5	2	-174.44	73.27										-2.40	-8.86
10	3	58.49	-90.50	36.63									-1.70	12.57
15	4	-17.17	59.34	-90.17	47.90								1.70	10.09
20	5v	1.69	-28.11	71.70	-122.42	69.19							4.00	1.34
30	6v	-3.76	14.27	-17.25	55.16	-75.49	21.73						11.00	2.78
40	7v	11.76	-12.27	8.60	-27.01	56.24	-53.68	27.15					18.80	10.80
50	8v	-18.98	9.21	-1.58	9.59	-23.80	41.10	-64.75	36.67				24.80	5.53
60	9v	22.06	-6.97	0.62	-2.38	11.34	-20.67	52.22	-88.01	44.36			33.00	8.09
70	10v	-4.88	6.96	-0.78	3.33	-9.38	14.75	-26.49	69.76	-102.74	52.15		41.20	10.76
80	11v	-6.26	-5.99	-8.67	10.86	1.41	-6.93	12.93	-35.75	80.19	-120.34	57.91	51.20	-0.98
													Cont. moy =	5.15

		RDI NR 90° (file 2)										Déplacement Contraint		
		Matrice inverse pondérée (M-1)										(µm)	(MPa)	
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10		
2	1	3037.0											-0.30	-91.11
5	2	-4903.8	668.7										-0.10	140.43
10	3	2667.2	-693.5	100.3									0.40	-69.07
15	4	-1384.8	401.4	-207.6	89.8								2.30	49.87
20	5v	738.1	-188.9	149.7	-205.2	97.7							5.20	-10.65
30	6v	-252.7	68.7	-39.8	96.4	-108.9	27.4						11.70	2.91
40	7v	187.1	-66.1	30.0	-70.8	97.4	-78.3	35.7					20.60	12.67
50	8v	-166.2	69.6	-19.9	55.0	-68.0	85.9	-104.2	47.8				28.10	0.94
60	9v	224.0	-68.3	13.5	-39.3	52.0	-64.0	119.6	-140.1	58.1			37.70	9.48
70	10v	-315.1	69.0	-7.9	27.1	-37.2	51.1	-92.8	162.9	-170.3	62.4		47.60	-22.98
80	11v	391.9	-66.4	1.9	-16.1	25.8	-38.3	73.6	-127.0	199.7	-183.6	80.5	56.70	84.10
													Cont. moy =	6.48

		RDI NR 90° (file 3)										Déplacement Contrainte		
		Matrice inverse pondérée (M-1)										(µm)	(MPa)	
Z (mm)		2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10		
2	1	6930.6											-0.20	-138.61
5	2	-11955	1732.7										-0.50	152.47
10	3	7292.7	-1981.0	231.0									-0.20	-51.43
15	4	-4421.0	1387.0	-509.0	193.1								0.30	35.04
20	5v	2412.5	-745.6	418.8	-440.5	179.1							3.40	28.33
30	6v	-757.0	248.4	-132.7	218.4	-196.6	48.1						6.80	-22.23
40	7v	607.6	-194.2	109.3	-177.9	185.2	-124.8	48.8					14.00	36.47
50	8v	-498.5	159.3	-82.8	142.3	-137.8	129.2	-133.2	55.8				18.70	-33.28
60	9v	344.0	-114.5	63.3	-106.9	104.0	-95.8	145.5	-156.9	62.2			29.80	60.35
70	10v	-152.3	68.2	-49.7	86.7	-81.5	76.5	-111.4	176.5	-178.0	75.4		37.00	-49.68
80	11v	-78.7	-7.7	36.2	-71.5	66.3	-60.1	89.4	-136.4	204.4	-218.7	86.1	45.50	42.71
													Cont. moy =	12.81

RD1 R 90° (file 1)

Z(mm)	Matrice inverse pondérée (N-1)											Déplacement Contrainte	
	2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)
2	1	114.64										0.10	1.15
5	2	-134.87	56.64									0.40	0.92
10	3	45.22	-69.97	28.32								1.60	2.18
15	4	-13.27	45.88	-69.72	37.04							5.90	12.40
20	5v	1.31	-21.73	55.43	-94.65	53.50						9.60	3.53
30	6v	-2.91	11.03	-13.34	42.65	-58.36	24.72					16.30	7.70
40	7v	9.09	-9.49	6.65	-20.88	43.48	-61.06	32.66				22.20	3.17
50	8v	-14.67	7.12	-1.22	7.41	-18.40	46.75	-77.88	39.82			30.60	11.83
60	9v	17.05	-5.39	0.48	-1.84	8.77	-23.51	62.80	-95.58	49.03		39.90	11.62
70	10v	-3.77	5.38	-0.60	2.58	-7.25	16.77	-31.86	75.76	-113.60	56.80	47.50	-0.38
80	11v	-4.84	-4.63	-6.70	8.39	1.09	-7.88	15.55	-38.82	88.67	-131.08	63.69	3.71

Cont. moy = 6.10

RD1 R 90° (file 2)

Z(mm)	Matrice inverse pondérée (N-1)											Déplacement Contrainte	
	2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)
2	1	3037.0										-0.20	-60.74
5	2	-4903.8	668.7									-0.30	78.02
10	3	2667.2	-693.5	100.3								0.00	-32.54
15	4	-1384.8	401.4	-207.6	89.8							2.10	34.50
20	5v	738.1	-188.9	149.7	-205.2	97.7						4.40	-9.19
30	6v	-252.7	68.7	-39.8	96.4	-108.9	29.9					12.20	11.80
40	7v	187.1	-66.1	30.0	-70.8	97.4	-85.4	41.1				19.00	0.19
50	8v	-166.2	69.6	-19.9	55.0	-68.0	93.7	-119.9	52.8			27.40	14.05
60	9v	224.0	-68.3	13.5	-39.3	52.0	-69.8	137.7	-154.8	63.9		37.90	6.83
70	10v	-315.1	69.0	-7.9	27.1	-37.2	55.7	-106.8	180.0	-187.3	78.2	45.70	-0.93
80	11v	391.9	-66.4	1.9	-16.1	25.8	-41.8	84.7	-140.3	219.7	-229.9	88.5	12.55

Cont. moy = 6.06

RD1 R 90° (file 3)

Z(mm)	Matrice inverse pondérée (N-1)											Déplacement Contrainte	
	2	3	5	5	5	10	10	10	10	10	10	(µm)	(MPa)
2	1	6407.5										-0.10	-64.08
5	2	-11053	1601.9									-0.30	62.47
10	3	6742.3	-1831.5	213.6								-0.30	-18.89
15	4	-4087.4	1282.3	-470.6	178.5							0.60	27.23
20	5v	2230.4	-689.3	387.2	-407.2	165.6						2.20	-1.25
30	6v	-699.8	229.7	-122.7	201.9	-181.8	44.0					9.50	17.67
40	7v	561.8	-179.6	101.0	-164.5	171.3	-114.1	47.6				16.00	-7.67
50	8v	-460.9	147.3	-76.6	131.6	-127.4	118.1	-130.0	57.3			22.30	14.42
60	9v	318.0	-105.9	58.5	-98.9	96.2	-87.6	142.0	-161.3	63.7		33.80	13.04
70	10v	-140.8	63.0	-45.9	80.2	-75.4	69.9	-108.7	181.4	-182.2	78.3	39.40	-20.85
80	11v	-72.7	-7.1	33.4	-66.1	61.3	-55.0	87.2	-140.2	209.2	-227.1	89.7	51.94

Cont. moy = 6.99

## ANNEXE 4

### Programme d'exploitation automatique des résultats de mesure (Tableur SMART)

Fichier de commandes LC80F1

```
-----  
1: pas-a-pas n.f.  
2: opérations-matricielles inverser 194:104c6:16 nouvelle-matrice 1111:121c6:  
16  
3: opérations-matricielles multiplier 1111:121c6:16 par 169:79c3 nouvelle-mat  
rice 169:79c7  
4:  
5: 163c18 = 1000  
6: 163c17 = 1000  
7: 163c16 = 1000  
8: $amin = 162c12  
9:  
10: $oA1 = 159c13  
11: $oB1 = 160c13  
12: $oC1 = 161c13  
13: $oA2 = 159c14  
14: $oB2 = 160c14  
15: $oC2 = 161c14  
16: $oA3 = -$oA2  
17: $oB3 = -$oB2  
18: $oC3 = -$oC2  
19:  
20: $Amin = 159c10  
21: $Amax = 159c11  
22: $Bmin = 160c10  
23: $Bmax = 160c11  
24: $Cmin = 161c10  
25: $Cmax = 161c11  
26:  
27: $Aminr = $Amin - $oA1  
28: $Bminr = $Bmin - $oB1  
29: $Cminr = $Cmin - $oC1  
30: $A = $Amin  
31: $B = $Bmin  
32: $C = $Cmin  
33: $oC = $oC1  
34: $dc1 = $amin  
35: $dc0 = $aminr  
36:  
37: tantque $C (<= $Cmax  
38:  
39:     $C = $Cmin + $oC  
40:     $oA = $oA1  
41:     $da1 = $amin  
42:     $da0 = $aminr  
43:  
44:     tantque $A (<= $Amax  
45:  
46:         $A = $Amin + $oA  
47:         $oB = $oB1  
48:         $dB1 = $amin  
49:         $dB0 = $aminr  
50:  
51:         tantque $B (<= $Bmax  
52:  
53:             $B = $Bmin + $oB  
54:
```

```

55:                                169c6 = $A
56:                                170c6 = $B
57:                                171c6 = $C
58:
59:                                recalculer
60:
61:  opérations-matricielles multiplier 194:104c6:16 par 169:79c11 nouvelle-ma
trice 169:79c10
62:
63:                                $db2 = 132c9
64:
65:                                si $db2 > $db1
66:                                    si $oB = $oB2 ou $oB = $oB3
67:                                        brancher finoB2
68:                                    finsi
69:                                    si $db0 < $db2
70:                                        $oB = $oB3
71:                                    sinon
72:                                        $oB = $oB2
73:                                    finsi
74:
75:                                    $Bmin = $B - $oB1
76:                                    $db0 = $dmin
77:
78:                                sinon
79:                                    $Bmin = $B
80:                                    si $db2 < 163c16
81:                                        159c16 = $A
82:                                        160c16 = $B
83:                                        161c16 = $C
84:                                        163c16 = $db2
85:                                    finsi
86:                                    $db0 = $db1
87:                                    $db1 = $db2
88:                                finsi
89:
90:
91:                                fintantque
92:
93:                                etiquette finoB2
94:
95:                                $oB = $oB1
96:                                $da2 = $db1
97:
98:                                si $da2 > $dcl
99:                                    si $oA = $oA2 ou $oA = $oA3
100:                                        brancher finoA2
101:                                    finsi
102:
103:                                    si $da0 < $da2
104:                                        $oA = $oA3
105:                                    sinon
106:                                        $oA = $oA2
107:                                    finsi
108:
109:                                    $Bmin = 5* ent($B/5) - 3*$oB1
110:                                    $Amin = $A - $oA1
111:                                    $da0 = $dmin
112:                                sinon
113:                                    $Bmin = 5* ent($B/5) - $oB1
114:                                    $Amin = $A
115:
116:                                    $da0 = $dcl
117:                                    $dcl = $da2
118:                                finsi
119:
120:                                fintantque
121:                                etiquette finoA2
122:                                $oA = $oA1
123:                                $dc2 = $dcl
124:
125:                                si $dc2 > $dcl
126:                                    si $oC = $oC2 ou $oC = $oC3
127:                                        brancher finoC2
128:                                    finsi
129:
130:                                    si $dc0 < $dc2
131:                                        $oC = $oC3
132:                                    sinon
133:                                        $oC = $oC2
134:                                    finsi
135:

```

```

136:                                $Cmin = $C - $cC1
137:                                $dc0 = $dmin
138:
139:                                sinon
140:                                $Cmin = $C
141:
142:                                $dc0 = $dc1
143:                                $dc1 = $dc2
144:                                ainsi
145:
146:                                $Bmin = 160c10
147:                                $Amin = 159c10
148:                                fintantque
149:
150:                                etiquette fincC2
151:                                169c6 = 159c16
152:                                170c6 = 160c16
153:                                171c6 = 161c16
154:
155:                                recalculer
156:
157:
158:                                opérations-matricielles multiplier 194:104c6:16 par 169:79c11 nouvelle-mat
rice 169:79c10
159:                                reformater bloc 169:79c6:67 numérique normale avec-séparateur-de-millier o
résision 1
160:                                impression texte bloc 163:83c1:13 imprimante normale copies 1
161:

```

## ANNEXE 5

### Tableaux récapitulatifs de toutes les contraintes obtenues

Ces tableaux sont au nombre de trois (une par base extensométrique).

La signification des abréviations employées est la suivante :

- Entaille : du nom de la dalle, conformément à la désignation définie précédemment
- Catt : contrainte moyenne attendue. Il s'agit de la valeur de la précontrainte moyenne à laquelle la dalle a été soumise
- C : puissance de l'exponentielle, qui dépend de l'âge du béton
- d : distance obtenue (mesure de la qualité de l'adéquation trouvée)
- Cmoy : contrainte moyenne obtenue.

Dans la colonne "observations", les abréviations des termes sont :

- TT : toutes tranches. Toutes les valeurs de  $\Delta_{dep}$ , de la tranche de 20 mm à celle de 80 mm sont considérées dans la formule de distance
- (-V80) : contrairement au cas précédent, ici, le  $\Delta_{dep}$ , correspondant à la tranche de 80 mm (11ème ligne) a été supprimé de la formule de distance (il semble entaché d'une erreur grossière)
- f2 : la contrainte de la tranche de 2 mm a été forcée à zéro
- f5 : idem pour les deux premières tranches (2 et 5 mm)
- f10 : idem pour les trois premières tranches (2,5 et 10 mm).

Ces caractéristiques peuvent être combinées entre elles (ex : TTf2 : toutes les tranches sont prises en compte dans la formule de la distance et la valeur de la contrainte de la première tranche est forcée à zéro).

ENTAILLE	C.Att	BASE 1									Observations
		C	d	C moy	C	d	C moy	C	d	C moy	
RSC-NR-90°	0	0.1	1.30	1.3	0.1	1.01	1.3	0.7	0.98	-0.3	TT/TT f2/TT f5
		0.4	1.06	-0.3	0.8	1.26	-1.2				TT f2
RSO-NR-45°	0	0.3	1.63	-3.4	0.4	1.56	-3.3				TT/TT f2
		0.7	1.66	-2.7							TT f5
RDO-NR-90°	0	0.1	1.03	6.5	0.05	1.02	6.6	0.1	0.84	7.1	TT/TT/TT f2
		0.4	0.97	4.8	0.8	1.20	3.4				TT f2
RDO-NR-45°	0	0.1	1.33	0.8	0.2	1.12	0.3	0.6	1.17	0.6	TT/TT f2/TT f5
		0.4	1.17	-0.8	0.8	1.31	-1.9				TT f2
RDO-R-90°	0	0.4	1.56	4.7	1.0	1.53	4.4				TT/TT f5
		0.6	1.43	3.9							TT f2
RS1-NR-45°	30	1.0	4.3	20.3	0.1	1.32	31.8				TT/-V80
		0.4	1.54	28.6	0.8	1.75	28.3				-V80
RD1-NR-45°	30										C=0.1 ?
		0.4	1.06	32.4	0.8	1.23	30.9				TT
RD1-NR-90°	60										TT ?
		1.3	1.37	59.4							f2
RS1-NR-90°	60										
		0.5	2.18	58.6							TT
RS2-NR-45°	60	0.2	2.44	62.9							-V80
		0.4	2.69	60.3	0.8	3.10	58.3				-V80
RD2-NR-45°	60	0.1	3.46	52.7							TT f2
		0.5	0.54	56.7							-V80
RD1-R-90°	60										
		1.8	1.96	64.2							TT
RS2-NR-90°	120	0.6	4.86	117.7	0.1	2.35	135.7	0.05	2.28	136.8	TT/-V80/-V80
		0.4	2.62	125.1	0.8	3.17	120.9				-V80
RD2-NR-90°	120										C=0.1 ?
		0.4	3.35	118.7	0.8	4.09	113.4				-V80
RD2-R-90°	120	0.5	2.68	105.8	0.02	1.05	117.1				TT/-V80
		0.4	1.64	111.2	0.8	2.20	107.9				-V80

ENTAILLE	C.Act	BASE 2									Observations
		C	d	C moy	C	d	C moy	C	d	C moy	
RSO-NR-90°	0	0.4	1.93	-3.3	0.4	1.94	-3.1	0.4	1.97	-3.0	TT/TT f2/TT f5
		0.6	2.04	-1.9							TT f10
RSO-NR-45°	0	0.4	1.33	-2.7	0.4	1.38	-2.9				TT/TT f2
		0.6	1.45	-2.3							TT f5
RDO-NR-90°	0	0.4	0.82	3.1	0.4	0.79	4.2	0.8	2.60	8.8	TT/TT f2/TT f2
		0.4	0.70	3.9	0.8	2.14	8.2				TT f5
RDO-NR-45°	0	0.1	2.48	-5.1	0.4	2.68	-3.7	0.8	2.95	-3.0	TT f5
		0.1	2.59	-4.8	0.4	2.85	-3.4	0.8	3.13	-2.7	TT f2
RDO-R-90°	0	0.6	0.71	3.4	1.0	0.79	4.0				TT/TT f5
		0.7	0.72	3.6							TT f2
RS1-NR-45°	30	0.1	3.44	21.6	0.1	1.50	30.9	0.05	1.48	31.1	TT/-V80/-V80
		0.4	1.55	29.9	0.8	1.59	28.9				-V80
RD1-NR-45°	30										C=0.1 ?
		0.4	0.91	31.8	0.8	1.03	30.8				TT
RD1-NR-90°	60										
		0.7	1.31	58.3							TT
RS1-NR-90°	60										
		0.7	2.18	57.8							TT
RS2-NR-45°	60										
		0.7	2.48	60.4							TT
RD2-NR-45°	60										
		0.7	1.51	54.8							TT
RD1-R-90°	60										
		0.7	0.99	65.3							TT
RS2-NR-90°	120	0.2	2.23	120.6							TT
		0.4	2.27	119.1	0.8	2.55	116.5				TT
RD2-NR-90°	120										C=0.1 ?
		0.4	2.49	121.0	0.8	2.99	118.2				TT
RD2-R-90°	120	0.1	1.35	105.9							TT
		0.4	1.47	104.5	0.8	1.76	104.4				TT



ENTAILLE	C.Act	BASE 3									Observations	
		C	d	C <sub>0.05</sub>	C	d	C <sub>0.05</sub>	C	d	C <sub>0.05</sub>		
RS0-NR-90°	0 -											
RS0-NR-45°	0 -											
RDO-NR-90°	0 -											
RDO-NR-45°	0 -											
RDO-R-90°	0 +											
RS1-NR-45°	30 -	0.1	6.05	26.2	0.1	4.23	29.0	0.1	1.63	37.9	-TT/-V80/-V80-V30	
		0.4	1.79	31.1	0.8	1.96	33.1				-V80-V30	
RD1-NR-45°	30 -										C=0.1 ?	
		0.4	1.23	32.2	0.8	1.35	30.8				TT	
RD1-NR-90°	60 -										C=0.1 ?	
		0.4	1.39	58.2	0.8	1.67	59.3				TT	
RS1-NR-90°	60 -	0.012	2.96	60.4							-V80	
		0.4	3.31	57.0	0.8	3.38	62.7				-V80	
RS2-NR-45°	60 -											
		0.7	2.39	62.3							TT	
RD2-NR-45°	60 -	0.4	4.36	51.9	0.1	3.21	61.2				TT/-V80	
		0.4	3.41	50.8	0.8	3.59	56.4				-V80	
RD1-R-90°	60 +										C=0.1 ?	
		0.4	2.00	66.9	0.8	2.10	68.3				TT	
RS2-NR-90°	120 -	0.1	4.33	126.3	0.1	1.87	123.7				TT/-V60	
		0.4	3.07	110.9	0.8	3.13	128.7				-V60	
RD2-NR-90°	120 -											
		0.5	2.11	114.0							TT	
RD2-R-90°	120 +	0.1	1.78	105.8							TT	
		0.4	1.97	104.7	0.8	2.32	105.8				TT	