

THESE DE DOCTORAT

présentée à

**L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE FLANDRES-ARTOIS**

SPECIALITE MECANIQUE DES SOLIDES

par

Mohamed BOUMAHDI

**CONCEPTION ET REALISATION
D'UN TRIAXIAL VRAI
DE GRANDE CAPACITE SIMULATEUR
D'OUVRAGES SOUTERRAINS**

Tirage provisoire

SOMMAIRE

INTRODUCTION	
CHAPITRE I : CONCEPTION GENERALE DU TRIAXIAL	1
1.1 CAHIER DES CHARGES	2
1.2 PRINCIPE	2
1.3 CADRE BIAXIAL	3
1.3.1 Définition de la forme	3
1.3.2 Evaluation des contraintes et des déformations des cerces	3
1.3.3 Vérification expérimentale : mesure des déformations des cerces	5
1.3.4 Dalles d'appui	8
1.3.5 Bâti support	8
1.3.6 Liaison bâti cadre	8
1.3.7 Positionnement du cadre biaxial par rapport au bloc	14
1.4 TROISIEME AXE	14
1.4.1 Schéma d'ensemble	14
1.4.2 Profil des poutres caisson	15
1.4.3 Prédétermination des contraintes	16
1.4.4 Dimensionnement des tirants	16
CHAPITRE 2 : TECHNOLOGIE D'APPLICATION DES CHARGES	19
2.1 GENERALITES	20
2.2 VERINS PLATS	22
2.2.1 Définition	22
2.2.2. Précharge des boulons de la matrice de conformation	25
2.3 BLOC VERIN A QUATRE PISTONS	26
2.3.1 Conception du bloc vérin	26
2.3.2 Evaluation des contraintes	26

2.4	SYSTEME DE REPORT DE CHARGEMENT	29
2.4.1	Axes de chargement avec le bloc vérin	29
2.4.2	Axes de chargement avec le vérin plat	31
2.5	PARTICULARITES DU TRIAXIAL	34
2.5.1	Forage sous contrainte	34
2.5.2	Cales de réduction	35
2.6	PROBLEMES TECHNOLOGIQUES RENCONTRES ET LEURS SOLUTIONS	37
CHAPITRE 3 : SYSTEME D'ANTIFRETTAGE		39
3.1	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	40
3.1.1	Technique d'interposition	40
3.1.2	Technique de discrétisation de la charge	40
3.2	CONCEPTION D'UN NOUVEAU DISPOSITIF D'ANTIFRETTAGE	42
3.3	ETUDE EXPERIMENTALE DU DISPOSITIF D'ANTIFRETTAGE	43
3.4	VALIDATION SUR LE TRIAXIAL	46
3.4.1	Etude qualitative	46
3.4.2	Etude quantitative	52
CHAPITRE 4 : ASSERVISSEMENT		54
4.1	CAHIER DES CHARGES	55
4.1.1	Asservissement des groupes de pompage	55
4.1.2	Acquisition des données	55
4.2	CHOIX DES GROUPES HYDRAULIQUES	55
4.3	DECHARGE : SYSTEME DE REGULATION	56
4.4	MESURES	56
4.4.1	Mesures des contraintes	56
4.4.2	Mesures des déformations	56

4.5	SYSTEME D'ACQUISITION ET D'ASSERVISSEMENT	60
4.5.1	Présentation	60
4.5.2	Description des éléments	62
4.5.3	Asservissement et acquisition	64
4.6	CONCLUSION	65
CHAPITRE 5 : ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE DISCAGE		67
5.1	ETUDE EXPERIMENTALE	68
5.1.1	Description des essais	68
5.1.2	Résultats	69
5.1.3	Conclusions	71
5.2	ADAPTATION DE LA TECHNIQUE ET L'EMISSION ACOUSTIQUE A LA MANIPULATION	72
5.2.1	Chaîne d'acquisition d'émission acoustique	72
5.2.2	Analyse du signal.....	74
5.2.3	Les éléments de la chaîne d'acquisition d'émission acoustique	75
5.2.4	Dispositif expérimental	78
5.2.5	Résultats	81
5.3	CONCLUSION	82
CHAPITRE 6 : ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE STABILITE DE Puits		83
6.1	ADAPTATION DU TRIAXIAL	84
6.1.1	Conception d'une sonde de mesure de convergence	84
6.1.2	Adaptation du système d'émission acoustique à la manipulation	87
6.2	EXEMPLE DE MESURES ET DE RESULTATS	87
6.2.1	Vérification de la distribution des contraintes ..	88
6.2.2	Mesure de la convergence, stabilité du trou	88
6.2.3	Mesure d'émission acoustique	92

CHAPITRE 7 : ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE LA PERMEABILITE	94
7.1 ADAPTATION DU TRIAXIAL	95
7.1.1 Description du dispositif expérimental	95
7.1.2 Déroulement de l'essai	98
7.2 EXEMPLE DE RESULTATS	98
CONCLUSION	103
BIBLIOGRAPHIE	107
ANNEXE 1 : Calcul des contraintes et des déplacements pour dif- férentes configurations du biaxial	112
ANNEXE 2 : Mesure des déformations et calcul des contraintes maxi dans les cerces	135
ANNEXE 3 : Dimensionnement des patins à billes	137
ANNEXE 4 : Prédétermination des contraintes et déformation de la poutre sommier du 3e axe	141
ANNEXE 5 : Dimensionnements des tirants	143

INTRODUCTION

Les matériaux naturels ou artificiels liés au Génie Civil et Pétrolier nécessitent, en égard aux problèmes industriels qu'ils posent, une caractérisation de plus en plus fine de leurs propriétés, notamment sous les conditions de chargement complexes. Dans ce but, l'approche des lois de comportement au moyen de modèles rhéologiques est une voie nécessaire qui doit se développer. La validation de la connaissance des limites d'application des modèles proposés nécessitent des procédures expérimentales complexes capables de simuler, en laboratoire, des conditions aux limites en accord avec la réalité, et dès lors, nécessaire au calage des lois proposés.

Deux types d'appareils permettent de soumettre un matériau à une sollicitation polyaxiale :

- L'appareil triaxial vrai [4] : il soumet l'échantillon cubique à trois contraintes principales indépendantes (figure a).
- L'appareil triaxial en torsion [26] : il applique à un échantillon cylindrique un état de contrainte triaxial de révolution et une torsion (figure b).

Les deux appareils sont complémentaires ; ils peuvent imposer des chemins identiques en contraintes principales, le premier en cinématique irrotationnelle, et le second en rotationnelle. Ceci permet, entre autre, de mieux cerner les effets propres à la rotation continue et imposée des axes principaux de contraintes et de déformations.

Toutefois, notre choix s'est porté sur le triaxial vrai sur blocs cubiques, pour la multitude de possibilités d'étude qu'offre un tel appareillage, allant de l'étude des propriétés mécaniques et la rhéologie des matériaux, à l'étalonnage d'appareils de mesure in-situ.

Les systèmes triaxiaux dans le monde

Les équipements triaxiaux vrais sont peu développés en France. L'équipement de base nécessaire aux études sous contraintes utilisé par les laboratoires est constitué de cellules triaxiales de révolution conçues pour des pressions élevées. Toutefois, certains laboratoires se sont équipés de cadres biaxiaux : LCPC (blocs $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ sous 70 MPa), CETE de Lyon (blocs $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ sous 30 MPa) et de corps d'essais triaxiaux vrai dont les dimensions d'échantillon ne dépassent pas $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (ENTPE de Lyon, CFP, INSA de Toulouse, etc. ...). La faiblesse relative de ces dimensions ne permet pas de s'affranchir de l'hétérogénéité des matériaux testés, ni de procéder à la simulation de travaux en milieu contraint.

Des corps d'essai triaxiaux vrais de capacité supérieure existent sur le continent Nord-Américain :

- Université d'Alberta (Canada) (Professeur Morgenstern) $100 \times 100 \times 30 \text{ cm}^3$ (10 MPa)
- Université de l'Illinois - USA (Professeur Hendron) $100 \times 100 \times 30 \text{ cm}^3$ (17 MPa)
- Berkeley - USA (Professeur Goodman)
- Société Terrateck - USA (M. Abou Sayed)
- Université de Denver-Boulder - USA (Professeur Matei)
- Université de Kentucky (Professeur Szwilski)

Thème de l'étude

L'objectif visé dans notre étude s'inscrit dans l'axe rhéologie, et plus particulièrement des roches avec une application aux travaux souterrains. Il permettra de doter la France d'un système d'essais triaxiaux unique :

- par la taille de son éprouvette : $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}^3$
- par ses contraintes appliquées : 70 MPa
- par sa possibilité d'atteindre des contraintes plus élevées, en réduisant la taille de l'échantillon
- par ses possibilités de simuler sous contraintes l'exécution d'un ouvrage souterrain.

Cet appareillage permettra également d'étudier les matériaux composites, et notamment les bétons de fibre employés en Génie Civil et en Travaux Souterrains dont les propriétés sont mal définies car les moyens d'essais sur gros échantillons sont presque inexistantes.

Notre étude est présentée en cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la conception général du triaxial, résolution des problèmes technologiques rencontrés, évaluation des contraintes et des déformations, et définition des différents sous-ensembles de l'appareillage.

Dans le deuxième chapitre, après un bref résumé sur les différentes possibilités de générer les contraintes, nous présentons notre système d'application des charges, en définissant toutes les pièces composant un axe de chargement.

Dans le troisième chapitre, nous exposons, de manière critique, les différents systèmes d'antifretage actuellement utilisés. Nous y présentons, ensuite, notre dispositif d'antifretage, puis sa validation sur le triaxial.

Le quatrième chapitre est consacré à l'asservissement, définition du matériel et du logiciel. Les deux possibilités d'asservissement sont de type classique, en boucle fermée, à pilotage par système d'acquisition et micro-calculateur.

Nous montrons, dans le chapitre 5, la facilité d'adaptation du triaxial pour effectuer les différentes études.

Dans un premier temps, la machine a été adaptée pour permettre l'étude du phénomène du discage. Une chaîne d'acquisition d'émission acoustique lui était associée pour affiner les mesures. Ensuite, la machine nous a servi pour réaliser une étude de stabilité de puits. Nous avons mis au point une sonde de mesure de convergence.

Enfin, nous avons conçu une sonde d'injection pour pouvoir réaliser l'étude de l'influence de l'état de contrainte sur la conductivité hydraulique en milieu fissuré.

CHAPITRE 1

CONCEPTION GENERALE DU TRIAXIAL

1.1 CAHIER DES CHARGES

a) Caractéristiques du système de chargement

L'équipement triaxial doit permettre de générer dans les trois directions de l'espace des efforts indépendants pouvant atteindre 1 750 tonnes. Afin de pouvoir s'affranchir des problèmes d'hétérogénéité du matériau et des conditions aux limites, les blocs cubiques testés auront pour taille maximale 50 x 50 x 50 cm³. Les contraintes appliquées sur chaque face seront, ainsi, équivalentes à un recouvrement de 3 000 m. Des plaques d'adaptation pourront permettre de soumettre, avec le système de chargement, des blocs de dimensions réduites à un niveau de contraintes plus élevé.

Une attention toute particulière devra être portée sur les conditions d'application des charges : chargement uniforme, élimination des moments parasites, pas ou peu de contraintes de cisaillement transmises à la surface de l'échantillon.

b) Essais à réaliser sur le triaxial

En plus des caractéristiques principales décrites ci-dessus, la machine d'essai sera prévue pour pouvoir réaliser un certain nombre de manipulations dont la liste est donnée ci-dessous :

- * **Stabilité d'ouvrages souterrains**
Détermination des conditions de stabilité en fonction de l'état de contrainte externe appliquée sur le bloc. Détermination du champ de déformation autour du trou. Détection de la rupture (initiation, évolution) par méthode acoustique.
- * **Exécution de forage d'orientation quelconque dans un plan principal à travers un bloc sous contraintes**
Etude des conditions de discage des carottes. Incidence sur la rupture ultérieure des parois, du passage d'un front de taille de forme différente (utilisation d'outils de formes diverses)
- * **Simulation de fracturation hydraulique - Asservissement pour "stabiliser" le front de fracture**
- * **Essais de perméabilité à partir de puits.**
- * **Test et mise au point d'appareillage**
- * **Possibilité de tester des méthodes expérimentales de diaggraphie utilisé en forage**
Etalonnage d'appareillage en fonction de la contrainte ...

1.2 PRINCIPE

La définition de la structure générale de l'appareil a été la partie la plus délicate. Elle était en partie liée à la définition du système de poussée. Pour des raisons d'encombrement, nous avons décidé de choisir un système de poussée peu volumineux,

s'intégrant parfaitement dans la structure. Les vérins classiques auraient conduit à des tailles de bâti très importantes, donc à des coûts prohibitifs. Le même raisonnement a été tenu pour le système d'antifretage. Cette option étant choisie, des efforts de conception devront être faits pour les systèmes de poussée et d'antifretage.

La structure générale du dispositif expérimental est présentée par la figure 1.1. Les efforts de poussée des deux axes de chargements horizontaux sont équilibrés par un cadre biaxial, en appui unilatéral sur le bâti support. Un espace annulaire est ménagé à mi-hauteur du cadre afin de permettre le passage des outils de forage ou d'une instrumentation spécifique.

L'axe vertical, mécaniquement indépendant du cadre horizontal, est constitué par un ensemble sommiers-tirants en appui sur le bâti.

1.3 BIAxIAL (CADRE BIAxIAL)

1.3.1 DEFINITION DE LA FORME

Pour des raisons de mise en place du triaxial, il est nécessaire de constituer le cadre d'éléments amovibles, modulables, afin que les pièces soient transportables par le pont roulant du laboratoire dont la charge maximale est de cinq tonnes. Il fallait également prévoir le passage d'un carottier au travers du cadre.

Le cadre biaxial est composé de six cerces d'épaisseur 90 mm, empilées les unes sur les autres (figure 1.2). Les cerces centrales sont séparées d'une distance de 140 mm et entretoisées dans la partie sensible au voilement, c'est-à-dire dans les zones de raccordement. Les cerces extrêmes sont accolées et soudées par deux sur toute la périphérie pour éviter également le voilement.

Le poids de chaque jeu de cerces est de l'ordre de 5 000 kg, soit la charge maxi du pont roulant servant à la manutention. Les faces servant à l'empilage sont usinées. Les faces intérieures des cerces ont été totalement usinées après leur empilage, ceci de façon à ne pas avoir de défauts géométriques qui pourraient conduire au fait qu'une cerce reprenne plus d'efforts que les autres. La photo 1.1 montre la réalisation des cerces.[7]

1.3.2 EVALUATION DES CONTRAINTES ET DES DEFORMATIONS DES CERES

Il faut reprendre 1 750 tonnes par axe, sur six cerces de 90 mm d'épaisseur. Nous avons donc effectué une étude générale afin de mettre en lumière les effets des longueurs de chargement (en cas de mauvaise répartition des charges) des rayons de raccordement intérieurs et extérieurs. L'étude est reportée en Annexe 1. Le récapitulatif montre que les contraintes maximales dans le rayon de raccordement fixé, pour des raisons de construction, restent dans le cas d'une charge suffisamment répartie, inférieures à 15 daN/mm². Nous avons donc choisi un acier à 28 daN/mm² de classe C, afin d'éviter les variations de caractéristiques et les imperfections. Ceci donne donc un coefficient de sécurité théorique de l'ordre de 1.8. Les déplacements globaux axiaux seront de l'ordre de 0,15 mm au maximum.

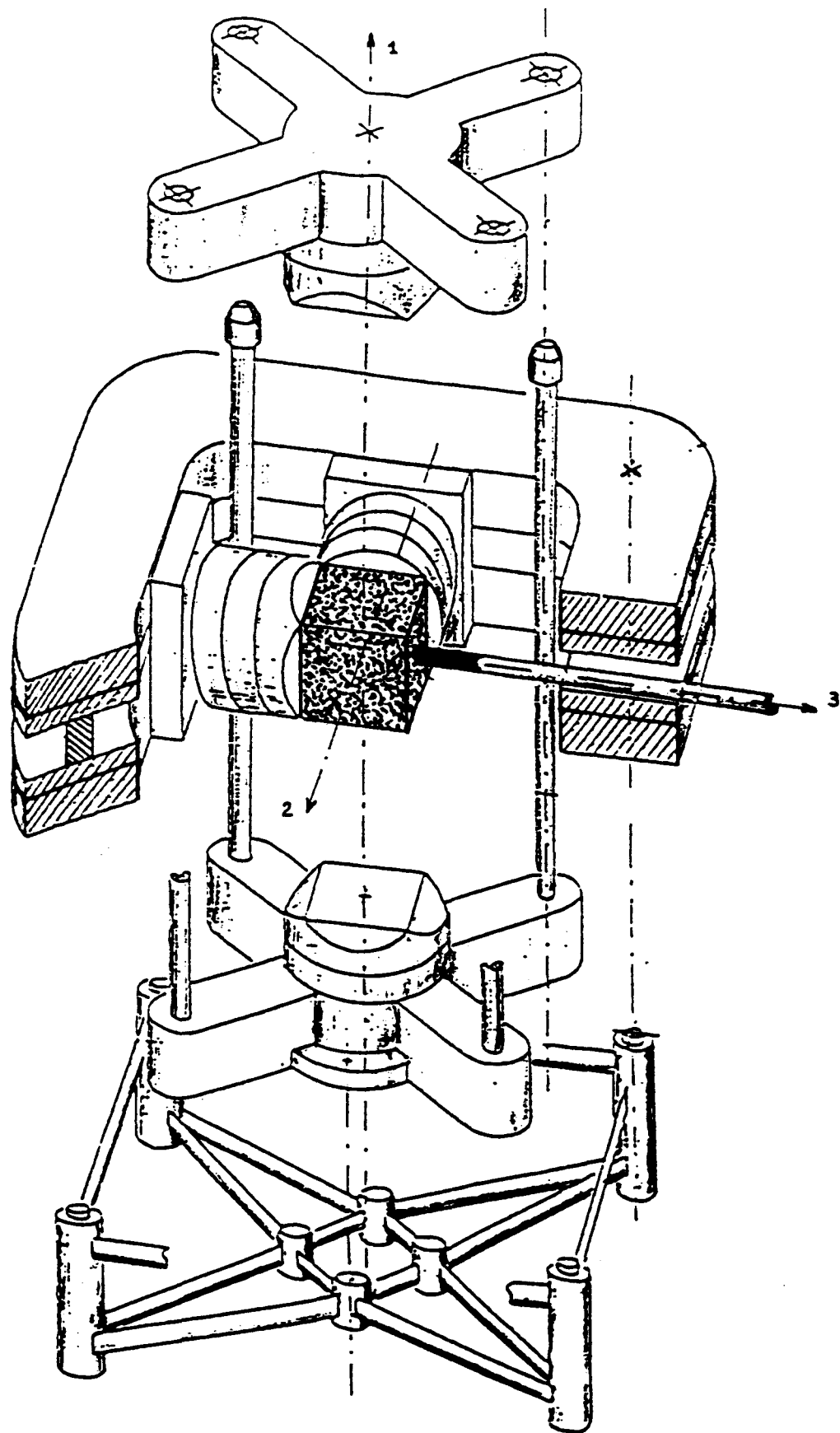


Figure 1.1
Structure générale

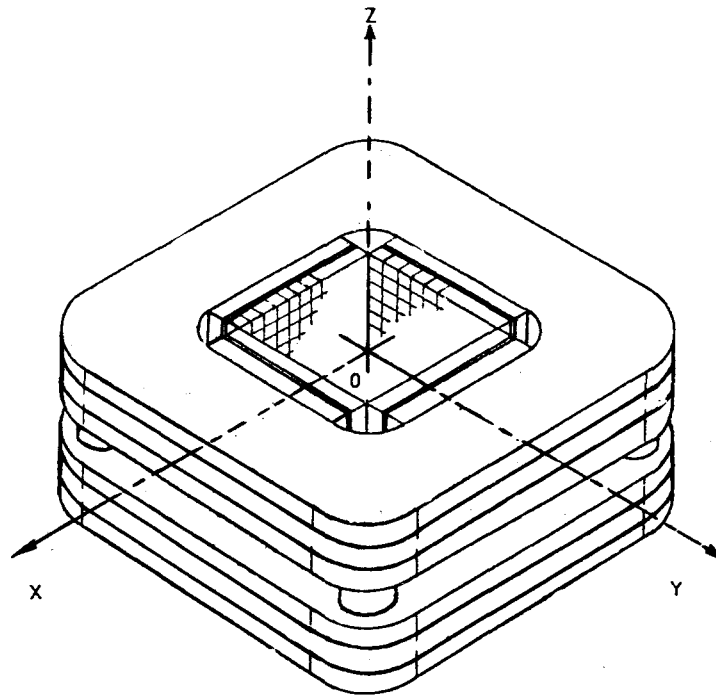


Figure 1.2
Cadre biaxial

1.3.3 VERIFICATION EXPERIMENTALE : MESURE DES DEFORMATIONS DES CERCES

Nous avons opté pour la méthode des jauges électriques d'extensométrie pour mesurer les déformations des cerces. Pour cela, nous avons équipé les cerces de six jauges collées au niveau des raccords intérieurs suivant le schéma de la figure 1.3.

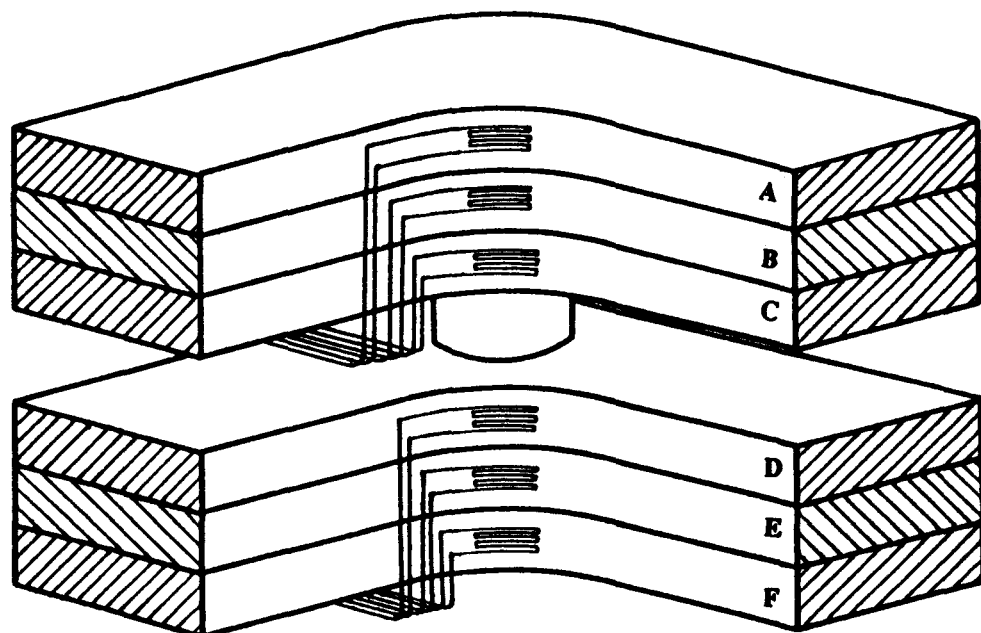
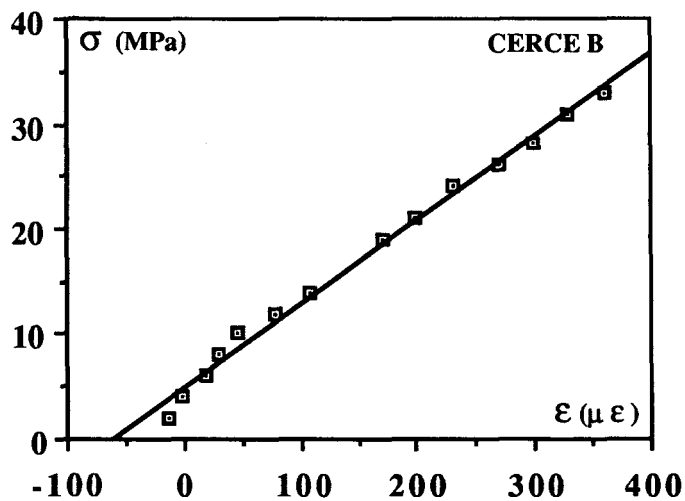
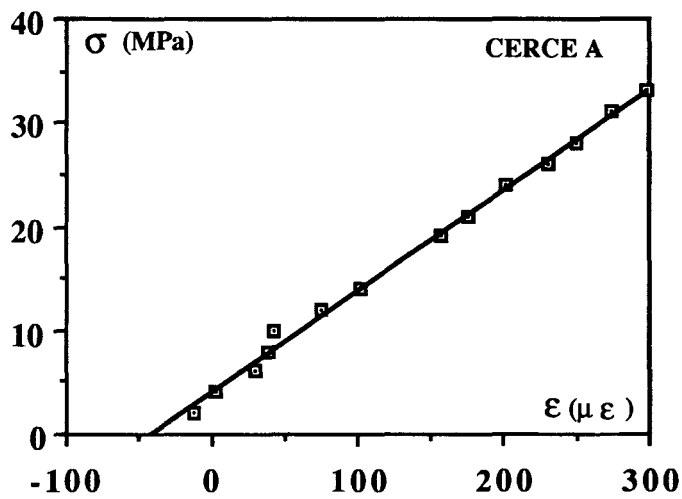
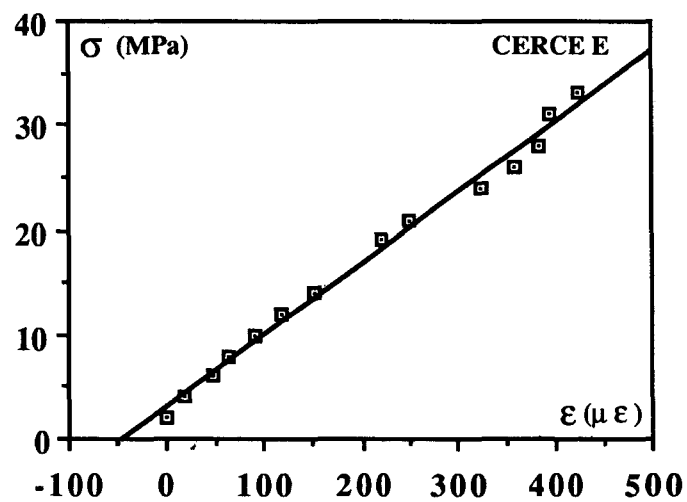
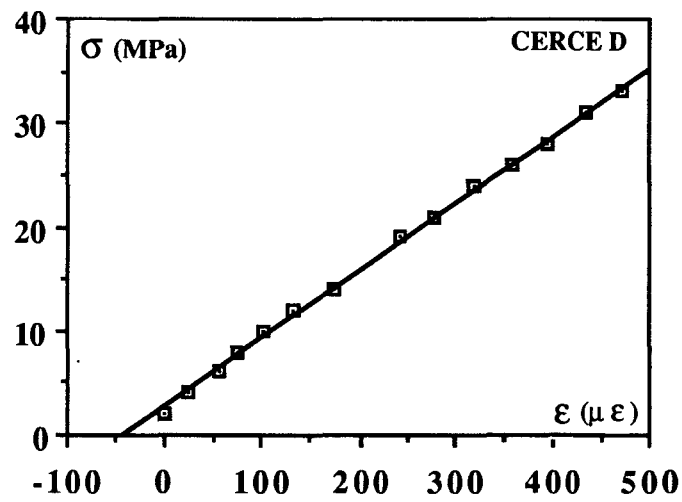
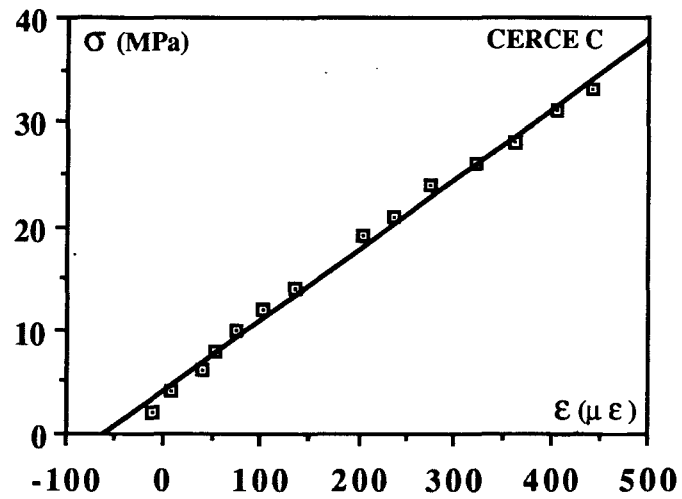


Figure 1.3
Instrumentation des cerces

Nous avons effectué un chargement biaxial ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ et $\sigma_z = 0$). D'après les courbes reliant les déformations au niveau des raccordements à la contrainte appliquée (figure 1.4), on peut constater que ce sont les cerces centraux qui ont subi le plus de déformations, alors que la cerce A était la moins sollicitée.

Les contraintes maximales dans les cerces sont comprises entre 15,1 daN/mm² pour la cerce A et 21,6 daN/mm² pour la cerce D (le calcul est reporté en Annexe 2). Le matériau du cadre est un acier dont la limite minimale apparente d'élasticité est de 28 daN/mm², ce qui nous laisse un coefficient de sécurité $s = 1,3$.





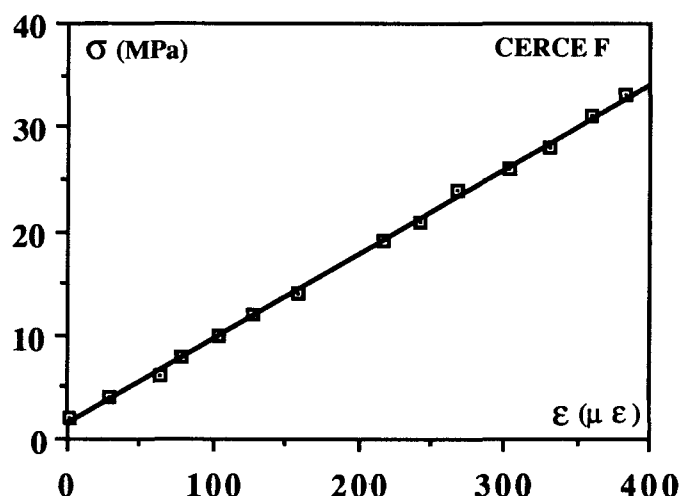


Figure 1.4
Courbes contraintes-déformation des six cerces
composant le cadre

1.3.4 DALLES D'APPUI

L'assemblage des cerces est assuré par un boulonnage sur des dalles d'appui à l'intérieur du cadre. Elles permettent aussi de recevoir l'ensemble cales + vérins grâce aux broches de positionnement (photo 1.2) et d'assurer leur centrage automatique.

1.3.5 BATI SUPPORT

La fonction essentielle du bâti (figure 1.1 - photo 1.3) est de supporter les différents ensembles : cadre, 3^{ème} axe et harnais de mesure. Constituant la référence de la machine, c'est sur le bâti qu'est fixé le harnais de mesure des déformations du bloc (photo 1.4).

1.3.6 LIAISON BATI-CADRE

Lors du chargement, le bloc va se déformer, et il est nécessaire que le système de chargement n'induisse pas de contraintes parasites (cisaillement) et que les contraintes appliquées se rapprochent le plus possible d'une contrainte uniforme. En outre, il est nécessaire de reprendre le poids des cerces qui induirait également une contrainte de cisaillement. Nous avons choisi de rendre le cadre "flottant" et indépendant du 3^{ème} axe. Les liaisons s'effectuant par le bâti.

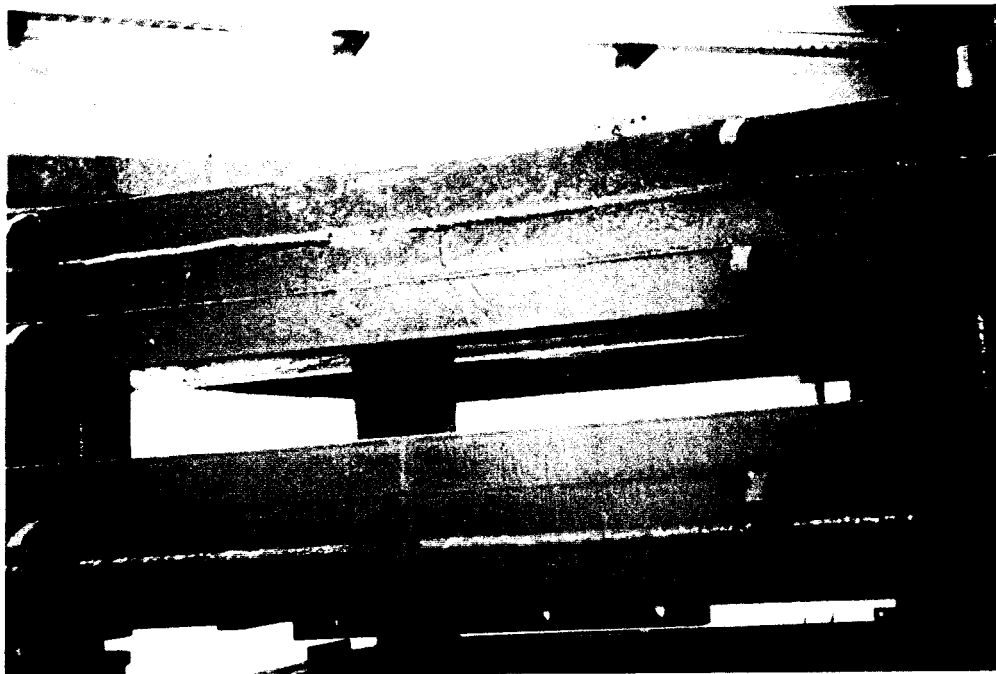


Photo 1.1

Détail des six cerces et des accouplements.
Le vide dans la zone centrale permet le passage d'outils de forage et d'accéder au bloc



Photo 1.2

Dalles et broches.
L'ensemble se fixe sur l'une des quatre faces intérieures du biaxial par huit boulons de $\Phi 30$



Photo 1.3

Détail du bâti et des quatre plots de positionnement du 3ème axe

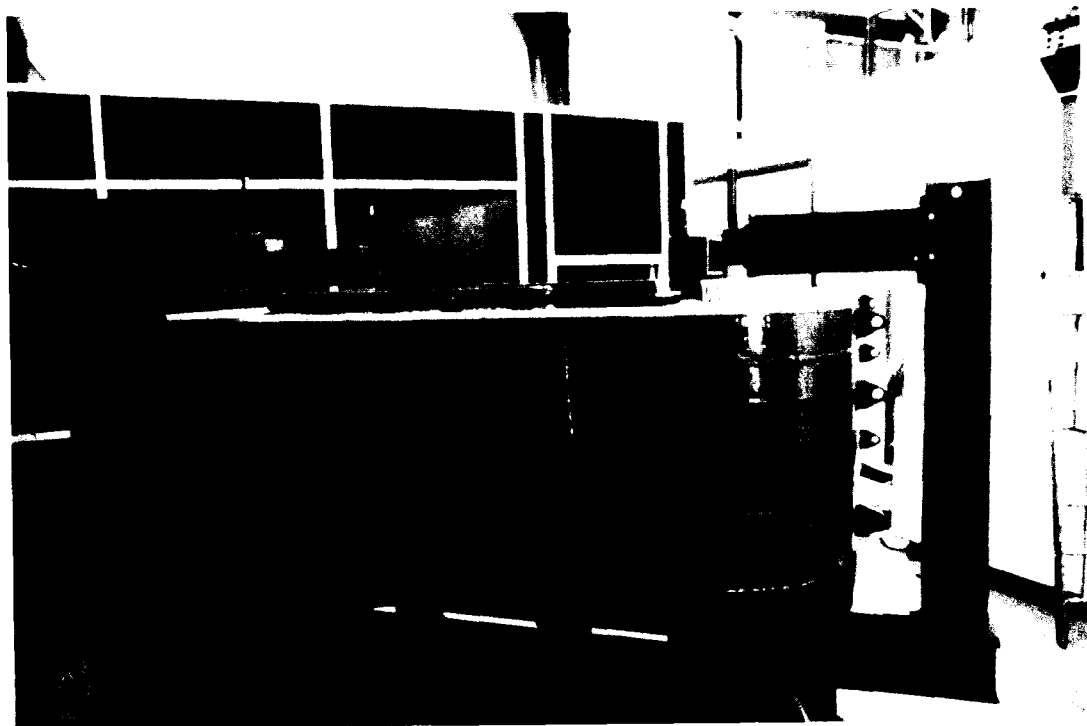


Photo 1.4

Harnais de mesure fixé sur le bâti

Quatre vérins munis de patins à billes sur leur tête (photo 1.5 et figure 1.5) ont été intégrés à la structure, d'où la possibilité de régler la hauteur des axes, de reprendre le poids du cadre et de respecter l'isostatisme. Ce patin à billes a l'aptitude de reprendre une charge même très importante, d'assurer sa portance, mais aussi son déplacement dans le plan horizontal. L'interchangeabilité de ses différents composants permet une maintenance rapide et peu coûteuse. Il est composé de deux plateaux en acier fortement allié Z 200 C 12 trempé et revenu. Entre les deux plateaux, 32 billes de ϕ 10 mm sont intercalées permettant ainsi un déplacement relatif des deux plateaux de 20 mm. Une plaque d'élastomère est collée sur le plateau supérieur. Le dimensionnement du patin à billes est reporté en annexe 3.

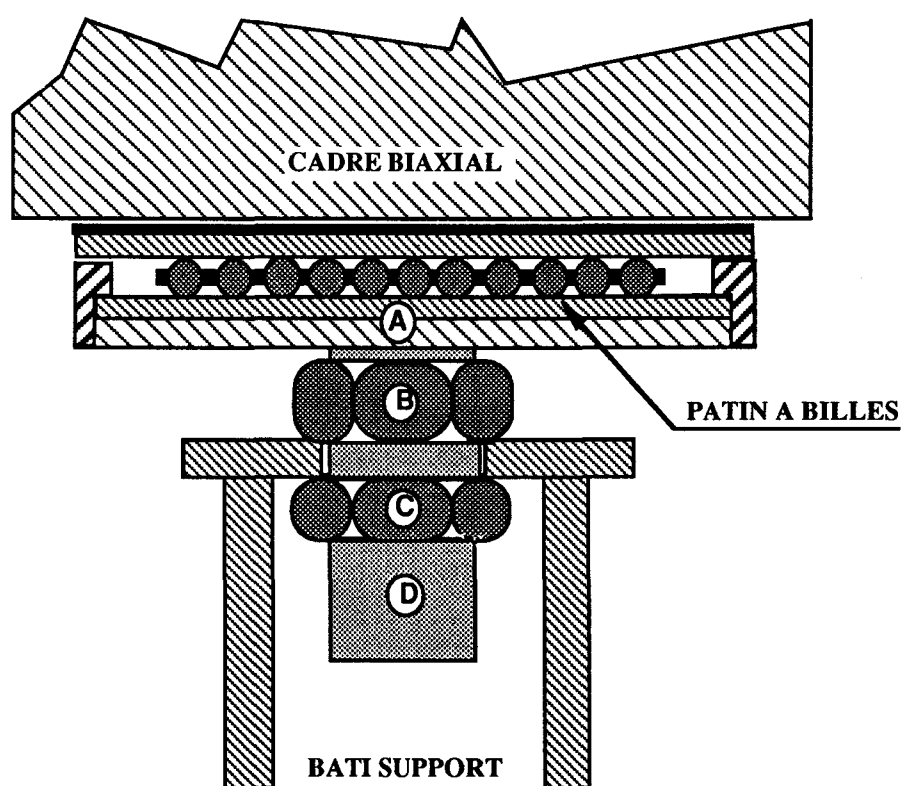


Figure 1.5

Un des quatre vérins permettant le positionnement du cadre biaxial.

Il est fixé par l'écrou (B) et le contre écrou (C)

L'écrou est vissé sur le corps du vérin (D)

Le plateau (A) fixé sur le vérin (D) reçoit le patin à billes qui reçoit le cadre biaxial.

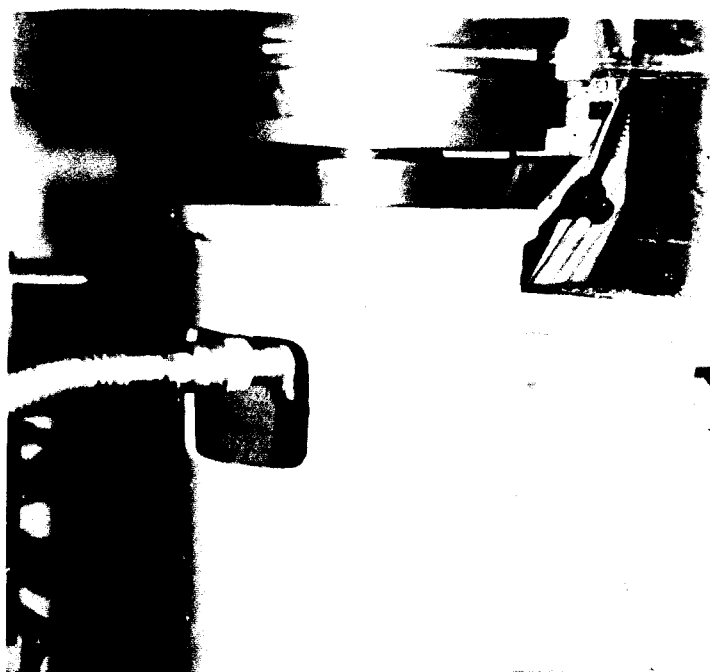


Photo1.5

Le patin à billes interposé entre l'un des quatre vérins porteurs
et le cadre biaxial

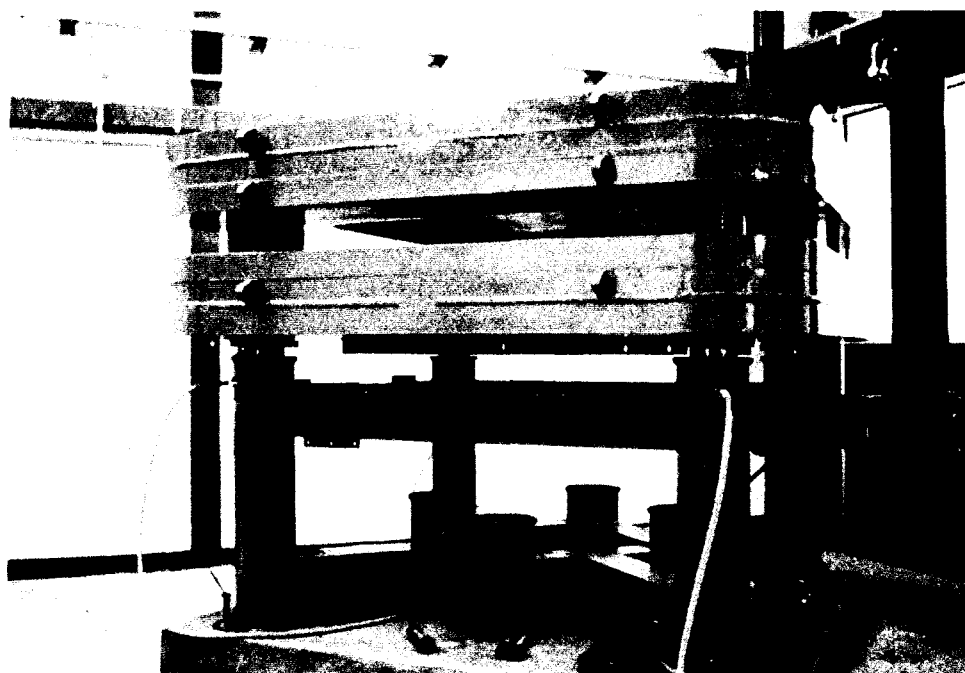


Photo 1.6

Détail du bras de positionnement du cadre biaxial

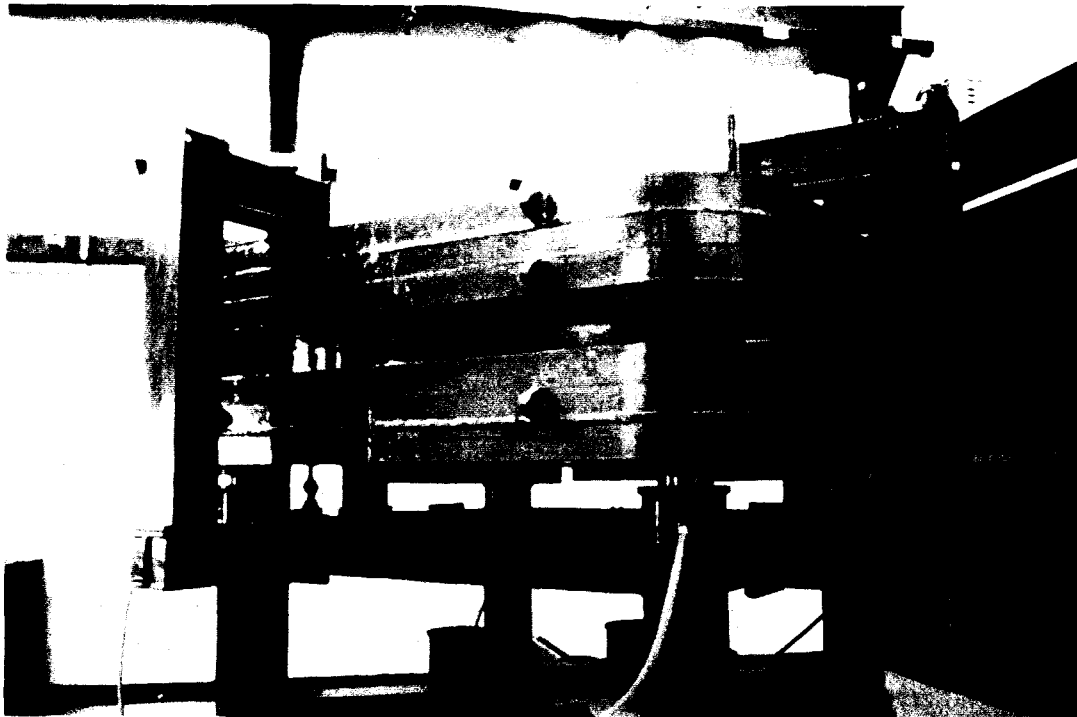


Photo1.7

Vue générale du cadre biaxial avec les quatre bras de positionnement et le harnais de mesure

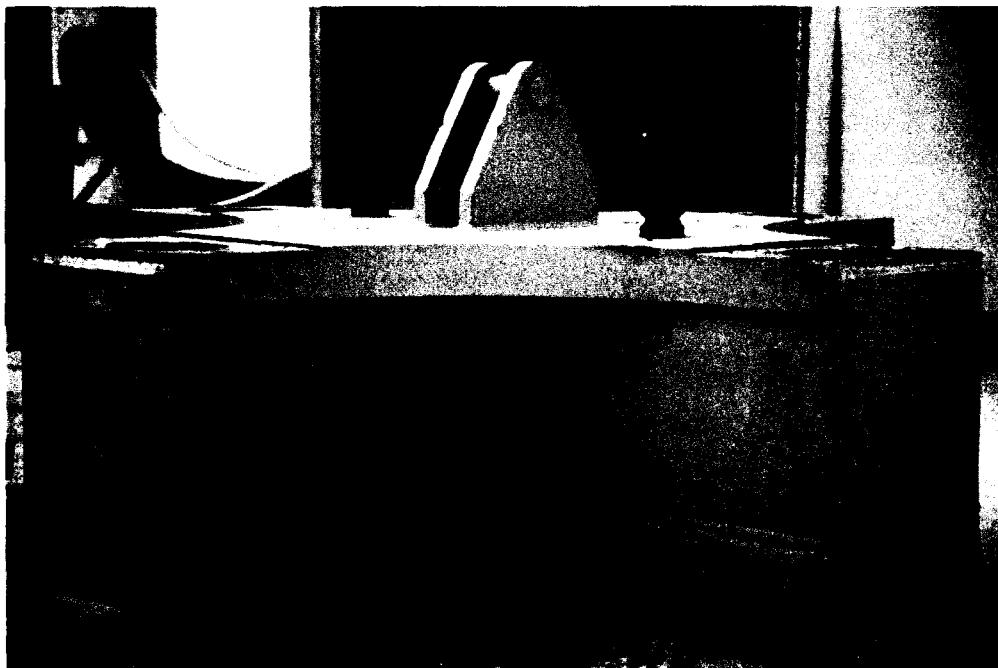


Photo1.8

Sommier

1.3.7 POSITIONNEMENT DU CADRE BIAXIAL PAR RAPPORT AU BLOC

L'ensemble du cadre biaxial, dalles d'appui, vérin pèse environ 23 tonnes. Il est nécessaire d'avoir un système mécanique de positionnement du biaxial par rapport au bloc. Quatre bras (photo 1.6) fixés sur le bâti permettent par l'intermédiaire d'une vis supérieure de bloquer le positionnement en hauteur du biaxial et de le régler. En essai, les vis seront escamotées. Les bras de positionnement permettent également de supporter le harnais de mesure (photo 1.7).

1.4 TROISIEME AXE

1.4.1 SCHEMA D'ENSEMBLE

Dans la définition du troisième axe, la difficulté essentielle résidait dans le fait d'avoir un système le plus compact possible afin de diminuer les coûts et surtout les déformations. Nous avons choisi de reprendre les efforts verticaux par quatre tirants se logeant dans l'espace libre du cadre biaxial (figure 1.1).

Le troisième axe sera constitué d'une poutre-sommier supérieure démontable, d'une partie inférieure identique et de quatre tirants reliant les deux parties précédentes (figure 1.6).

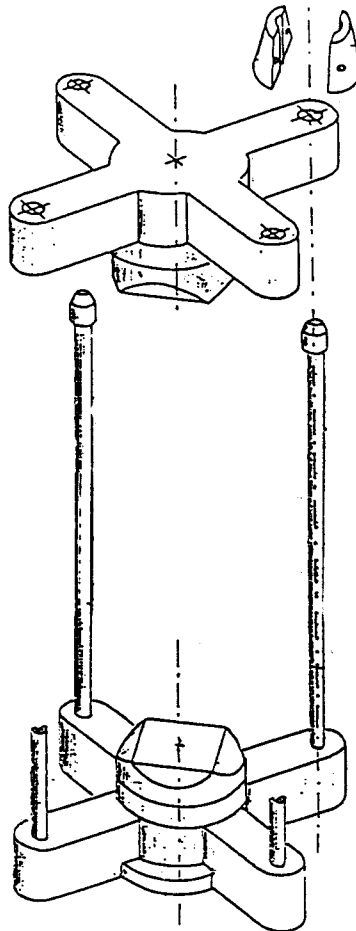


Figure 1.6
Schéma du 3ème axe

1.4.2 PROFIL DES POUTRES CAISSONS

Le rôle des poutres, inférieures et supérieures, est de transmettre l'effort vertical de 1 750 tonnes au bloc par l'intermédiaire de quatre tirants. Il s'agit d'un problème symétrique. Les poutres sont donc semblables.

Les poutres seront réalisées en tôles mécanosoudées d'épaisseur 80 mm. Le système de fermeture de l'élément supérieur, ainsi que la dimension des répartiteurs définissent le format et l'allure générale des poutres (figure 1.7).

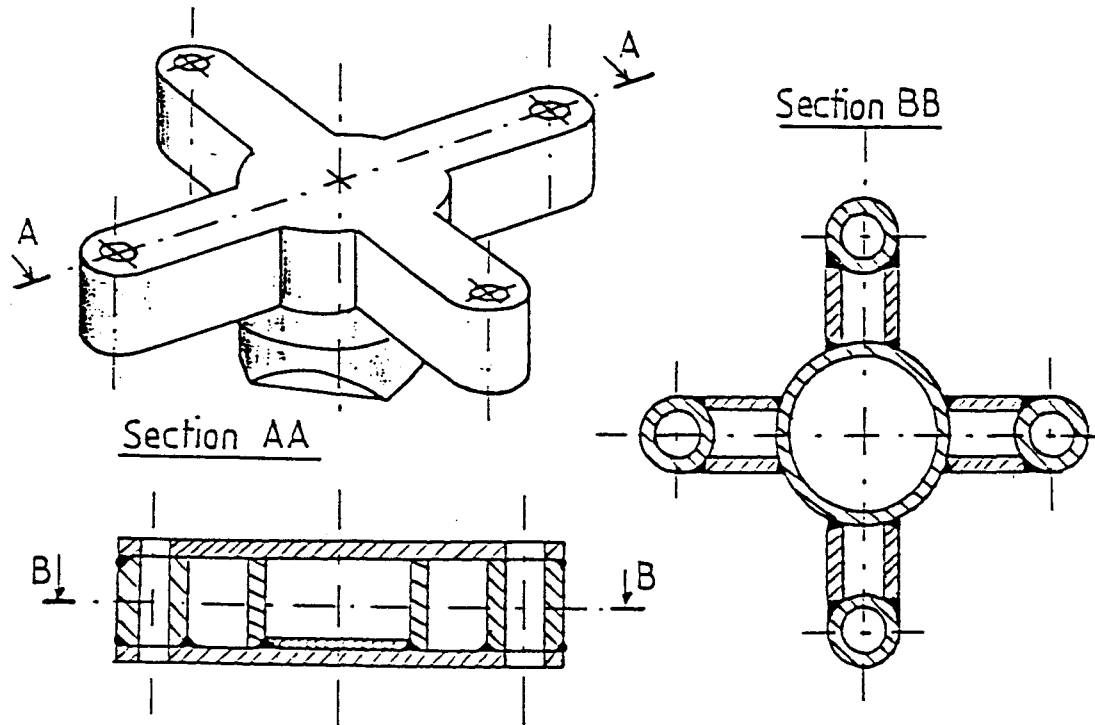


Figure 1.7
Schéma des poutres caissons

Grâce à la dépose de l'élément supérieur, on peut effectuer toutes les manipulations au pont roulant. Les quatre tirants "traversent" le cadre dans la zone dégagée par les congés de raccordement intérieur. De ce fait, l'effort vertical généré par le troisième vérin de chargement est équilibré très près de l'appui. On a donc des poutres compactes, aux déformées sous charges, réduites.

On ferme le troisième axe en enfilant la poutre supérieure sur les quatre tirants, qui sont alors protégés pendant cette opération [8].

La fermeture du troisième axe est assurée par un système vis-écrou. Les filets seront trapézoïdaux et la concentration de contrainte diminuée par un rayon de raccordement.

1.4.3 PREDETERMINATION DES CONTRAINTES

Le sommier supérieur (photo 1.8), constitué de deux poutres caissons de section carrée, transmet aux quatre tirants l'effort vertical de 1 750 tonnes.

D'après les calculs portés en annexe 4, et pour un acier du type E 24, la poutre est convenablement dimensionnée et sa réalisation mécanosoudée est proche de l'avant projet défini par la figure 1.7.

1.4.4 DIMENSIONNEMENT DES TIRANTS

a) Calcul des tirants

Le calcul porté en annexe 5 fixe le diamètre minimal des tirants à $d_{\min} = 100$ mm. Comme ce diamètre n'est pas constant le long des tirants, on a augmenté le coefficient de sécurité pour tenir compte des concentrations de contraintes, et le diamètre a été porté à 160 mm (photo 1.9).

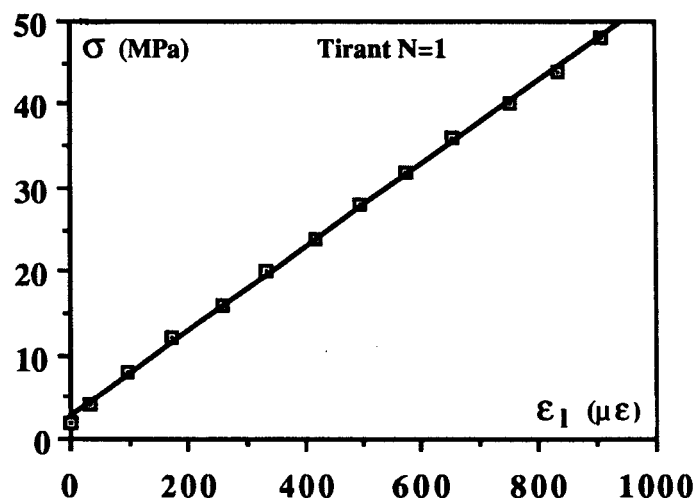
b) Mesure des déformations des tirants

Une jauge électrique d'extensométrie a été collée au milieu de chaque tirant. Ensuite, on a procédé à un chargement triaxial ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$).

On peut calculer, à l'aide des courbes contraintes-déformations des 4 tirants (figure 1.8) la contrainte maximale $\sigma_{\max}$ dans le tirant le plus chargé. Nous obtenons :

$$\sigma_{\max} = 29,2 \text{ daN/mm}^2$$

Le résultat est largement acceptable étant donné que l'acier des tirants présente une résistance élastique $R_e = 94 \text{ daN/mm}^2$, ce qui nous laisse un coefficient de sécurité supérieur à 3.



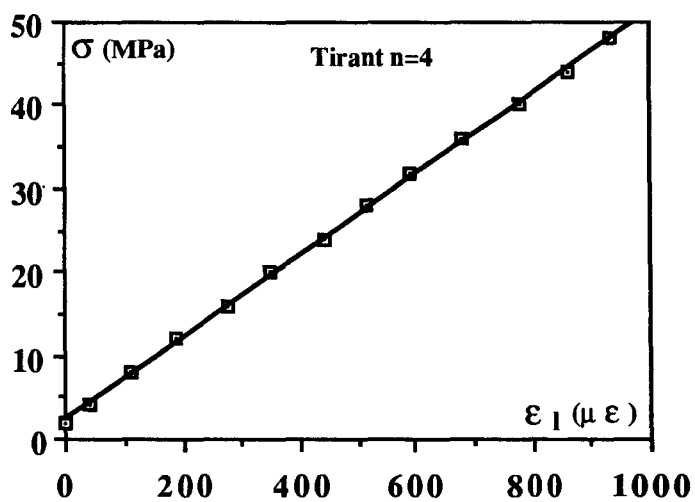
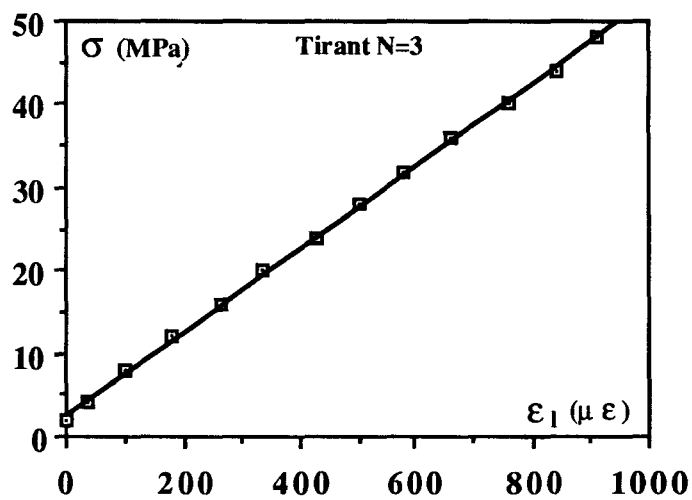
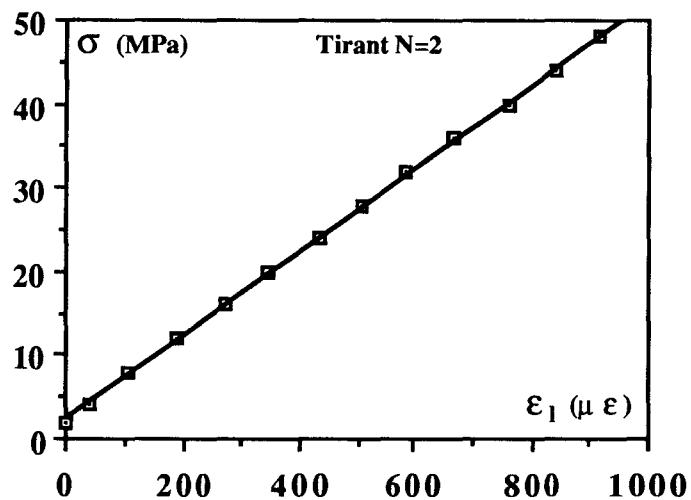


Figure 1.8
Courbes contrainte déformation des quatre tirants de l'axe vertical

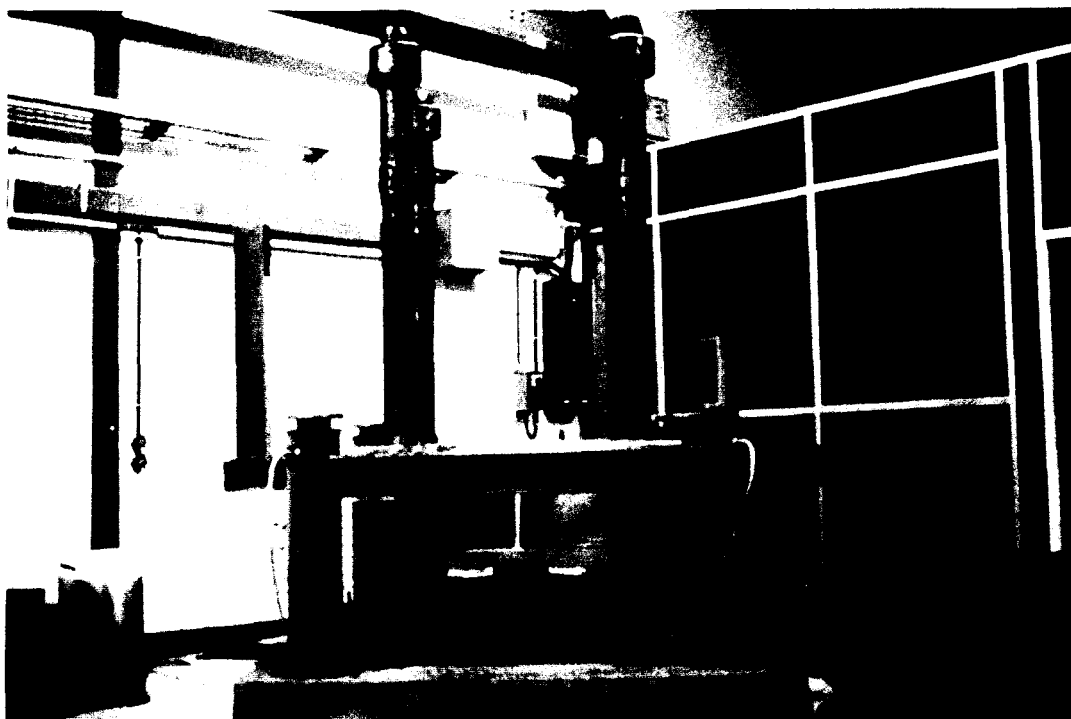


Photo 1.9
Ensemble des tirants

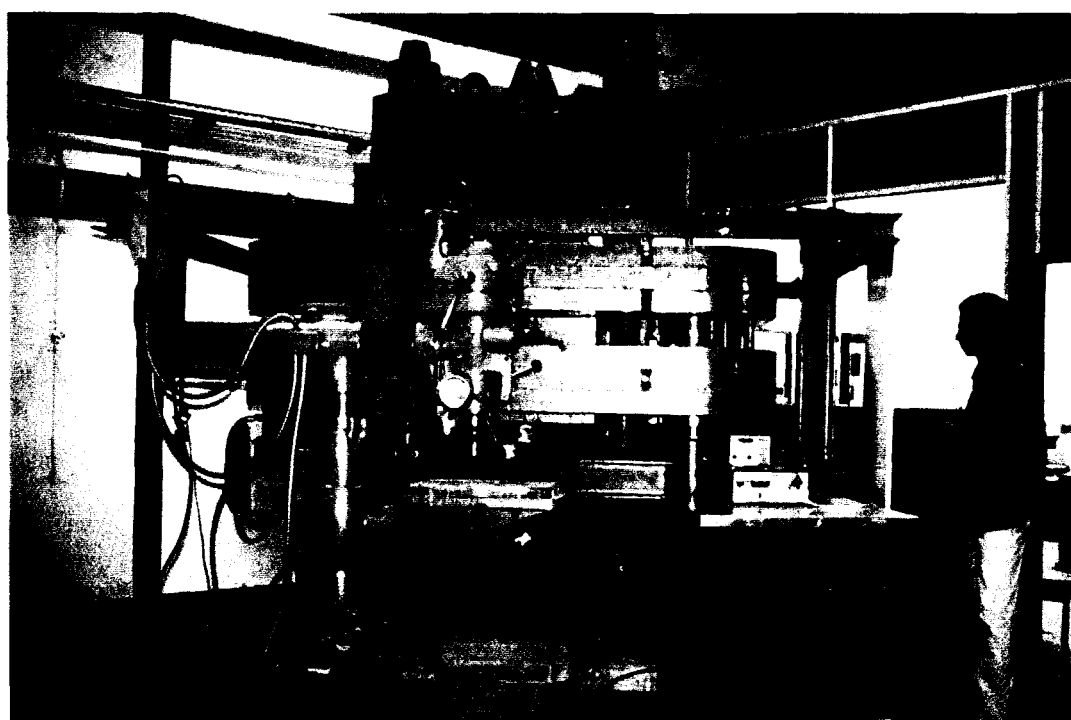


Photo 1.10
Vue d'ensemble du triaxial,
avec la perceuse radiale permettant l'exécution du carottage

CHAPITRE 2

TECHNOLOGIE D'APPLICATION DES CHARGES

2.1 GENERALITES

On classe les véritables triaxiaux suivant les conditions aux limites qu'ils imposent à l'échantillon, en deux catégories :

- Appareils à interfaces souples : les sollicitations sont transmises à l'échantillon par l'intermédiaire d'un appui souple de rigidité nulle (figure 2.1) [1]. L'avantage principal de cet appui est le fait qu'il permet d'appliquer un champ de contrainte pur et uniforme. Ce type d'équipement présente également l'avantage, puisque les pressions et donc les contraintes (normales) appliquées sont maîtrisées, de pouvoir suivre de manière précise des chemins de contraintes complexes (figure 2.2).
- Appareils à interfaces rigides : les efforts sont appliqués par l'intermédiaire de plateaux rigides (figure 2.3) [29]. L'ensemble, vérin, plateau rigide, impose des conditions en déplacement. Ce type d'équipement exige un corps d'épreuve dont les défauts géométriques sont presque inexistantes.

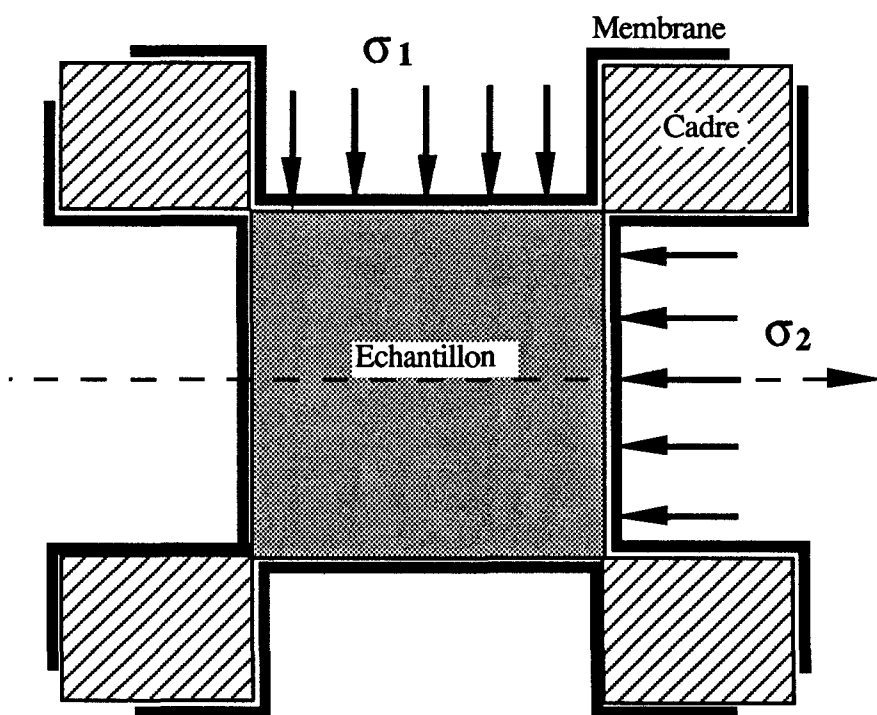


Figure 2.1
Exemple d'appui souple [21]

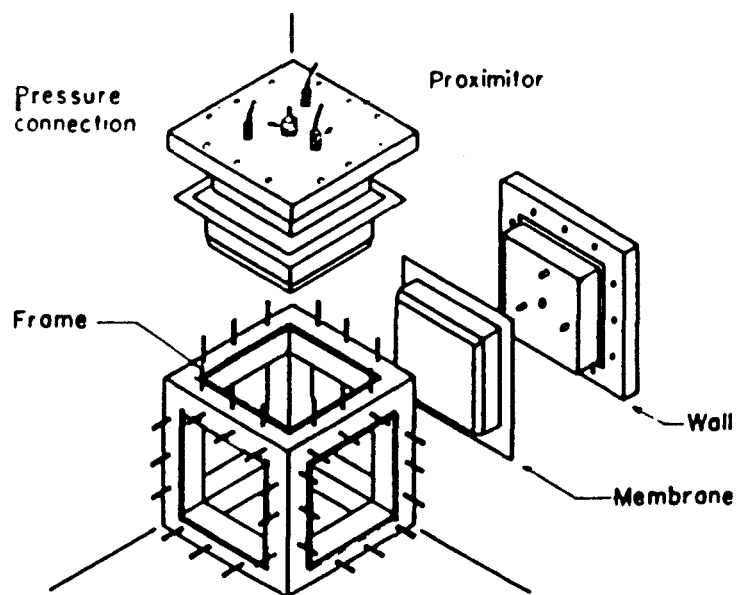


Figure 2.2
Cellule multiaxiale de l'Université de Colorado

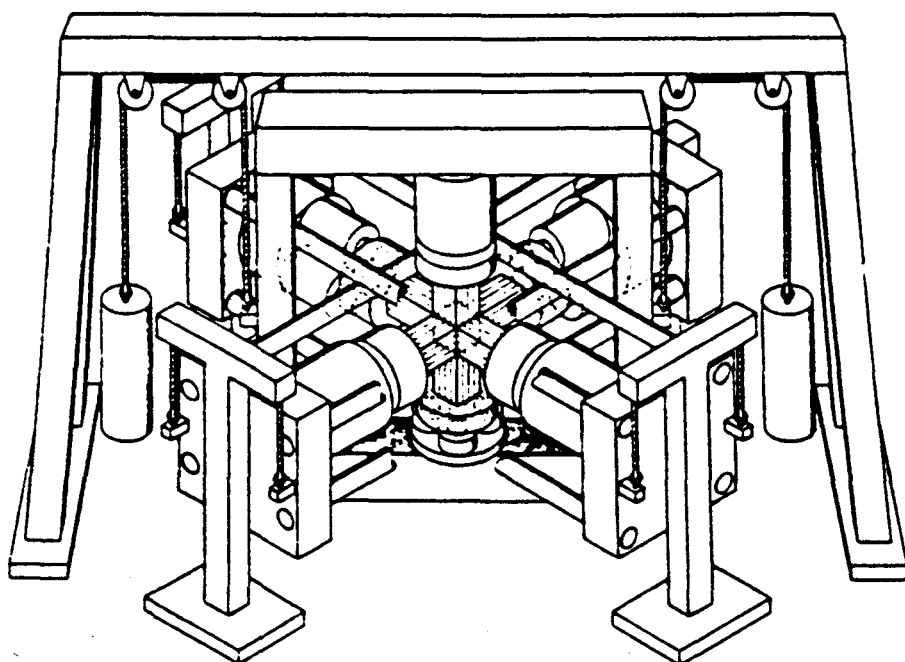


Figure 2.3
Appareil à interface rigide (BAM)

Certains appareils dit mixtes sont équipés de deux genres d'appui. Ainsi, ils cumulent les avantages et les possibilités des deux catégories précitées. L'appareil triaxial de l'Université de Tokyo permet d'appliquer les contraintes principales maximale et intermédiaire par un appui rigide, et la contrainte minimale par un appui souple [38].

2.2 VERINS PLATS

2.2.1 DEFINITION

L'objectif de générer un champ uniforme de contrainte nous a conduit à tenter d'utiliser des vérins plats. Les vérins plats, au contraire des vérins hydrauliques classiques, ne présentent pas de parties mobiles. Ils génèrent le champ de contrainte par déformation de leur enveloppe.

Des poussées importantes, pour un encombrement réduit, sont les principaux atouts des vérins plats.

Nous avons limité la pression à 500 bars dans les vérins plats, ce qui conduit à une taille de 700 mm de diamètre. Les vérins plats seraient donc constitués de deux disques d'acier d'environ 700 mm de diamètre, de 0.5 mm d'épaisseur, et soudés sur leur pourtour (figure 2.4, photo 2.1), puis "gonflés" par une centrale hydraulique qui leur est propre.

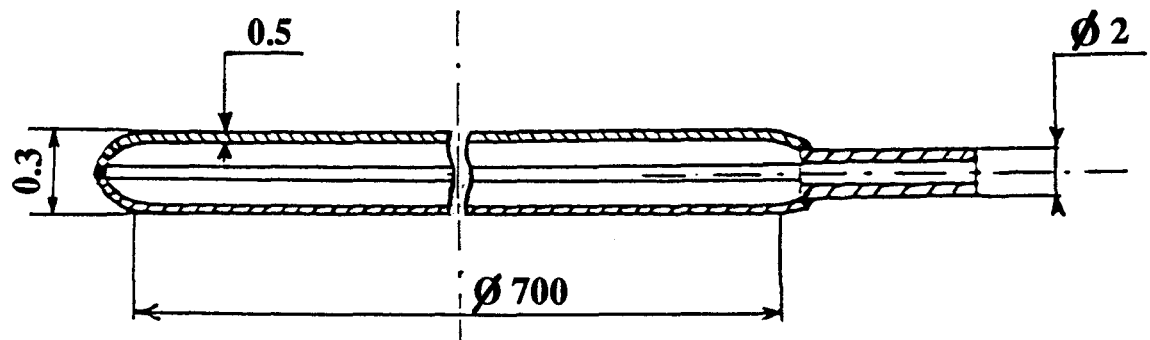


Figure 2.4
Vérin plat - Ebauche

Le corps creux ainsi créé sera gauchi par le soudage. Il sera alors nécessaire de le conformer afin d'obtenir un bon profil de fonctionnement permettant un déplacement de 4 mm. Pour ce faire, on prévoit de gonfler hydrauliquement le vérin plat dans une matrice de conformation (photo 2.2).

Le vérin prend alors l'aspect de la figure 2.5.

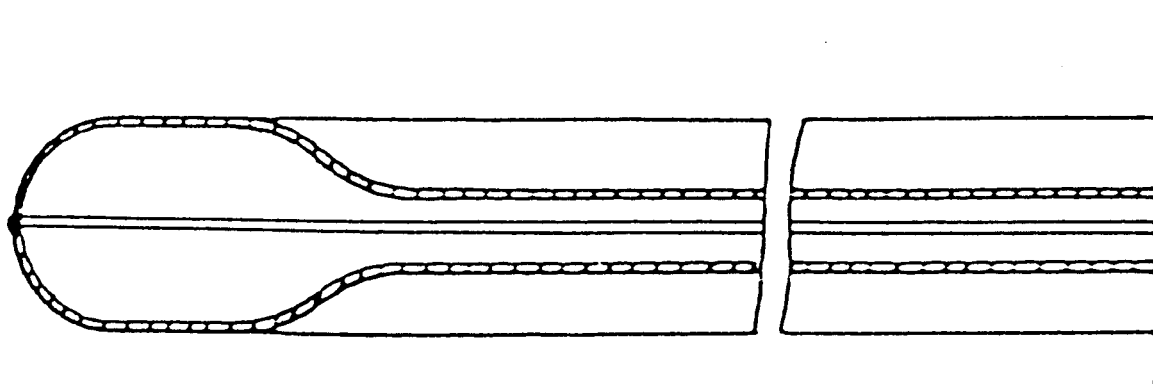


Figure 2.5
Vérin plat fini,

Le profil ainsi obtenu a la propriété d'assurer avec le minimum de contrainte pour la membrane, la déformation maxi du vérin quand ce dernier est sous pression (figure 2.6).

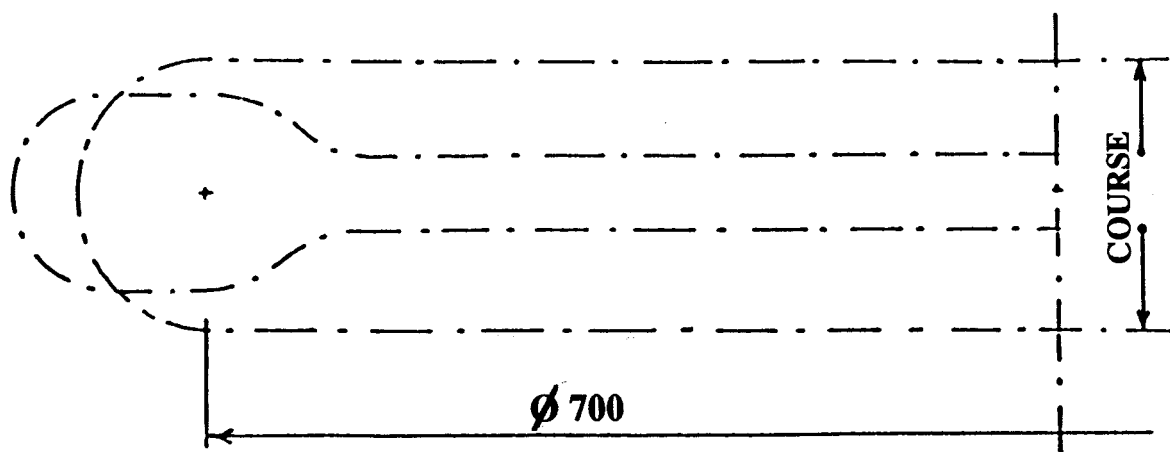


Figure 2.6
Vérin plat - déformation



Photo 2.1
Vérin plat



Photo 2.2
Matrice de conformation

2.2.2 PRECHARGE DES BOULONS DE LA MATRICE DE CONFORMATION

Entre des deux parties de la matrice, assemblées par boulonnage, il est nécessaire d'assurer une liaison rigide, sans ouverture, des deux parties de la matrice pendant la montée en pression, quelque soit les conditions d'utilisation.

Nous avons choisi pour précharger les boulons un tendeur hydraulique (photo 2.3), plutôt qu'un visseur qui détériorerait à brève échéance les écrous. Un vérin annulaire (figure 2.7), placé autour du boulon exerce une traction sur la vis pour provoquer son élongation. Il suffit alors de visser l'écrou à la main pour assurer le serrage entre les deux flans de la matrice. Cet effort hydraulique est exercé de manière si précise qu'il est possible d'obtenir des précharges voisines de la limite élastique sans risque de surcharge.

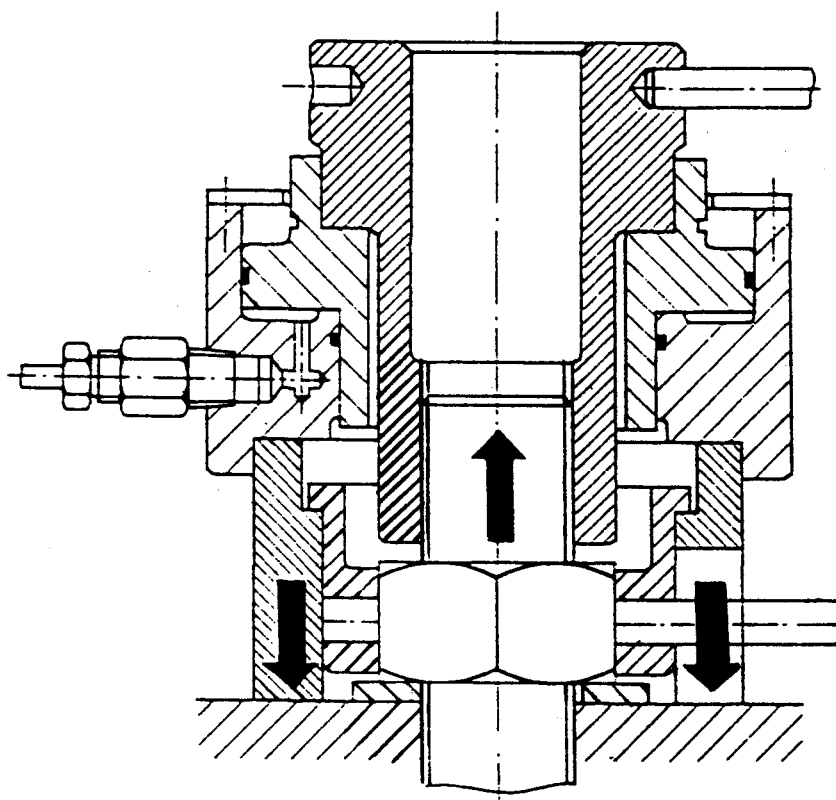


Figure 2.7
Système de chargement

2.3 BLOC VERIN A QUATRE PISTONS

Le vérin plat présente l'inconvénient d'avoir des déplacements limités et une fiabilité faible aux hautes pressions.

2.3.1 CONCEPTION DU BLOC VERIN

Devant le coût des essais et la faible fiabilité des vérins plats, nous avons choisi une deuxième méthode en parallèle : des vérins classiques. L'encombrement réduit et la technique de centrage automatique nous ont conduit à intégrer quatre vérins dans un bloc de même diamètre que les cales circulaires d'appui (figure 2.8, photos 2.4, 2.5). Le compromis encombrement-pression dans les chambres du vérin nous a conduit à choisir des vérins de diamètre 270 mm, ce qui nécessite une pression intérieure de 70 MPa pour atteindre la poussée prescrite dans le cahier des charges.

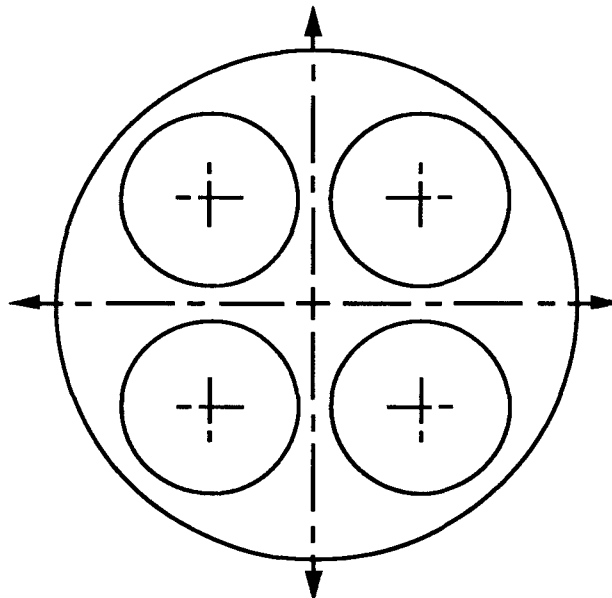


Figure 2.8
Schéma des blocs vérins

2.3.2 EVALUATION DES CONTRAINTES

On a effectué un calcul numérique des contraintes dans les zones sensibles en utilisant la méthode de discontinuité de déplacement qui est une technique de calcul, basée sur l'utilisation des fonctions d'influence. Cette méthode, en déformation plane, due à Crouch [16],[17] s'apparente aux techniques du type équations intégrales. Seul, le contour du domaine est donc discrétisé. Le code de calcul utilisé est celui développé dans le laboratoire DISDEP.

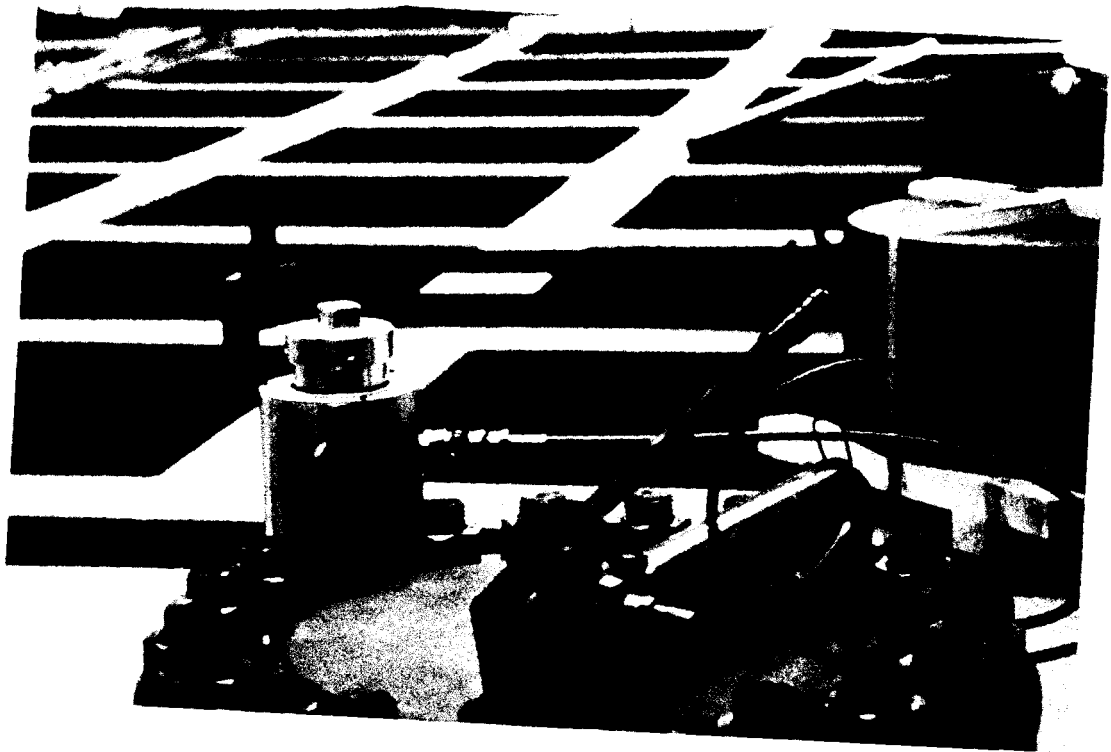


Photo 2.3
Tendeur hydraulique de type SKF

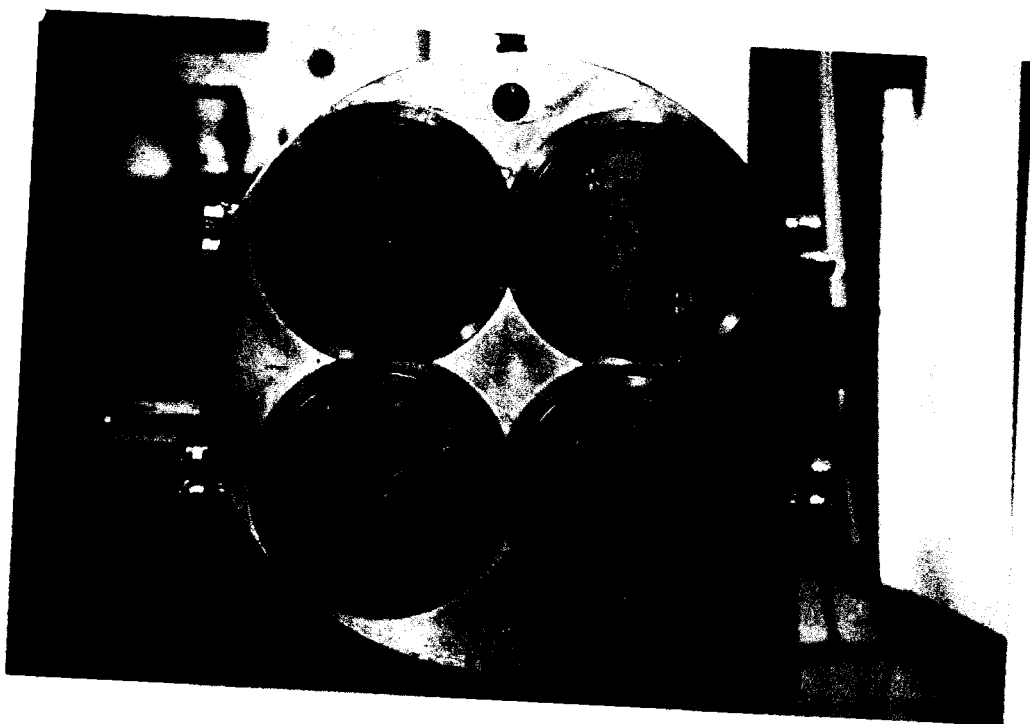


Photo 2.4
Bloc vérin

On a pris en compte la double symétrie par rapport aux axes OX et OZ , ce qui a donné le modèle suivant (figure 2.9).

Le matériau choisi du bloc vérin est un acier faiblement allié : 30 CND 8T dont la valeur de la limite minimale apparente d'élasticité est 1 200 MPa. Le calcul numérique des contraintes montre que les contraintes maximales dans les zones sensibles restent inférieures à 600 MPa (figure 2.10), ce qui donne un coefficient de sécurité de l'ordre de 2.

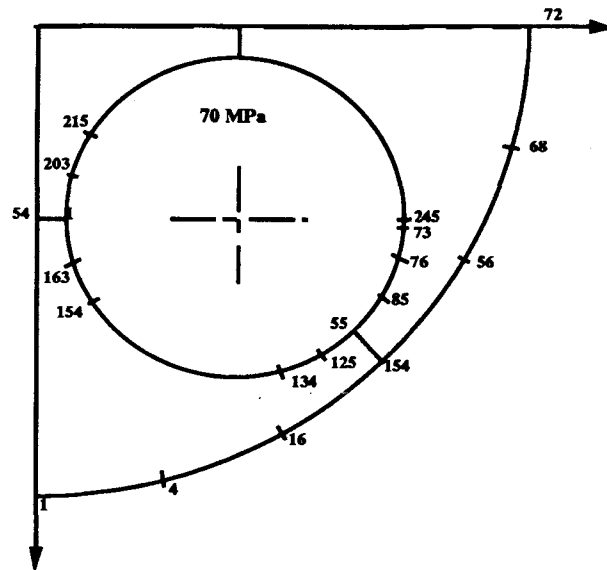


Figure 2.9
Discretisation du contour et des endroits sensibles

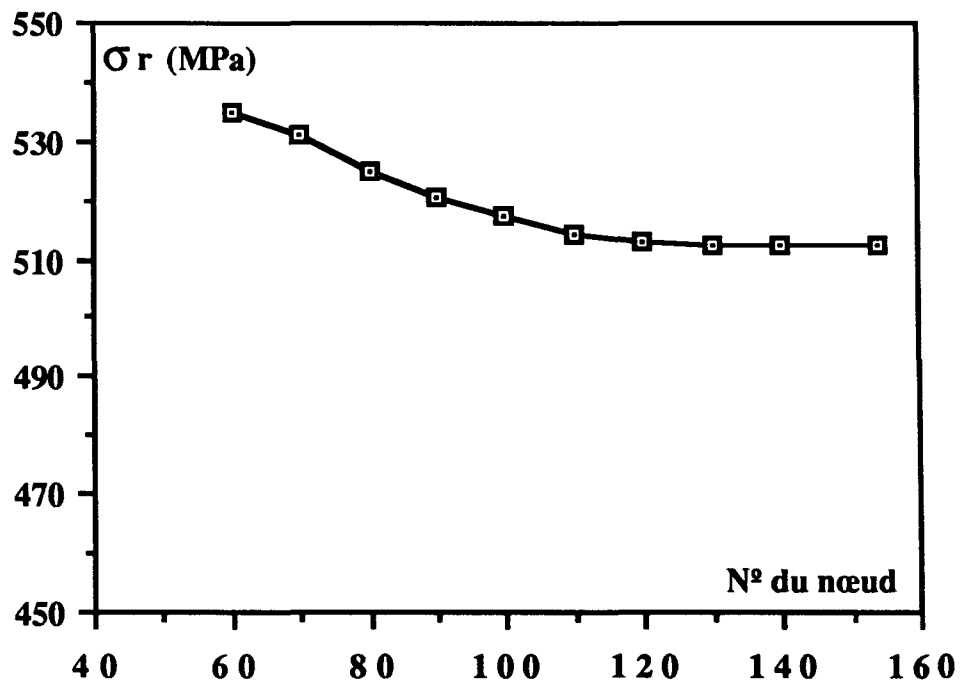


Figure 2.10
Répartition des contraintes

2.4 SYSTEME DE REPORT DE CHARGEMENT

Les efforts de compression sont appliqués à l'échantillon au moyen du montage représenté à la figure 2.11. Le centrage de tous les éléments de poussée, des axes horizontaux est réalisé grâce aux broches de positionnement solidaires aux dalles d'appui, alors que pour l'axe vertical, il est assuré par des goupilles de centrage et des tiges filetées solidaires aux sommiers inférieur et supérieur.

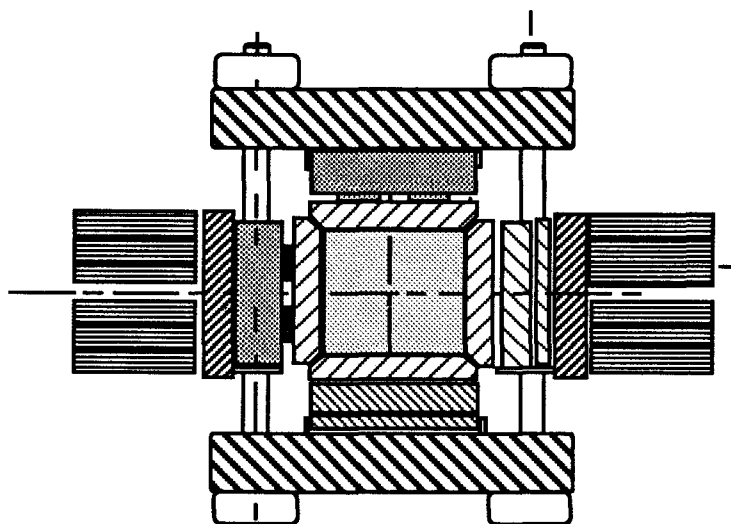


Figure 2.11
Système de report de chargement

2.4.1 AXES DE CHARGEMENT AVEC LE BLOC VERIN

L'ensemble des pièces constituant un axe de chargement (figure 2.12) se compose pour chaque demi-axe et du cadre vers l'échantillon :

- d'une dalle de répartition centrée sur les cerces et permettant le centrage des autres pièces composant l'axe de chargement,
- d'un module de poussée : bloc vérin pour le demi-axe de poussée ou de cales de réglages permettant d'ajuster au mieux la côte "cale" à la côte "bloc" pour le demi-axe de réception (photos 2.6, 2.7).
- d'une tête de chargement (figure 2.13), à surface d'appui de section égale à celle de l'échantillon (photo 2.8). L'indexage angulaire des têtes de chargement (orientation du carré d'appui) est assuré par un vé réglable faisant partie de la tête.

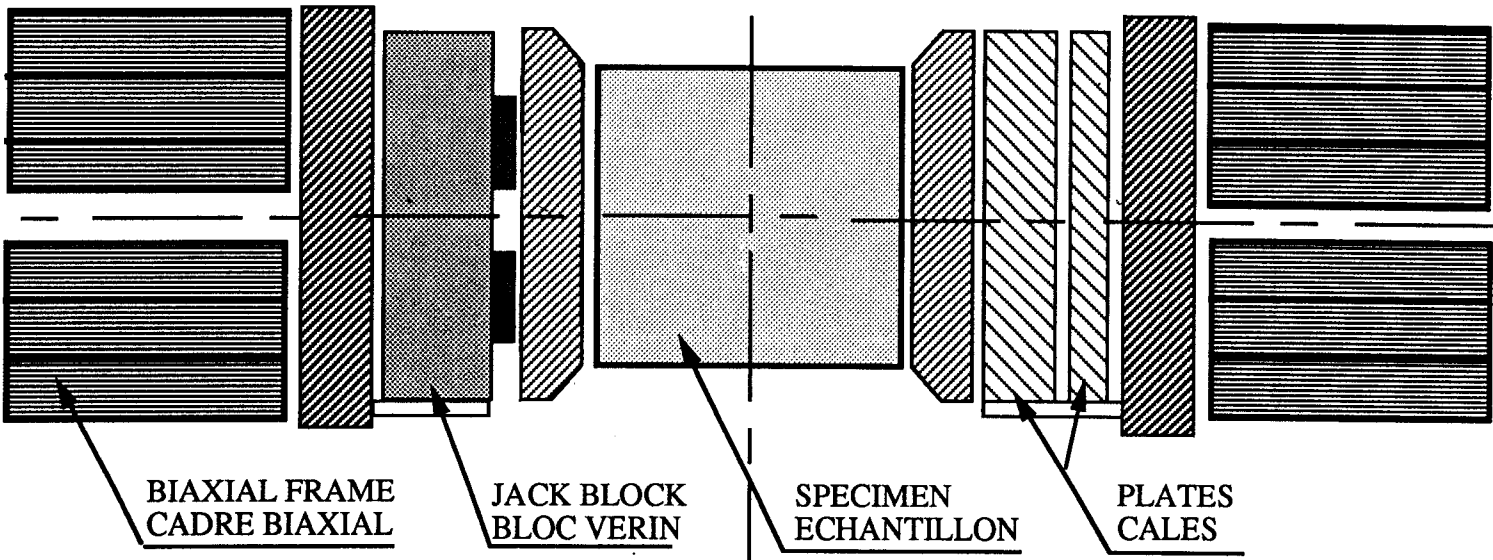


Figure 2.12
Axe de chargement avec le bloc vérin

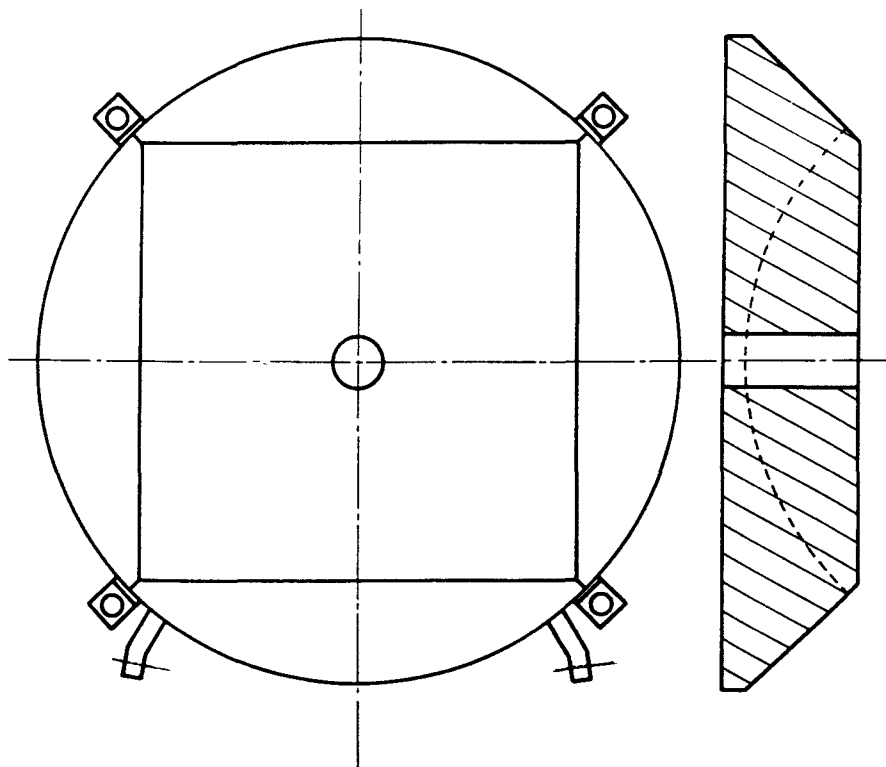


Figure 2.13
Tête de chargement

2.4.2 AXE DE CHARGEMENT AVEC LE VERIN PLAT

La seule différence par rapport à l'axe de chargement avec le bloc vérin se situe au niveau du demi-axe de poussée. On remplace le bloc vérin et la tête de chargement par deux cales circulaires, le vérin plat étant placé entre elles (figure 2.14). Elles ont la même géométrie interne que la matrice de conformation (figure 2.15). L'ensemble cale, vérin plat et tête de chargement est posé sur les broches d'appui bridé, afin de ne former qu'un seul élément. Il ne sera désolidarisé qu'avant la montée sous pression des vérins plats.

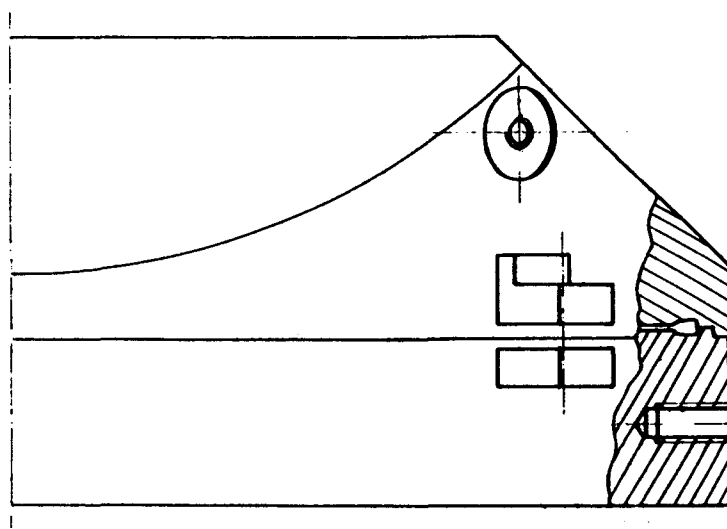


Figure 2.14
Vue montrant la géométrie interne des deux cales

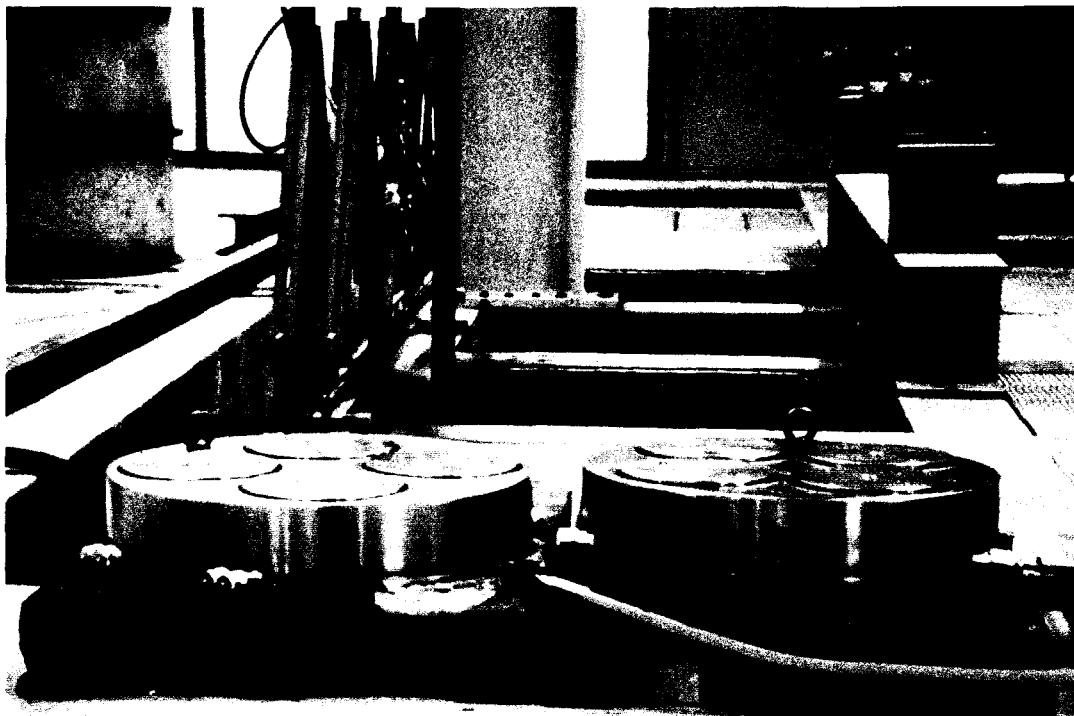


Photo 2.5
Ensemble de deux blocs vérins

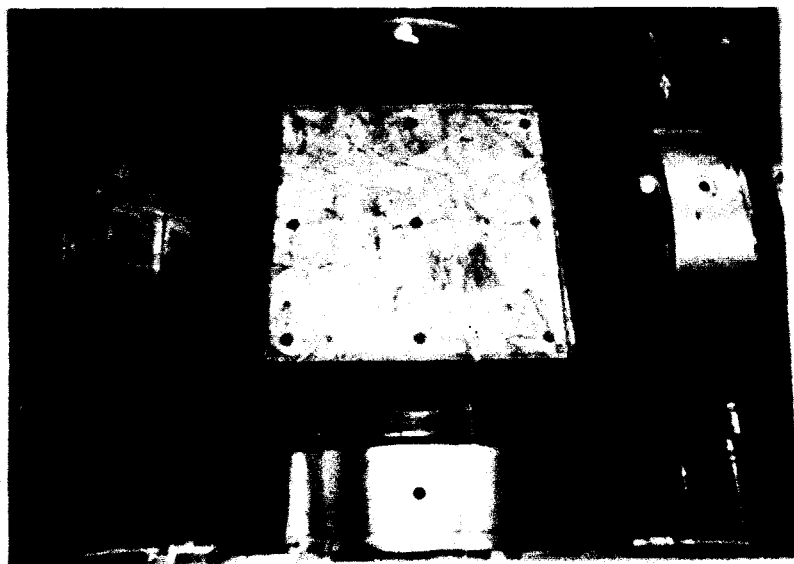


Photo 2.6
Ensemble de deux axes de chargement horizontaux

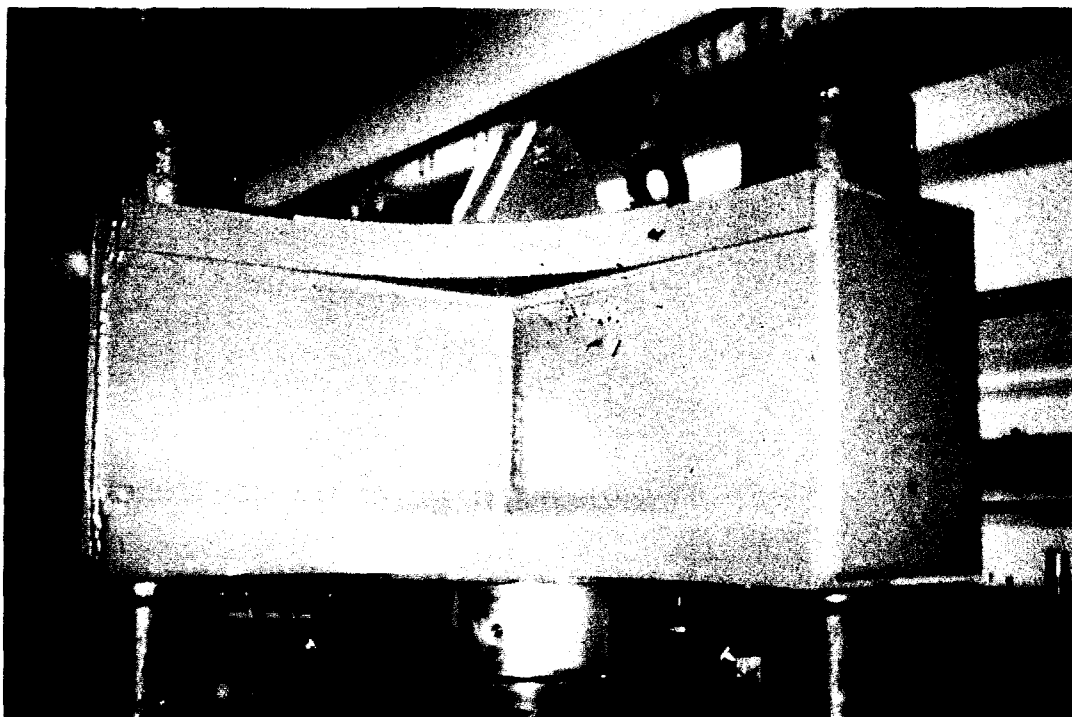


Photo 2.7

Le demi-axe de poussée de l'axe de chargement vertical



Photo 2.8

Tête de chargement

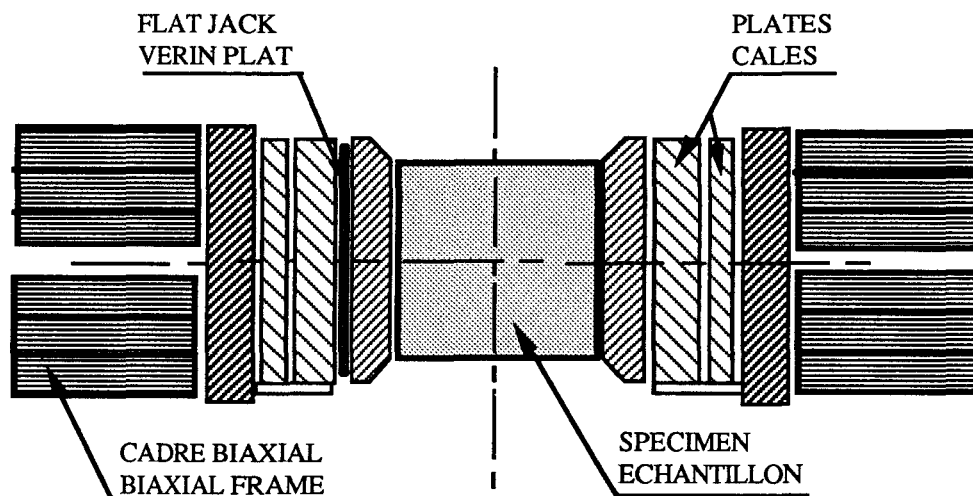


Figure 2.15
Axe de chargement avec le vérin plat

2.5 PARTICULARITES DU TRIAXIAL

2.5.1 FORAGE SOUS CONTRAINTES

L'originalité de l'appareillage réside dans le fait que l'on peut accéder à l'échantillon sous contrainte. Pour permettre l'exécution des forages, un espace central a été aménagé au centre du cadre biaxial, et l'ensemble des pièces composant le demi-axe de réception est muni d'un perçage central (figure 2.16 - photo 2.3). L'angle que fait l'axe de chargement avec l'axe de perçage varie selon que l'on veut exécuter le forage dans une direction principale (angle nul) ou dans un plan principal.

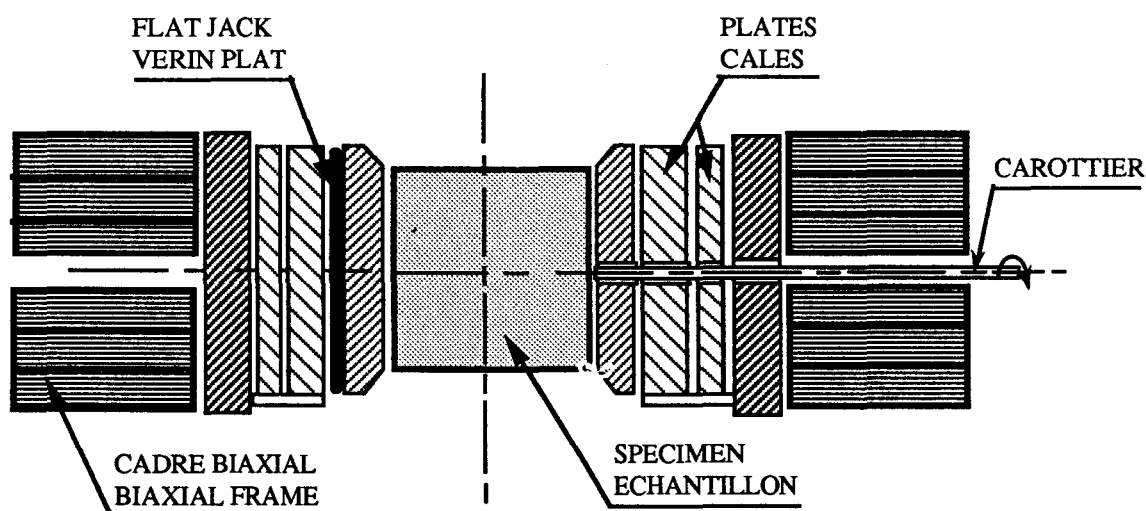


Figure 2.16
Axe de chargement avec dispositif du carottage

2.5.2 CALES DE REDUCTION

Les cales de réduction permettent le prolongement des têtes de chargement (photo 2.10) réduisant ainsi la taille de l'échantillon (figure 2.17). En diminuant la taille du bloc, on accroît l'intensité des contraintes puisque les vérins génèrent une force. Par exemple, la contrainte maximale qu'on peut appliquer à un échantillon de 40 cm de côté est de 110 MPa.

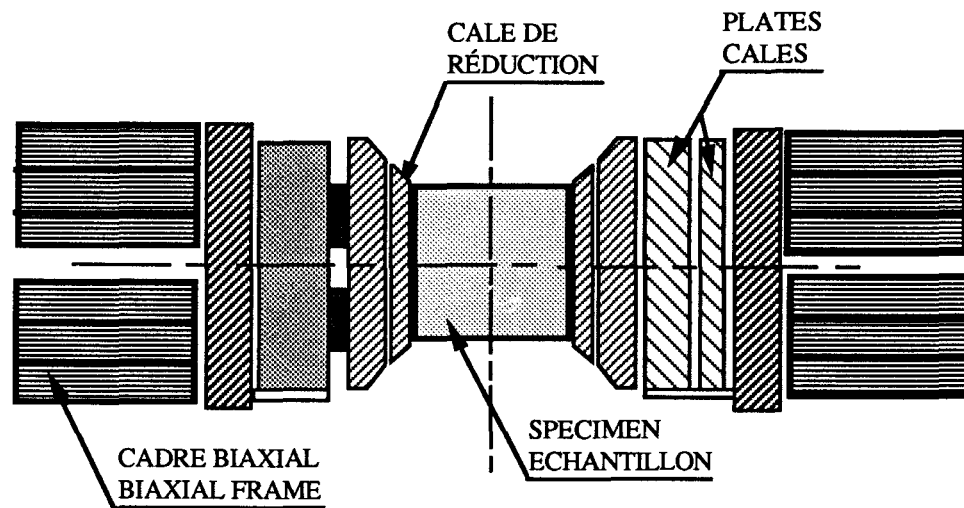


Figure 2.17

Axe de chargement avec un échantillon réduit



Photo 2.9

Carottier passant à travers le cadre biaxial et la dalle d'appui

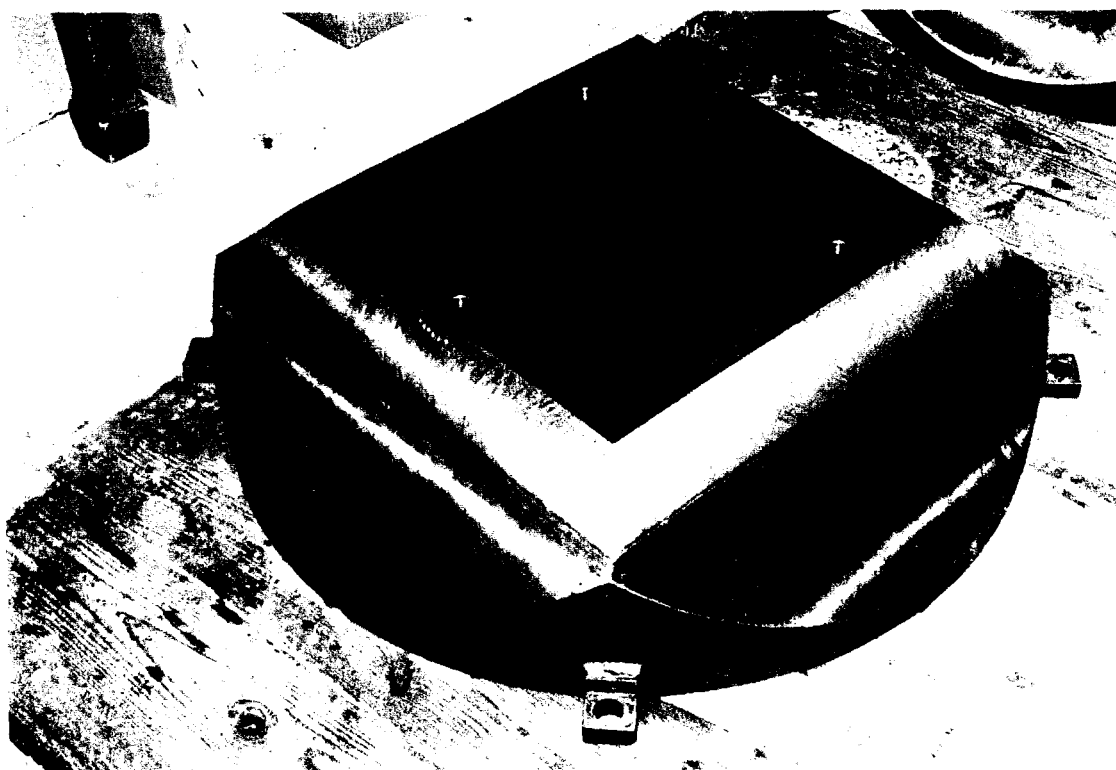


Photo 2.10

Tête de chargement équipée de la cale de réduction

2.6 PROBLEMES TECHNOLOGIQUES RECONTRES ET LEURS SOLUTIONS

Lors du chargement, le centre de gravité du corps d'épreuve se déplace vers les côtés réception alors que le centre de chargement, qui est le point d'intersection des trois axes, est fixe dans l'espace. Les deux centres ne coïncidant plus, produisent des sollicitations parasites qui viennent perturber l'état de contrainte appliqué. Ce phénomène d'excentrement du chargement sur l'éprouvette a été mis en évidence par plusieurs auteurs [3].

Pour permettre à la machine de conserver le centrage du chargement sur l'éprouvette à tous les stades de la déformation, deux solutions sont envisageables.

1ère solution :

Il s'agit de maintenir le centre de gravité de l'éprouvette fixe. Pour cela, on peut procéder de deux façons différentes :

- soit, doter la machine de deux modules de poussée par axe (figure 2.18). Comme le chargement est symétrique, le centre de gravité reste, à tout instant du chargement, fixe. Cette solution, malgré le surcoût qu'elle produit, paraît attrayante. Cependant, l'utilisation d'un bloc vérin par demi-axe va obstruer l'accès à l'échantillon supprimant du même coup, une condition principale du cahier des charges.
- soit, équiper la machine d'un système permettant le mouvement en translation de chaque axe suivant sa direction de chargement. Ainsi, le centre de gravité de l'éprouvette reste fixe, et c'est le demi-axe de poussée et le demi-axe de réception qui se déplacent symétriquement par rapport à lui. Ce système a été choisi par Bascoul [4] pour équiper la presse biaxiale de l'INSA de Toulouse (figure 2.19). Cependant, de par la conception du triaxial, cadre biaxial rigide, un tel système est inadaptable.

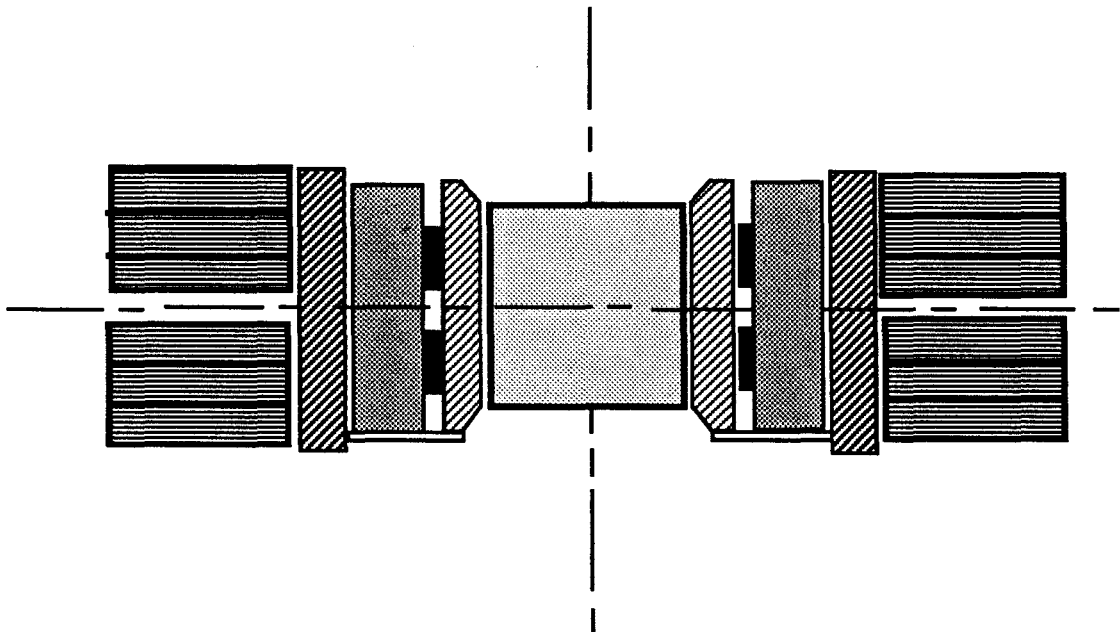


Figure 2.18

Axe de chargement avec deux modules

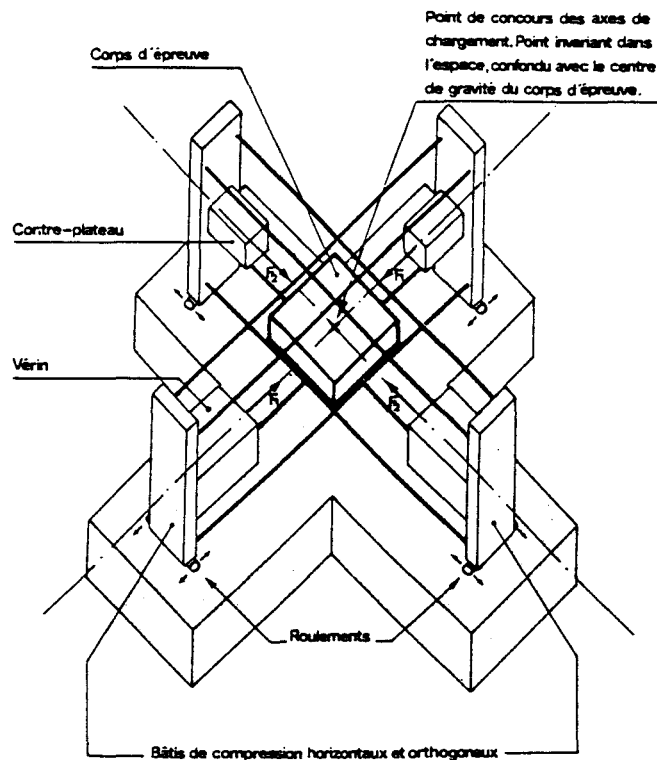


Figure 2.19
Presse de l'INSA de Toulouse (avec le système)

2ème solution :

Il s'agit de permettre à la machine de "suivre", en cours d'essai, les déformations du corps d'épreuve. Pour cela, il faut libérer le mouvement de translation de chaque axe dans le plan normal à la direction du chargement. L'idée de réaliser un palier hydrostatique entre les cales de chaque demi-axe est intéressante et reste toujours envisageable. Toutefois, en plaçant un corps déformable derrière chaque tête de chargement, tout en réduisant la portée des broches de positionnement et en choisissant judicieusement le système d'anti-fretage on arrivera à réduire fortement les effets parasites dûs à l'excentrement du chargement.

CHAPITRE 3

SYSTEME D'ANTIFRETTAGE

3.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La qualité d'un essai triaxial sur éprouvette cubique dépend, pour beaucoup, de l'uniformité et de l'homogénéité des champs de contraintes appliquées. En effet, le plateau d'appui possède des caractéristiques mécaniques généralement très différentes de celles du corps d'épreuve. Cette différence crée, au cours du chargement, des efforts tangentiels dans l'interface appui-éprouvette. Ces efforts, dus au frottement, viennent perturber le champ de contrainte appliqué. Plusieurs chercheurs confrontés à ce phénomène, nommé communément frettage, ont dû élaborer des dispositifs expérimentaux permettant de la réduire fortement pour ne pas dire le supprimer.

Les dispositifs d'antifrettage utilisés dans les essais pluriaxiaux reposent sur l'une des trois techniques suivantes :

3.1.1 Technique d'interposition

Le procédé consiste à intercaler entre la tête d'appui et l'éprouvette des matériaux facilitant la dilatation transversale. Demir [18] a obtenu une bonne distribution des contraintes dans l'échantillon en intercalant trois feuilles graissées de téflon. D'autres chercheurs [27,43] utilisent des feuilles de laiton, cuivre, ou aluminium dans le but de réduire le frettage au niveau de l'interface de chargement.

Cette technique se ramène toujours à mettre en contact de l'éprouvette des matériaux dont les caractéristiques sont différentes des siennes. En outre, les matériaux utilisés en couches minces et soumis à des fortes pressions peuvent exercer des efforts tangentiels inverses qui tendent à endommager l'échantillon.

3.1.2 Technique d'application des charges en un nombre fini de points : (ou technique de discrétisation de la charge)

Cette technique consiste à appliquer le chargement en un nombre fini de points afin de fragmenter les sollicitations transversales parasites. Maso [31] a réussi à réduire le frettage dans l'interface en appliquant le chargement par l'intermédiaire de plateaux rigides usinés en forme de peigne à dents prismatiques (figure 3.1). On peut remarquer que le dispositif n'assure pas la discrétisation de la charge suivant l'épaisseur de l'éprouvette.

3.1.3 Technique de l'appui à peignes

Il s'agit d'un ensemble de tiges d'acier espacées de quelques dixièmes de millimètres. L'ensemble des tiges est encastré dans une dalle (figure 3.2). Chaque tige, calculée à la limite de la charge critique du flambement, est susceptible de suivre localement le déplacement transversal de l'interface tige-éprouvette. Hilsdorf [25] est l'un des premiers expérimentateurs à avoir préconisé ce genre d'appui. Winkler [53] l'avait amélioré en intercalant un élastomère entre les tiges et la dalle. Toutefois, les études faites sur cette technique [47,51] montrent que les efforts nécessaires pour déformer latéralement les tiges d'acier sont suffisamment importants pour que la libre dilatation transversale soit limitée. En outre, compte-tenu de la taille du bloc, ce dispositif n'a pas été retenu, pour les encombrements énormes qu'il induisait.

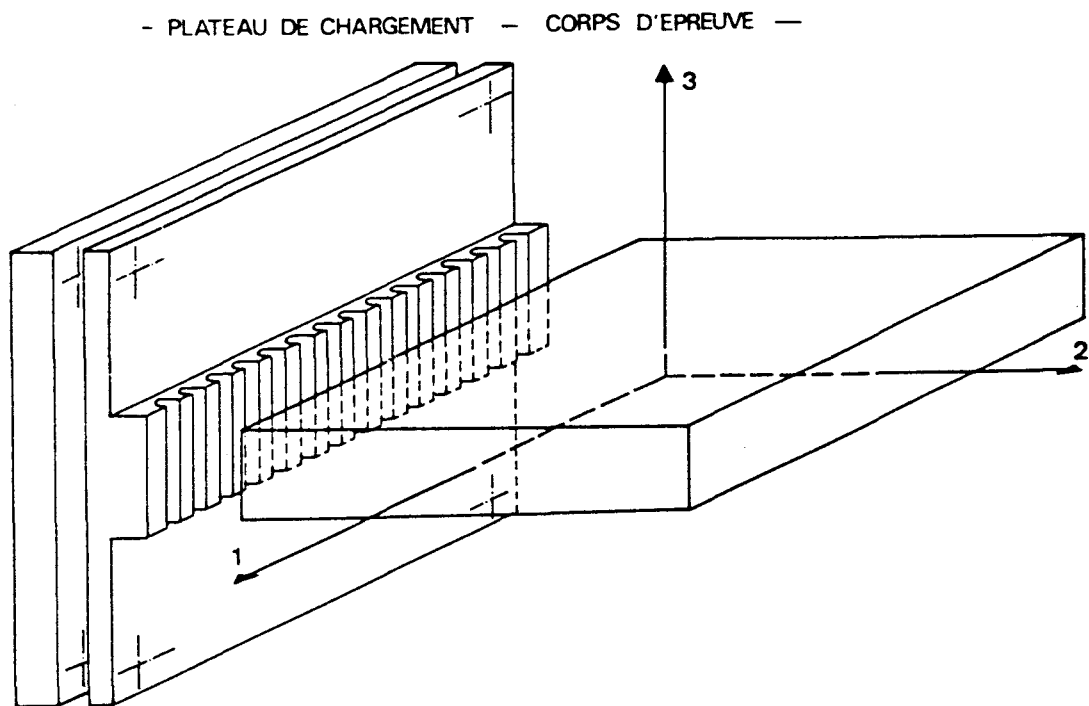


Figure 3.1
Système d'antifrettage d'après Maso [32]

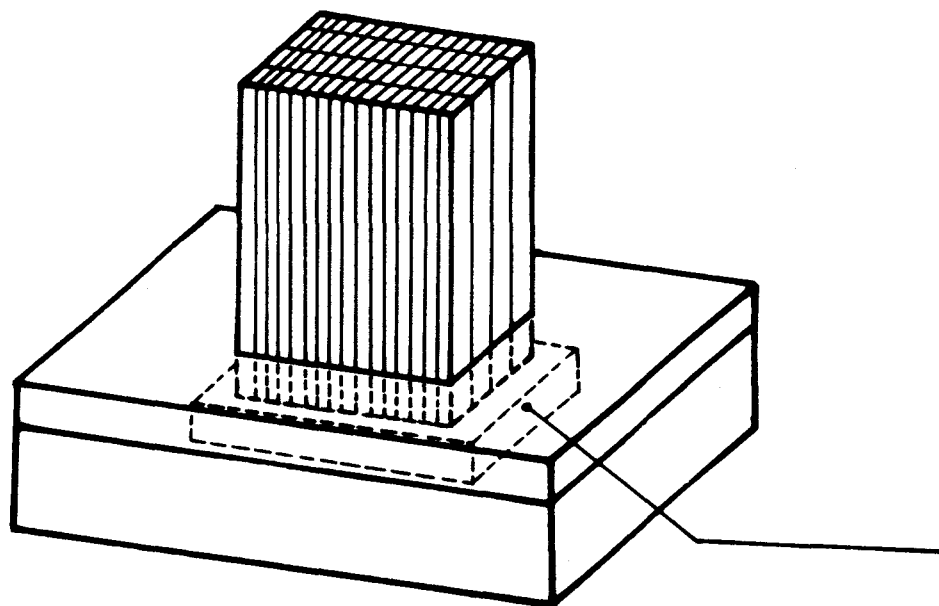


Figure 3.2
Dispositif d'appui à peignes

3.2 CONCEPTION D'UN NOUVEAU DISPOSITIF D'ANTIFRETTAGE

Les diverses techniques proposées pour éliminer le frettage dans l'interface de chargement ne nous ont pas paru répondre convenablement à notre problème. Nous avons donc entrepris de concevoir un dispositif spécifique d'antifrettage permettant aussi une instrumentation plus aisée des faces de l'échantillon. La réalisation est effectuée au moyen d'un ensemble de plots d'acier disjoints de section $25 \times 25 \text{ mm}^2$ et de 5 mm d'épaisseur, positionnés régulièrement (espacement environ 1 mm) sur chaque face de l'éprouvette à l'aide d'une colle silicone (figure 3.3) [9]. Ce composant permet, par sa déformabilité, de réaliser une interface glissante.

La discontinuité de la surface ainsi réalisée permet la mise en place de l'instrumentation de l'échantillon par suppression des plots correspondants. Les espaces libres entre les plots permettent de disposer les fils de connexion aux chaînes de mesure (figure 3.4) (photo 3.1).

Le dispositif d'antifrettage est complété par la réalisation d'une interface déformable disposée entre les plots et la tête de chargement, ayant pour but d'une part, de rattraper les défauts géométriques du corps d'épreuve, et d'autre part, d'encaisser les déformations transversales.

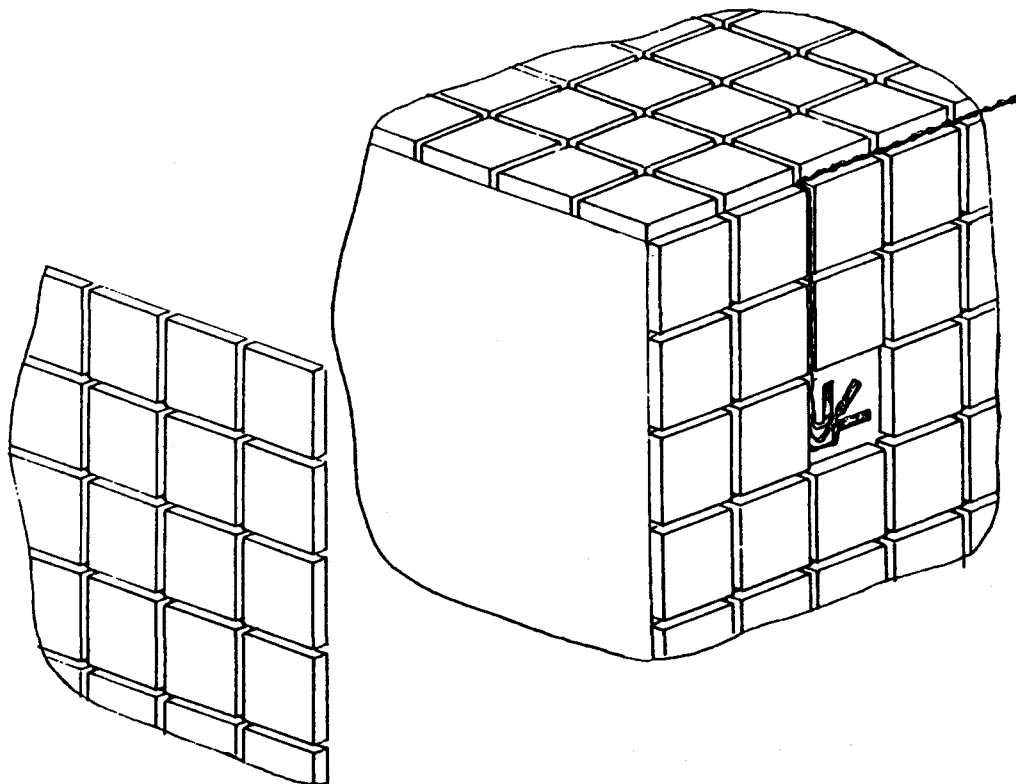


Figure 3.3
Dispositif d'antifrettage

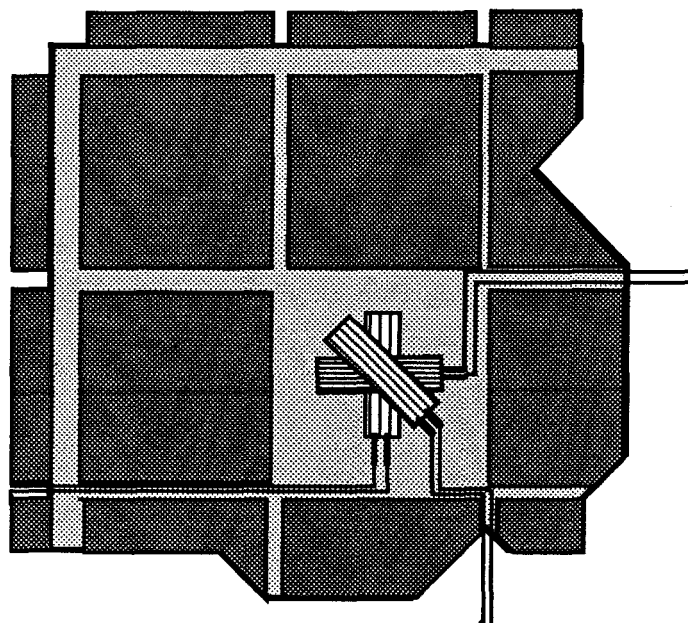


Figure 3.4
Instrumentation de l'échantillon

3.3 ETUDE EXPERIMENTALE DU DISPOSITIF D'ANTIFRETTAGE

Pour tester l'efficacité du système d'antifretage, un bloc de 30 cm de béton a été coulé. Aucune précaution n'a été prise sur le parallélisme des faces, et le défaut était de l'ordre du cm. Les plots d'acier décrits précédemment ont été collés au silicone sur une face. Le bloc a été placé sous les plateaux d'une presse à appuis rotulés. Entre les plots et le plateau de la presse, 5 dispositions ont été testées.

- | | |
|-------------------------|---|
| 1ère disposition | • contact direct |
| 2ème disposition | • une feuille de téflon d'épaisseur 1 mm est intercalée |
| 3ème disposition | • une feuille de laiton d'épaisseur 1 mm est intercalée |
| 4ème disposition | • une feuille de téflon et une autre de laiton d'épaisseur 1 mm chacune ont été placées |
| 5ème disposition | • deux feuilles de téflon d'épaisseur 1 mm chacune ont été intercalées |

Des jauges d'extensométrie en rosette ont été collées sur les faces latérales non chargées de l'échantillon à 3 cm de l'interface de chargement (figure 3.5). Cette instrumentation nous a permis de mesurer en fonction de la charge appliquée, les déformations axiales ainsi que l'angle d'inclinaison de la direction principale [10].

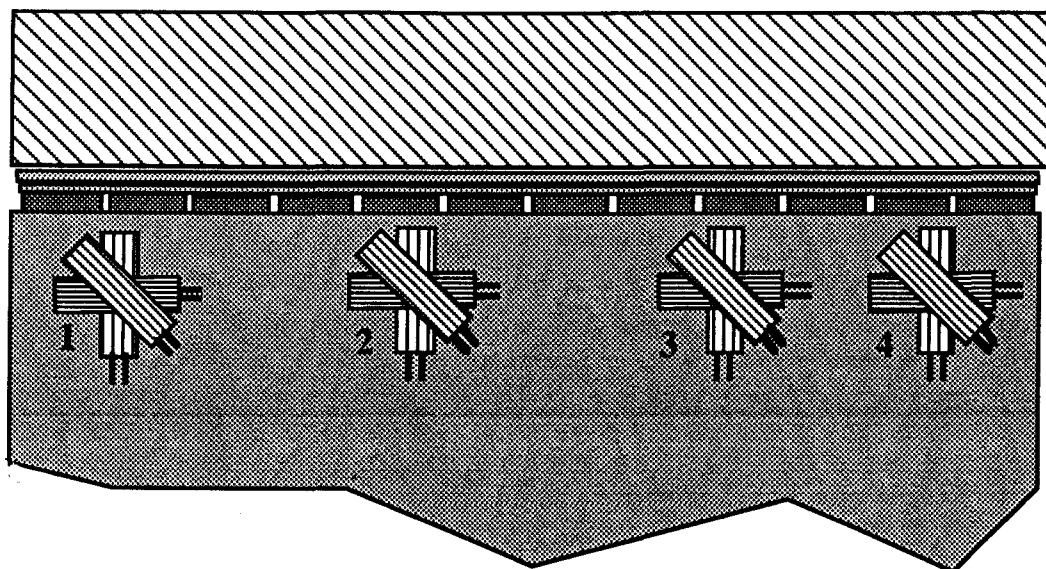


Figure 3.5

Montage anti-fretage avec deux feuilles de téflon

La solution la plus satisfaisante utilise l'interposition de deux feuilles de téflon d'épaisseur 1 mm chacune, comme le montre la figure 3.6, pour une contrainte appliquée de 12 MPa. La figure 3.7 montre que le dispositif choisi permet avec une bonne approximation, d'appliquer un champ de contrainte uniforme au voisinage de l'interface de chargement.

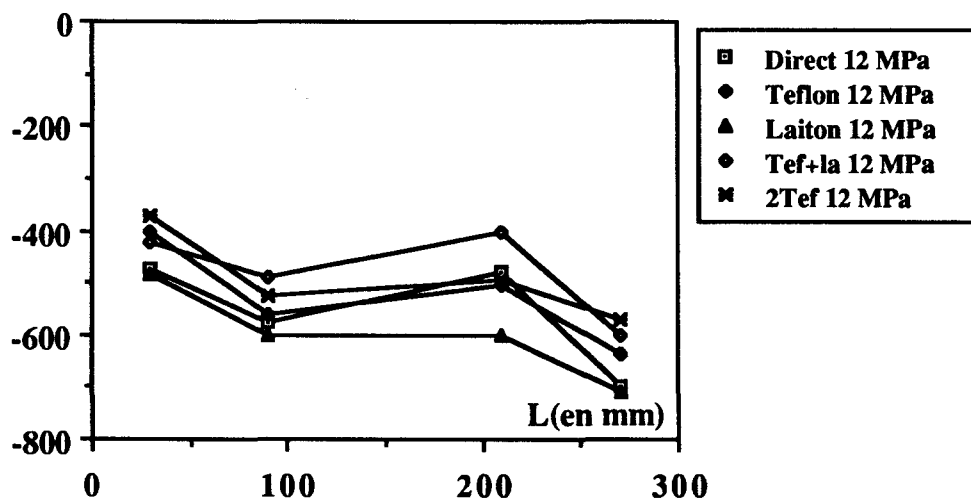


Figure 3.6

Comparaison de l'efficacité des différents systèmes entre les plots et le système d'appuis

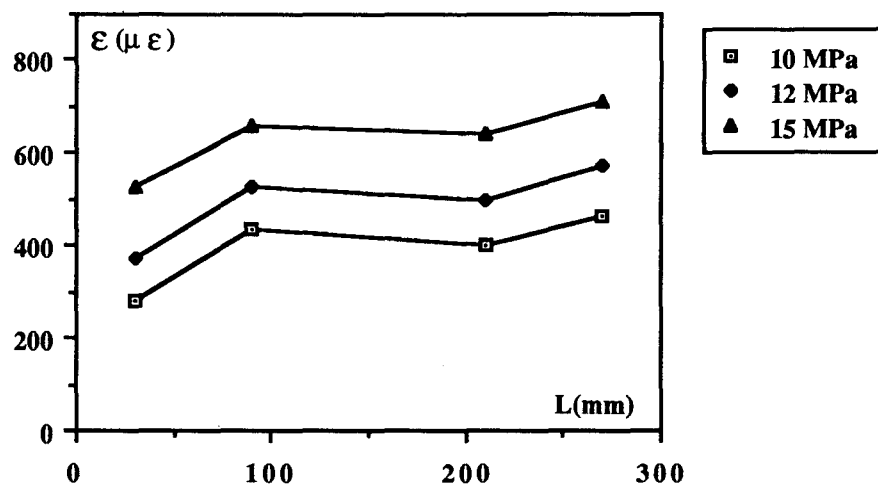


Figure 3.7
Déformations axiales à 3 cm de la face d'appui

La figure 3.8 montre que les directions principales ont une orientation qui varie dans un intervalle expérimentalement acceptable.

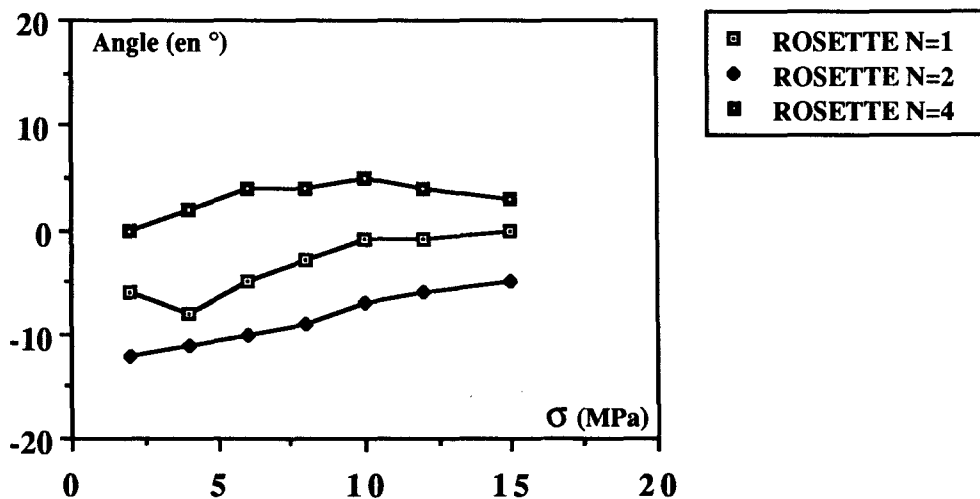


Figure 3.8
Inclinaison des directions principales

3.4 VALIDATION SUR LE TRIAXIAL

Dans le but de vérifier l'efficacité du dispositif d'antifrettage sur la machine triaxiale, nous avons effectué deux études complémentaires. Une étude qualitative qui nous a permis de visualiser le champ de contraintes dans les zones proches de l'interface de chargement. Et une étude quantitative qui nous a permis de comparer les courbes contrainte-déformation expérimentale et théorique du corps d'épreuve.

3.4.1 ETUDE QUALITATIVE

Parce qu'elle est plus précise et ne nécessite, dans notre cas, aucun investissement, on a préféré utiliser la méthode des jauges à fils résistants à la photoélasticimétrie [2] pour visualiser le champ de contraintes dans l'échantillon. Nous avons utilisé pour cette étude deux échantillons cubiques de 50 cm d'arête. Le premier est un cube de calcaire obtenu par découpe classique. Le deuxième est un cube de granite découpé, puis rectifié. Ses tolérances géométriques de perpendicularité et de parallélisme sont inférieures à 0,5 mm.

Manipulation

Nous avons recouvert cinq des six faces de chaque échantillon par les plaques d'antifrettage (photo 3.2). La face restante est équipée de 8 jauges d'extensométrie suivant le schéma de la figure 3.9.

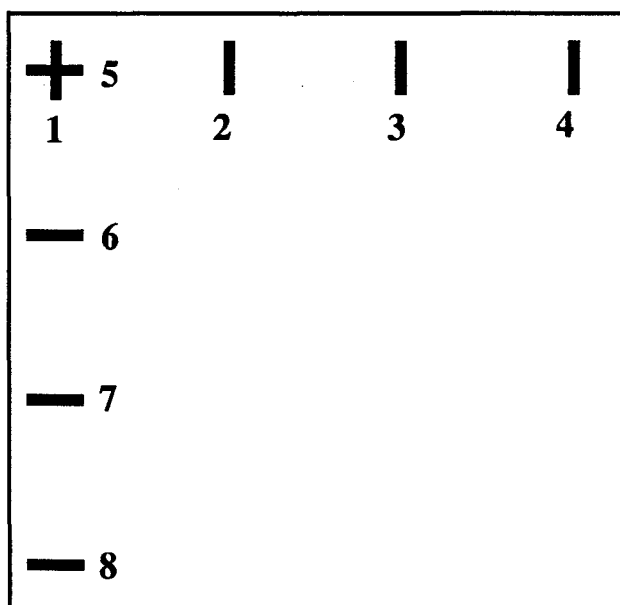


Figure 3.9
Echantillon équipé de 8 jauges

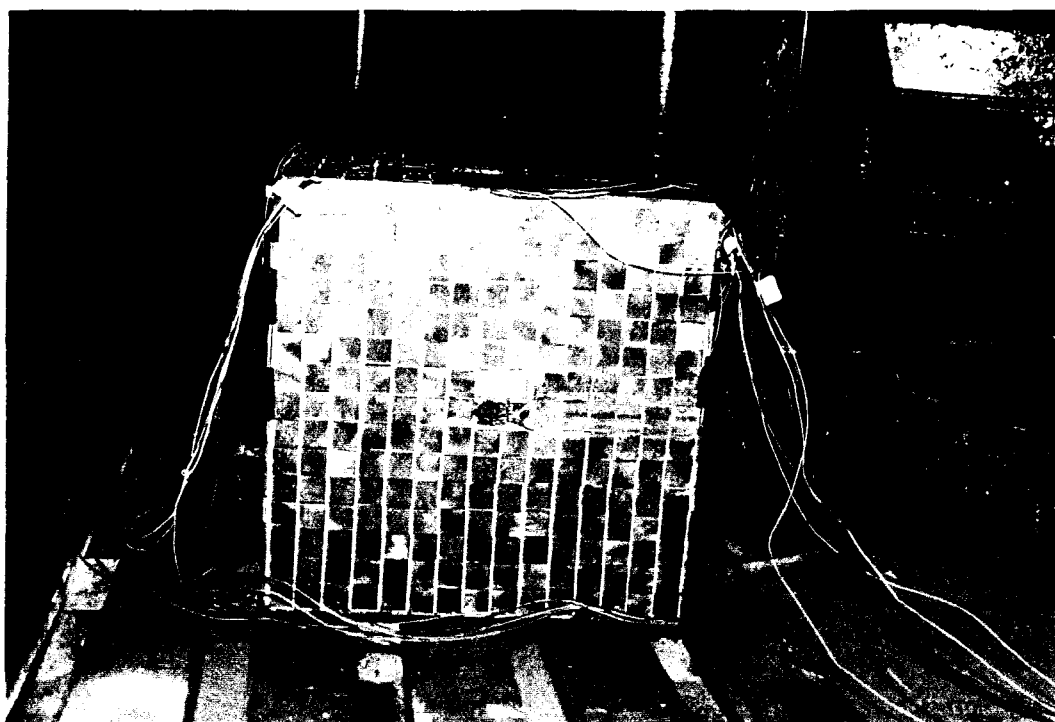


Photo 3.1
Echantillon équipé de jauges en rosettes

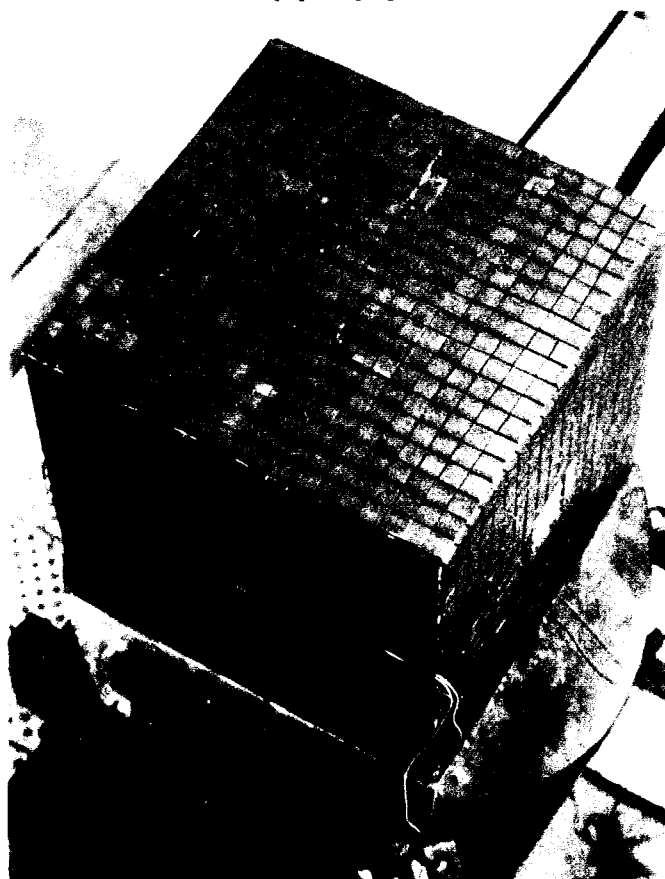


Photo 3.2
Echantillon recouvert de plots

Nous avons positionné le corps d'épreuve au milieu de la machine triaxiale, la face supérieure étant celle contenant les jauges. Ensuite, nous avons procédé à un chargement biaxial isotrope suivant les axes horizontaux.

Les jauges d'extensométrie nous ont permis de mesurer, en fonction des contraintes appliquées, et selon les axes de chargement les déformations locales pour chaque échantillon.

Résultats et interprétation

Les résultats obtenus (déformations en fonction de la contrainte appliquée) sont regroupés dans les tableaux suivants :

Echantillon de calcaire

σ (MPa) \ N° de la jauge	1	2	3	4	5	6	7	8
4 MPa	- 60	- 30	- 147	- 80	0	- 16	- 11	- 16
6 MPa	- 165	- 95	- 246	- 167	- 22	- 75	- 55	- 50
8 MPa	- 250	- 154	- 310	- 225	- 64	- 150	- 117	- 103
10 MPa	- 338	- 226	- 375	- 296	- 120	- 233	- 180	- 165
12 MPa	- 392	- 268	- 414	- 352	- 186	- 316	- 241	- 227
14 MPa	- 452	- 320	- 458	- 406	- 248	- 397	- 310	- 287

Echantillon de granite

σ (MPa) \ N° de la jauge	1	2	3	4	5	6	7	8
10	- 203	- 141	- 160	- 166	- 152	- 173	- 179	- 167
20	- 371	- 339	- 415	- 296	- 360	- 334	- 321	- 315
30	- 492	- 520	- 556	- 472	- 536	- 498	- 475	- 449
40	- 582	- 662	- 684	- 586	- 622	- 625	- 592	- 554

Les figures 3.10 et 3.11 montrent que le dispositif permet, avec une bonne approximation, d'appliquer un champ de contraintes uniforme au voisinage des faces de chargement pour le granite.

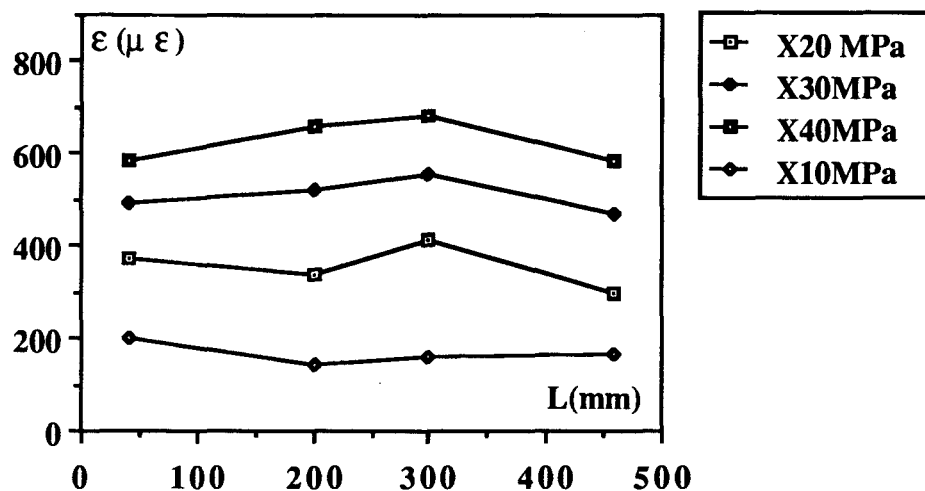


Figure 3.10

Variation des déformations dans le granite suivant l'axe de chargement X
le long d'une arête à 4 cm du bord

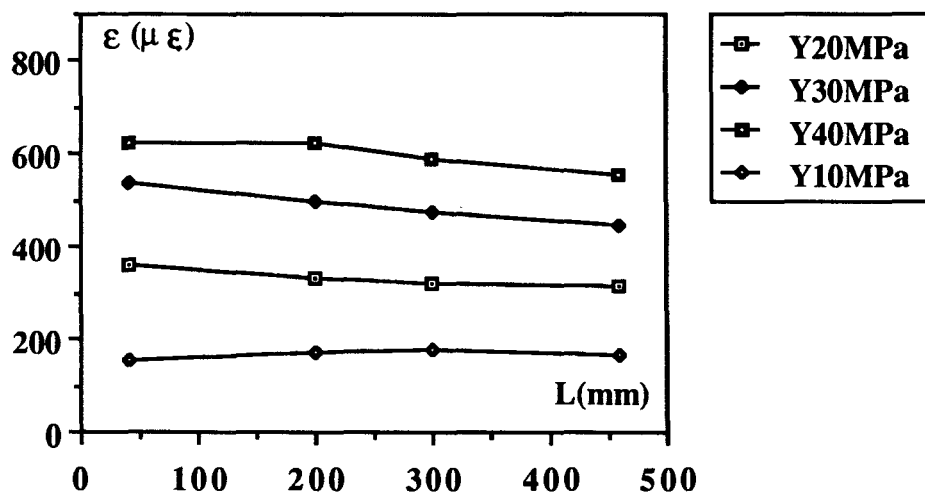


Figure 3.11

Variation des déformations dans le granite suivant OY
le long d'une arête à 4 cm du bord

Les figures 3.12 et 3.13 montrent que pour le calcaire, la distribution des déformations est loin d'être uniforme.

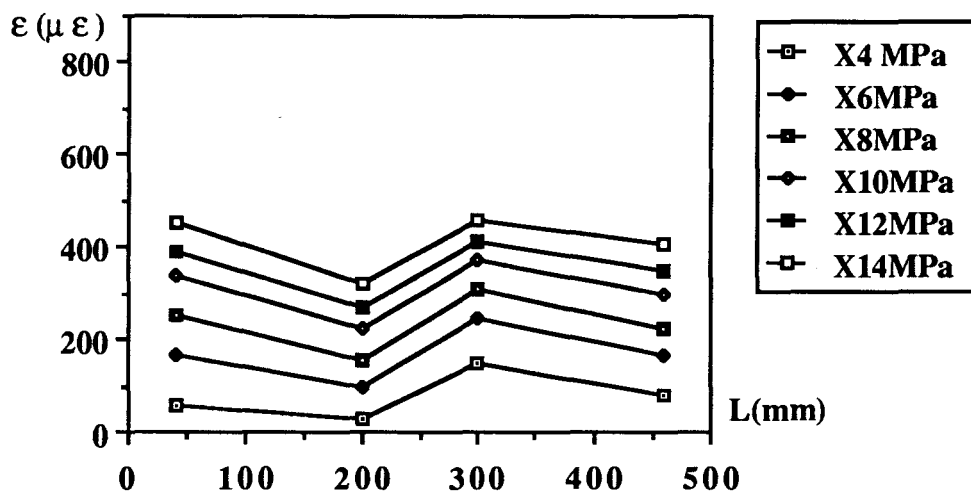


Figure 3.12

Variation des déformations dans le calcaire suivant l'axe X
le long d'une arête à 4 cm du bord

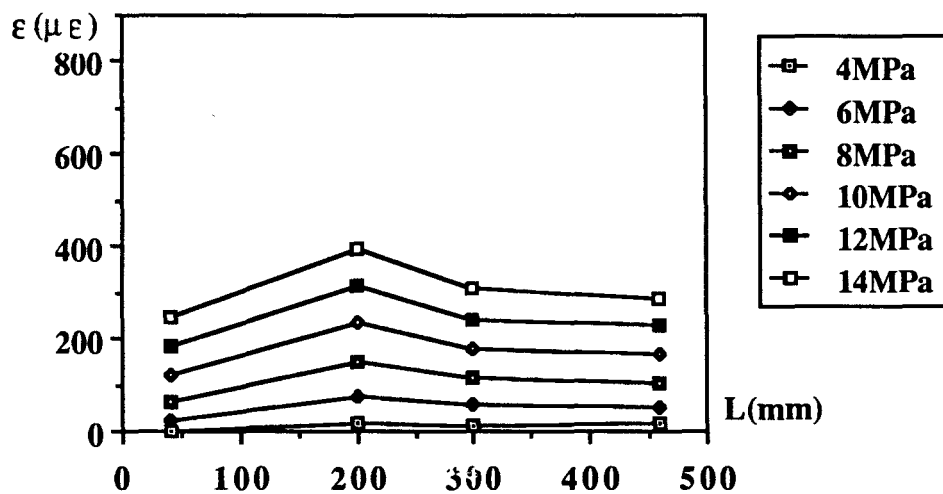


Figure 3.13

Variation des déformations dans le calcaire suivant l'axe Y

Cependant, si on initialise les informations obtenues par les jauges collées sur l'échantillon de calcaire à 6 MPa, on constate d'après les figures 3.14 et 3.15 que la distribution des contraintes s'est nettement améliorée.

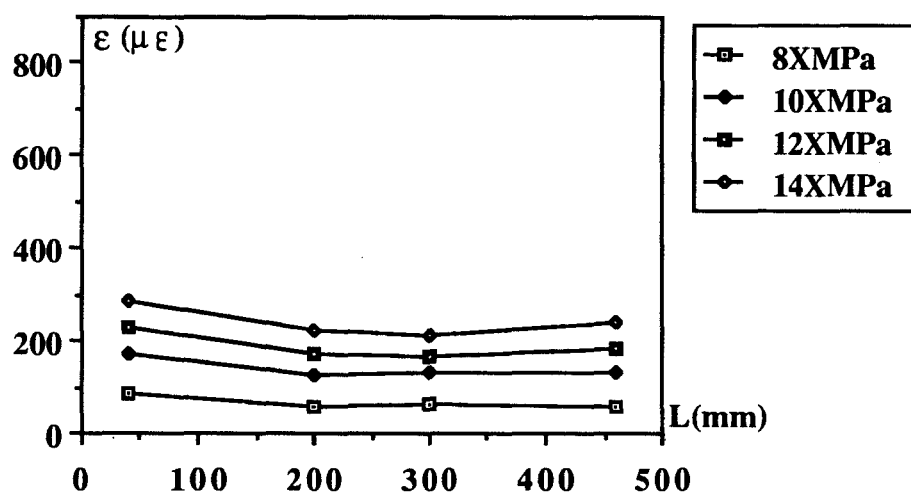


Figure 3.14
Variation des déformations suivant l'axe X

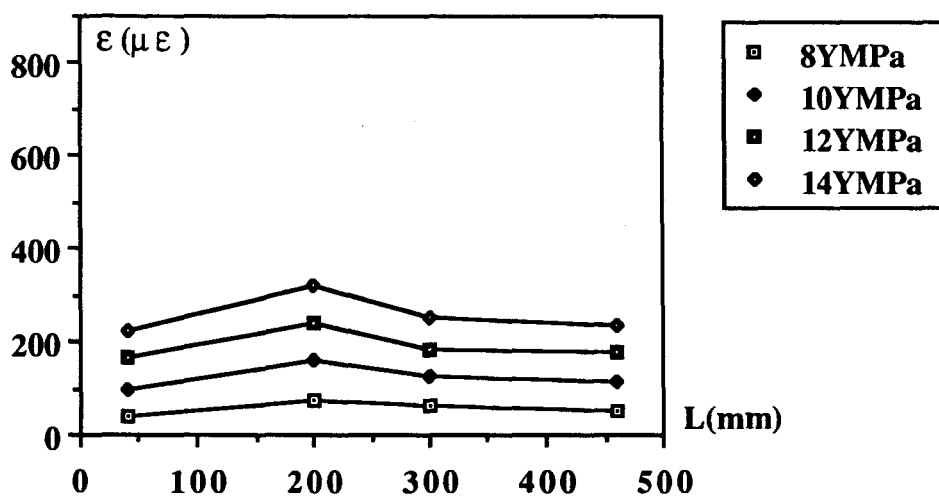


Figure 3.15
Variation des déformations suivant l'axe Y

Si on initialise à 10 MPa, on aura une distribution quasi-parfaite. De ce fait, on peut dire que la machine triaxiale a des difficultés à rattraper les défauts géométriques à basses contraintes.

On peut conclure que les défauts géométriques de l'échantillon de calcaire ont contribué, pour une part importante à l'hétérogénéité du champ de contrainte (figures 3.12 et 3.13). Le triaxial ne rattrape donc pas ces défauts à basses contraintes, et l'utilisation d'échantillons rectifiés est conseillée.

3.4.1 ETUDE QUANTITATIVE

Nous avons utilisé un échantillon cubique de grès découpé puis rectifié. On a recouvert toutes les faces par les plaques d'antifrettage. Les déformations sont mesurées par des jauges d'extensométrie collées au milieu des faces suivant le schéma de la figure 3.16.

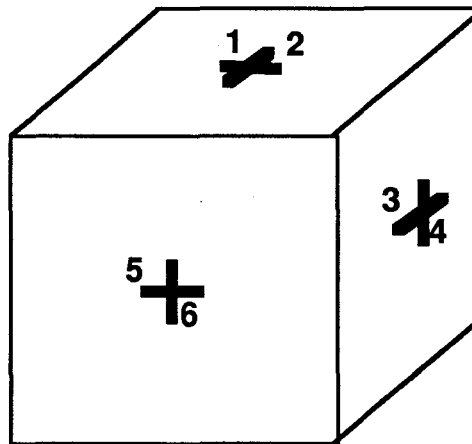


Figure 3.16

Une fois le corps d'épreuve positionné dans la machine triaxiale, on a procédé à un chargement "triaxial" hydrostatique. Appelons σ cette contrainte appliquée, les lois de l'élasticité linéaire [24] donnent la valeur de la déformation théorique valable dans n'importe quelle direction :

$$\varepsilon_T = \frac{(1 - 2\nu)}{E} \sigma$$

Les caractéristiques mécaniques du grès sont : $E = 2,2 \cdot 10^4$ MPa, $\nu = 0,2$.

La contrainte exercée sur la roche est déduite du rapport de la charge sur la surface de l'échantillon.

En comparant les informations obtenues par les jauges avec la déformation théorique (figure 3.17), on constate que toutes les courbes expérimentales ont quasi la même pente que la courbe théorique. Ce résultat permet de vérifier que le chargement exercé par le triaxial est correct, et que le fait de perturber la mesure par une non application locale de chargement vertical n'influence pas beaucoup la mesure.

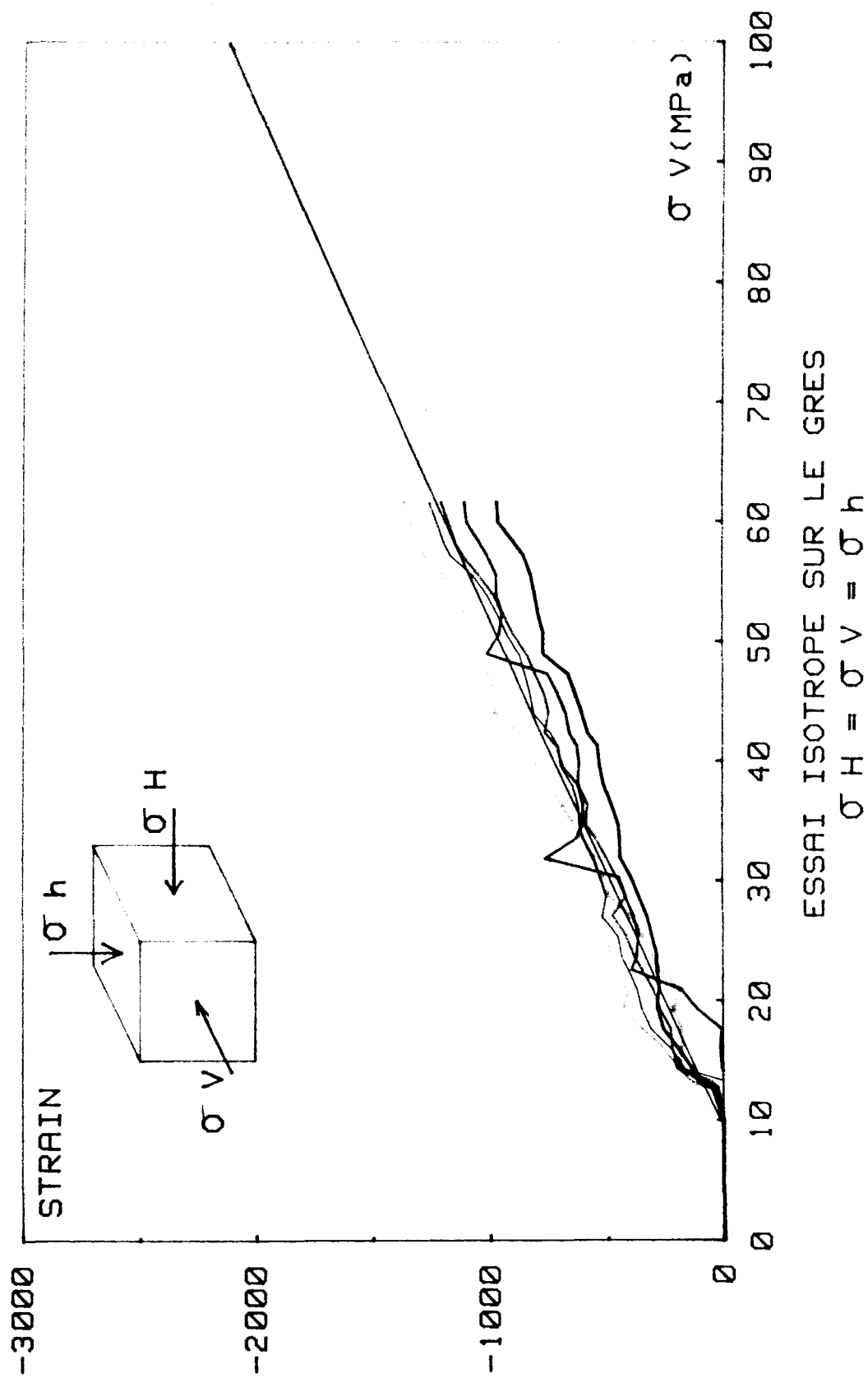


Figure 3.17
 Déformation d'un cube de grès sous contrainte hydrostatique

CHAPITRE IV

ASSERVISSEMENT

4.1 CAHIER DES CHARGES :

4.1.1 ASSERVISSEMENT DES GROUPES DE POMPAGE

Les groupes hydrauliques pourront être pilotés à partir d'un signal de retour de :

- de pression dans les trois vérins (p_1 , p_2 , p_3)
- de déplacement dans les trois directions de l'espace (d_1 , d_2 , d_3)

Le signal d'asservissement pourra être une rampe de pente variable ou un signal généré à partir de données ponctuelles.

4.1.2 ACQUISITION DES DONNEES

On devra prévoir l'acquisition des données des capteurs de pression et des capteurs de déplacement.

L'enregistrement sera obtenu :

- par une sortie sur imprimante des données en temps réel, avec une scrutation automatique régulièrement espacée dans le temps,
- ou (et) par un stockage sur disquette pour traitement automatique ultérieur.

4.2 CHOIX DES GROUPES HYDRAULIQUES

Dans la plupart des applications envisagées, le chargement devra être constant durant une période longue pour étudier le comportement de "l'ouvrage" ou encore les charges seront appliquées très lentement. Pour ce type de sollicitations quasi-statiques, il faut utiliser des groupes hydrauliques produisant des microdébits. Notre choix s'est porté sur des modules de pompage Gilson (photo 4.1).

Ces pompes mono-piston ont un mouvement alternatif constant avec retour rapide. Un moteur pas à pas contrôlé par un microprocesseur génère un déplacement très précis et assure un contrôle excellent de la vitesse de la pompe. Elles fonctionnent de façon autonome ou asservie à un programmeur de système.

4.3 DECHARGE : SYSTEME DE REGULATION

Lorsque l'on comprime plus fortement l'échantillon selon une direction, dans les directions perpendiculaires, le bloc se déforme en extension. Il est donc important de prévoir une possibilité de diminuer le volume d'huile dans les vérins afin de pouvoir garder la consigne de pression.

Cette étape n'est pas réalisable directement. Le groupe hydraulique permet uniquement de monter en pression. Il est donc nécessaire de prévoir un système de décharge.

Le système est composé d'une micro-vanne de régulation commandée par un moteur pas à pas (photo 4.2). Les commandes du moteur peuvent être envoyées automatiquement depuis un micro-ordinateur ou générées manuellement à partir d'un rack de commande.

4.4 MESURES

4.4.1 MESURE DES CONTRAINTES

L'intensité de l'effort appliqué est mesurée, par l'intermédiaire de la pression de fluide dans le vérin, au moyen d'un capteur de pression associé à chaque module de pompage. La contrainte exercée sur le matériau est déduite par le rapport des sections du piston et de la face du cube.

Une amélioration possible de notre système consisterait à établir, périodiquement, une courbe d'étalonnage reliant la pression dans le vérin à l'effort appliqué. Ceci nous permettrait d'écarter le frottement à l'intérieur du vérin.

4.4.2 MESURE DES DEFORMATIONS

Les déformations du bloc peuvent être déterminées à partir des deux techniques suivantes :

- **Les jauges d'extensométrie :**

Les jauges à fils résistant permettent une mesure locale de la déformation. Notre système d'antifretage permet facilement, même en chargement triaxial, l'instrumentation de toutes les faces de l'éprouvette. En enlevant un plot, l'espace permet le collage des jauges d'extensométrie. Les rainures entre plots facilitent le passage de toutes les connections électriques (photo 4.3). Ainsi, on peut mesurer les déformations du bloc dans n'importe quelle direction.

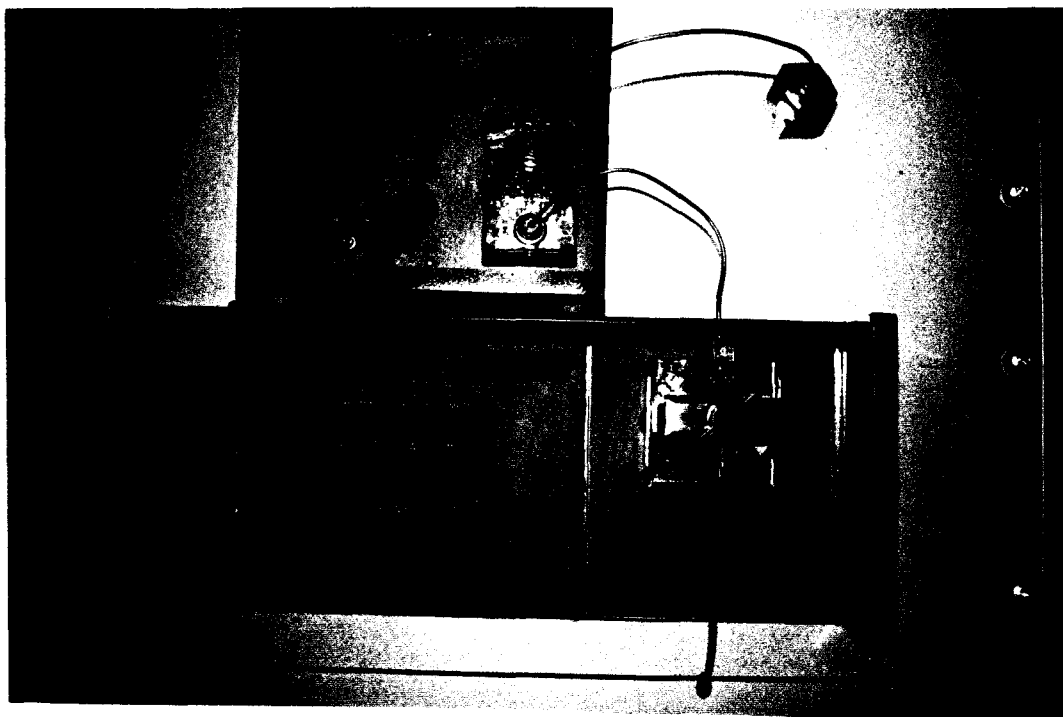


Photo 4.1
Ensemble module de pompage et manomètre

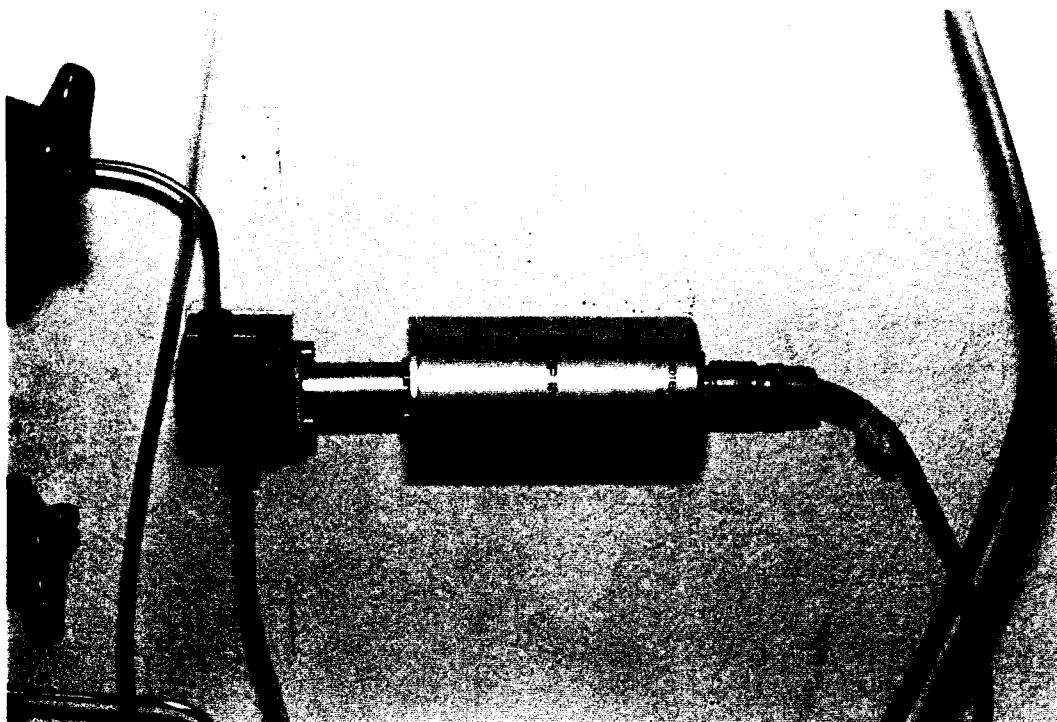


Photo 4.2
Vanne de régulation commandée par un moteur pas à pas

- **Le capteur de déplacement**

A l'inverse des jauges d'extensométrie, les capteurs de déplacement permettent une mesure globale de la déformation de l'échantillon, intégrant les conditions aux limites.

La mesure du déplacement relatif des faces d'appui de l'échantillon dans une direction donnée est réalisée à l'aide de capteurs de déplacement, de type LVDT, montés deux à deux, en opposition, comme l'indique la figure 4.1.

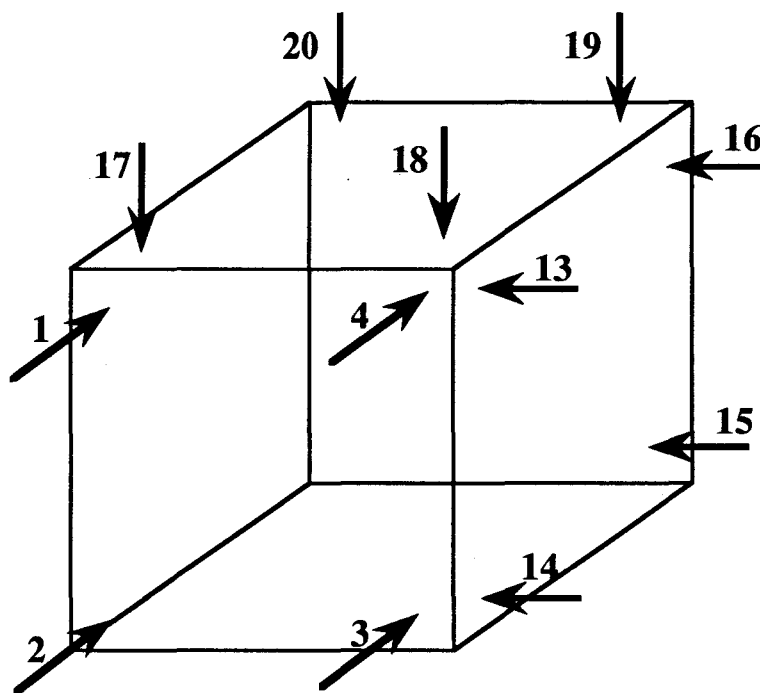


Figure 4.1

Principe de montage en opposition - LVDT

Les capteurs disposés sur des supports sont fixés au harnais de mesure. Huit capteurs sont envisagés pour chaque axe en des points de mesure disposés sur les têtes de chargement le plus près possible des faces de l'échantillon (figures 4.2, 4.3 ; photo 4.4).

La mesure du déplacement entre les deux points de mesures solidaires des têtes de chargement intègre en plus de la déformation de l'échantillon, la déformation de tous les matériaux composant le système d'antifretage, et même la déformation de la tête de chargement. Malgré l'étalonnage nous permettant de soustraire de la déformation totale la déformation de tout matériau autre que le corps d'épreuve, cette solution nous paraît peu fiable quant à sa reproductibilité.

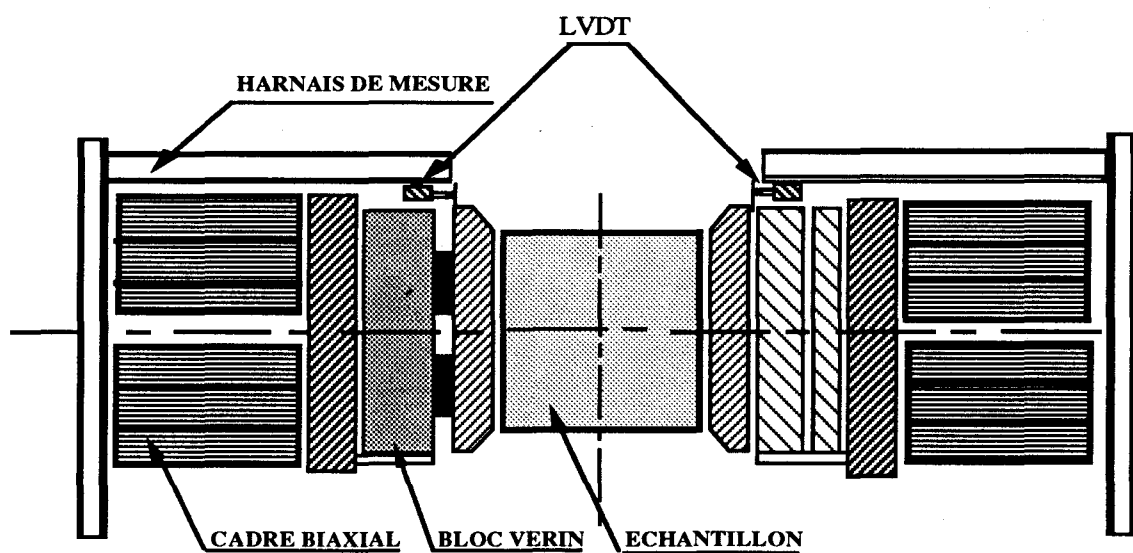


Figure 4.2
Axe de chargement équipé des capteurs LVDT

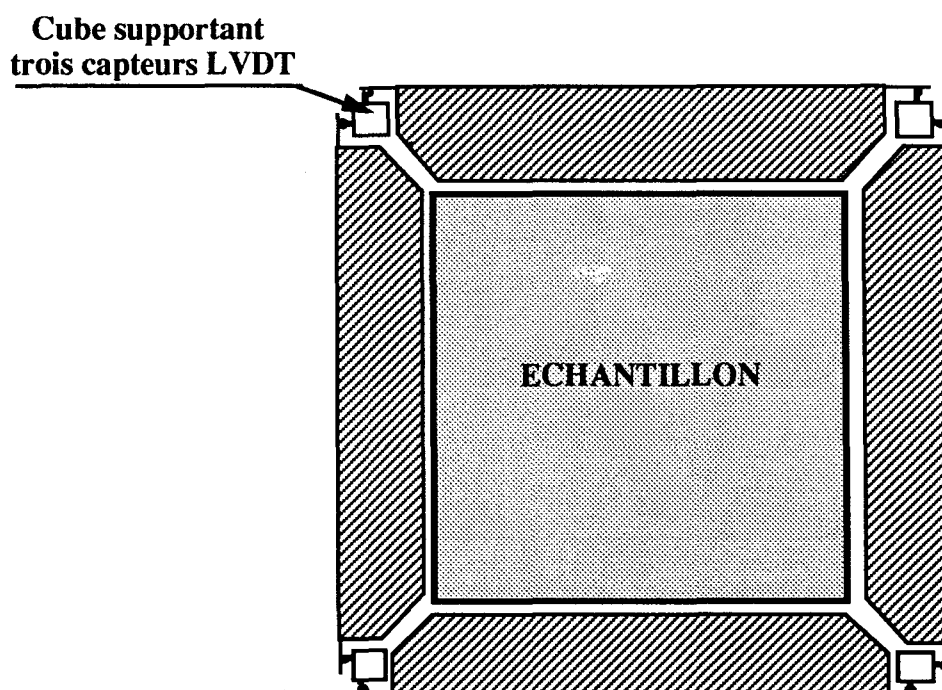


Figure 4.3
Montage des LVDT

La solution à venir consiste à mettre les capteurs de déplacement en contact direct avec la roche. Chaque capteur sera positionné dans une rainure réalisée dans la tête de chargement (figure 4.4). La suppression d'un plot du dispositif d'antifretage permettra au capteur d'accéder à l'éprouvette. Ainsi, les capteurs montés en opposition deux à deux nous donneront uniquement le déplacement relatif de deux faces opposées de l'échantillon.

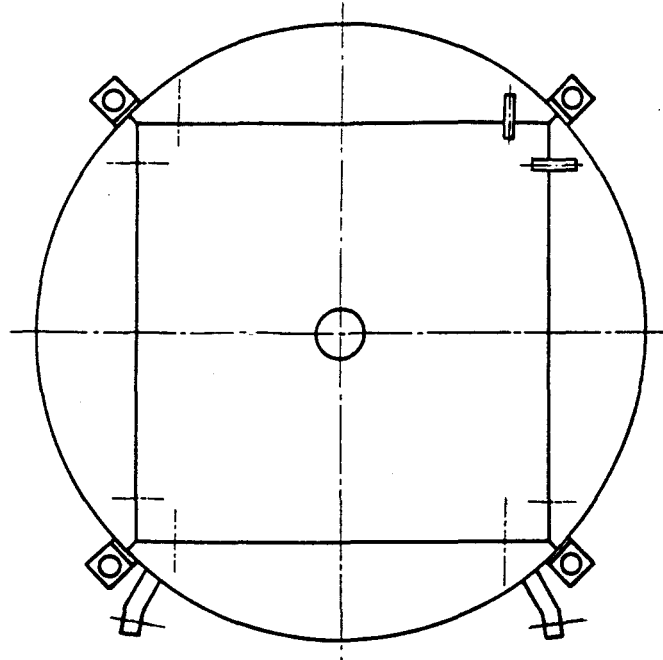


Figure 4.4

Tête de chargement avec les rainures

4.5 SYSTEME D'ACQUISITION ET D'ASSERVISSEMENT

4.5.1 PRESENTATION

L'élément principal est la presse triaxiale. Les contraintes appliquées à l'éprouvette sont exercées par trois blocs vérins. Tout l'automatisme de cette presse est organisé autour d'un micro-ordinateur HP 9 000.

Autour de ces deux éléments, on trouve (figure 4.5) :

- Une pompe Gilson pour chaque bloc vérin,
- Deux interfaces micro-processeur/capteurs à 16 voies permettant l'acquisition des informations fournies par les capteurs de déplacement,
- Une centrale d'acquisition HP de type 3 497 A, contenant :
 - une carte 010 servant à l'acquisition des pressions dans chacun des trois blocs vérins
 - une carte 110 permettant l'envoi de commandes aux moteurs pas à pas des micro-vannes de régulation
 - 20 voies de jauges d'extensométrie

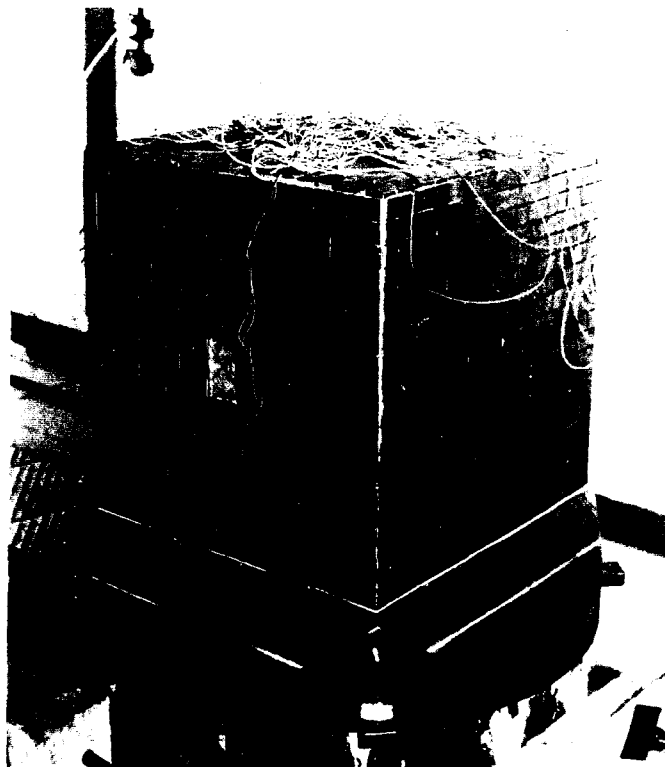


Photo 4.3

Echantillon instrumenté avec des jauges d'extensométric



Photo 4.4

Cube supportant des LVDT dans les trois directions principales

- Une micro-vanne actionnée par un moteur pas à pas pour chaque axe de chargement. Le pilotage du moteur pas à pas est assuré par une carte LD₂
- La carte LD₂ positionnée dans un rack spécifique pour permettre un double fonctionnement :
 - manuel par actions sur boutons poussoirs et interrupteurs, (photo 4.5)
 - automatique depuis la carte 110 de la centrale d'acquisition
- Une imprimante
- Une table traçante

4.5.2 DESCRIPTION DES ELEMENTS

a) Les pompes Gilson

Les trois modules de pompage sont commandés par le micro-ordinateur. On peut éventuellement les commander manuellement ; dans ce cas, les paramètres de fonctionnement (débit et consigne) sont sélectionnés sur la face avant de chaque pompe.

b) Le rack de commande des moteurs pas à pas

Ce rack comporte les trois cartes de commande des moteurs pas à pas ainsi que leur alimentation. L'envoi des paramètres de fonctionnement à la carte peut être automatique ou manuel. En mode automatique, les commandes sont envoyées depuis le micro-ordinateur, via la centrale d'acquisition. En mode manuel, les commandes sont générées à partir de la face avant du rack.

c) Les modules d'acquisition des capteurs de déplacement

Les deux modules CJ1616 sont des interfaces capteur/ordinateur à 16 voies chacun. Un module fournit à chaque capteur LVDT raccordé l'alimentation dont il a besoin et scrute la sortie des capteurs suivant une fréquence sélectionnée par le calculateur. Ces signaux de sortie subissent une conversion analytique/numérique puis sont envoyés vers le calculateur.

d) La centrale d'acquisition

La centrale d'acquisition HP 3497 A possède deux rôles principaux :

- L'acquisition des données : elle permet de réaliser les mesures de tension, de résistance, de pression ou de température. A cet effet, elle est dotée d'un système de cartes d'options que l'on peut choisir selon les informations qu'on veut collecter (carte 010,050 et 070).
- Rôle de contrôle : nous utiliserons particulièrement la carte relais 110 pour commander l'ouverture et la fermeture des vannes.

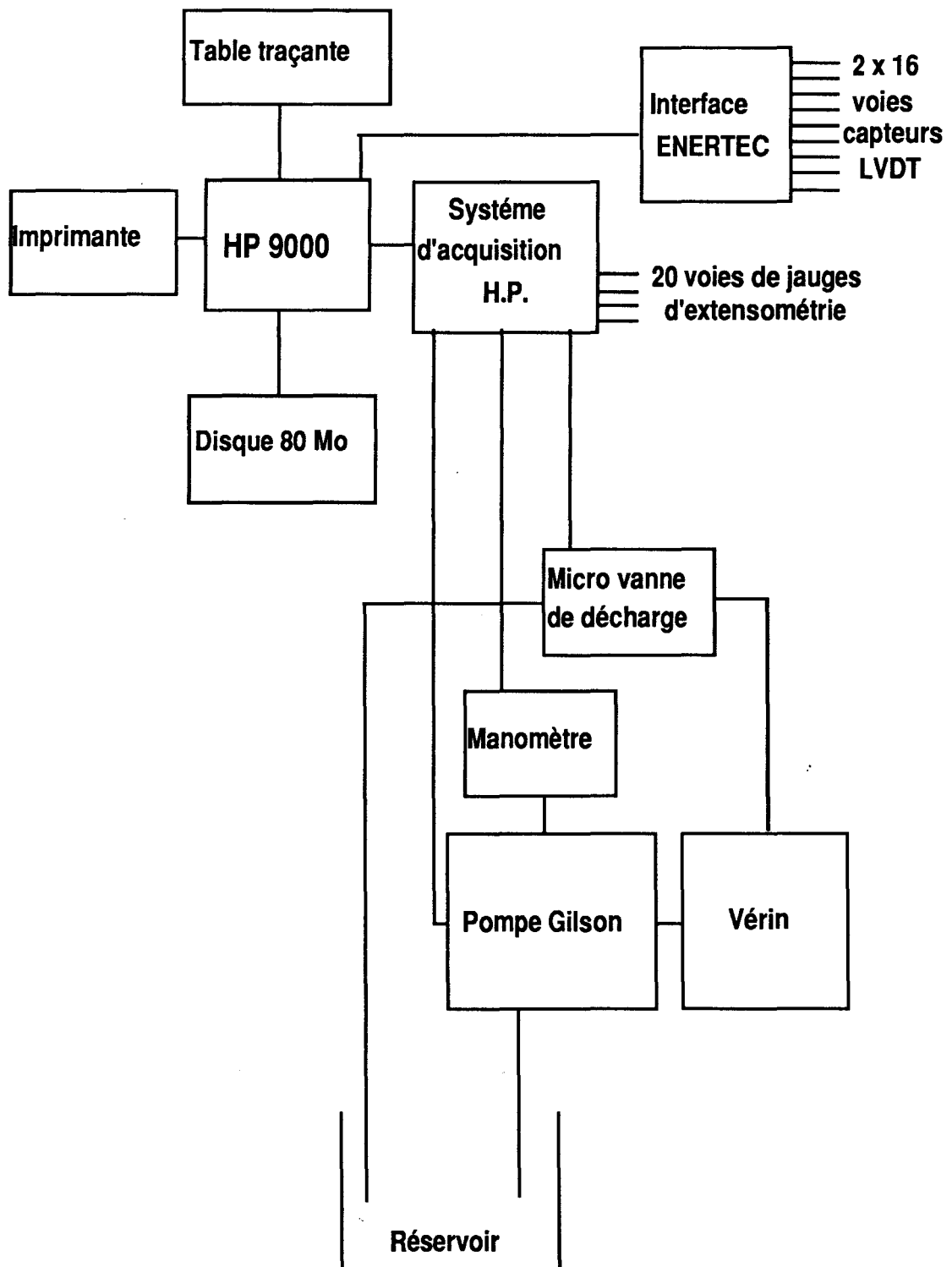


Figure 4.5
Schéma général

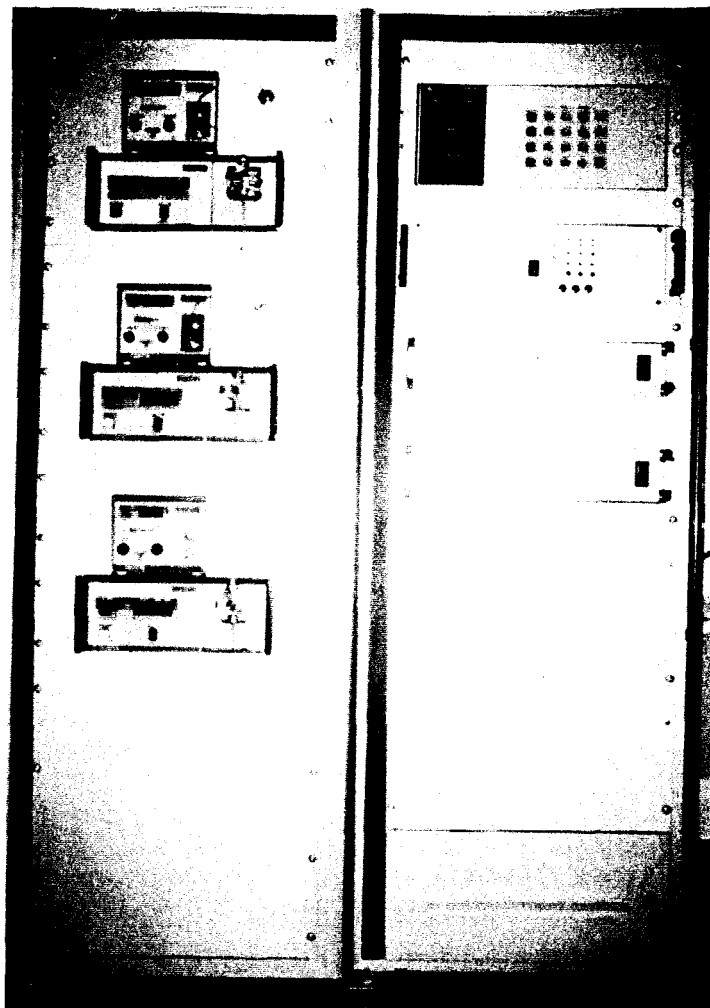


Photo 4.5

A droite, l'armoire de commande (centrale d'acquisition, rack de commande des moteurs pas à pas)
A gauche, l'armoire contenant les trois modules de pompage et leurs manomètres

4.5.3 ASSERVISSEMENT ET ACQUISITION

Le dispositif expérimental est conçu pour réaliser les asservissements nécessaires à l'objectif visé. L'indépendance totale possible des axes de chargement conduit à définir, pour chacun, deux asservissements de base :

- Asservissement en force imposée,
- Asservissement en déplacement imposé.

Les deux possibilités d'asservissement sont de type classique, en boucle fermée, à pilotage par capteurs, système d'acquisition et mini-calculateur de type HP 9 000 (figure 4.6).

L'écart entre la consigne numérique et l'information délivrée par le capteur est traité au moyen d'un algorithme de type P.I.D. (Proportionnel Intégral Dérivé) adapté pour optimiser le processus d'établissement de la valeur assignée.

Deux débits de la pompe sont envisagés en fonction de la valeur de l'écart entre consigne et signal de retour.

4.6 CONCLUSION

Le logiciel d'asservissement est susceptible d'évoluer en fonction des applications et des essais futurs. Dans cette perspective, on a prévu de nombreux tests nous permettant d'essayer chaque périphérique indépendamment des autres. Le logiciel a été décomposé en un grand nombre de sous-programmes dans un souci de clarté, mais aussi pour simplifier toute modification ultérieure. La grande interactivité avec l'utilisateur permet à celui-ci d'intervenir à tout moment pendant la manipulation.

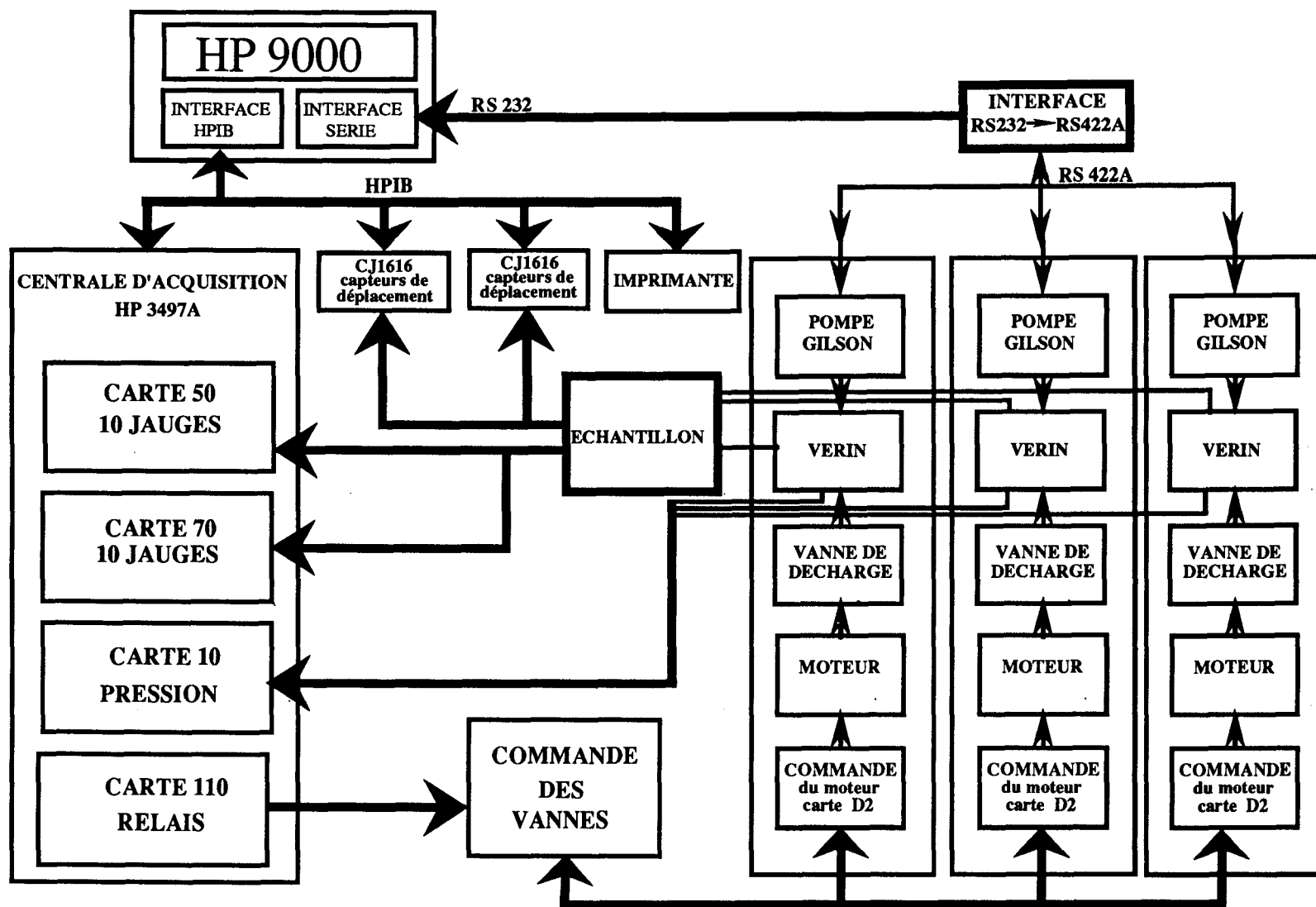


Figure 4.6

Schéma de l'asservissement et de l'acquisition

CHAPITRE V

ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE DISCAGE

Un paramètre fondamental dont il faut tenir compte lors de la modélisation de la stabilité, de la fracturation hydraulique, est le tenseur de contrainte en place. De nombreuses techniques de mesures sont utilisées dans le génie civil et minier pour déterminer ce tenseur, le surcarottage, la mini-frac, l'orientation des ovalisations des puits, la recompression des carottes ...

Les observations faites depuis quelques dizaines d'années montrent que l'on peut utiliser un autre indicateur. Dans certains ouvrages souterrains (mines, forages pétroliers, tunnels ...), lors du prélèvement de carottes, il a été observé un découpage de celles-ci en tranches d'épaisseur régulière et de forme identique sur la même carotte. Le phénomène d'apparition de rupture périodique est appelé "discage" [46].

Obert et Stephenson [40] ont entrepris, les premiers, une étude expérimentale pour connaître les conditions de contraintes sous lesquelles se produit le discage. Les résultats obtenus ont montré que l'état de contrainte doit vérifier la condition empirique suivante : $\sigma_H = K_1 + K_2 \sigma_v$ ($\sigma_v = \sigma_3$, $\sigma_H = \sigma_1 = \sigma_2$) où K_1 et K_2 sont deux contraintes dépendantes du matériau et σ_H est la contrainte en place supposée principale et isotrope dans le plan orthogonal à l'axe du carottage et σ_v la contrainte parallèle à l'axe de la carotte. Sur la base d'essais expérimentaux simulant le discage (Obert et Stephenson) Panet [41] établit les relations suivantes :

$$K_2 = 0.25 + 0.65 \cdot 10^{-2} \sigma_t$$

qui introduit la résistance à la traction σ_t dans le critère de discage,

et
$$K_1 = 23 + 2\tau_o$$

qui introduit la résistance au cisaillement τ_o .

Ainsi, pour une roche donnée (résistance à la traction et au cisaillement connues) et pour une profondeur donnée (contrainte σ_v connue), l'apparition de discage permettrait de déterminer une valeur minimale pour la contrainte horizontale moyenne. Ce résultat a, souvent, été utilisé dans les projets d'ouvrages souterrains pour estimer l'ordre de grandeur de la contrainte latérale au forage dans un parement de galerie (Panet, Maury [33]).

5.1 ETUDE EXPERIMENTALE

L'objectif de ce travail a été de mettre en place la manipulation de discage et de tenter de mettre en lumière l'influence de la hauteur du disque.

5.1.1 DESCRIPTION DES ESSAIS

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de calcaire d'Anstrude (50x50x50 cm³). Une fois l'échantillon positionné dans le triaxial, on procède au carottage à l'air comprimé jusqu'à l'obtention de la profondeur de la carotte désirée, et ceci sous une application de charge sur le bloc isotrope de l'ordre de 2 MPa. On se retrouve, dans ce cas, dans l'application première du "triaxial".

Pour chaque essai, une valeur est fixée pour le coefficient K , K étant le rapport de la contrainte horizontale σ_H (les contraintes perpendiculaires à l'axe du forage sont identiques) sur la contrainte verticale σ_v . On applique les contraintes croissantes en respectant le rapport K , jusqu'à ce que la carotte soit complètement décollée.

5.1.2 RESULTATS

Les résultats des 10 essais réalisés sont regroupés dans le tableau 5.1 ci-après.

La figure 5.1 semble dire qu'il y a une relation liant l'épaisseur des disques aux contraintes en place. L'épaisseur du disque paraît inversement proportionnelle à la contrainte. Les figures 5.2 et 5.3 représentent la relation liant les contraintes verticale et horizontale pour qu'il y ait rupture d'une carotte d'épaisseur respectivement 15 et 30 mm.

N =	L (mm)	K	σ_H (MPa)	σ_v (MPa)
1	15	3	54	18
2	15	4	50	12.5
3	15	6	49	8
4	15	10	50	5
5	15	24	46	1.9
6	30	3	52	17.4
7	30	5	48	9.6
8	30	22	44	2
9	60	3	45	15
10	10	3	40	13.4

Tableau 5.1
Résultats des essais de discage

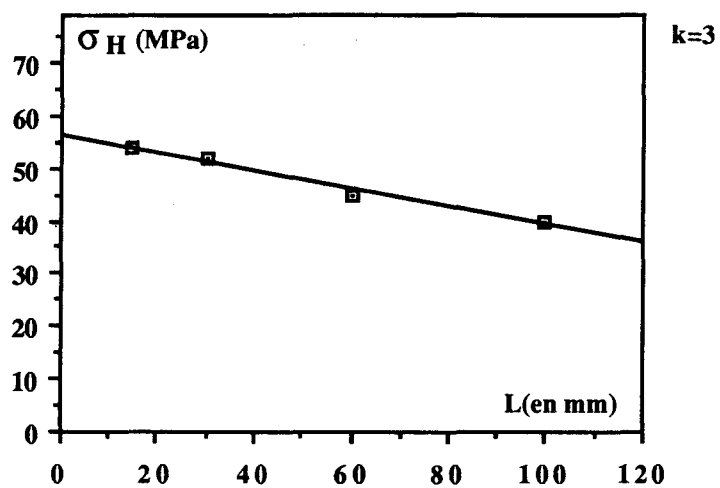


Figure 5.1
Influence de l'état de contrainte sur l'épaisseur des disques

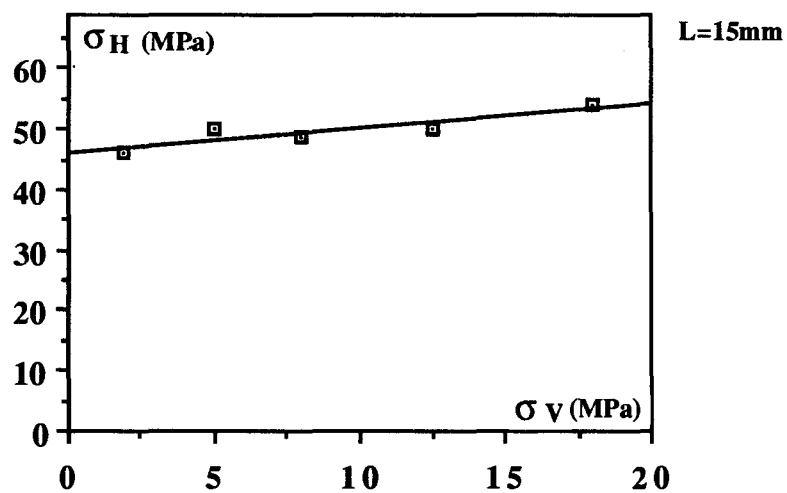


Figure 5.2
Relation $\sigma_H - \sigma_v$ à la rupture pour $L = 15 \text{ mm}$

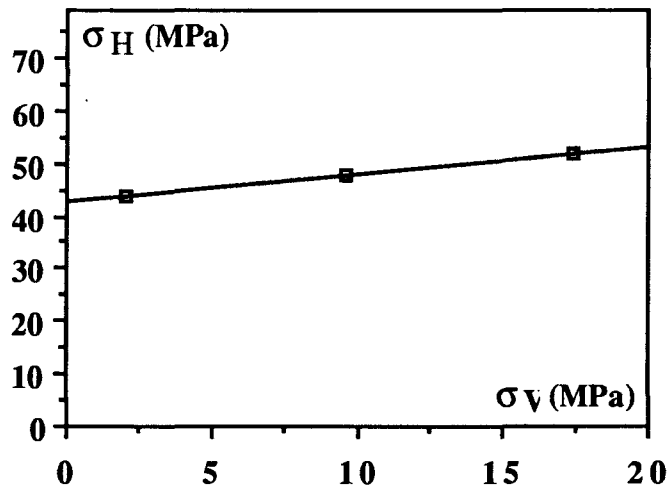


Figure 5.3

Relation $\sigma_H - \sigma_v$ à la rupture pour $L = 30$ mm

5.1.3 CONCLUSIONS

Si l'on tient compte des résultats d'Obert et Stephenson et de Panet, la relation entre σ_v et σ_H s'écrit, sachant que pour le calcaire d'Anstrude $\tau_o = 6$ MPa , $\sigma_t = 2$ MPa :

$$\sigma_H = 35 + 0,38 \sigma_v$$

Or, les droites trouvées expérimentalement sont :

pour	$L = 1,5$ cm	$\sigma_H = 46 + 0,41 \sigma_v$
	$L = 3$ cm	$\sigma_H = 43 + 0,52 \sigma_v$

On constate que les deux droites expérimentales ont à peu près la même pente (figure 5.4).

Les contraintes trouvées expérimentalement sont supérieures aux contraintes critiques du discage. Cet écart peut s'expliquer par la difficulté qu'a la carotte disquée à se détacher de l'échantillon. Afin de pallier ce phénomène, un dispositif de contrôle non destructif a été adapté pour cette étude. Il s'agit d'une chaîne d'acquisition d'émission acoustique permettant de détecter les contraintes correspondant à l'amorce de discage.

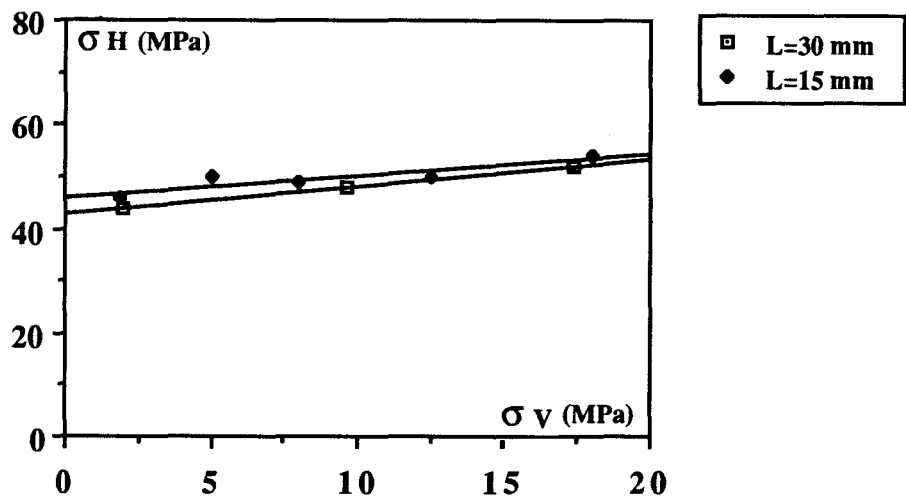


Figure 5.4

Comparaison des droites critiques de disage pour $L = 15$ mm et $L = 30$ mm

5.2 ADAPTATION DE LA TECHNIQUE DE L'EMISSION ACOUSTIQUE A LA MANIPULATION

Quand on soumet un matériau à une contrainte, on crée en son sein un champ de contraintes ou de déformations. Il s'ensuit une accumulation localisée d'énergie. Lors de brusques relaxations locales de ce champ, une partie de l'énergie emmagasinée est libérée sous forme d'ondes élastiques de déformation qui se propagent dans toutes les directions du matériau. Les modes élastiques se propagent sous forme d'onde de volume (modes de compression et modes de cisaillement). En arrivant sur la surface libre du matériau, elles se réfléchissent et créent des ondes de surface.

En ce qui concerne les roches qui sont des matériaux polycristallins, les signaux émis correspondent à une échelle très petite, aux dislocations, à une échelle plus élevée, aux mouvements aux joints de grain, initiation et propagation de fissures intragranulaires et intergranulaires, et à un niveau plus grand, à la fracturation et à la rupture [44,49].

5.2.1 CHAINE D'ACQUISITION D'EMISSION ACOUSTIQUE

La méthode consiste à disposer un ou plusieurs capteurs (céramique piézoélectrique) en contact avec (ou couplés acoustiquement à) l'échantillon à observer. Ces capteurs détectent les ondes de contraintes et les convertissent en signaux électriques transitoires qui sont alors analysés par un système électronique approprié (figure 5.5).

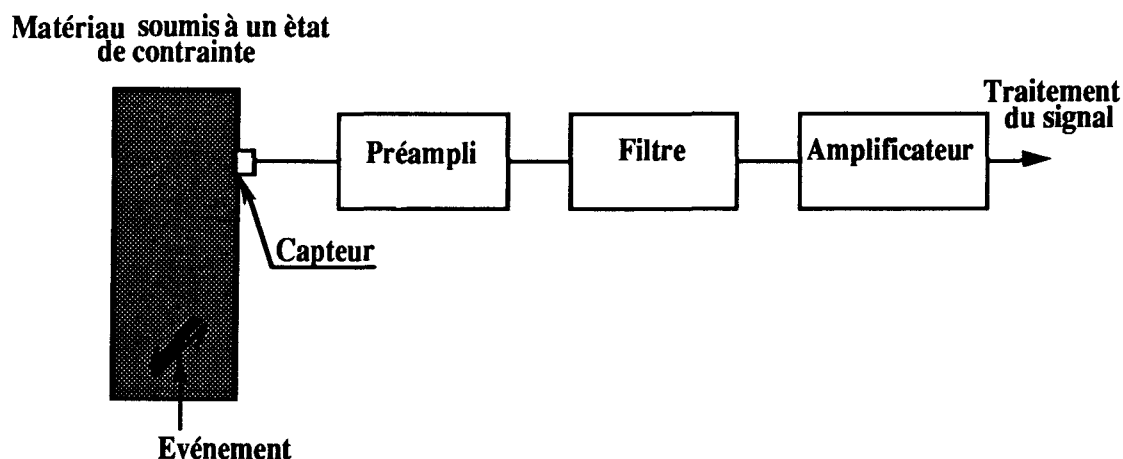
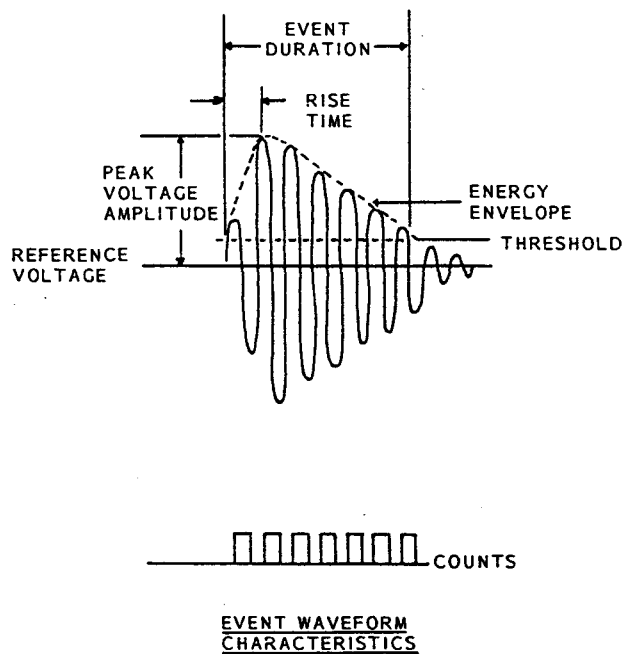


Figure 5.5
Système de réception des signaux d'émission acoustique

Un signal d'émission acoustique appelé "évènement" peut être décrit par plusieurs paramètres (figure 5.6) tels que : amplitude, crête, nombre de coups (nombre d'alternance qui dépassent un seuil préréglé), durée, temps de montée, fréquences ... [28].



COUNTS (EXAMPLE 7 COUNTS)
AMPLITUDE (EXAMPLE 66 dB)
DURATION (EXAMPLE 361 μ s)

Figure 5.6
Signal transitoire

5.2.2 ANYSE DU SIGNAL

Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'analyse sont :

Mesure de l'activité acoustique

Le but est d'avoir une représentation quantitative de l'énergie acoustique émise tout au long d'un essai (généralement fonction du paramètre de sollicitation ou du temps). Ceci peut se réaliser électroniquement soit par comptage cumulé au-dessus d'un seuil fixé préalablement, soit par taux de comptage (comptage pour une unité de temps fixée) [19]. Trois méthodes sont principalement utilisées :

- Mesure du nombre de dépassements du seuil, dit nombre de coups : cette technique consiste, après avoir fixé un seuil de discrimination, à redresser les arches négatives du signal et à compter le nombre d'arches ayant dépassé le seuil.
- Mesure du nombre d'évènements : cette méthode consiste en un comptage d'évènements ayant dépassé le seuil préfixé. Elle ressemble à la méthode précédente. La difficulté de cette méthode réside dans la reconnaissance de l'évènement élémentaire et de sa discrimination par rapport à ses suivants, à des parasites ou à des réflexions.

Analyse statistique

Un signal d'émission acoustique détecté renferme des informations qui ne peuvent être extraites par la seule méthode de comptage. Ainsi l'analyse statistique est apparue. Cette méthode consiste à caractériser un évènement par différents paramètres tels qu'ils apparaissent sur la figure 5.6.

Un analyseur de distribution permet de faire un classement statistique d'une certaine population d'évènements. Chacun d'eux étant défini par son paramètre p . Cet appareillage permet donc de tracer une courbe de distribution définie, soit par $F(p)$: nombre d'évènements de paramètres p (distribution non cumulative), soit par $G(p)$: nombre d'évènements de paramètre supérieur ou égal à p (distribution cumulative) ... Elle permet d'établir des corrélations entre les différents paramètres du signal ou avec des paramètres extérieurs tels que contrainte, déformation ...

Localisation

L'utilisation de plusieurs capteurs permet, en mesurant les différences de temps d'arrivée des ondes, de localiser la source d'émission acoustique. On distingue cependant les localisations linéaires pour lesquelles deux capteurs sont alignés suivant une droite, ce qui suffit pour localiser la source, des localisations planes nécessitant au moins trois capteurs.

Analyse spectrale

Parmi les travaux réalisés jusqu'ici en émission acoustique, peu d'études concernent les fréquences, ceci est dû pour une part, à la méconnaissance des fonctions de transfert exactes du matériau traversé et du capteur, et pour une autre part, aux difficultés techniques à surmonter pour mener à bien un tel travail.

En conclusion, l'influence des différentes fonctions de transfert, les réflexions successives, les types d'ondes selon la position du capteur et l'angle d'incidence, la forme de l'échantillon, etc. ... font que l'on s'oriente vers un traitement de type statistique.

Il est indispensable de bien connaître l'appareillage utilisé et son influence sur les phénomènes étudiés.

5.2.3 LES ELEMENTS DE LA CHAINE D'ACQUISITION D'EMISSION ACOUSTIQUE

Domaine de fréquence

Le spectre de fréquence des signaux d'émission acoustique peut aller des fréquences les plus basses, incluant la fréquence zéro dans le cas où le capteur est positionné à un endroit où on a une variation de déformation permanente produisant une émission, jusqu'au-dessus du mégahertz [39] (figure 5.7).

Dans les matériaux rocheux, la plus grande partie de l'énergie rayonnée se situe généralement dans le domaine de quelques centaines de kilohertz. Hardy [23] a situé cette plage pour les roches entre 300 Hz et 300 KHz.

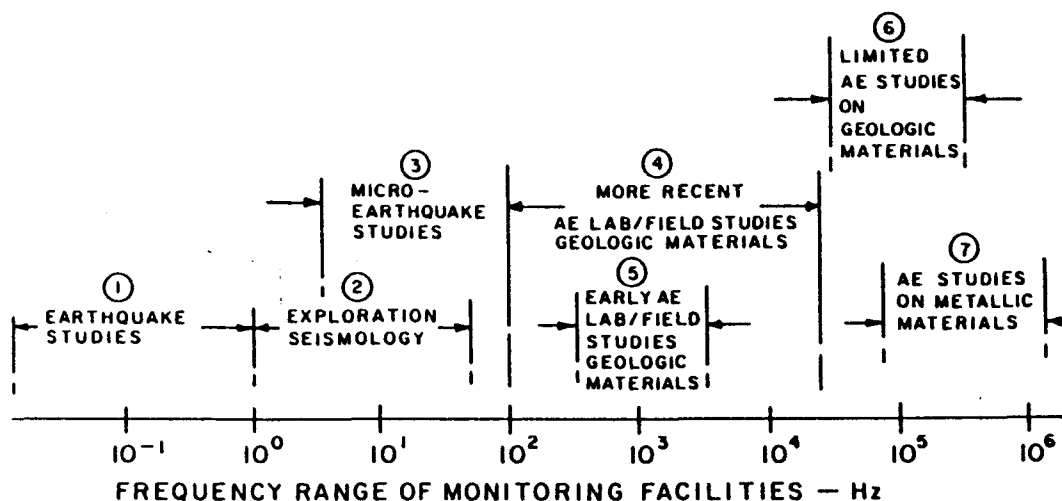


Figure 5.7

Domaines de fréquences d'études de différents types d'émission acoustique

Capteur

Le rôle principal du capteur est la transformation de l'énergie élastique de l'onde en signal électrique. Il est en contact avec le corps d'épreuve à l'aide d'un couplant permettant de diminuer les pertes dans l'interface matériau-capteur.

C'est un capteur piezoélectrique du type résonnant ; il permet de nombreuses applications dans un large domaine spectral (photo 5.1).

Préamplificateur

Sa principale fonction est d'amplifier le signal en sortie du capteur de manière à pouvoir le véhiculer sur plusieurs mètres de distance (photo 5.1).

Le système LOCAN

La chaîne Locan est un système complet de détection, d'analyse et de localisation des signaux d'émission acoustique (figure 5.8). Sa conception lui permet d'analyser, de visualiser et de stocker simultanément les signaux. Il permet à l'utilisateur de faire évoluer son système au fur et à mesure de ses besoins (photo 5.2).

Les modes d'analyse possibles sont :

- comptage des différents paramètres,
- analyse statistique,
- localisation linéaire et plane.

Par ailleurs une interconnexion complète entre les différents modules du système permet à l'opérateur de discriminer les signaux d'émission acoustique dans l'espace et/ou à partir de certains paramètres dans le but de filtrer les signaux pour ne prendre en compte que :

- ceux provenant d'une source ou d'une zone particulière définie par l'opérateur (filtrage spatial)
- ceux ayant une caractéristique particulière correspondant à un phénomène physique particulier (filtrage paramétrique). Ceci est réalisé grâce à l'utilisation d'une fenêtre de filtrage pour chaque caractéristique choisie (amplitude, durée, énergie, temps de montée ...) du signal détecté. Chaque fenêtre est caractérisée par ses deux bornes inférieure et supérieure, en dehors desquelles l'évènement est rejeté. Sont stockés et analysés uniquement les évènements sélectionnés par la fenêtre de filtrage.

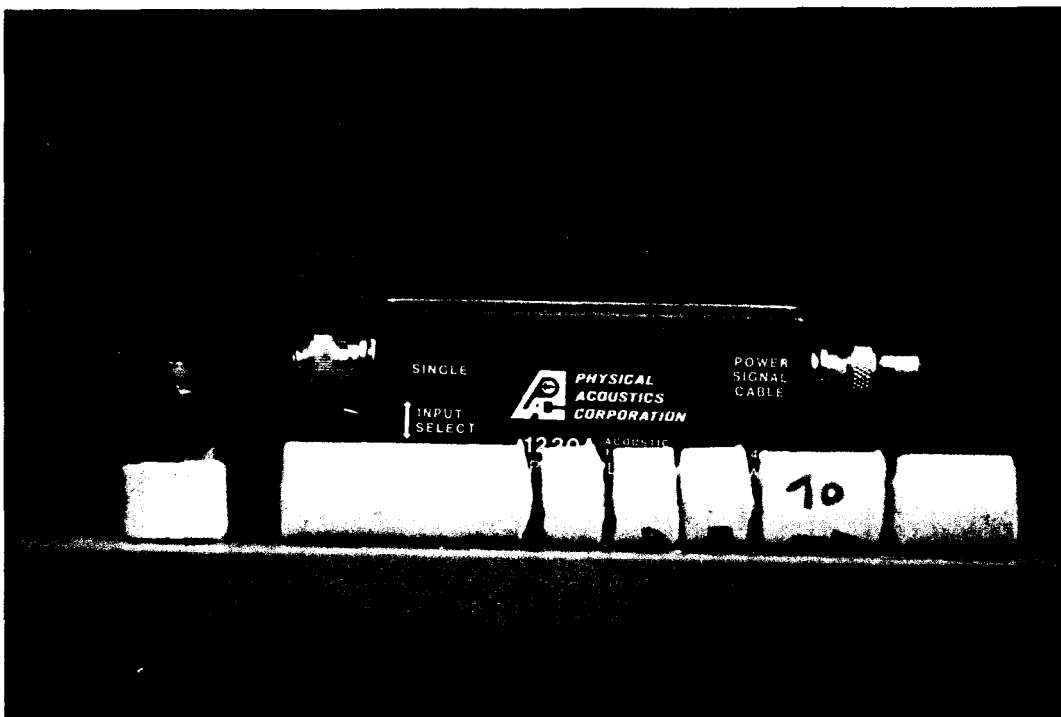


Photo 5.1
Capteur et préamplificateur

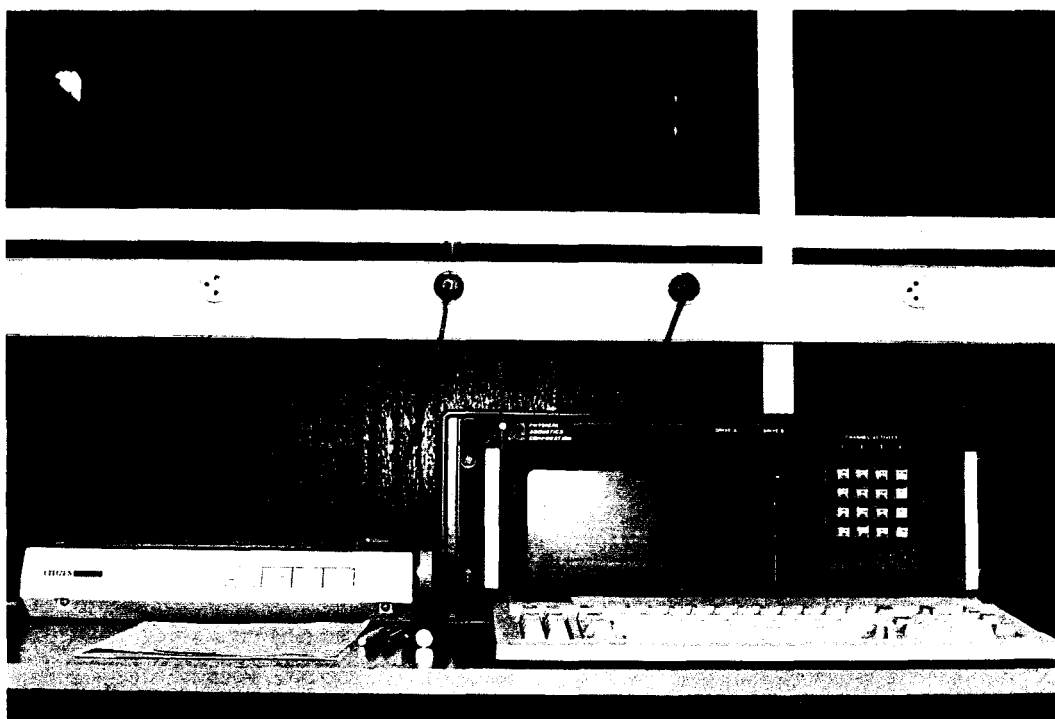


Photo 5.2
Système d'acquisition LOCAN

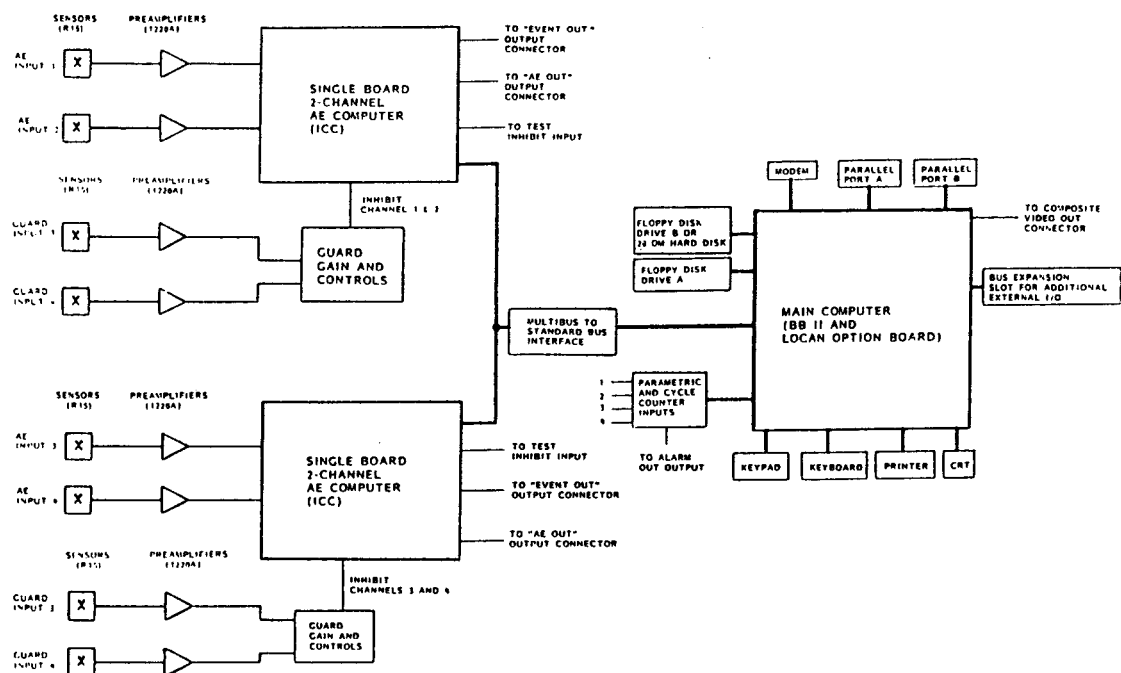


Figure 5.8
Schéma du système Locan

5.2.4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La procédure expérimentale est identique à celle de la première série d'essais. La détection de l'amorce de discage est déterminée par un capteur piézoélectrique collé en extrémité de la carotte (figure 5.9). Le traitement est assuré par le système Locan.

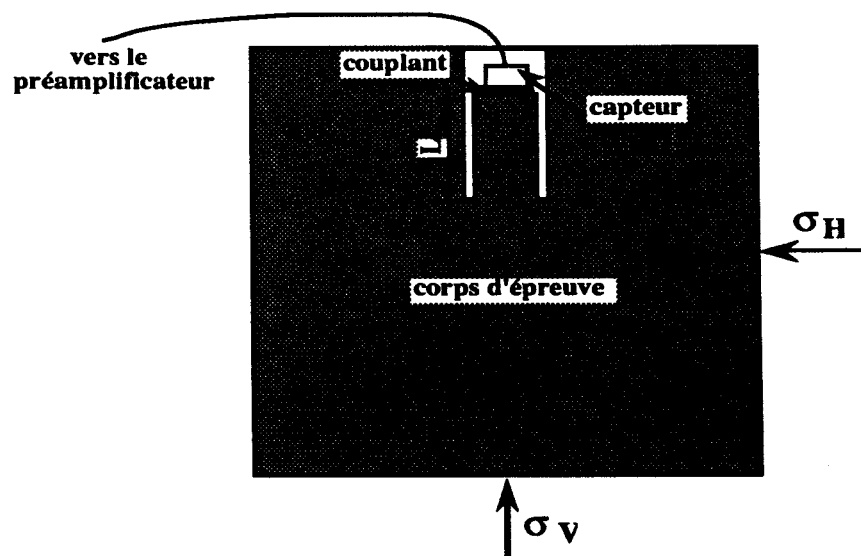


Figure 5.9
Description expérimentale

Le système Locan dispose d'un détecteur d'amplitude. Ce dernier reçoit le signal à la sortie du préamplificateur. Il est muni d'un seuil variable permettant d'éliminer les tout petits événements non distinguables du bruit de fond. Un événement est défini de la manière suivante :

Le début de l'évènement est fixé au premier dépassement du seuil. La fin de l'évènement est annoncée quant au bout d'un temps programmé au préalable, aucun dépassement du seuil n'a eu lieu.

Pour ne pas prendre en compte les émissions acoustiques provenant de sources autres que l'éprouvette, une étude de caractérisation des signaux émis par la roche a été réalisée. On a identifié les caractéristiques des événements parasites émis par les vérins (dont l'amplitude est supérieure à 80 dB et la durée du signal est supérieure à 1500 μ s) et du téflon (amplitude inférieure à 25 dB). Ainsi, et en utilisant deux fenêtres de filtrage ne laissant passer que les événements dont l'amplitude est comprise entre 25 dB et 80 dB pour la première et dont la durée du signal est inférieure à 1 500 μ s pour la seconde, on a pu éliminer les émissions provenant des vérins et du dispositif d'antifretage.

Cette étude porte uniquement sur la mesure de l'activité acoustique. Le but est de relier l'activité acoustique de la roche aux contraintes appliquées. Nous avons utilisé les trois possibilités de mesures suivantes :

Mesure du nombre d'évènements

Cette méthode peu utilisée nous renseigne bien sur l'activité acoustique au sein du matériau (figure 5.10). L'inconvénient est qu'elle ne fait pas de différence entre deux événements de taille différente.

Mesure du nombre de coups

C'est la méthode la plus utilisée, en raison de la simplicité des moyens techniques nécessaires à sa mise en oeuvre (figure 5.11). L'inconvénient est qu'elle est sujette à l'influence des fréquences du signal. Pour deux signaux de même amplitude et de même durée, celui de haute fréquence produira plus de dépassements.

Mesure de l'énergie

Dans ses expériences sur les aciers, Mirabile [37] a trouvé que l'énergie permettait de mieux faire la différence entre une déformation plastique et une propagation de fissure. En outre, l'énergie présente l'avantage d'être plus directement corrélée à l'amplitude des signaux, mesure plus représentative du signal (figure 5.12).

A-Dump is ON

BOREHOLE STABILITY TEST N=2

04/01/89 16:54:04

HITS

FIRST ARRIVAL

GRAPH 2 OF 10

DATA # = 26287

AE HITS = 26263

DATA FILENAME
B:DATA006

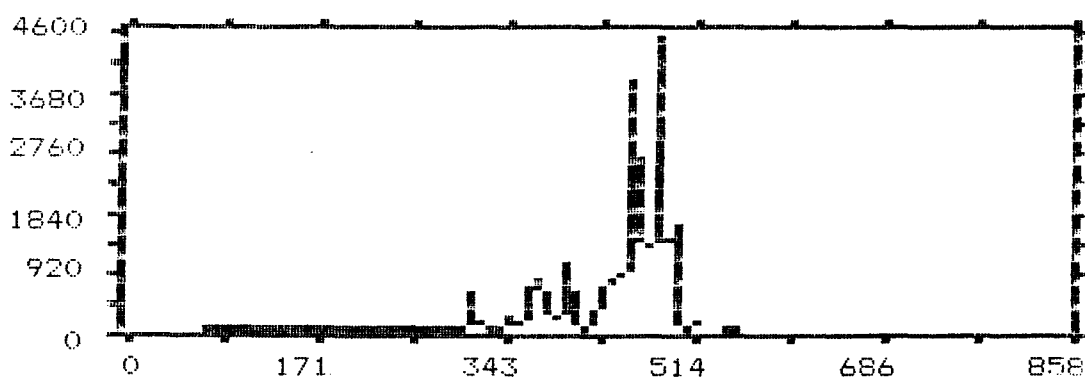


Figure 5.10

Mesure du nombre d'évènements

A-Dump is ON

BOREHOLE STABILITY TEST N=2

04/01/89 16:54:23

COUNTS

FIRST ARRIVAL

GRAPH 3 OF 10

DATA # = 26287

AE HITS = 26263

DATA FILENAME
B:DATA006

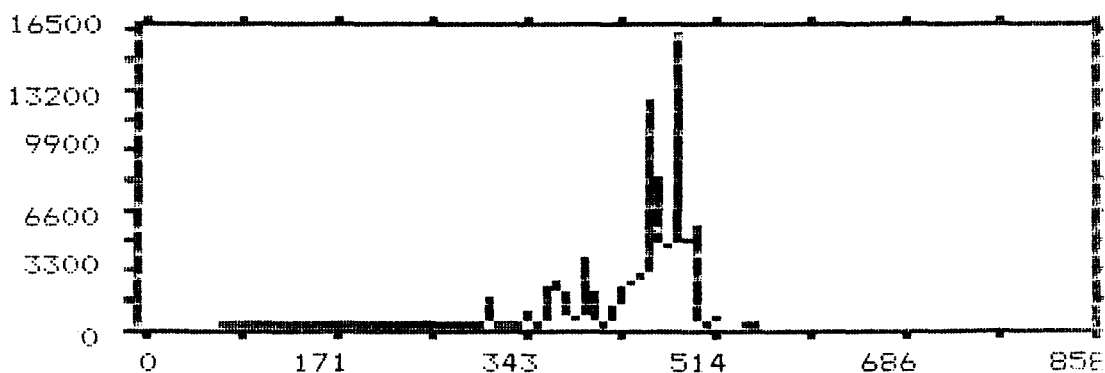


Figure 5.11

Mesure du nombre de coups

A-Dump is ON

BOREHOLE STABILITY TEST N=2

04/01/89 17:10:29

ENERGY

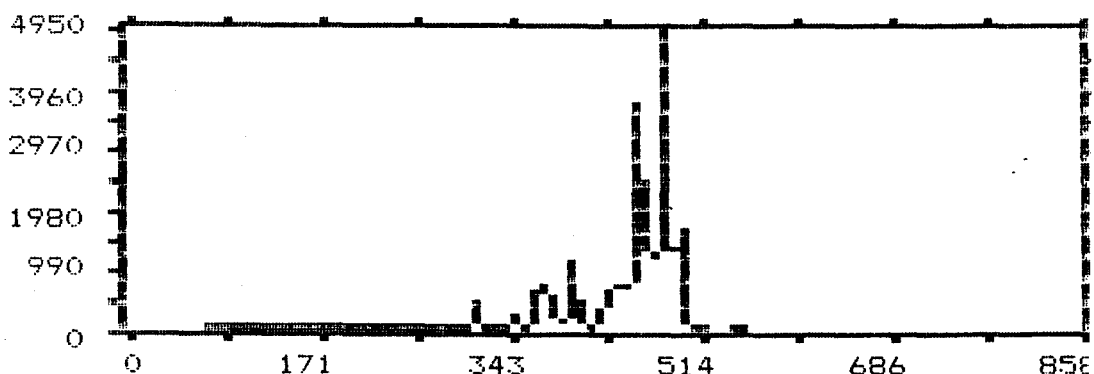
FIRST ARRIVAL

GRAPH 4 OF 10

DATA # = 26287

AE HITS = 26263

DATA FILENAME
B:DATA006



PARAMETRIC 1 : σ_H FIRST ARRIVAL
($\sigma_H = \sigma_h = 0.6 * \sigma_V$ <in bars>)

Figure 5.12

Mesure du nombre de coups d'énergie

5.2.5 RESULTATS

Le récapitulatif des essais réalisés et des résultats obtenus est donné par le tableau suivant :

N =	L (mm)	K	σ_H (MPa)	σ_v (MPa)
1	15	5	32	6.4
2	17	5	35	7
3	20	5	34	6.8
4	30	5	34	6.8
5	5	3	40	13.3
6	15	3	34	11.3
7	20	3	36	12
8	35	3	34	11.3
9	60	1.5	46	30.6

Tableau 5.2
Résultats des essais de discage

La figure 5.13 nous donne les relations reliant les contraintes appliquées à l'épaisseur du disque pour un coefficient de poussée égale respectivement à 3 et 5.

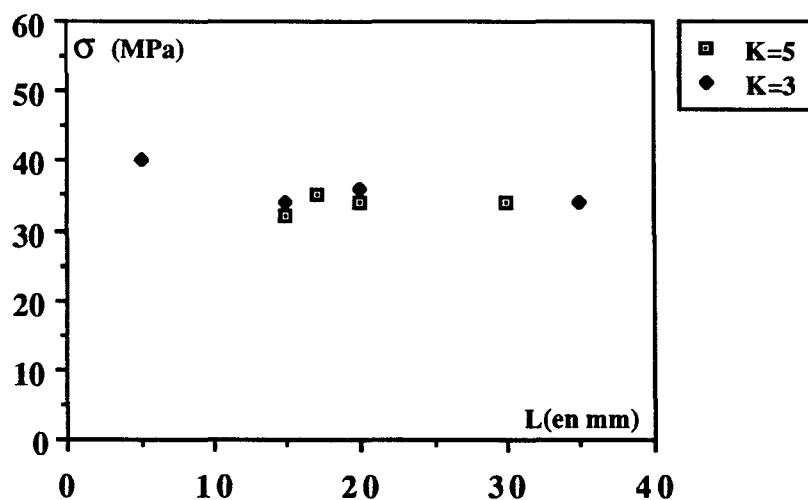


Figure 5.13
Discage - Détection de la rupture par émission acoustique

5.3 CONCLUSION

En observant les résultats obtenus, on constate qu'on avait surestimé les contraintes de discage dans la première série d'essais (figure 5.14).

On constate aussi qu'on n'a aucune influence notable de l'épaisseur du disque sur les contraintes de discage [52].

Du point de vue acoustique, la quantité globale d'énergie émise est bien moins importante que dans un essai de compression. L'initiation, la propagation et la rupture sont presque simultanées. On peut conclure que le phénomène de discage a un caractère instable.

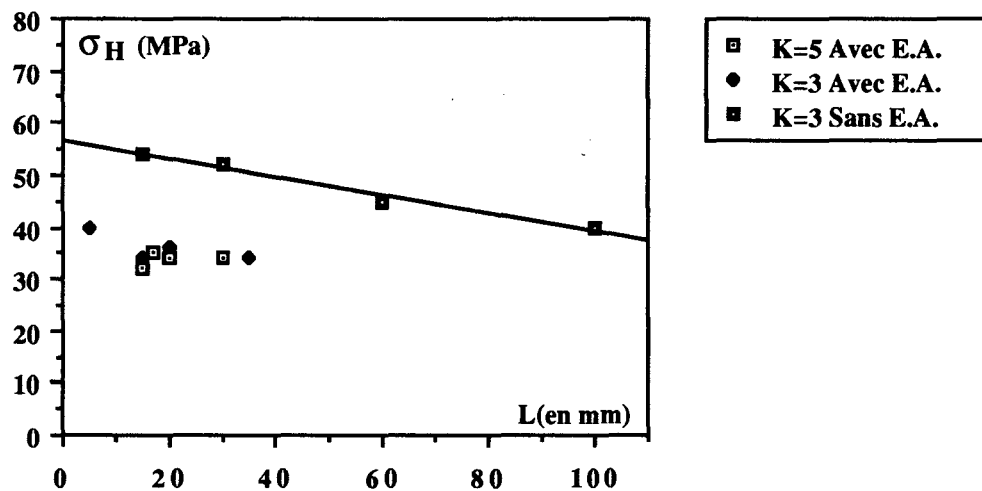


Figure 5.14

Comparaison des ruptures avec et sans émission acoustique

CHAPITRE 6

ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE STABILITE DE Puits

Le mécanisme de fracturation des roches autour des cavités souterraines est un problème fondamental en ce qui concerne la stabilité des excavations, car l'exploitation de l'excavation dépend dans une large mesure du contrôle de telles fractures. Actuellement, les méthodes disponibles de dimensionnement des ouvrages souterrains ne permettent pas de prévoir correctement la fracturation des parois, cause majeure de difficultés et d'augmentation des coûts des puits pétroliers par exemple [34, 22].

Prenons le cas des tunnels, la littérature [42] porte essentiellement sur les calculs des déplacements de la paroi, que le milieu soit supposé élastique, plastique ou visqueux, et ceci d'autant plus qu'il est apparu que ce sont ces déplacements, qui bloqués très tôt par un soutènement, permettent de générer les pressions de soutènement (méthode de convergence - confinement). On ne s'est pas, par contre, énormément intéressé à prédire la rupture des parois, avec production d'écaillés par création de nouvelles discontinuités, et avec modification sensible du profil de l'ouvrage [35,20].

Le triaxial que nous venons de concevoir est un merveilleux outil de validation de modèles de stabilité, à condition de pouvoir détecter les ruptures en paroi. C'est la mise au point de cette manipulation que nous présentons maintenant.

6.1 ADAPTATION DU TRIAXIAL

Dans le but de travailler sur des roches réelles et d'atteindre les contraintes de fracturation des roches autour des cavités souterraines, une augmentation des capacités de chargement de la machine peut s'avérer nécessaire. En réduisant la taille de l'échantillon à $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$, on augmente la contrainte maximale, développée par le triaxial, à 110 MPa par axe. On a adapté le triaxial à cette modification en prolongeant les têtes de chargement par l'adjonction de cales de réduction rectifiées de 5 cm d'épaisseur (voir description paragraphe).

6.1.1 CONCEPTION D'UNE SONDE DE MESURE DE CONVERGENCE

La sonde qu'on a mise au point permet de mesurer la variation de longueur de huit diamètres, situés dans des plans différents, inclinés de $22^\circ,5$ (figure 6.1, photo 6.1).

Chacun des huit palpeurs est constitué de deux pistons coulissant dans une douille à billes et écartés par un ressort. Ce dernier permet d'appliquer les pistons contre la paroi du sondage. Un capteur inductif LVDT mesure le déplacement relatif des deux pistons, le corps du LVDT étant fixé à l'un, et le noyau à l'autre (figure 6.2, photo 6.2). Une rallonge permet le positionnement de la sonde dans le forage et sa fixation (photo 6.3).

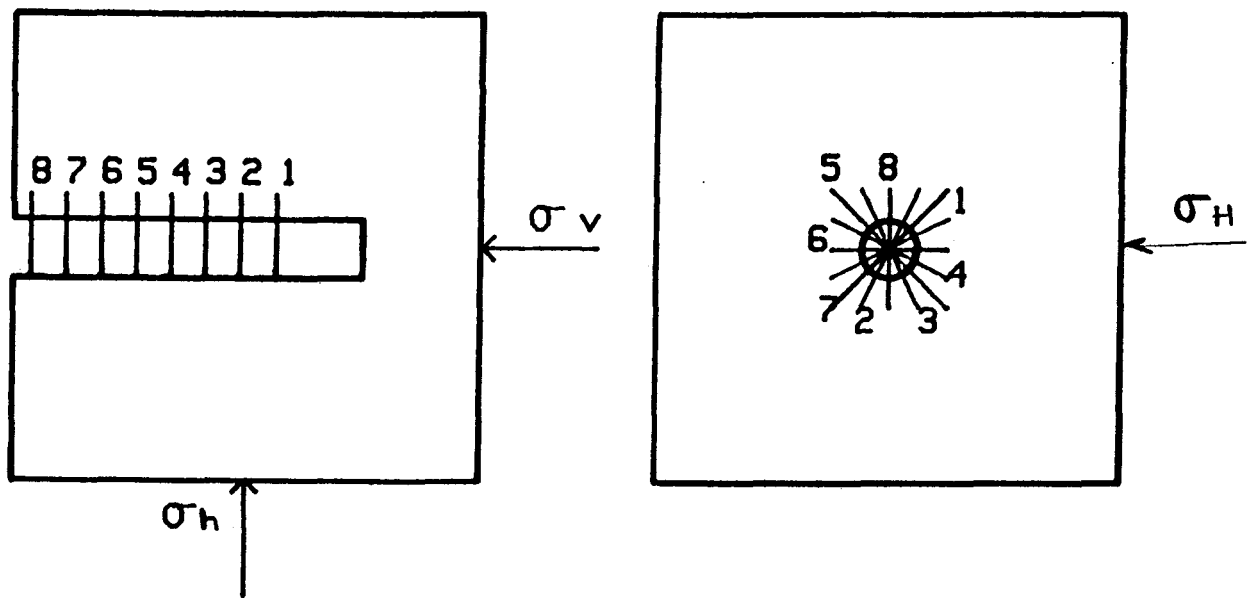


Figure 6.1
Les plans et les directions de mesures de la sonde

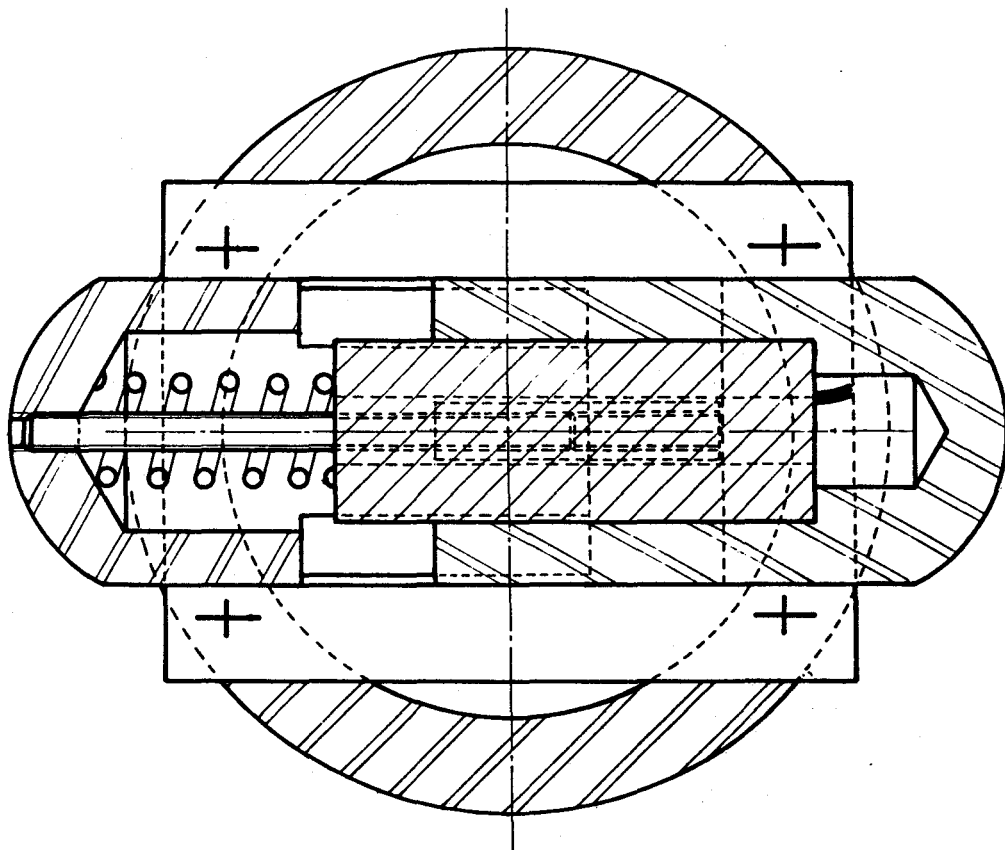


Figure 6.2
Dessin de définition d'un palpeur

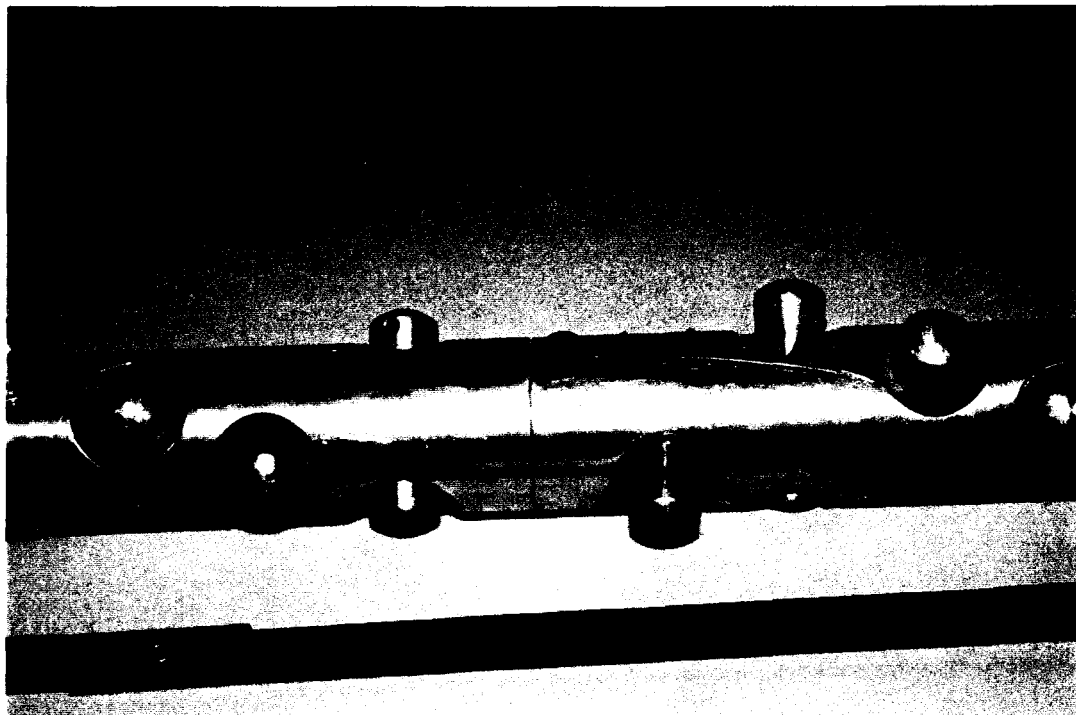


Photo 6.1
Sonde de mesure de la convergence

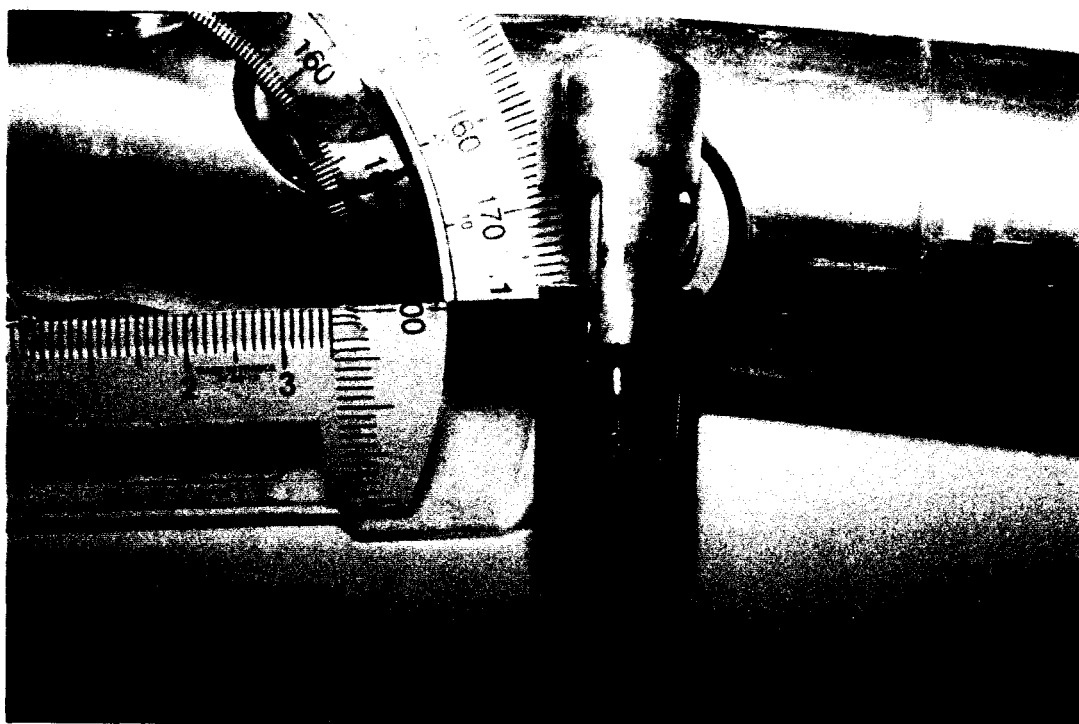


Photo 6.2
Détail d'un palpeur

6.1.2 ADAPTATION DU SYSTEME D'EMISSION ACOUSTIQUE A LA MANIPULATION

Comme pour l'étude du discage (chapitre 5), on propose de coller le capteur d'émission acoustique au fond du forage. La mesure de l'activité acoustique devrait permettre de détecter l'initiation et la propagation des fissures aux alentours du trou.

Le but de cette étude est de comparer les informations détectées et analysées par la chaîne d'acquisition d'émission acoustique aux mesures enregistrées par la sonde de mesure de la convergence.

6.2 EXEMPLE DE MESURES ET DE RESULTATS

Quatre essais de mise au point ont été réalisés sur un grès des Vosges dont la résistance à la compression est de l'ordre de 25 MPa.

Les chemins de chargement utilisés sont décrits par le tableau 6.1.

Les essais de stabilité de puits ont été réalisés sur des échantillons cubiques de 40 cm de côté, précarotté sur une profondeur de 30 cm. Le diamètre du puits est de 5 cm (figure 6.3).

	σ_v	σ_H	σ_n
Essai 1	σ_v	σ_v	σ_v
Essai 2	σ_v	$0,6 \sigma_v$	$0,6 \sigma_v$
Essai 3	σ_v	$0,65 \sigma_v$	$0,55 \sigma_v$
Essai 4	σ_v	$0,8 \sigma_v$	$0,4 \sigma_v$

Tableau 6.1
Chemins de chargement utilisés

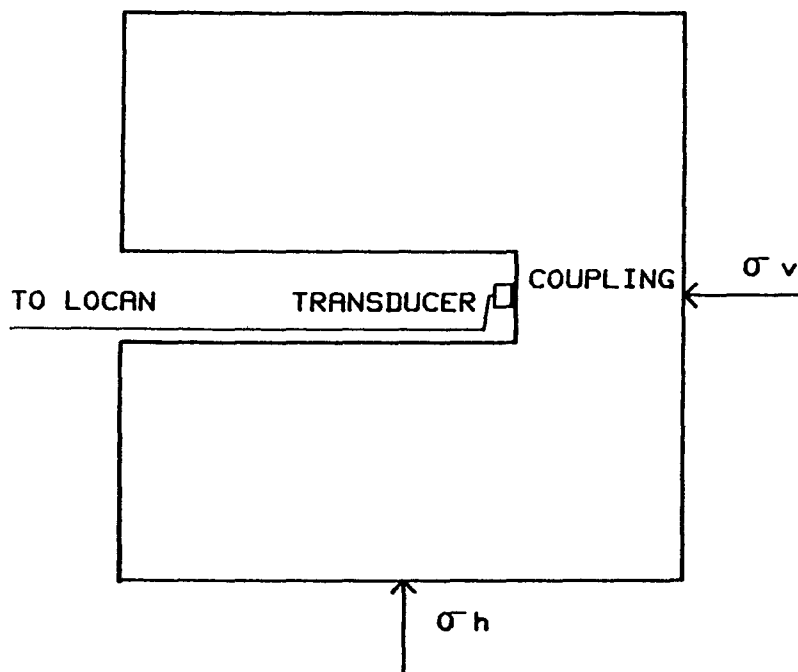


Figure 6.3
Echantillon précarotté et équipé du capteur d'émission acoustique

6.2.1 VERIFICATION DE LA DISTRIBUTION DES CONTRAINTES

Parce que la taille de l'échantillon utilisé est inférieure à celle pour laquelle le triaxial a été mis au point, il est nécessaire de vérifier si la distribution des contraintes est uniforme et égale à la charge que divise la surface du bloc. Dans cette perspective, un certain nombre de rosettes ont été collées au milieu des faces de l'échantillon (photo 6.4).

La figure 6.4 donne quelques exemples de résultats obtenus. Dans ces figures sont reportées les prédictions théoriques de déformation en appliquant l'élasticité linéaire. La bonne concordance des résultats montre que le "triaxial" fonctionne correctement. Notons cependant qu'en deçà d'une contrainte de 15 MPa appliquée sur les faces du bloc, les informations restent médiocres, ce qui prouve la plus grande difficulté de mise en place du bloc.

6.2.2 MESURE DE LA CONVERGENCE, STABILITE DU TROU

La figure 6.5 donne des résultats pour les tests 2 et 4. On remarquera l'excellente résolution de la sonde de convergence :

- dans le cas 2, toutes les informations sont quasi identiques car le chargement est uniforme autour du trou,
- dans le cas 4, l'ordre des convergences correspond bien aux prédictions élastiques linéaires.

On peut donc en conclure à la fiabilité du système proposé.

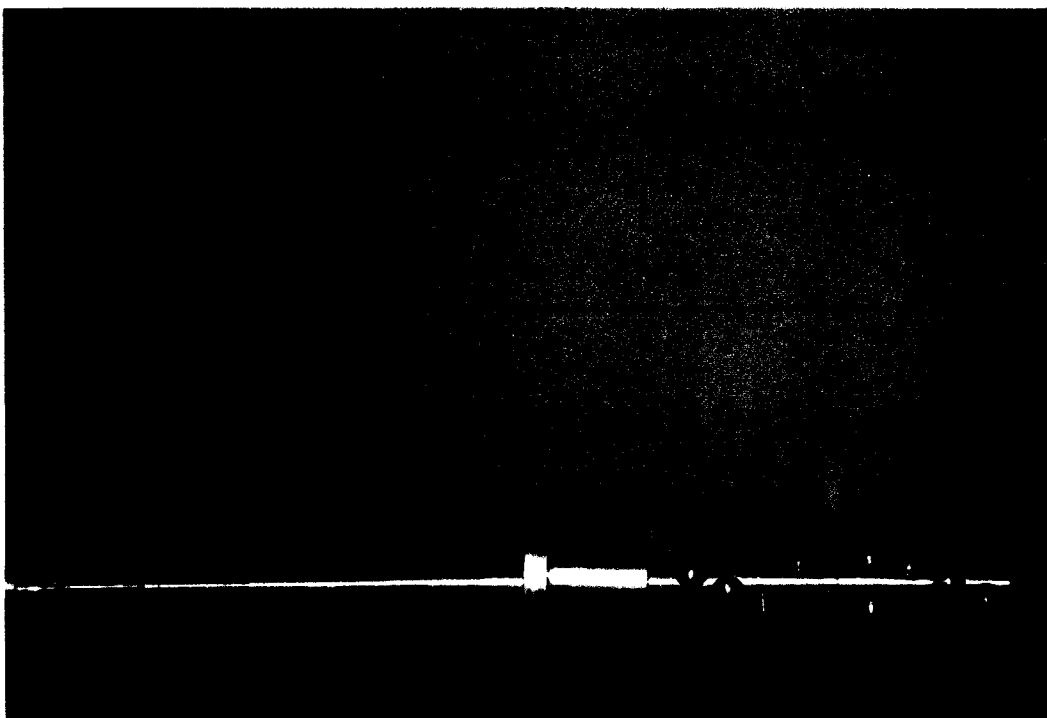


Photo 6.3
La sonde de mesure et sa rallonge

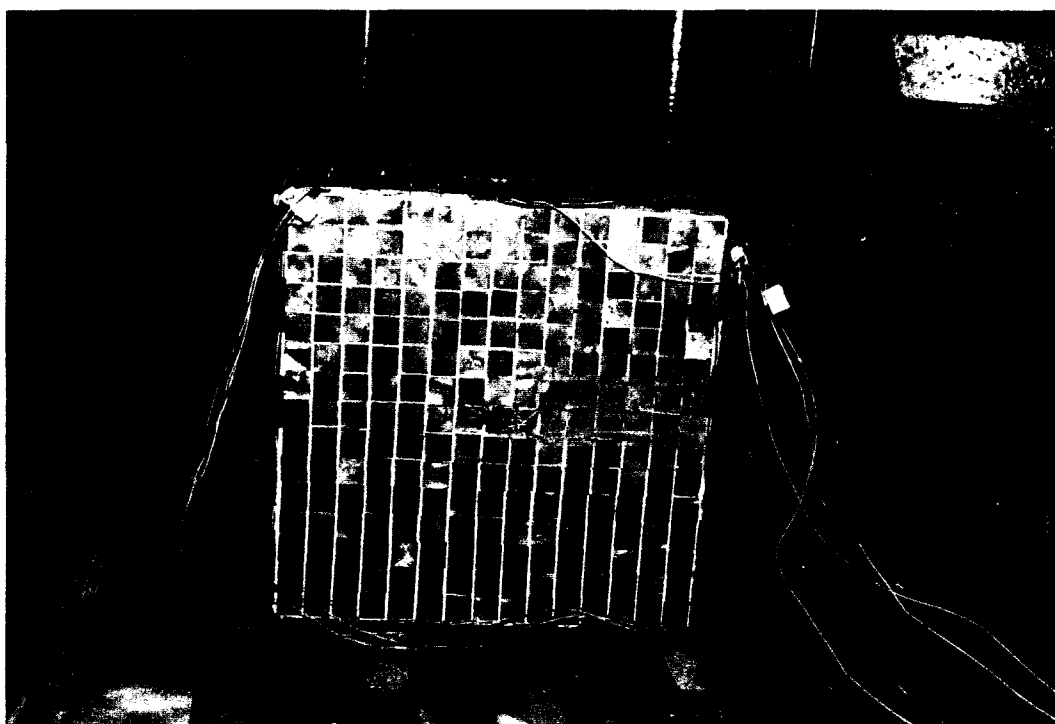


Photo 6.4
Echantillon équipé de rosettes

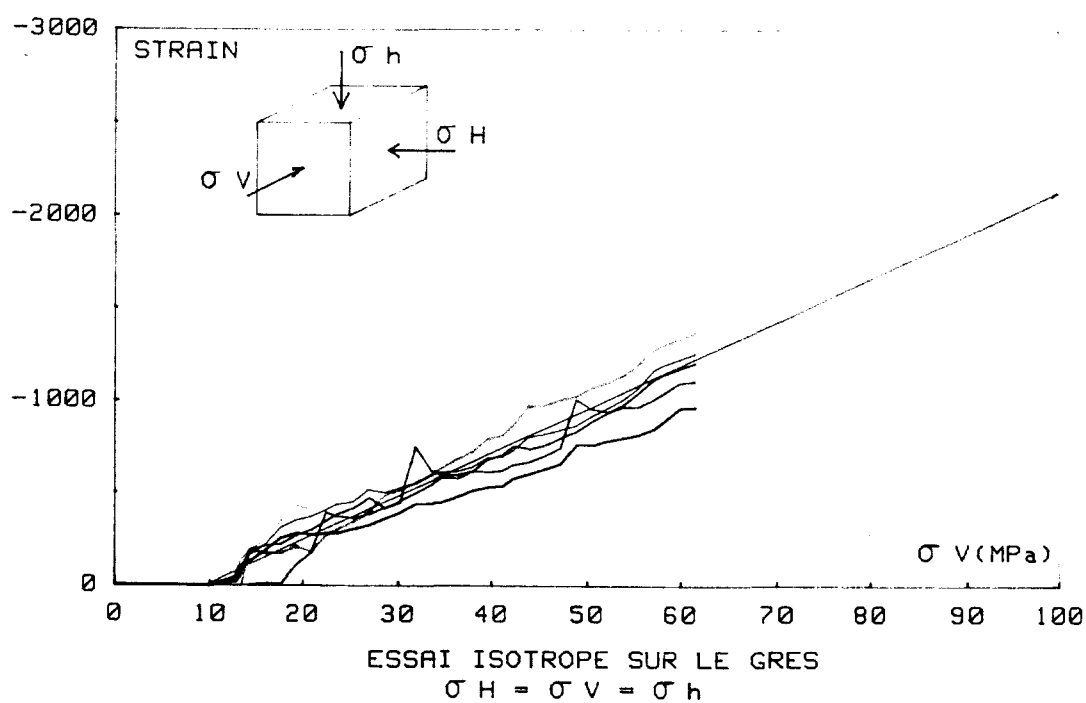
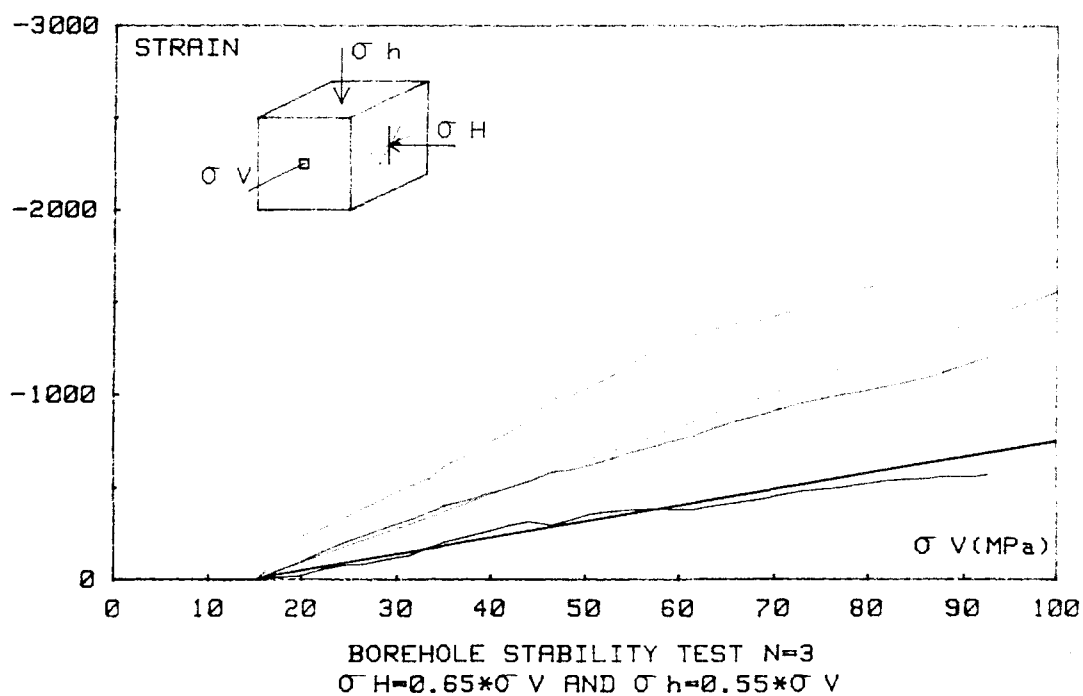


Figure 6.4
 Déformations du bloc enregistrées et prédiction
 a) Essai n° 1
 b) Essai n° 3

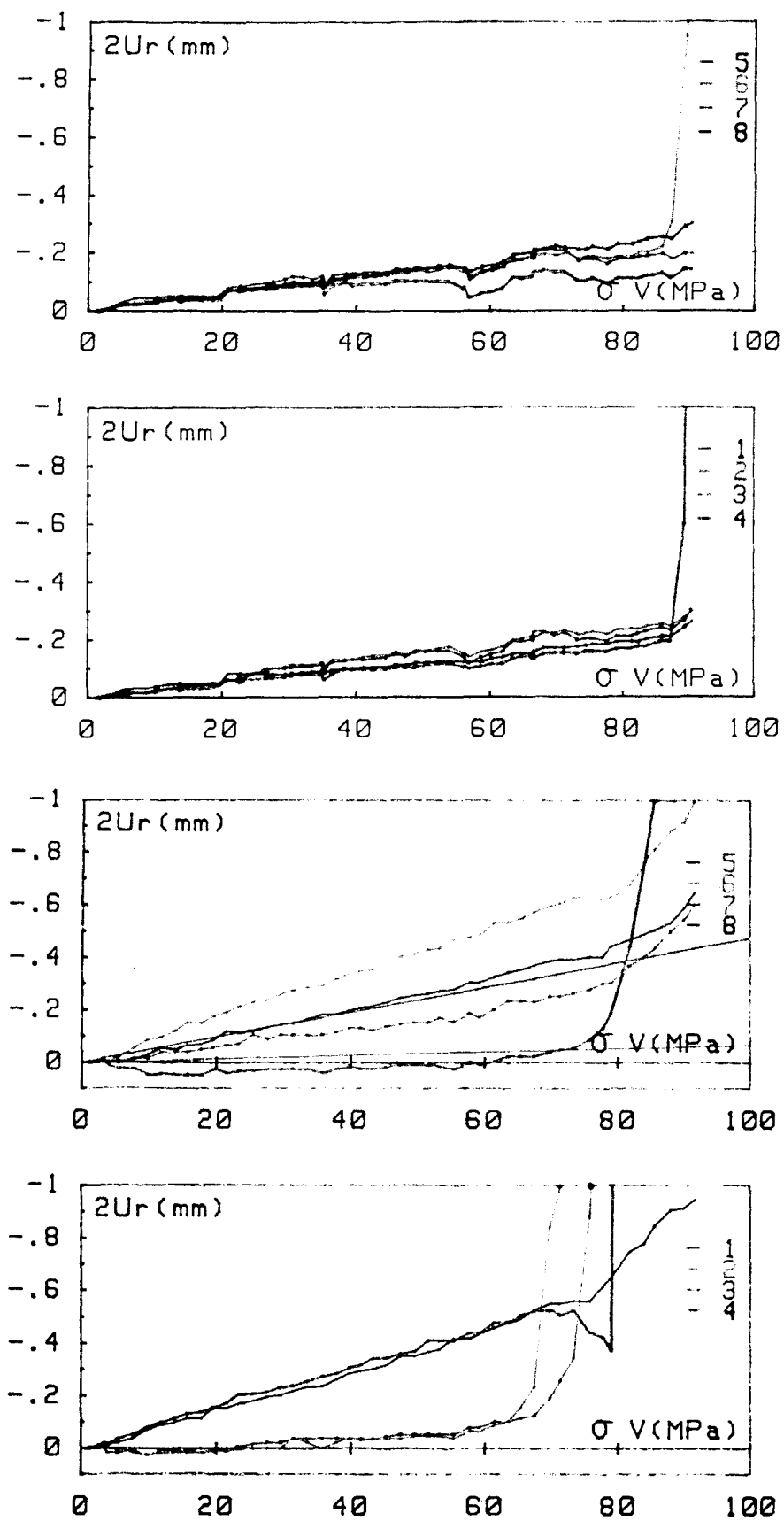


Figure 6.5
Mesure des convergences pour les tests 2 et 4

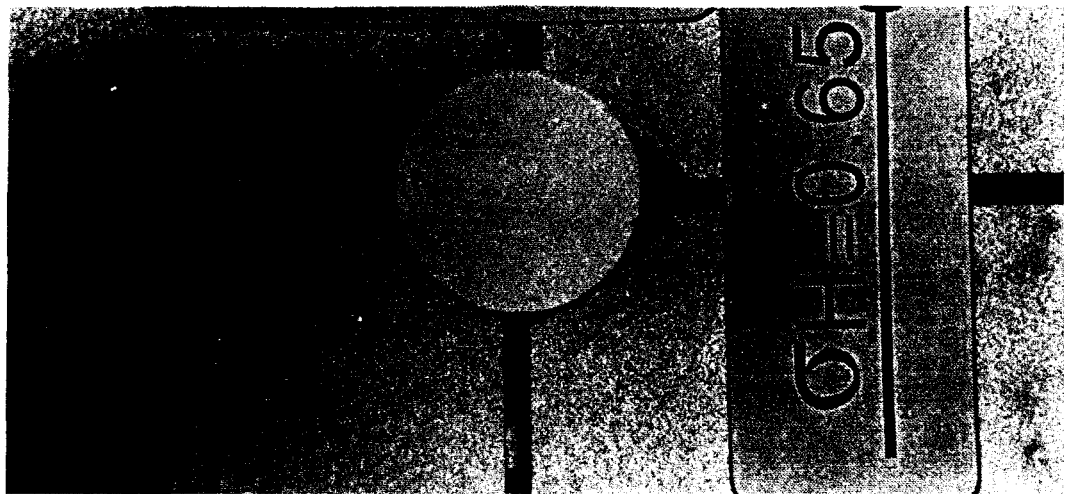
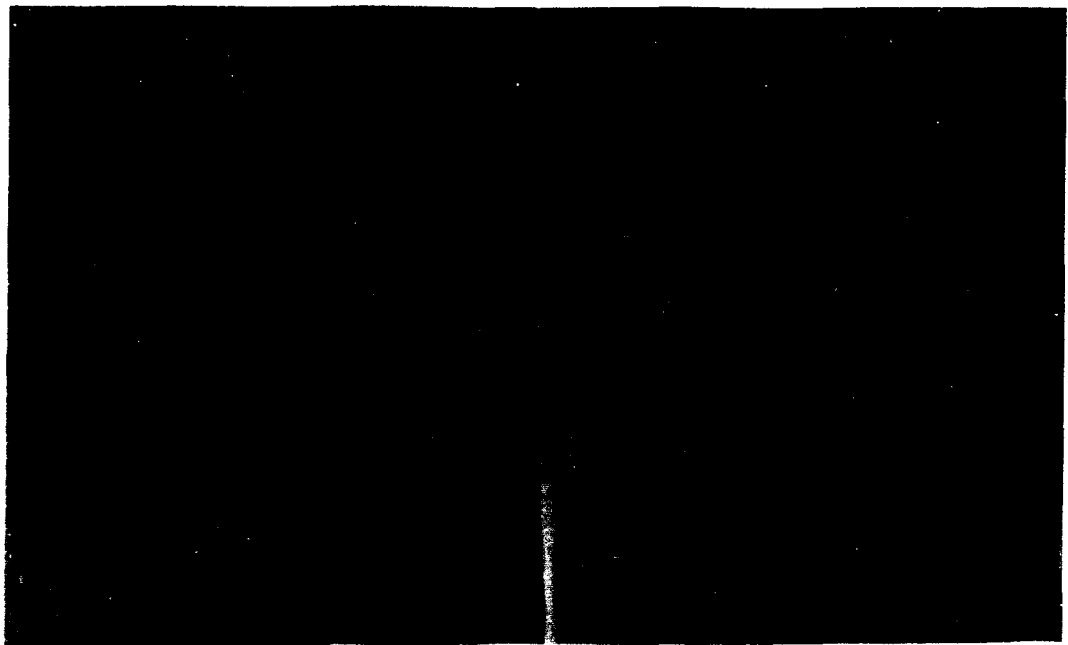


Photo 6.5
Fracturation autour du trou

6.2.3 MESURES D'EMISSION ACOUSTIQUE

La figure 6.6 donne une comparaison entre l'évolution de l'émission acoustique (en coups cumulés) et de la convergence en fonction de la contrainte mineure.

On peut constater que les premières émissions acoustiques apparaissent très tôt. Ceci s'explique par la dilatance observée très tôt dans l'essai de compression simple ou dans les essais triaxiaux à faible pression de confinement. L'augmentation du nombre de coups, aux alentours de 50 MPa, correspondrait aux ruptures constatées par les palpeurs 4 et 6.

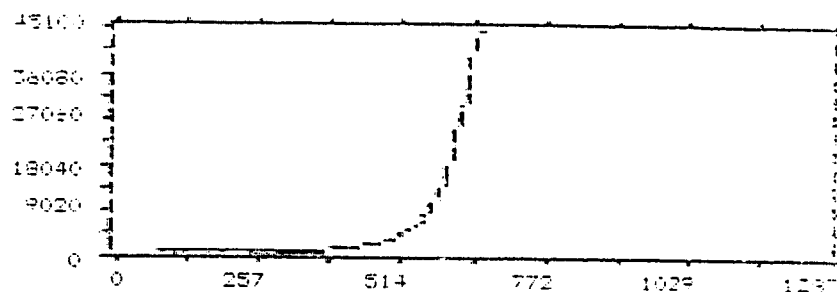
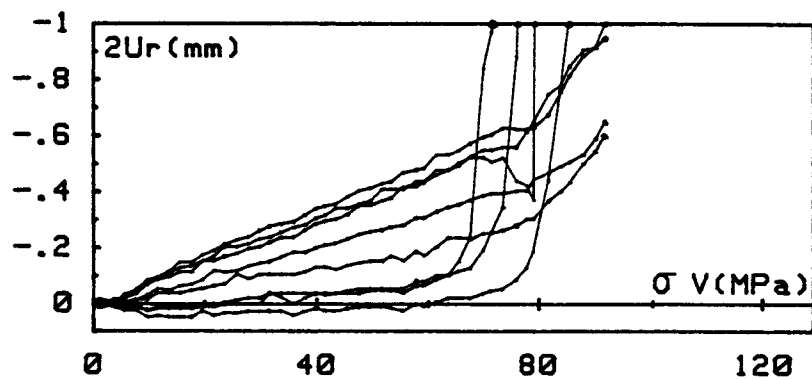
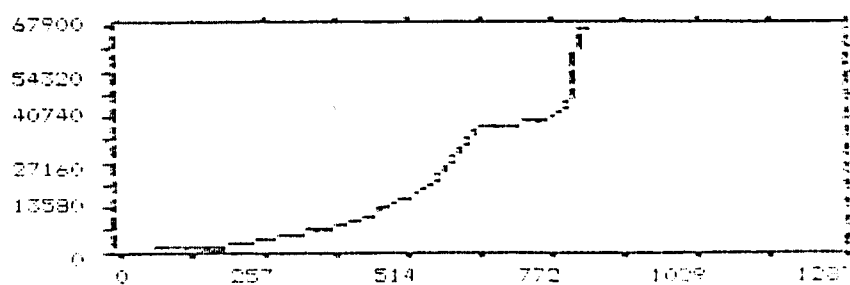
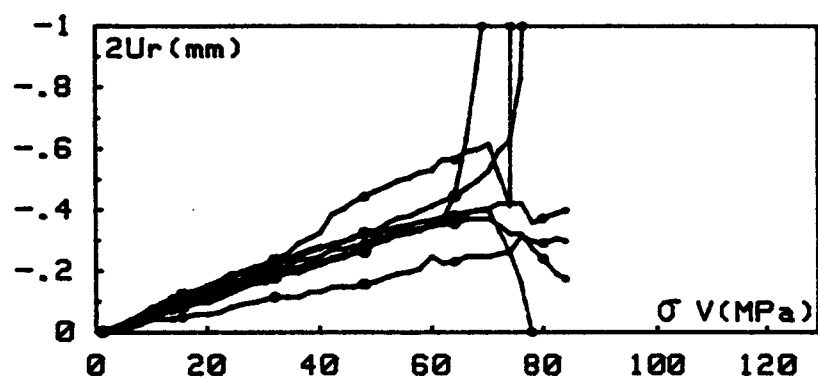


Figure 6.6

Comparaison entre émission acoustique et convergence pour les tests 3 et 4

CHAPITRE 7

ADAPTATION DU TRIAXIAL POUR L'ETUDE DE LA PERMEABILITE

On distingue pour l'écoulement de l'eau à travers une roche [48, 6] :

- La conductivité hydraulique primaire de la roche, dit perméabilité de la matrice, qui prend en compte exclusivement les écoulements au sein de la matrice rocheuse assimilable à un milieu poreux. La loi de Darcy lui est applicable [45],
- La conductivité hydraulique secondaire, dit perméabilité des fissures, dues à la présence de macro-discontinuités dans le massif rocheux [30].

La conductivité hydraulique des milieux cristallins est due, pour l'essentiel, à la porosité de fissure qui peut être importante si le terrain présente une fragilité mécanique et a été tectonisé. Les lois classiques d'écoulement en milieu poreux continu ne sont, en général, pas directement applicables au milieu fissuré. D'autres méthodes d'interprétation des résultats expérimentaux ont été développées pour tenir en compte de l'écoulement fissural. Il s'agit essentiellement de méthodes de modélisation numérique du comportement hydromécanique des différents milieux fissurés.

La mesure de la conductivité hydraulique se fait selon les méthodes classiques d'injection en forage sous simple obturateur en fond de trou ou entre double obturateurs qui conduisent à un régime d'écoulement permanent ou les méthodes transitoires telles que le slug test et le pulse test.

7.1 ADAPTATION DU TRIAXIAL

Le but des essais effectués est de mesurer la variation de la conductivité hydraulique, notée K , d'une matrice rocheuse sous sollicitation triaxiale croissante puis décroissante.

Les essais sont réalisés tout d'abord sur une éprouvette cubique à fissuration fine et homogène, puis sur une éprouvette cubique traversée par une fissure. La sollicitation triaxiale est caractérisée par trois contraintes principales σ_v , σ_H et σ_h : σ_v est la contrainte majeure dans l'axe du forage ; σ_H et σ_h sont les contraintes mineures telles que : $\sigma_H = \sigma_h = K \cdot \sigma_v$.

7.1.1 DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Sonde d'injection

Il s'agit d'un dispositif à double obturateur isolant une chambre d'injection dans un forage de longueur 355 mm et de diamètre 30 mm (figure 7.1). Les deux obturateurs sont respectivement une rondelle au fond du forage et un cylindre en tête du forage raccordant la chambre de mesure à la pompe d'injection. Les obturateurs sont assemblés à l'éprouvette par collage à l'aide d'un produit étanche (araldite). Le montage préserve une chambre d'injection de 200 mm de longueur. L'injection est réalisée par un groupe hydraulique Gilson à micro-débit. L'échantillon est drainé sur ces faces extrêmes ce qui a nécessité une adaptation de notre dispositif antifrettage habituel.

Adaptation du dispositif d'antifrettage

Pour permettre le drainage des eaux injectées, il n'est plus possible d'enduire les faces de l'échantillon de colle silicone. Nous avons alors collé les plots sur des feuilles de cuivre qu'on vient par la suite intercaler entre l'échantillon et les têtes de chargement selon le schéma de la figure 7.2. Il faut noter ici que les plots sont plus espacés que pour le procédé habituel (photo 7.1).

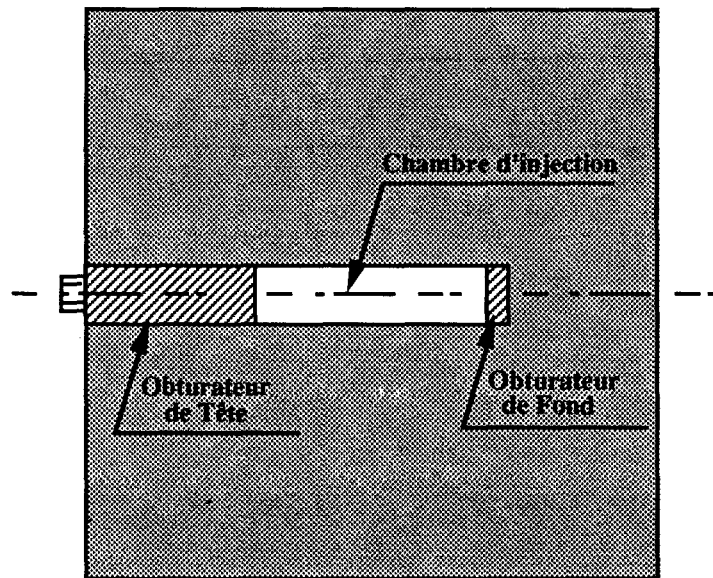


Figure 7.1
Dispositif expérimental

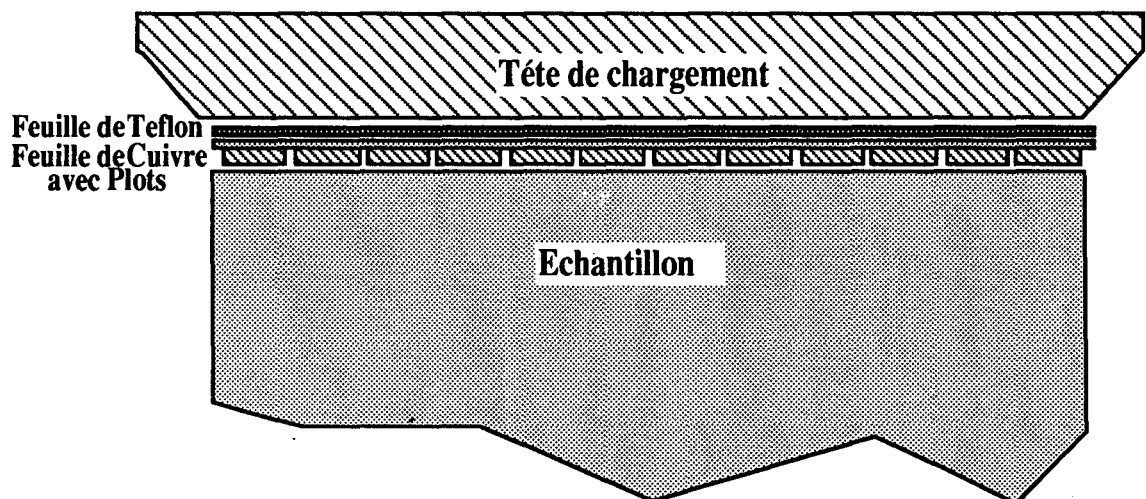


Figure 7.2
Modification du dispositif d'antifrettage

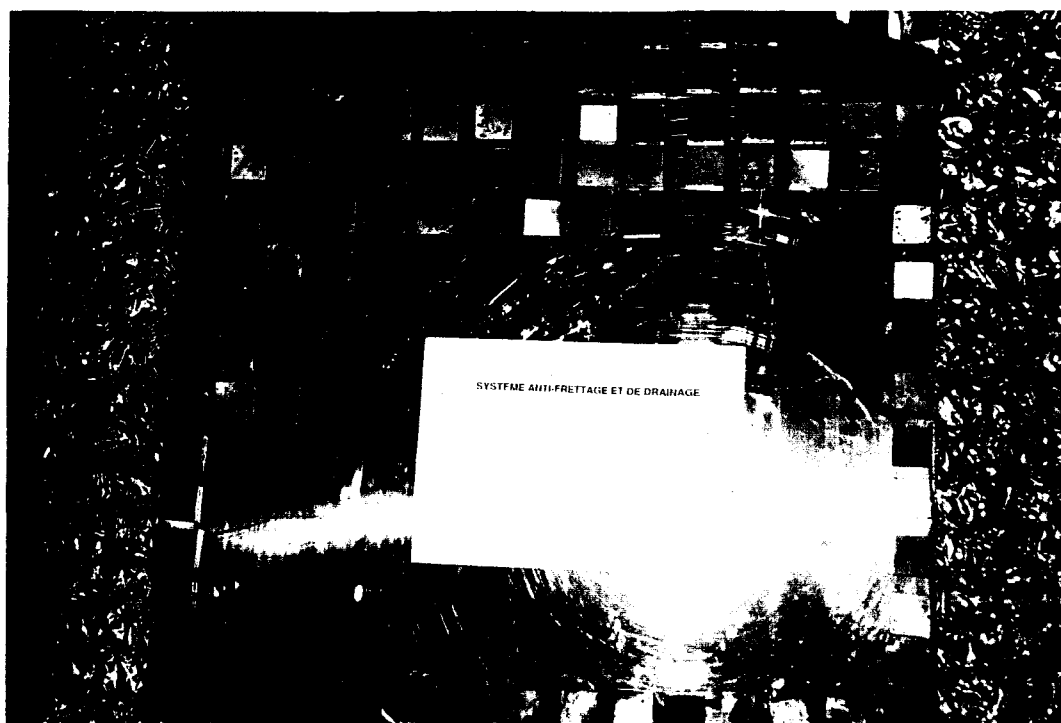


Photo 7.1
Dispositif d'antifrettage modifié

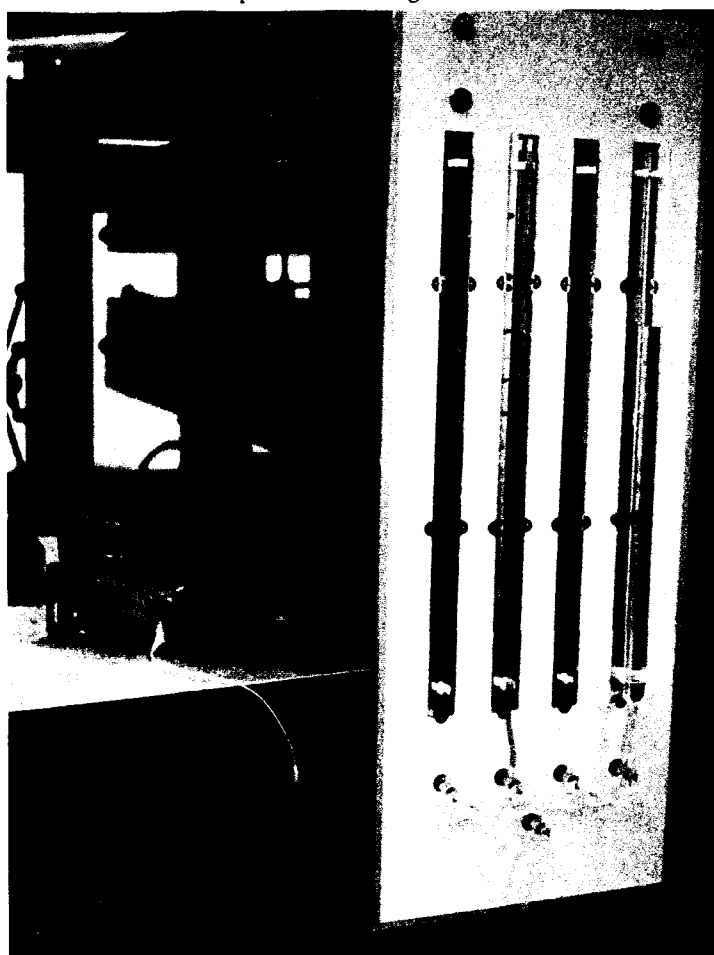


Photo 7.2
Tableau de mesure du volume injecté

7.1.2 DEROULEMENT DE L'ESSAI

Pour éviter les phénomènes de capillarité parasite ou d'écoulement en milieu bi-phasique, l'échantillon est longuement saturé (environ 20 jours). Les contraintes sont ensuite appliquées par palier de 3 MPa pour σ_v (σ_v varie de 5 à 30 MPa). Pour chaque palier de chargement ou de déchargement, un délai de stabilisation du débit d'injection est respecté. Quand le débit d'injection est constant dans le temps, la phase de mesure peut débuter (le délai de stabilisation est de 24 heures en moyenne). La pression d'injection dans le forage est constante et fixée à 1.5 MPa. Le volume d'eau injecté est mesuré en relevant la variation de niveau dans des capillaires calibrés servant de réservoir à la pompe Gilson (photo 7.2). Une mesure de volume est effectuée à intervalle de temps Δt régulier pendant une heure ($\Delta t = 5$ mn). L'évolution du débit d'injection Q est ainsi précisément mesurée, et permet de calculer la conductivité hydraulique en écoulement horizontal, dans un plan perpendiculaire au sondage :

$$K = \frac{Q}{2\pi L \Delta P} \text{Log} \frac{R_i}{r_p}$$

- K : conductivité hydraulique (m/s)
 Q : débit stabilisé (m^3/s)
 $\Delta P = 153$ m (pression d'injection en hauteur d'eau)
 L : 0,2 m (longueur de la chambre d'injection)
 R_i : 0,25 m (rayon d'influence : rayon du cylindre intérieur inscrit dans le cube)
 r_p : 0,015 m (rayon du sondage).

A titre de comparaison, des essais de "pulse test" ont été réalisés. Ils consistent à monter la pression d'injection dans le forage jusqu'à 5 MPa, et à mesurer la variation de pression ΔP en fonction du temps, après avoir isolé la chambre d'injection.

7.2 EXEMPLE DE RESULTATS

Les courbes représentant K en fonction de σ_v (figure 7.3) ou $\text{Log } K$ en fonction de σ_v (figure 7.4) sont régulières et peuvent être facilement approchées par la loi empirique :

$$K = K_0 e^{-\alpha \sigma_v}$$

K_0 : désigne la conductivité hydraulique pour σ_v nulle et α un coefficient qui dépend de la nature de la roche et de la fracturation.

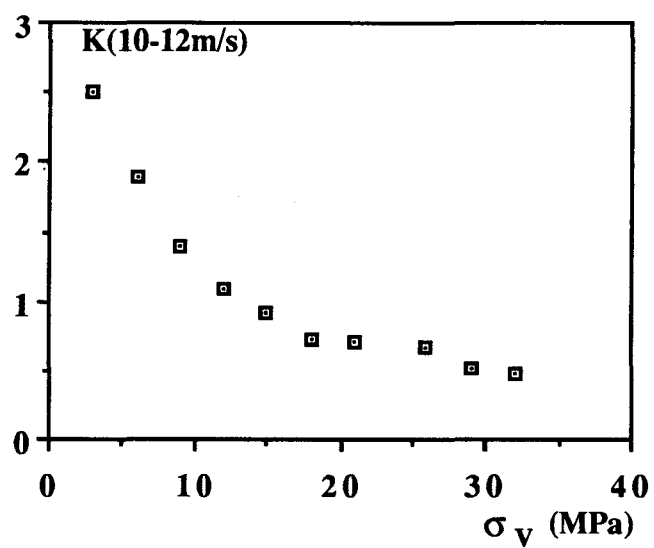


Figure 7.3
Evolution de K en fonction de σ_v (phase de chargement)

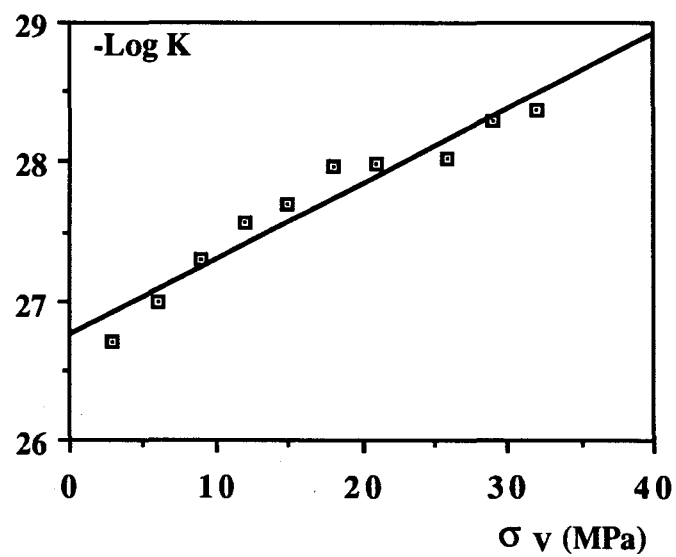


Figure 7.4
Evolution de $\text{Log } (K)$ en fonction de σ_v

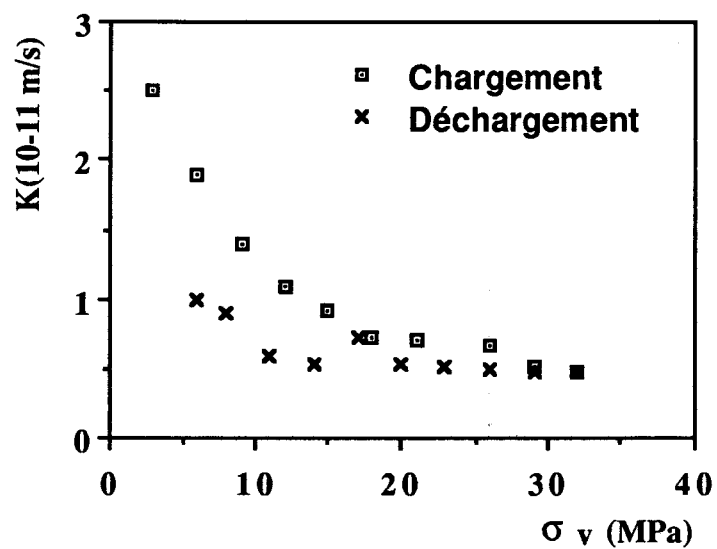


Figure 7.5

Evolution comparée de K pour les phases de chargement-déchargement
(échantillon traversé pour une fissure)

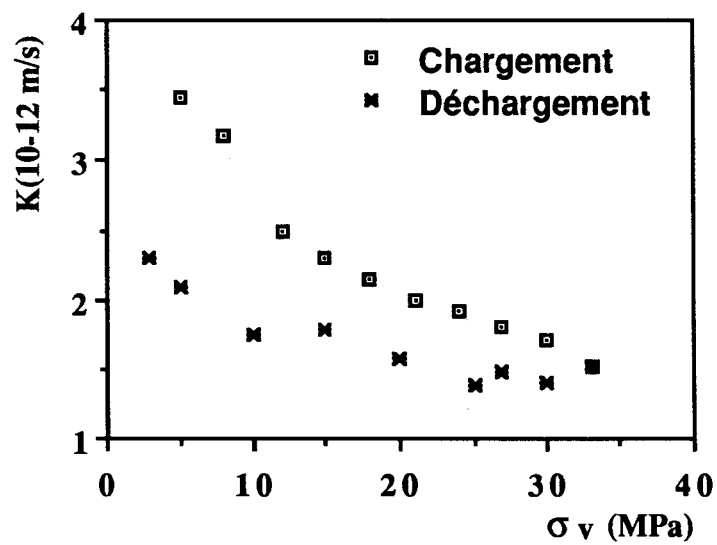


Figure 7.6

Evolution comparée de K pour les phases de chargement-déchargement
(échantillon vierge)

Les figures 7.5 et 7.6 fournissent une vue d'ensemble de l'évolution de la perméabilité au cours du chargement, puis du déchargement. En déchargement, la perméabilité mesurée est constamment plus faible qu'au cours du chargement, ceci est dû au comportement non réversible de la roche (fissuration + effet d'hystérésis).

Les résultats d'un essai de type "pulse test" sont représentés par la figure 7.7. Pour déterminer une corrélation entre ce type d'essai et la mesure à débit d'injection stabilisé, une approche empirique a été testée sous la forme d'une loi :

$$K = \frac{C(P) r_p}{L R_i \Delta t} \quad \text{Log} \frac{P}{P_o}$$

où P_o et P sont respectivement les pressions à t_o et $t_o + \Delta t$

$C(P)$: fonction de la pression, elle prend en compte la compressibilité du montage et du fluide, cette fonction est calée expérimentalement.

La figure 7.8 nous permet de comparer l'évolution des perméabilités des deux blocs testés (bloc avec fissure et le bloc sans fissure). On constate que la perméabilité des fissures est beaucoup plus importante que la perméabilité de la matrice.

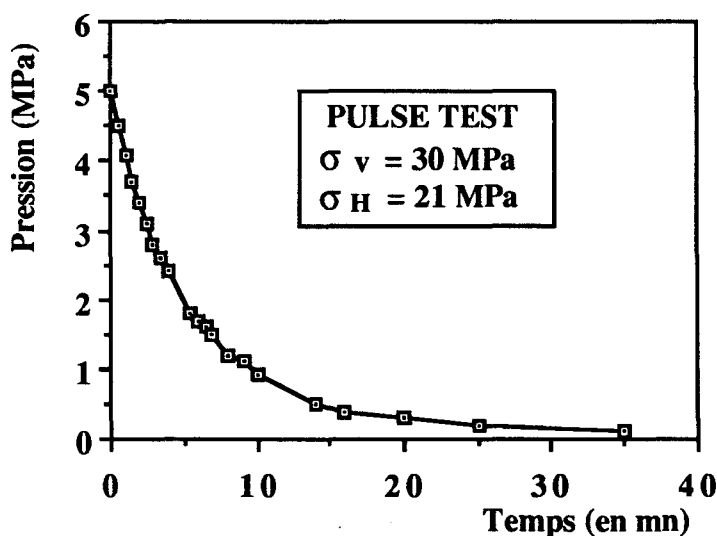


Figure 7.7

Evolution de la pression d'injection en fonction du temps

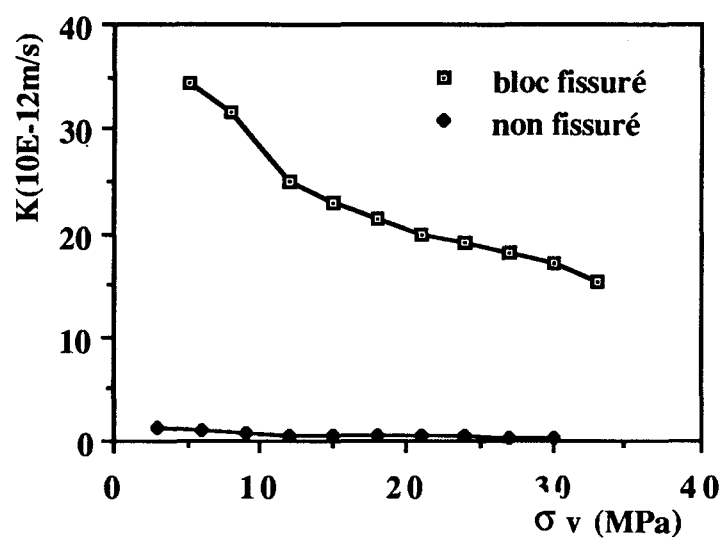


Figure 7.8
Evolution comparée de K pour un bloc fissuré et un non fissuré

CONCLUSION

L'objet de ce travail a été l'étude et la réalisation d'un triaxial vrai de grande capacité. La conception de cette machine d'essai polyaxiale s'inscrit dans le cadre des études sur le comportement rhéologique des roches et matériaux apparentés avec application aux travaux souterrains et aux études relevant du Génie pétrolier et du Génie minier.

Les principales caractéristiques de l'appareillage que l'on peut considérer unique en Europe, et même dans le monde sont :

- la dimension du bloc testé : $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$,
- les contraintes appliquées : 70 MPa.

La conception générale permet :

- d'accroître l'intensité des contraintes par diminution de la taille du bloc,
- de pouvoir simuler sous contraintes l'exécution d'ouvrages souterrains.

Le dispositif expérimental d'essai repose sur le principe de l'indépendance totale des sollicitations appliquées suivant les trois axes géométriques des éprouvettes cubiques testées. La conception du corps d'essai permet indifféremment la réalisation d'essais bi ou triaxiaux, l'axe vertical de chargement étant mécaniquement indépendant des autres.

Un asservissement de chargement, programmable par axe, autorise la génération de chemins de sollicitation indépendants ou couplés. Par conception, un auto-équilibrage des efforts, interne au dispositif expérimental, a été recherché. Cet objectif impose le maintien d'un nombre suffisant de degrés de liberté au niveau des liaisons entre les pièces de repise d'efforts et le milieu extérieur. Le bâti support n'intervient alors que pour transmettre le poids propre du système aux fondations.

Dans le plan horizontal, relatif aux axes de chargement 1 et 2, les efforts de poussée sont équilibrés par un cadre annulaire réalisé à l'aide de trois cerces superposées, en appui unilatéral sur le bâti. Cette disposition s'est avérée nécessaire en égard aux dimensions imposées par la taille des échantillons et aux possibilités de manutention locales limitées à 50 KN. Les efforts de compression horizontaux sont répartis sur les trois cerces au moyen de dalles d'appui en contact plan avec la surface intérieure usinée du cadre. Le centrage de la résultante des efforts de compression, à mi-hauteur des cerces, est réalisable au moyen de quatre vérins d'appui, logés en tête du bâti, sur lesquels elles reposent. La surface de contact est conçue pour recevoir un patin à billes permettant au cadre de se déplacer librement dans le plan horizontal. Un espace annulaire est aménagé entre les deux tôles constituant la cerce centrale, de façon à permettre, en cours d'essai, un forage de l'éprouvette ou toute autre manipulation interne.

L'axe vertical de chargement est assuré par un ensemble sommiers-tirants, en appui simple sur le bâti, disposé dans l'espace intérieur du cadre.

L'échantillon est maintenu, au centre du corps d'essai, par l'intermédiaire des modules de poussée et de cales de réglage permettant une adaptation dimensionnelle. Chaque axe comporte un module de poussée équipé de quatre vérins à mise en pression simultanée, par manifold de répartition. La pression admissible pour chaque axe, de valeur maximale égale à 70 MPa, est fournie par l'intermédiaire de groupes régulés à faible débit, de type Gilson. Cette valeur rapportée à la taille maximale des échantillons permet de développer une poussée de 1 750 tonnes par axe.

La réalisation d'un champ de contraintes de compression uniforme au travers d'une surface de chargement pose un problème expérimental de réalisation en égard aux contraintes tangentielles qui y prennent naissance de par la déformation transversale de l'échantillon. De nombreux expérimentateurs, confrontés à ce problème, ont dû élaborer un dispositif expérimental permettant de favoriser la libre dilatation transversale dans les faces de chargement. Après un brève étude des différents systèmes d'antifretage, nous avons mis au point un nouveau dispositif permettant aussi une instrumentation plus aisée des faces de l'échantillon. Ce dispositif a été testé, et a donné des résultats satisfaisants.

La machine triaxiale est conçue dans le but de réaliser les asservissements nécessaires à l'objectif visé. La conception fondamentale de base restant l'indépendance totale possible des axes de chargement, deux asservissements de base sont sélectionnables pour chacun ; ce sont :

- **le chargement à force imposée** : l'intensité de l'effort appliqué est mesurée par l'intermédiaire de la pression de fluide au moyen d'un capteur de pression associé à chaque groupe.
- **le chargement à déplacement imposé** : le déplacement relatif des faces d'appui de l'échantillon dans une direction de chargement est mesuré à l'aide de huit capteurs de déplacement de type LVDT, montés deux à deux en opposition et disposés sur un référentiel fixe.

Les deux possibilités d'asservissement sont de type classique, en boucle fermée, à pilotage par capteurs, système d'acquisition et mini-calculateur HP 9 000. L'écart entre consigne et valeur mesurée est traité au moyen d'un algorithme de type P.I.D. adapté pour optimiser le processus d'établissement de la valeur assignée. La pression de fluide des circuits de charge constitue la variable d'action dont l'établissement est assuré par les groupes de pompe et des micro-vannes de décharge à moteur pas à pas.

La collecte des informations relatives au comportement de l'échantillon sous contraintes est réalisée au niveau de toute surface extérieure, les capteurs associés étant spécifiques au type d'essai réalisé, ce sont :

- les jauges d'extensométrie pour les déformations locales,
- les capteurs de vitesse de propagation d'ondes utilisables pour caractériser l'endommagement du bloc,
- les capteurs d'émission acoustique pour la détection de l'amorce et l'évolution de la rupture.

La mise en place des capteurs sur les faces de chargement du bloc est réalisable grâce au système d'antifretage spécifique décrit.

L'originalité de l'appareillage réside dans le fait que l'on peut forer directement sous contrainte. Un espace central de 140 mm a été aménagé au centre du cadre biaxial. L'ensemble des cales d'appui possède un perçage qui permet le passage d'un carottier ou de tout autre système. A partir de cette conception, les possibilités d'études sont nombreuses.

Parmi les essais effectués sur le triaxial vrai, une étude de discage a été menée pour caractériser l'état de contrainte in-situ. L'utilisation d'une chaîne d'acquisition d'émission acoustique nous a permis de détecter l'amorce et la propagation de la rupture.

Nous avons conçu une sonde de mesure de la convergence d'un trou pour pouvoir effectuer l'étude de la stabilité d'ouvrages souterrains (forages pétroliers, tunnels) sous un champ de contrainte quelconque. L'adaptation de la chaîne d'émission acoustique nous a permis de comparer la mesure de l'activité acoustique au pourtour de l'excavation aux informations enregistrées par la sonde de mesure de la convergence.

En modifiant légèrement le dispositif d'antifretage, et en réalisant une sonde d'injection à double obturateurs, nous avons utilisé le triaxial vrai pour étudier l'influence de l'état de contrainte sur la conductivité hydraulique en milieu fissuré.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ATKINSON R.H. et H.Y. KO** (1972) - "A multiaxial device for testing rock materials - The deformations and the rupture of solids subjected to multiaxial stresses" - *Colloque RILEM*, Tome III, Cannes.
- [2] **AVRIL J.** - "Encyclopédie Vishay d'analyse des contraintes" - *Vishay Micromesures*, France.
- [3] **BASCOUL A., BOURDES J.P. et MASO J.C.** (1972) - "Une nouvelle machine de compression triaxiale" - *Colloque RILEM*, Cannes, Octobre.
- [4] **BASCOUL A.** (1974) - "Etude du comportement mécanique du béton en compression biaxiale" - *Thèse de Docteur Ingénieur* Université Paul Sabatier de Toulouse
- [5] **BAZAND Z.P.** (1986) - "Large triaxial-torsional testing machine with hygrothermal control" - *Experimental methods and Devices*, Vol. 19, n° 112, Matériaux et Construction
- [6] **BERNAIX J.** (1970) - "Etude géotechnique de la roche de MALPASSET" - *Edition Dunod*, Paris
- [7] **BOUMAHDI M., LEBLANC A., J.P. HENRY** (1986) - "Etude et réalisation d'un triaxial vrai de grande capacité avec possibilité de simulation de travaux souterrains" - *Rapport de fin de contrat MRT* - RT 86/05
- [8] **BOUMAHDI M., LEBLANC A., HENRY J.P.** (1987) - "Etude et réalisation d'un triaxial vrai de grande capacité" - *Colloque Géotechnique Saint Nazaire*
- [9] **BOUMAHDI M., LEBLANC A., HENRY J.P.** (1987) - "Triaxial vrai de grande capacité pour roches et matériaux hétérogènes" - *Colloque AUM Bordeaux*
- [10] **BOUMAHDI M., LEBLANC A., HENRY J.P.** (1987) - "Présentation d'un triaxial vrai de grande capacité et de ses possibilités de simulation sous contraintes de problèmes miniers et pétroliers" - *2^{ème} Colloque Franco-Polonais de géotechnique*, Nancy
- [11] **BOUMAHDI M., LEBLANC A., HENRY J.P.** (1988) - "Triaxial de grande capacité pour roches et matériaux hétérogènes - Exemple d'utilisation" - *Conférence Internationale Mesures et Essais en Génie Civil*, RILEM GAMAC, Volume 1, pp 163-172
- [12] **BOUMAHDI M., SKOCZYLAS F., HENRY J.P.** (1989) - "Mesures de perméabilité sur échantillon de granite" - *Rapport fin de contrat Commissariat de l'Energie Atomique* RT 89/21
- [13] **BOUMAHDI M., HENRY J.P.** - "Détection de l'amorce du discage par émission acoustique" - *Rapport fin de contrat Elf Aquitaine* (à paraître)
- [14] **BOUMAHDI M., HENRY J.P.** (1989) - "Borehole stability" - *Experimental Device - Final Report Contract Norwegian Geotechnical Institute* RT 89/18
- [15] **BOUMAHDI M., HENRY J.P.** (1989) - "Borehole stability during drilling and production" - *Final Report Contract Norwegian Geotechnical Institute* RT 89/10
- [16] **CROUCH S.L.** (1976) - "Solution of plane elastic problems by the displacement discontinuity method" - *Int. Num. Math. in Eng.* 10, pp. 301-343

- [17] **CROUCH S.L.** (1983) - "Boundary element methods in solids mechanics" - *Ed. Georges Allen & Unwin*
- [18] **DEMIRIS COSTAS A.** (1987) - "Investigation of Boundary frictions effects in polyaxial tests" - *Geotechnical Testing Journal* GT J OP J, Vol. 10, n° 2, pp 86-90
- [19] **DEMOL R.** (1982) - "Contribution à l'étude par émission acoustique de la fissuration et de la rupture d'aciers faiblement alliés" - *Thèse de Docteur Ingénieur* présentée à l'USTL
- [20] **DHAR B.B.** (1979) - "Fracture growth around openings in rock models and their effect on the design of stable openings" - *SIMR*, Montreux
- [21] **GERTSLE K.H. et al** (1980) - "Behaviour of concrete under multiaxial stress states" - *Journal of the Eng. Mech. Div. ASLE*, Volume 106, n° EM6
- [22] **GUENOT A.** (1987) - "Contraintes et ruptures autour des forages pétroliers" - *6 th ISRM Cong.* Montréal
- [23] **HARDY H.R. Jr.** (1970) - "Application of acoustic Emission Technique to Rock Mechanics Research" - Acoustic Emission ASTM STP 505, *American Society for Testing and Materials*, pp. 41-83
- [24] **HENRY J.P., PARSY F.** (1982) - "Cours d'élasticité" - *Editions Dunod*
- [25] **HILSDORF H.** (1965) - "The experimental determination of the triaxial strength of concrete" - *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*, Heft Nr. 173, Berlin
- [26] **KAISER** (1979) - "Time dependent behaviour of tunnels in jointed rock masses" - *Ph.D. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada
- [27] **LANNAY P., GACHON H., POITEVIN P.** (1970) - "Déformation et résistance ultime du béton sous étreinte triaxiale" - *Annales de l'I.T.B.T.P.*, n° 269
- [28] **LENAIN J.C.** (1981) - "General principles of acoustic emission" - *Materials Evaluation*, octobre, vol. 39, n° 11, pp. 1000 - 1002
- [29] **LINSE D. et STEGBAUER A.** (1972) - "Triaxial stress-strain behaviour of concrete : testing equipment" - *Colloque RILEM*, Cannes, Octobre
- [30] **LOUIS C.** (1976) - "Introduction à l'hydraulique des roches" - *Thèse de Docteur ès-sciences physique*, Université de Paris VI
- [31] **MASO J.C., LORRAIN M.** (1972) - "Réalisation expérimentale de champs homogènes de contraintes planes en traction et compression biaxiales" - *Colloque RILEM*, Cannes, Octobre
- [32] **MASO J.C. et LERAN J.** (1980) - "Mechanical behaviour of Darney sandstone (Vosges, France) in biaxial compression" - *International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 17, n° 2, April

- [33] **MAURY V.** (1979) - "Utilisation des essais et mesures en laboratoires et in-situ dans cinq projets de stockage souterrains" - Proc. 4th ISRM Congr., Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 417-428
- [34] **MAURY V., SAUZAY J.M., FOURMAINTRAUX D.** (1987) - "Approche géomécanique de la production pétrolière - Problèmes essentiels, premiers résultats" - Congrès Intern. de Mécanique des Roches, Montréal
- [35] **MAURY V., SAUZAY J.M.** (1987) - "Borehole instability, case histories, Rock Mechanics Approach and results" - *SPE/IADC Conf. New Orléans*, n° 16 051
- [36] **MIGUEZ R.** (1990) - "Etude de discage, application à la détermination des contraintes in-situ lorsque le forage n'est pas chargé" - *Thèse de Doctorat*, USTLFA
- [37] **MIRABILE M.** (1974) - "Application de l'émission acoustique à l'étude de la rupture des aciers" - Mémoires scientifiques, Revue Métallurgie LXXI, n° 9, pp. 495-507
- [38] **MOGI K.** (1971) - "Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone" - Tectonophysics, Vol. 11, pp 111-127
- [39] **NAKAMURA** (1977) - "Amplitude distributions of acoustic emission signals" - *ASTIM STP 505*, pp. 164-156
- [40] **OBERT L., STEPHENSON D.E.** (1965) - "Stress conditions under wich core discing occurs" - *Soc. Min. Engrs Trans.*, Vol. 232, pp. 227-234
- [41] **PANET M.** (1969) - "Quelques problèmes de mécanique des roches posés par le tunnel du Mont-Blanc". *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 264, pp. 1968-1979
- [42] **PANET M.** (1977) - "Les déplacements autour du tunnel en terrain tendre" - *Tunnels et Ouvrages souterrains*, n° 23, septembre/octobre, pp. 221-227
- [43] **PARROT L.J.** (1970) - "An improved apparatus for biaxial loading of concrete specimens" - *Journal of strain analysis*, Vol. 5, n° 3, pp. 169-176
- [44] **SALA P.** (1982) - "Etude expérimentale de la fissuration et de la rupture des roches par émission acoustique" - *Thèse de Docteur-Ingénieur* présentée à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble
- [45] **SANCHEZ U.J.R.** (1986) - "Etude de la perméabilité des roches en laboratoire" *Thèse de Docteur Ingénieur* présentée à l'I.N.P. de Lorraine
- [46] **SANTARELLI F.** (1988) - "Le discage, un indicateur des contraintes en place : état des connaissances" - *Rapport interne Elf Aquitaine*
- [47] **SCHICKERT G.** (1973) - "On the influence of different load applications techniques on the lateral strain and fracture of concrete specimens" - *Cement and Concrete Research*, Vol. 3
- [48] **TERZAGHI** (1942) - "Soil Moisture and Capillary phenomena in soils" - Ch. IXA in vol. IX of physics of the earth, New-York, *Mac Graw-Hill*
- [49] **THIERCELIN M.** (1980) - "Application de l'émission acoustique à l'étude de la fissuration et de la rupture des roches" - *Thèse de Docteur Ingénieur* présentée à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble

- [50] **TIMOSHENKO S.** (1972) - "Résistance des matériaux" - Tome II, *Editions Dunod*, Paris
- [51] **TORRENTI J.M.** (1987) - "Comportement multiaxial du béton - Aspects expérimentaux et modélisation" - *Thèse de Doctorat* présentée à l'ENPC, Paris
- [52] **VENET V.** - "Utilisation du discage pour la mesure des contraintes in-situ à grande profondeur" - (Thèse de Doctorat, à paraître à l'USTL)
- [53] **WINKLER H.** (1984) - "Fundamental investigations on the influence of test equipments on multiaxial test result of concrete" - *Colloque RILEM* "Réponse du béton aux sollicitations multiaxiales"

ANNEXE 1

CALCUL DES CONTRAINTES ET DES DEPLACEMENTS POUR DIFFERENTES CONFIGURATIONS DU BIAXIAL

DEPOUILLEMENT : Détermination des coefficients de proportionnalité

- Efforts axiaux (x, y) maxi : $F = p.s$

avec : p = pression dans les vérins plats (500.10^5 Pa)
 s = surface des vérins plats (diamètre 700 mm)

$$F = 500 \cdot \frac{\pi \cdot (70)^2}{4} = 1\,942.10^3 \text{ daN}$$

- Taux de charge équivalent : $q = \frac{F}{N \cdot S'}$

avec : N = nombre de plaques (6)
 e = épaisseur des plaques (90 mm)
 L = L_1 ou L_2 : longueur d'appui (en mm)
 $S' = 2 \times e \times L$: Surface d'appui

$$q = \frac{1942.10^4}{6.90 \cdot 2 \cdot L} = \frac{183.10^2}{L} \text{ N/mm}^2$$

- on en déduit alors un coefficient de proportionnalité $K = \frac{q}{q_u}$

avec : q_u = taux de charge unitaire (100 N/mm^2)

$$K = \frac{183.10^2}{100.L} = \frac{183}{L}$$

- on a donc

$$U_{\text{réel}} = U_{\text{calcul}} \times K$$

$$\sigma_{tt \text{ réel}} = \sigma_{tt \text{ calcul}} \times K$$

nota : démarche identique avec F nominale = $1\,500.10^3$ daN $\rightarrow K' = f(L)$

- Valeurs de K :

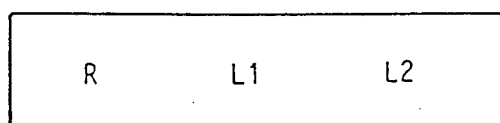
	L1 = 100	L2 = 200	L3 = 370
F maxi : 1 900 tonnes.f	0,183	0,092	0,050
F nominale : 1 500 tonnes.f	0,139	0,069	0,038

caractéristique du matériau :

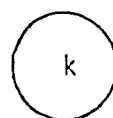
E : module d'élasticité = $0,2 \cdot 10^6$ N/mm²

ϵ : coefficient de Poisson = 0,2

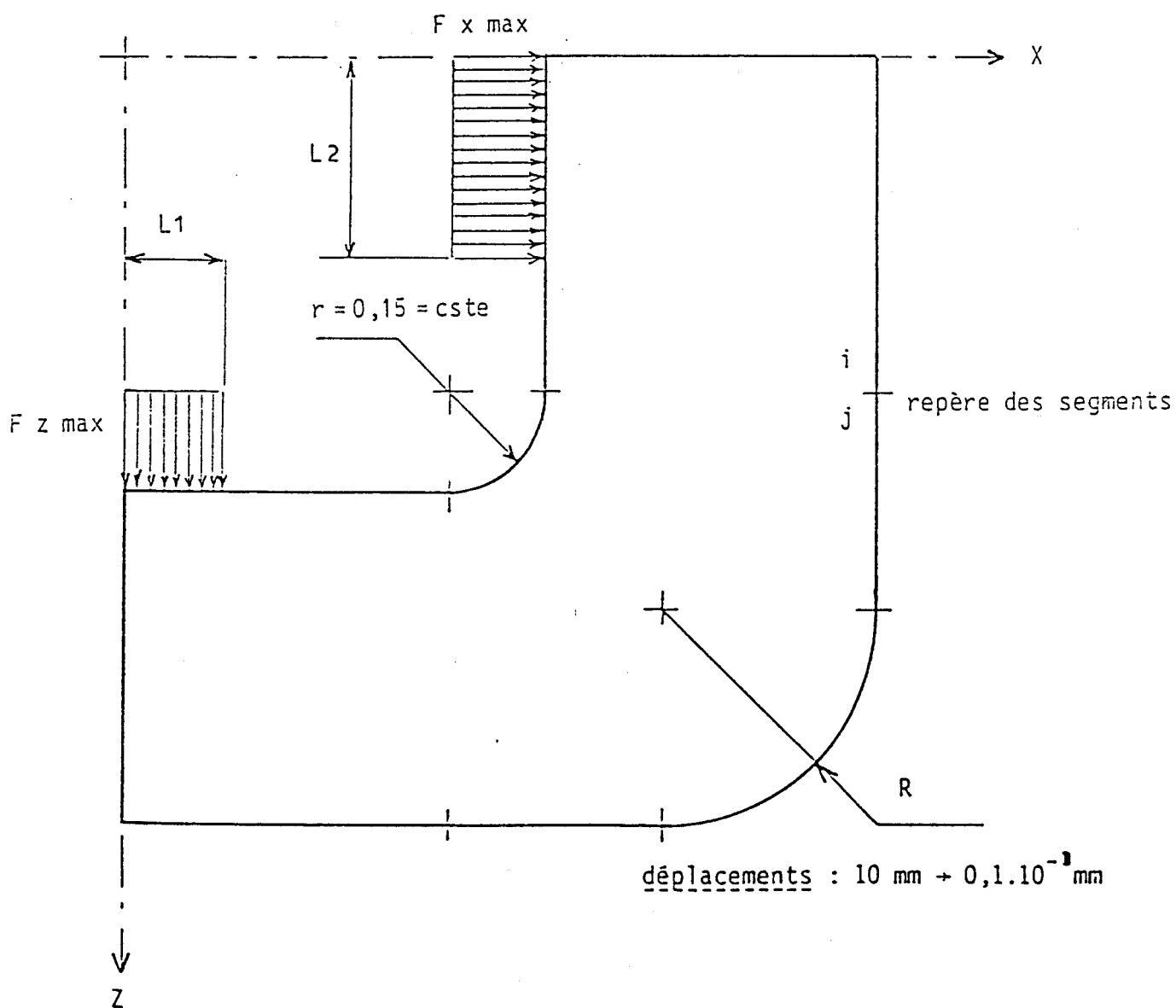
II - CONFIGURATION DES RÉSULTATS



en mètres

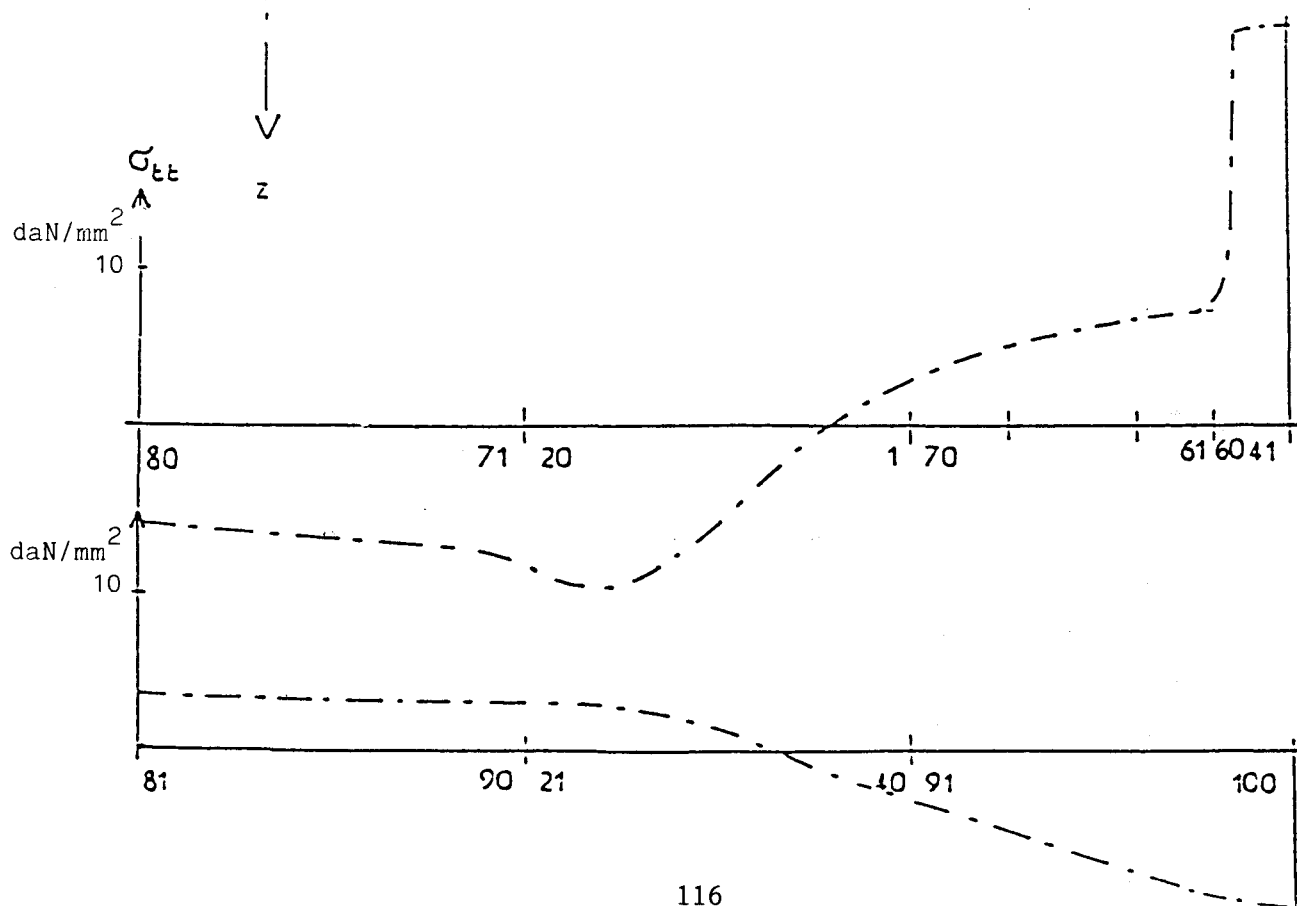
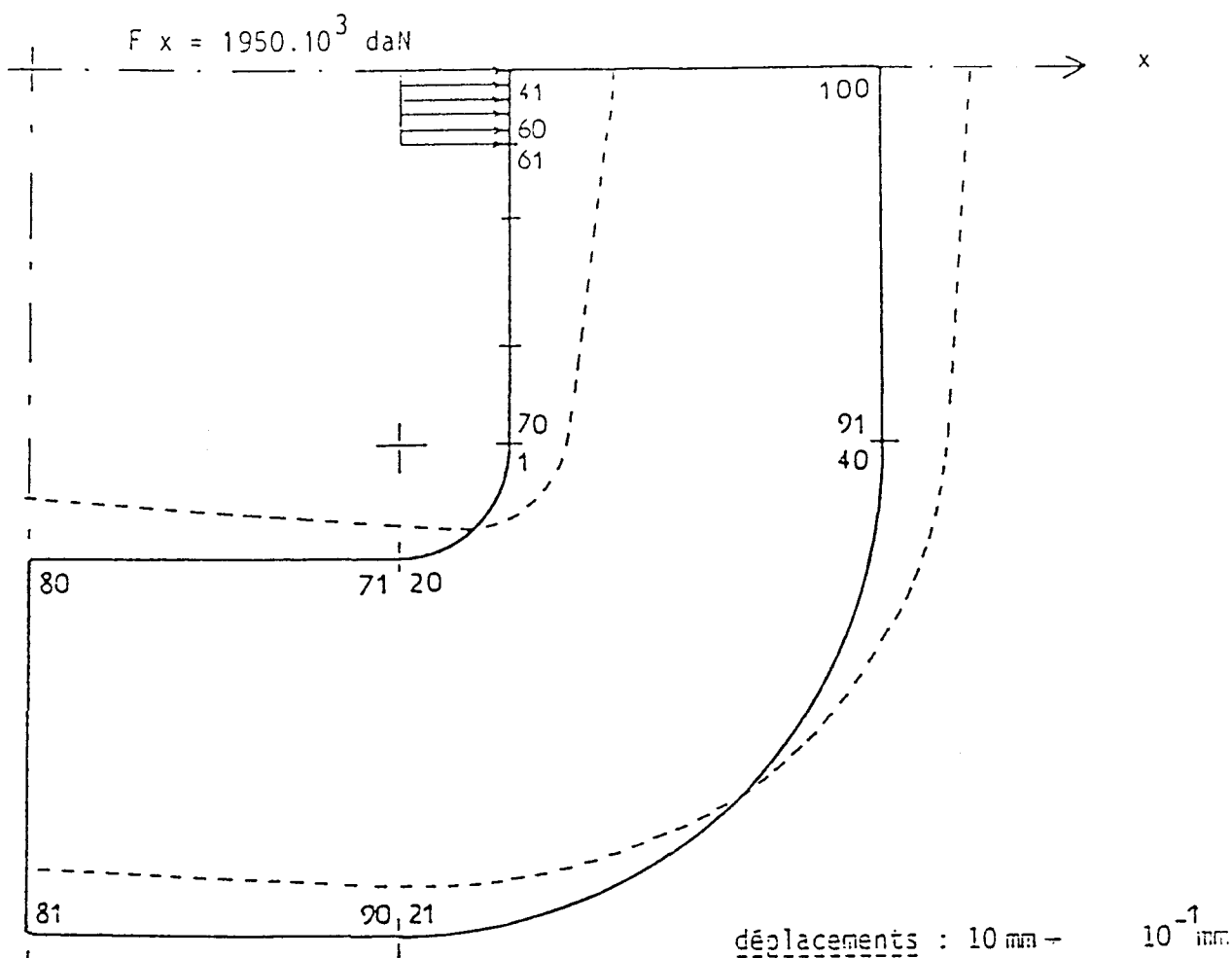
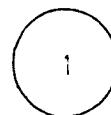


indice du cas
de figure



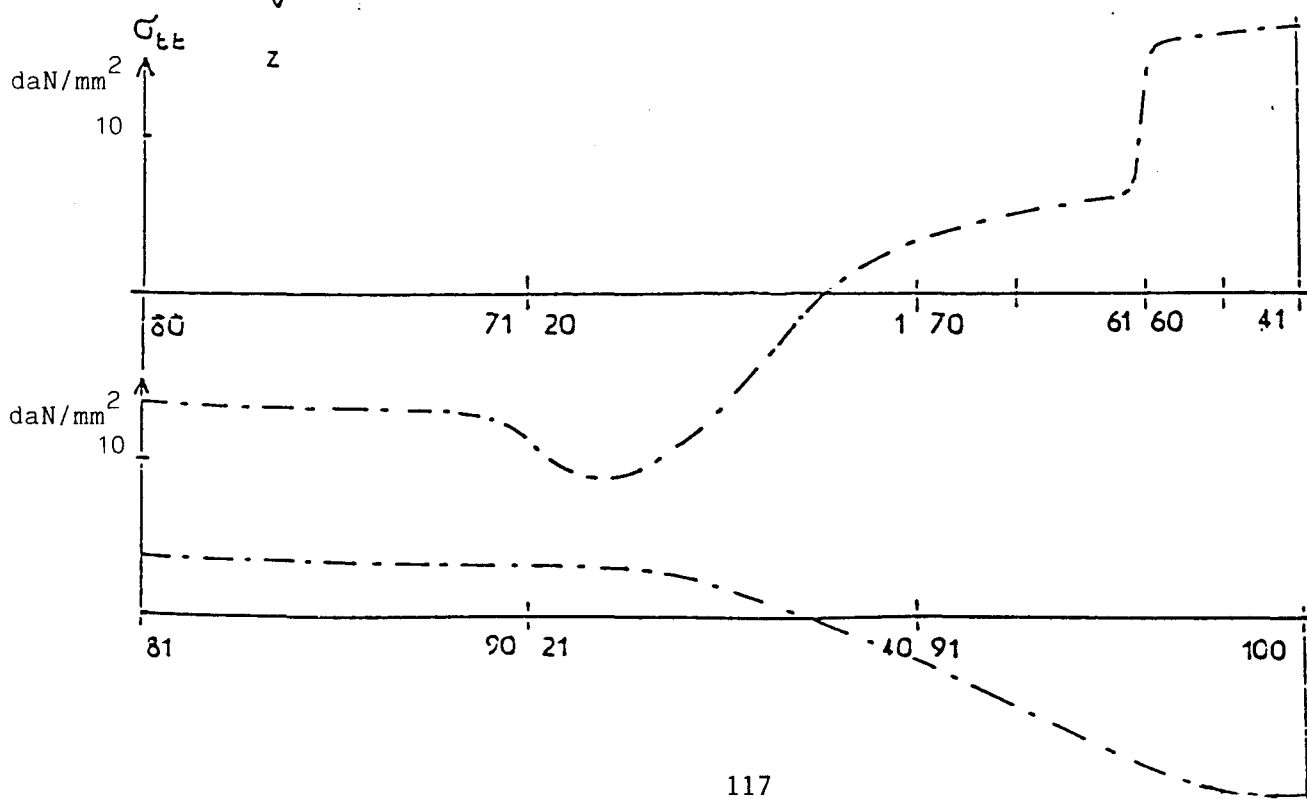
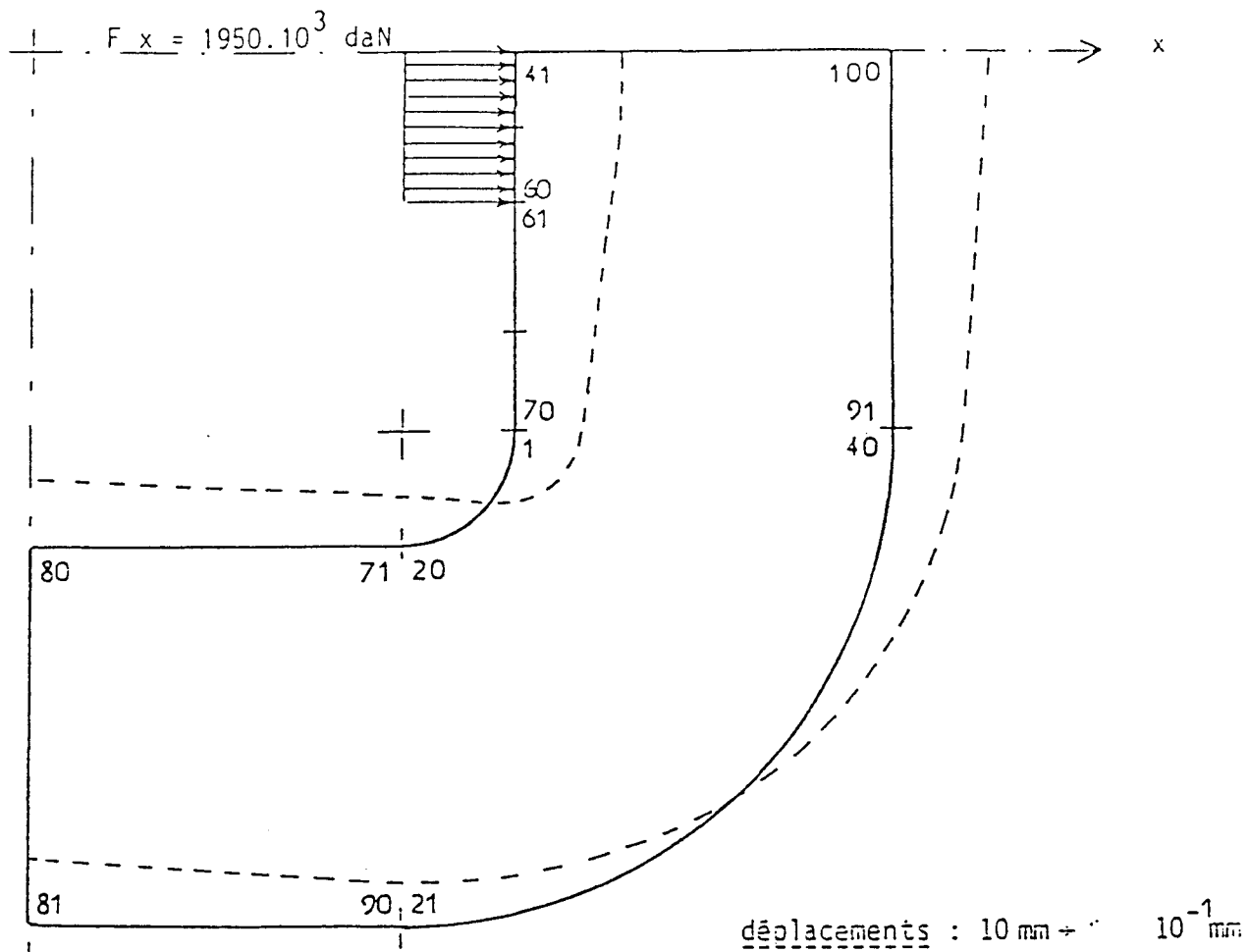
* $\sigma_{tt} = f(s)$ pour les contours intérieurs et extérieurs

$R = 0,65 \quad L1 = 0 \quad L2 = 0,1$



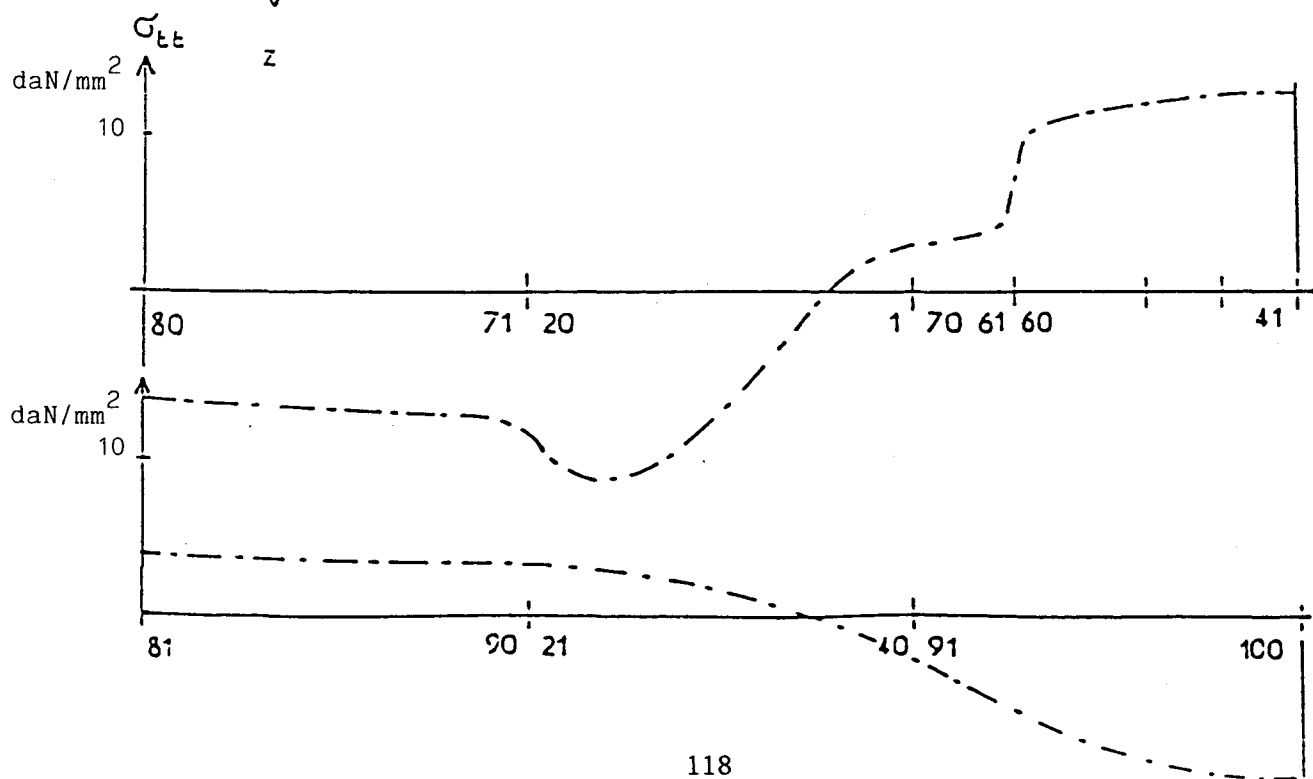
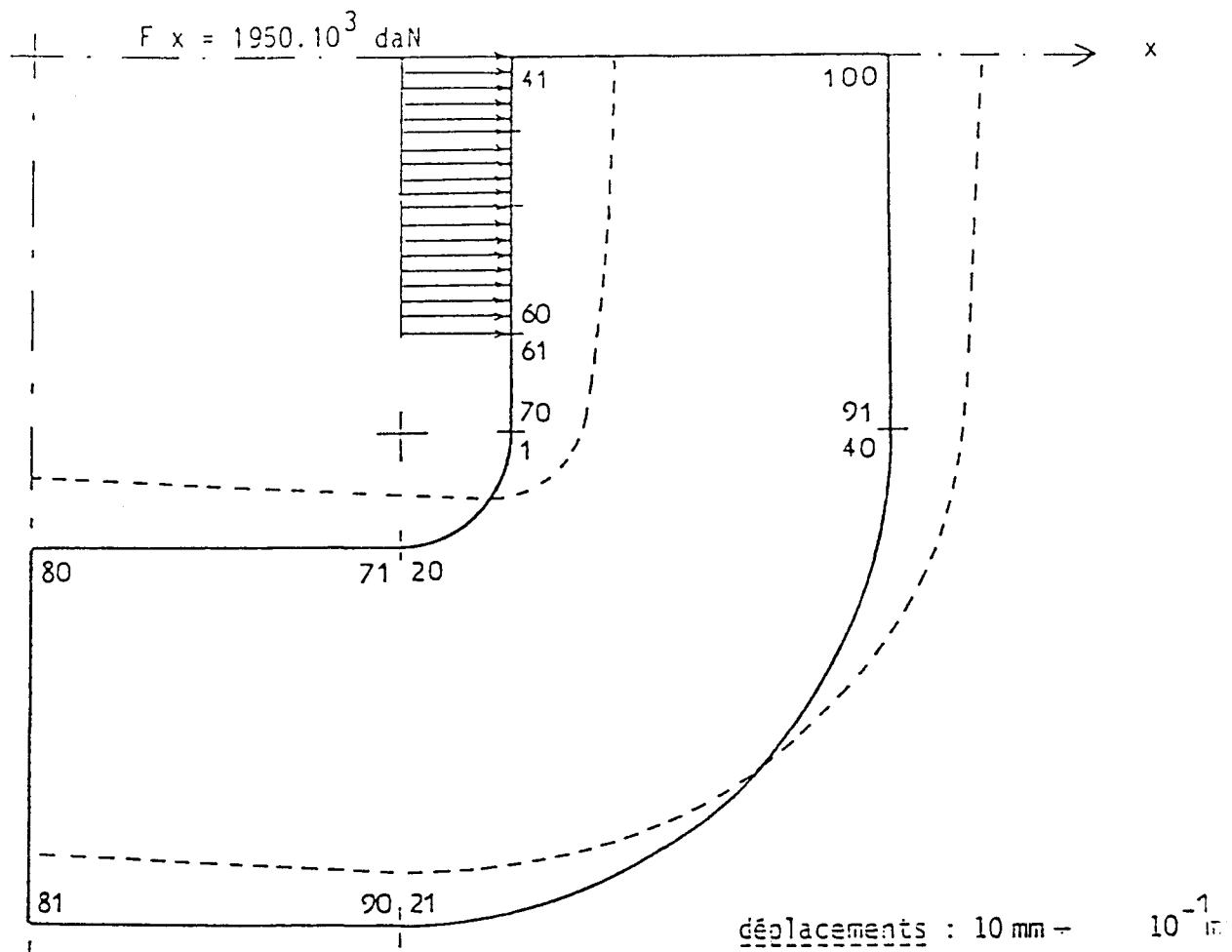
$$R = 0,65 \quad L1 = 0 \quad L2 = 0,2$$

2



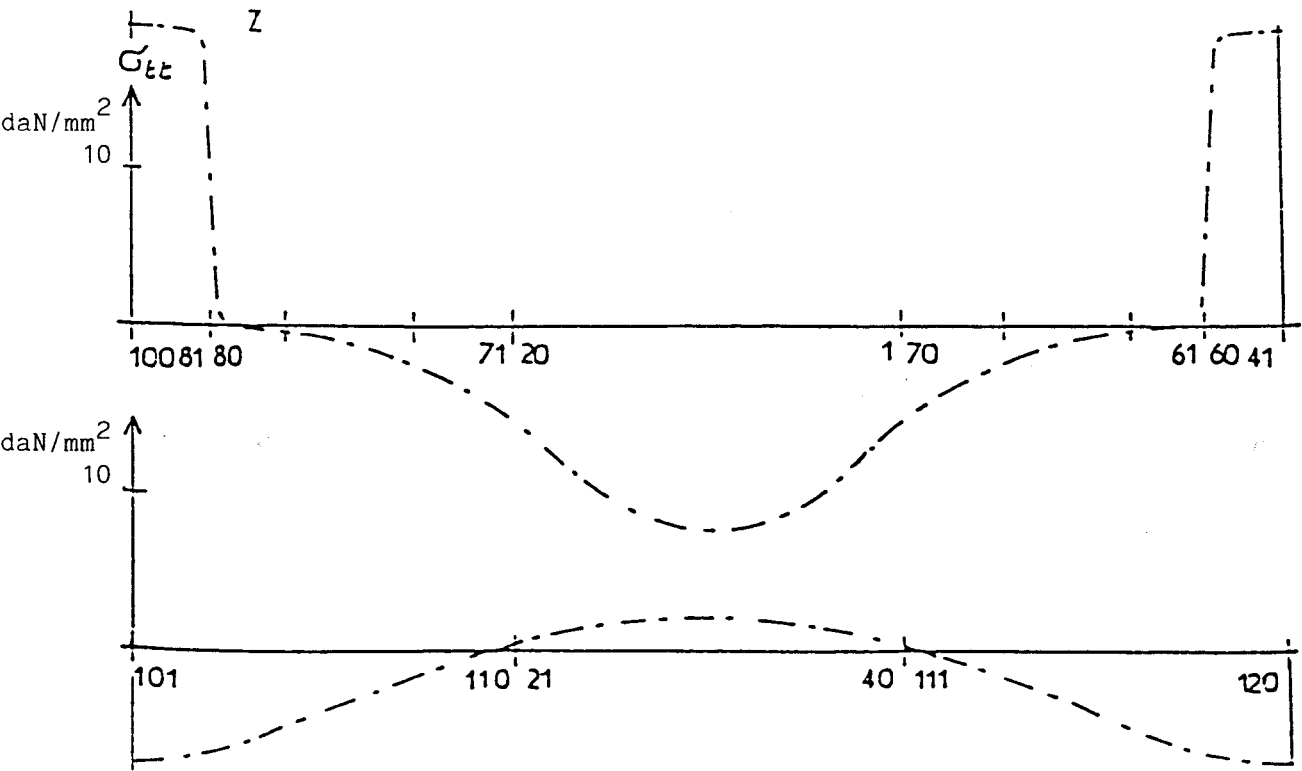
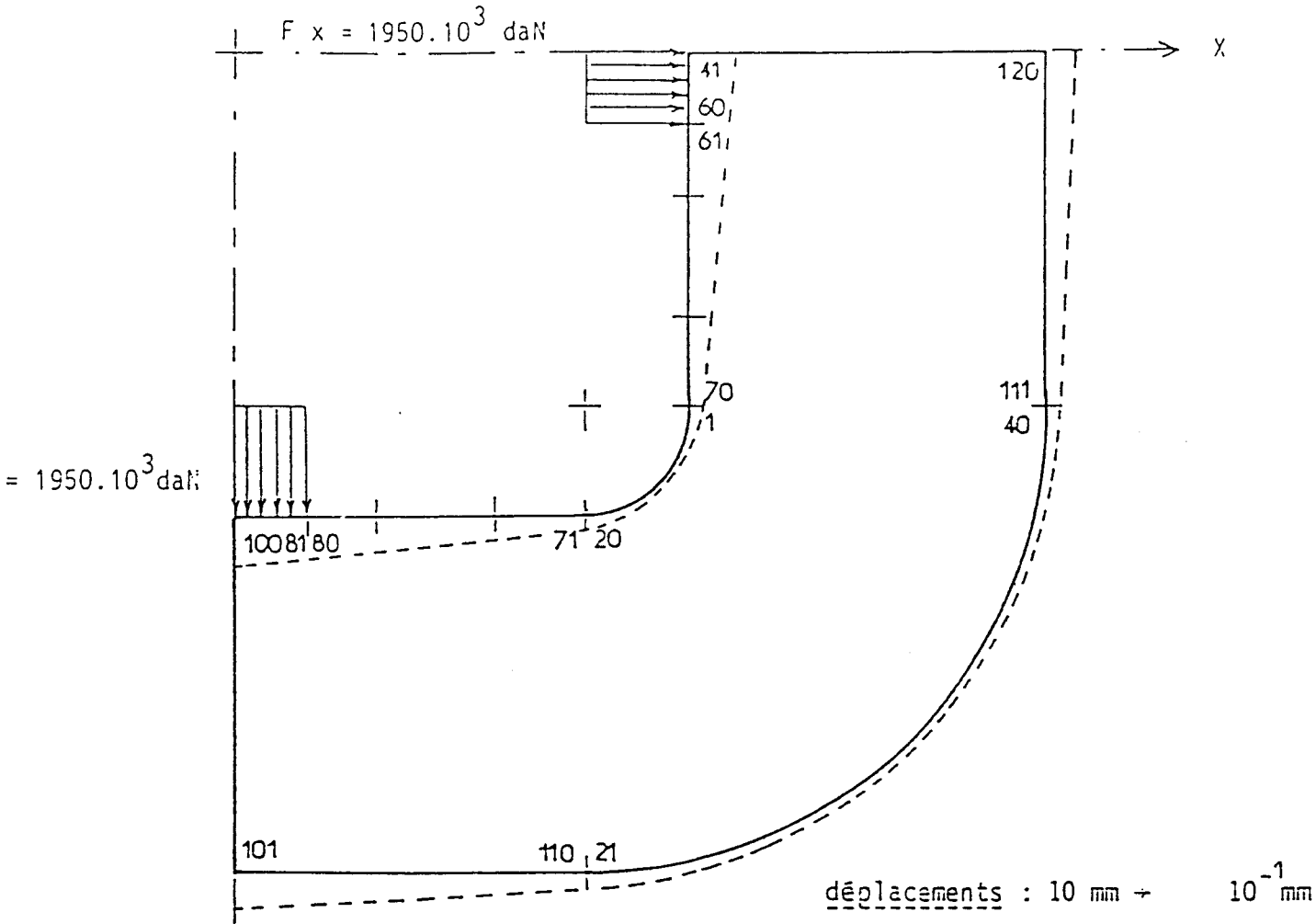
$$R = 0,65 \quad L1 = 0 \quad L2 = 0,37$$

3



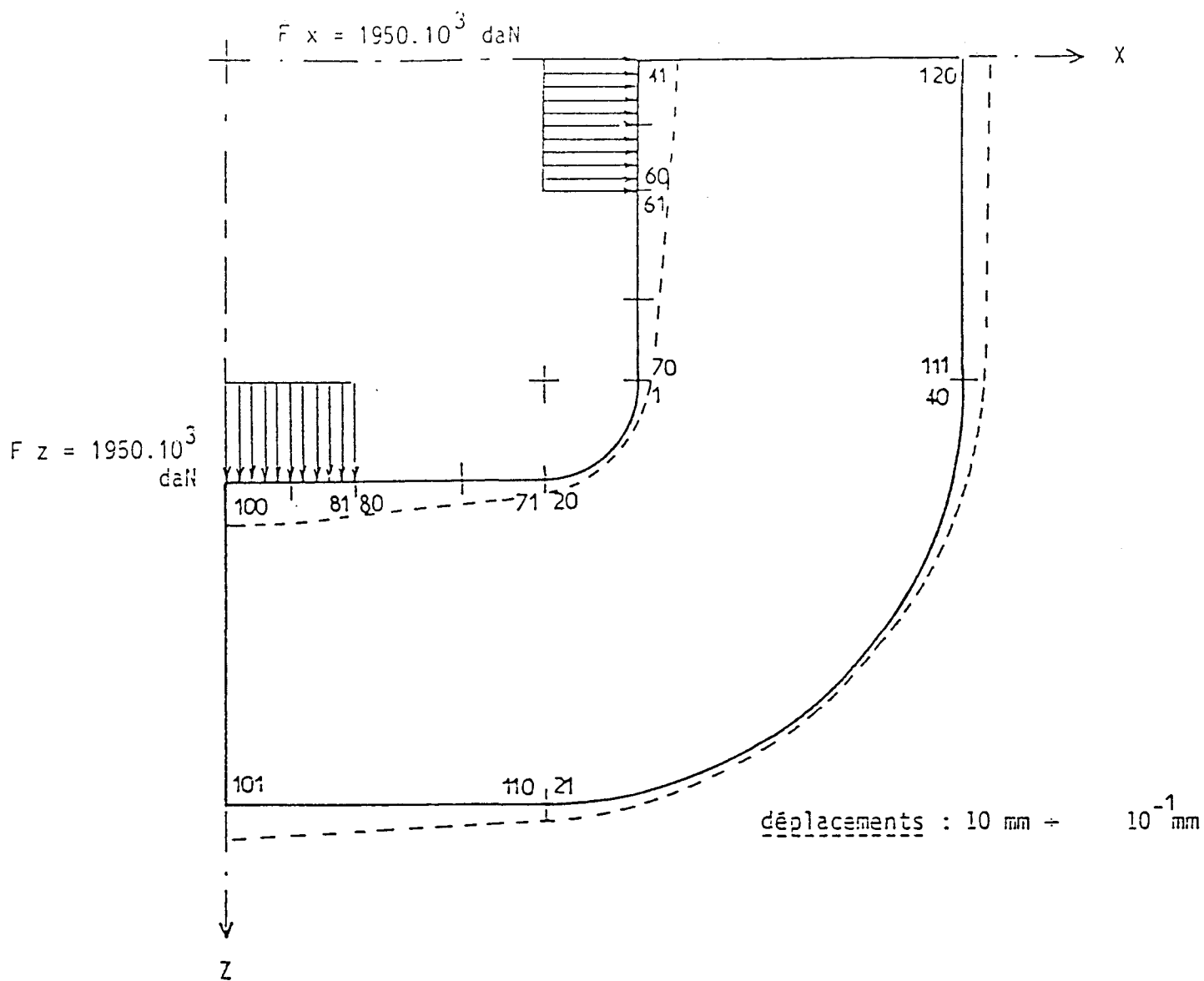
$R = 0,65 \quad L1 = 0,1 \quad L2 = 0,1$

4

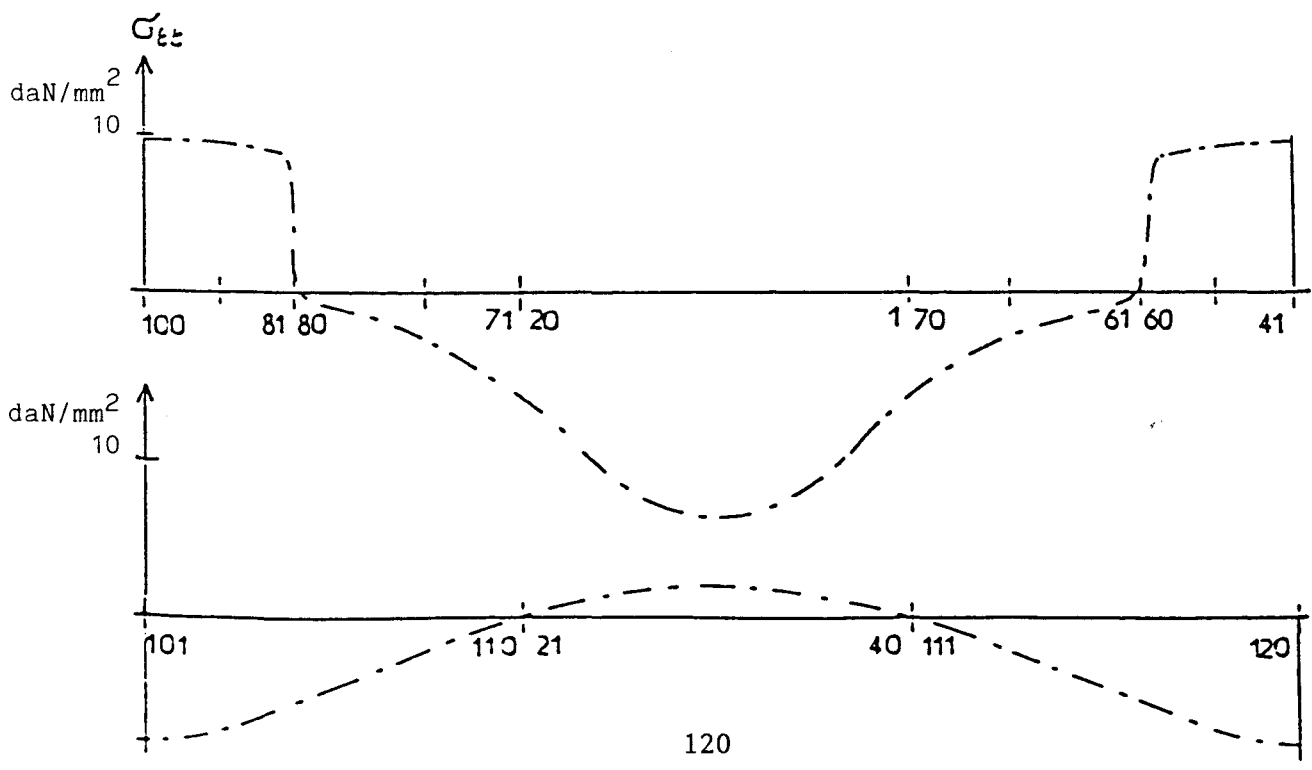


$R = 0,65 \quad L1 = 0,2 \quad L2 = 0,2$

5

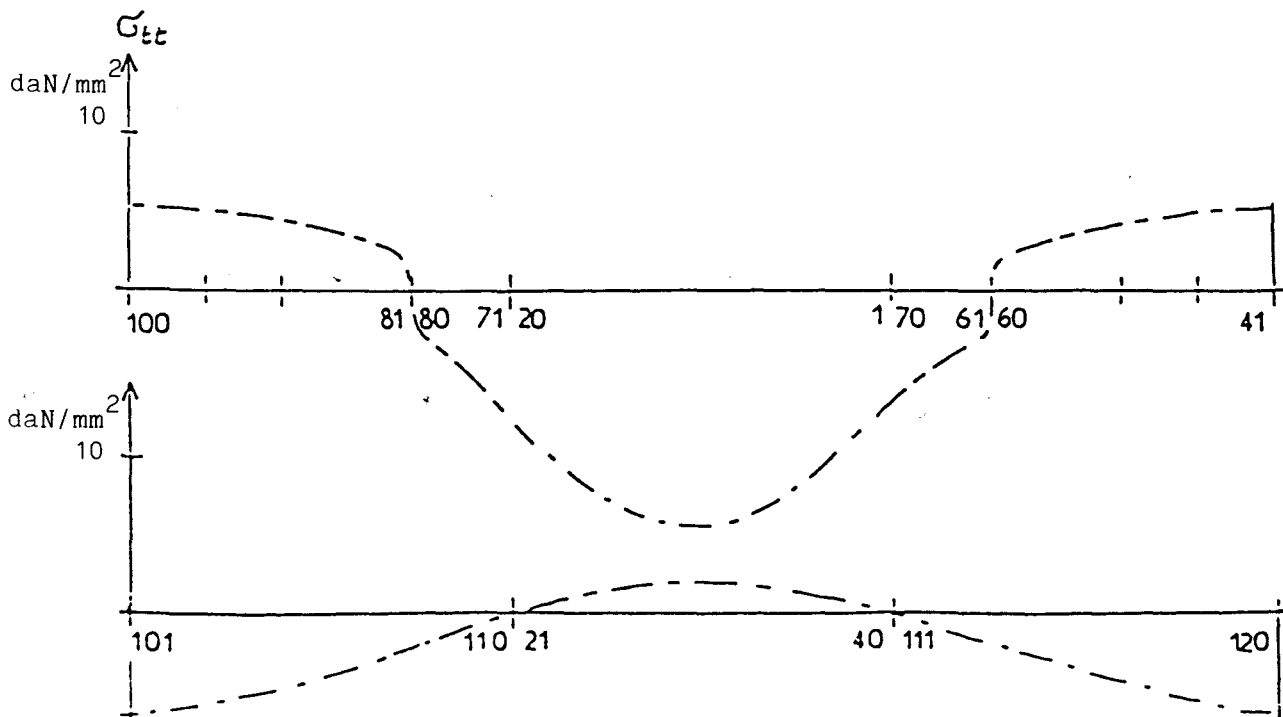
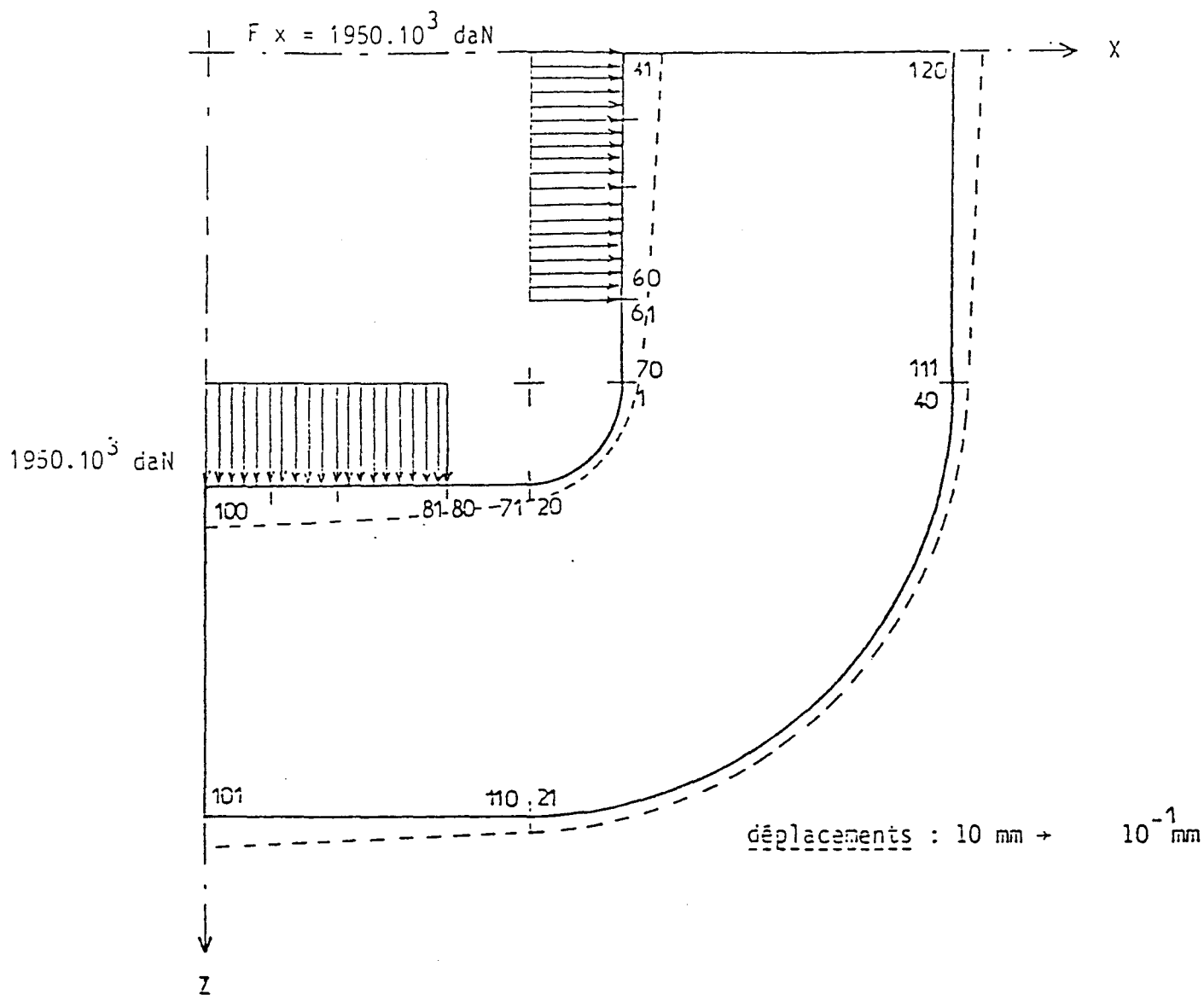


déplacements : 10 mm + 10^{-1} mm



$R = 0,65 \quad L1 = 0,37 \quad L2 = 0,37$

6



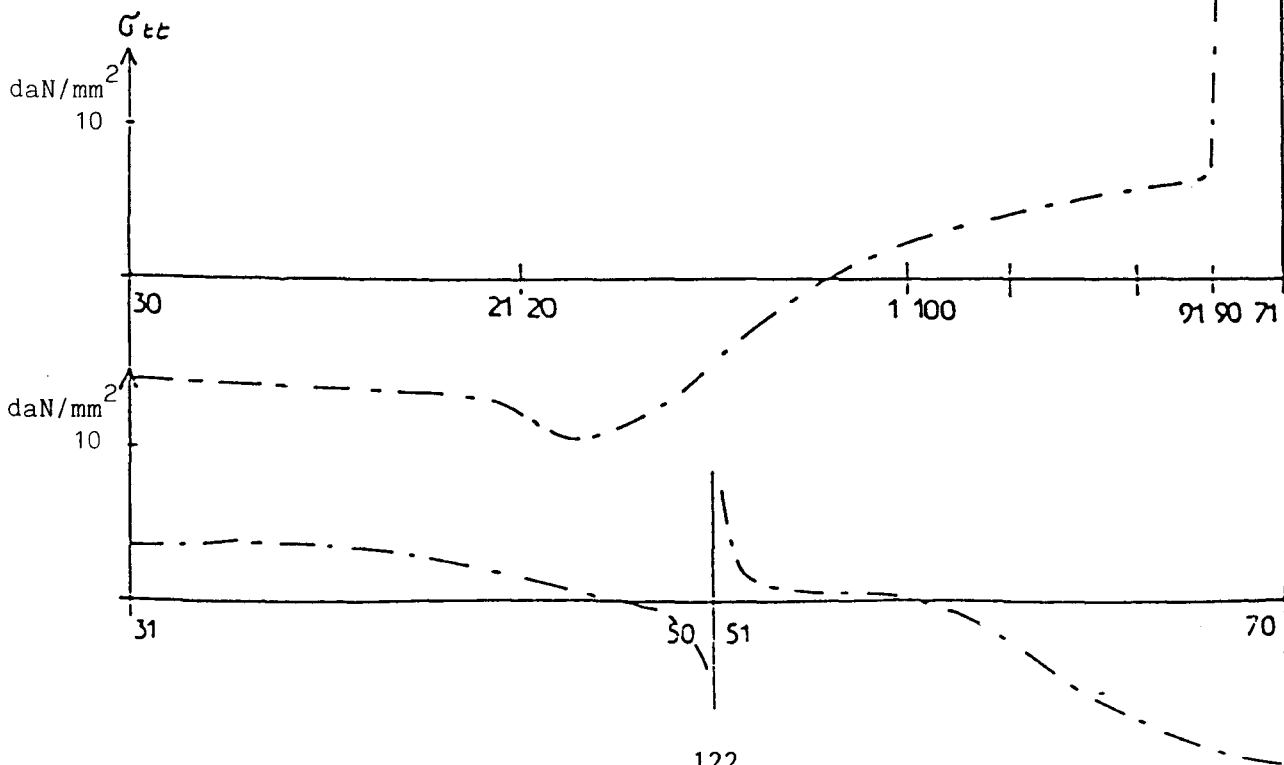
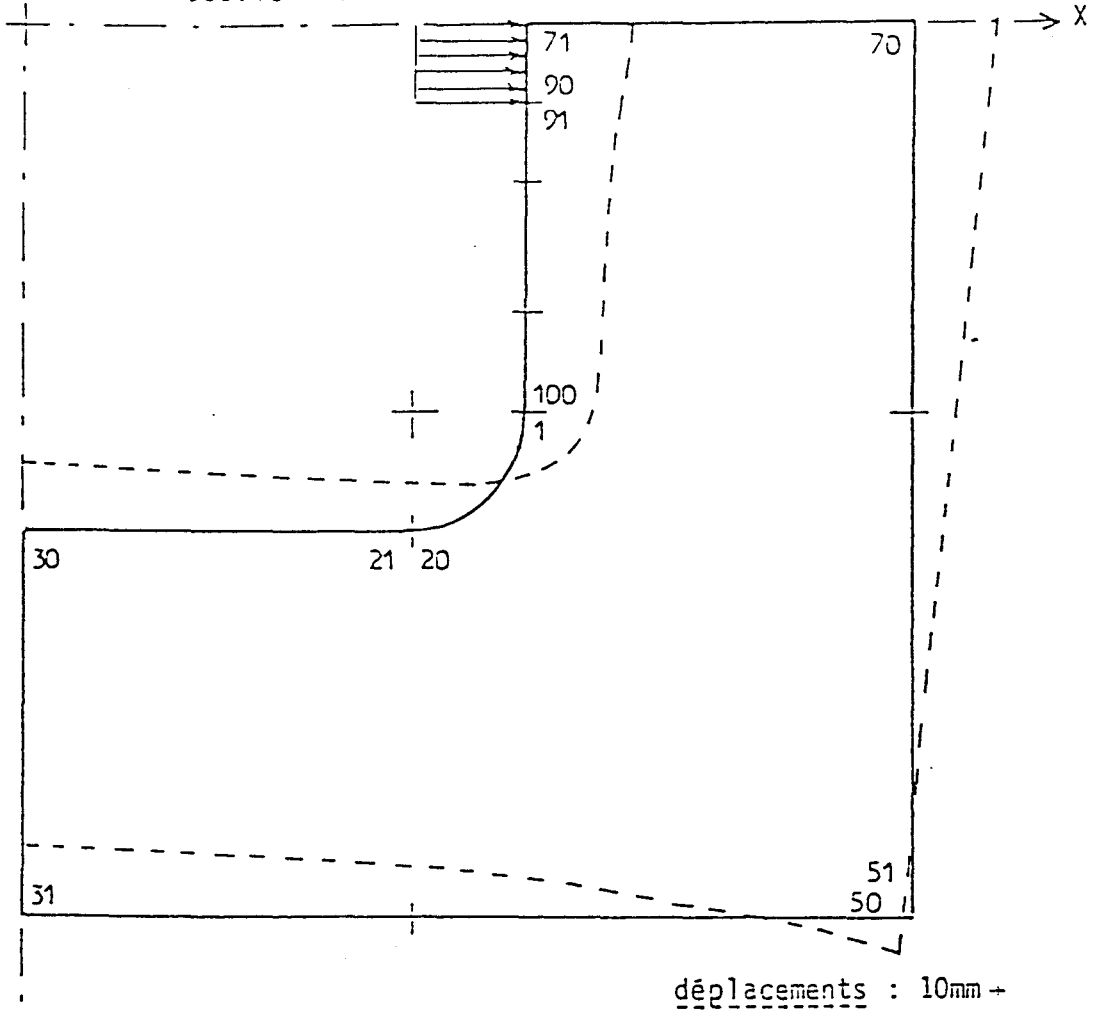
$$R = 0$$

$$L1 = 0$$

$$L2 = 0,1$$

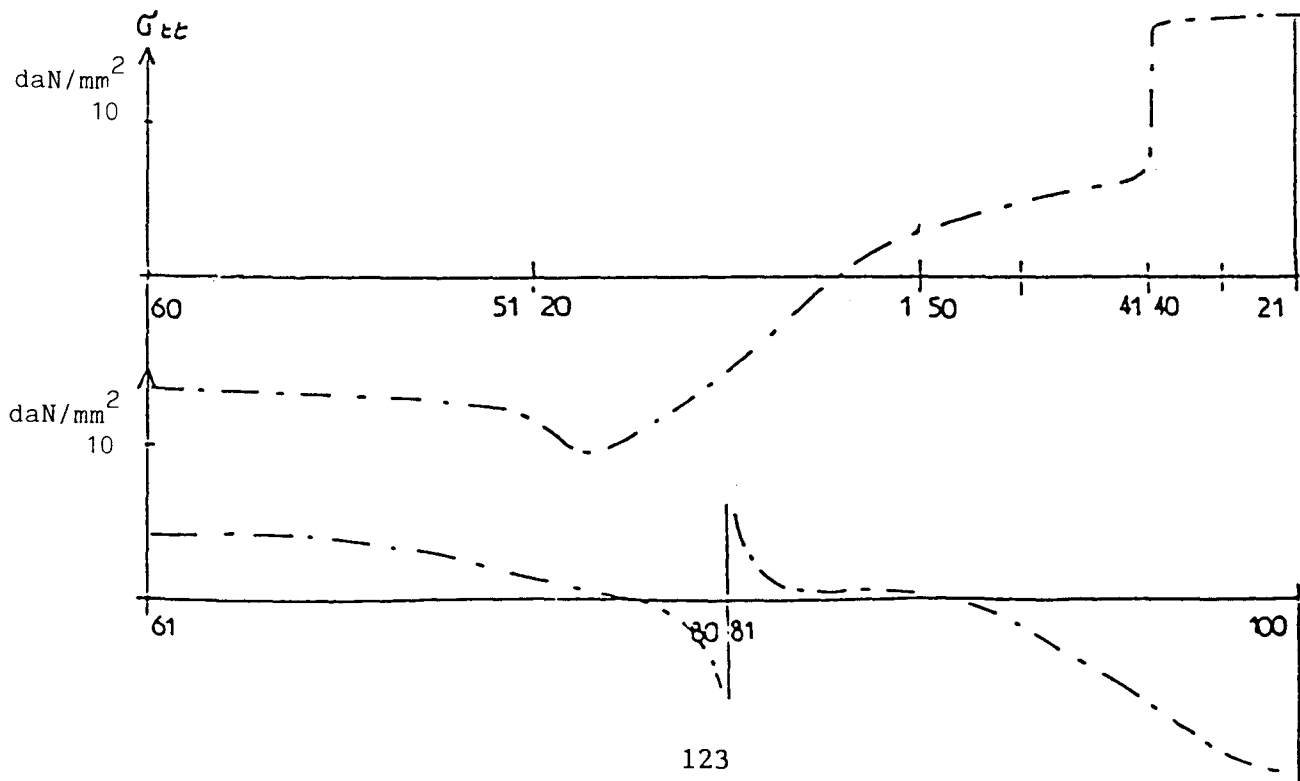
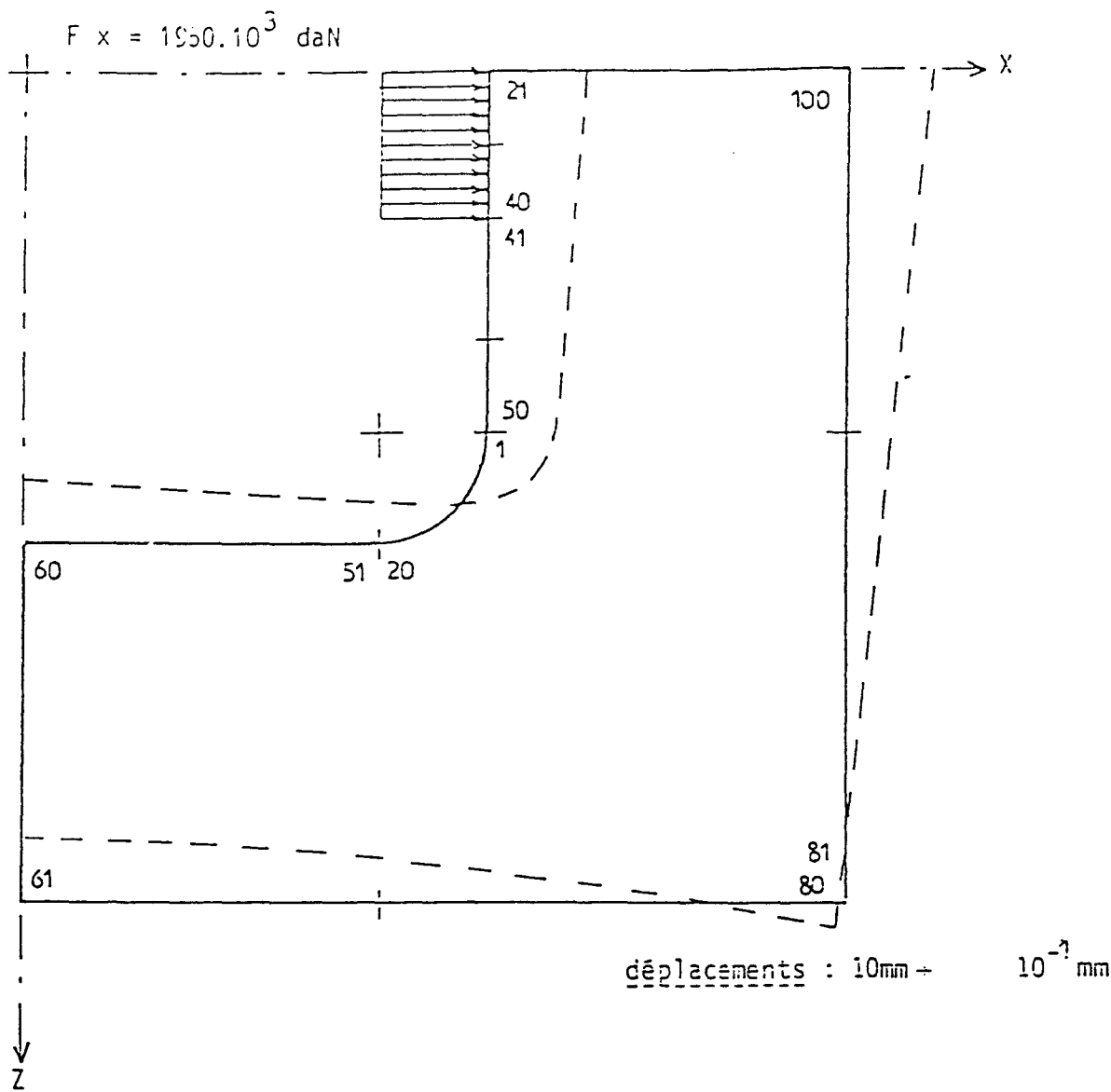
7

$$F_x = 1950 \cdot 10^3 \text{ daN}$$



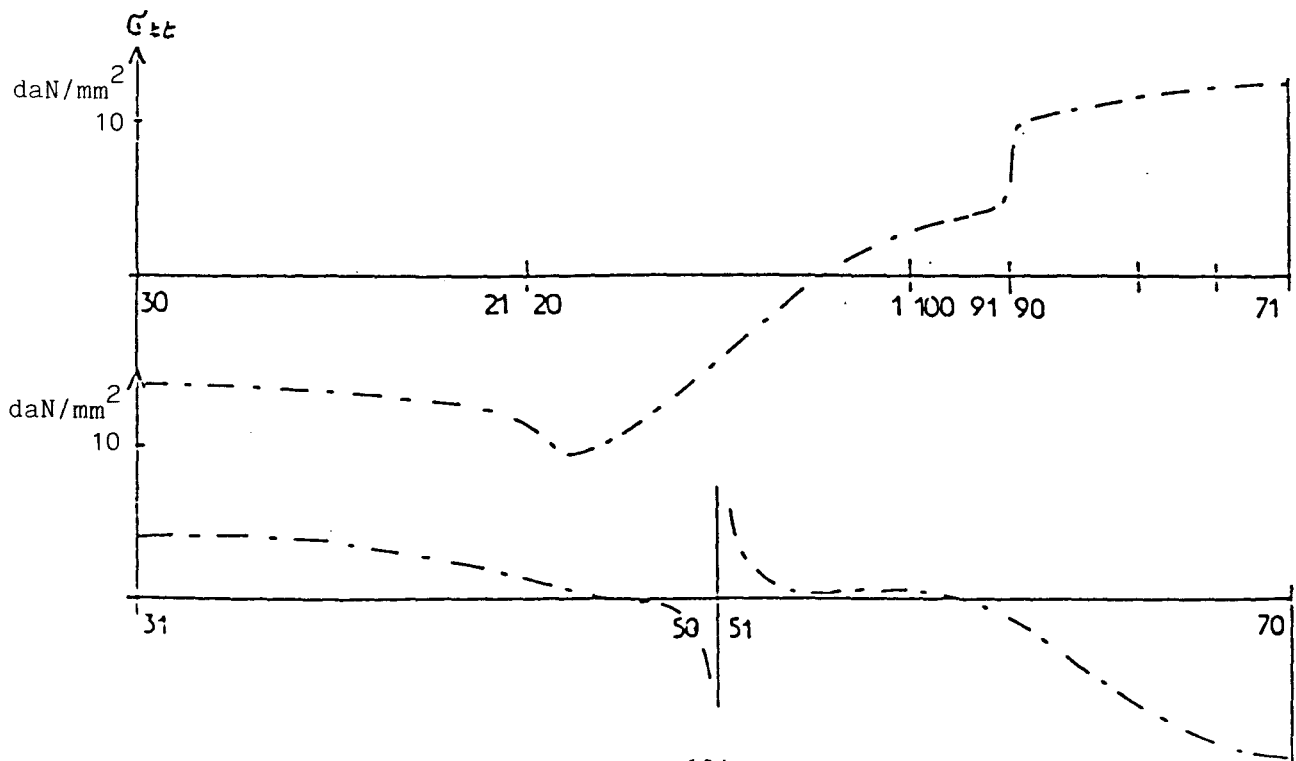
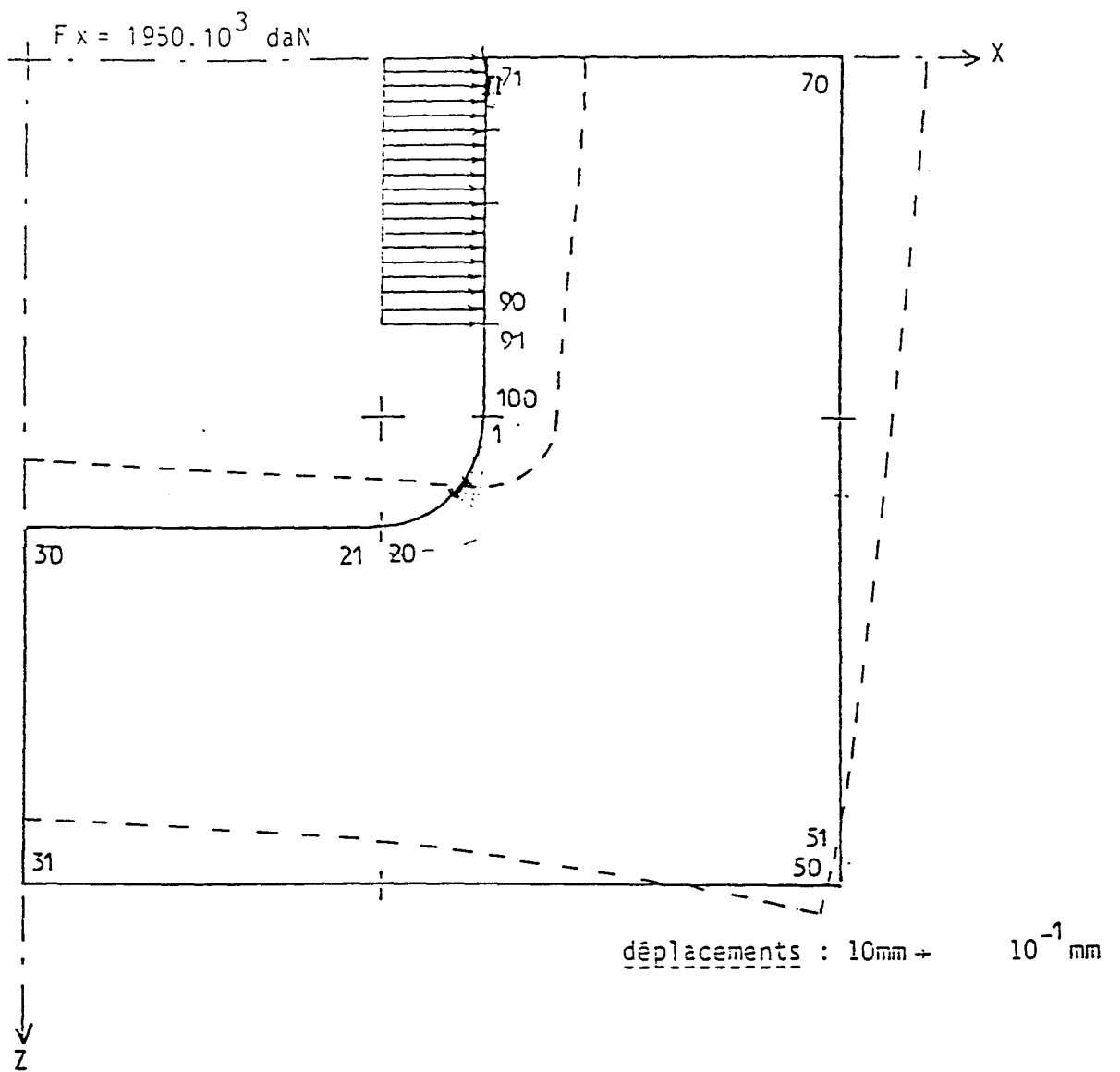
$R = 0$
 $L1 = 0$
 $L2 = 0,2$

8



$R = 0$ $L1 = 0$ $L2 = 0,37$

9

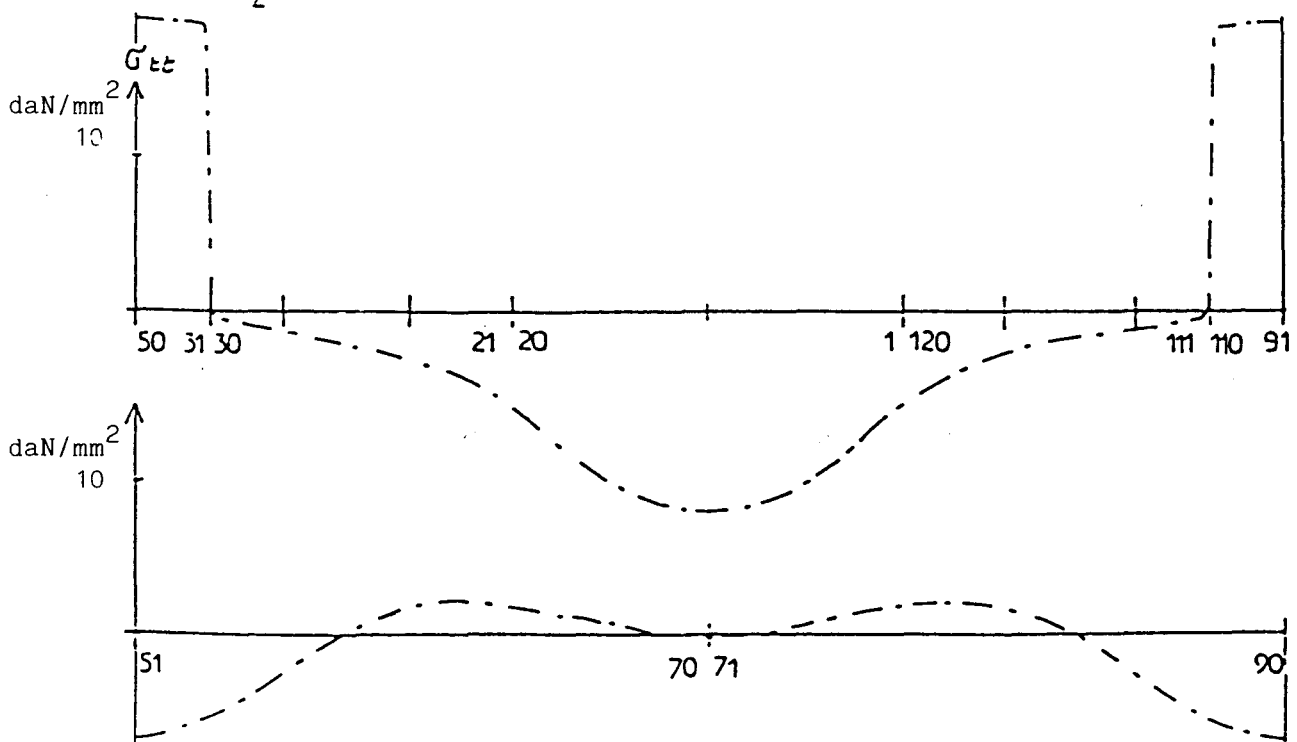
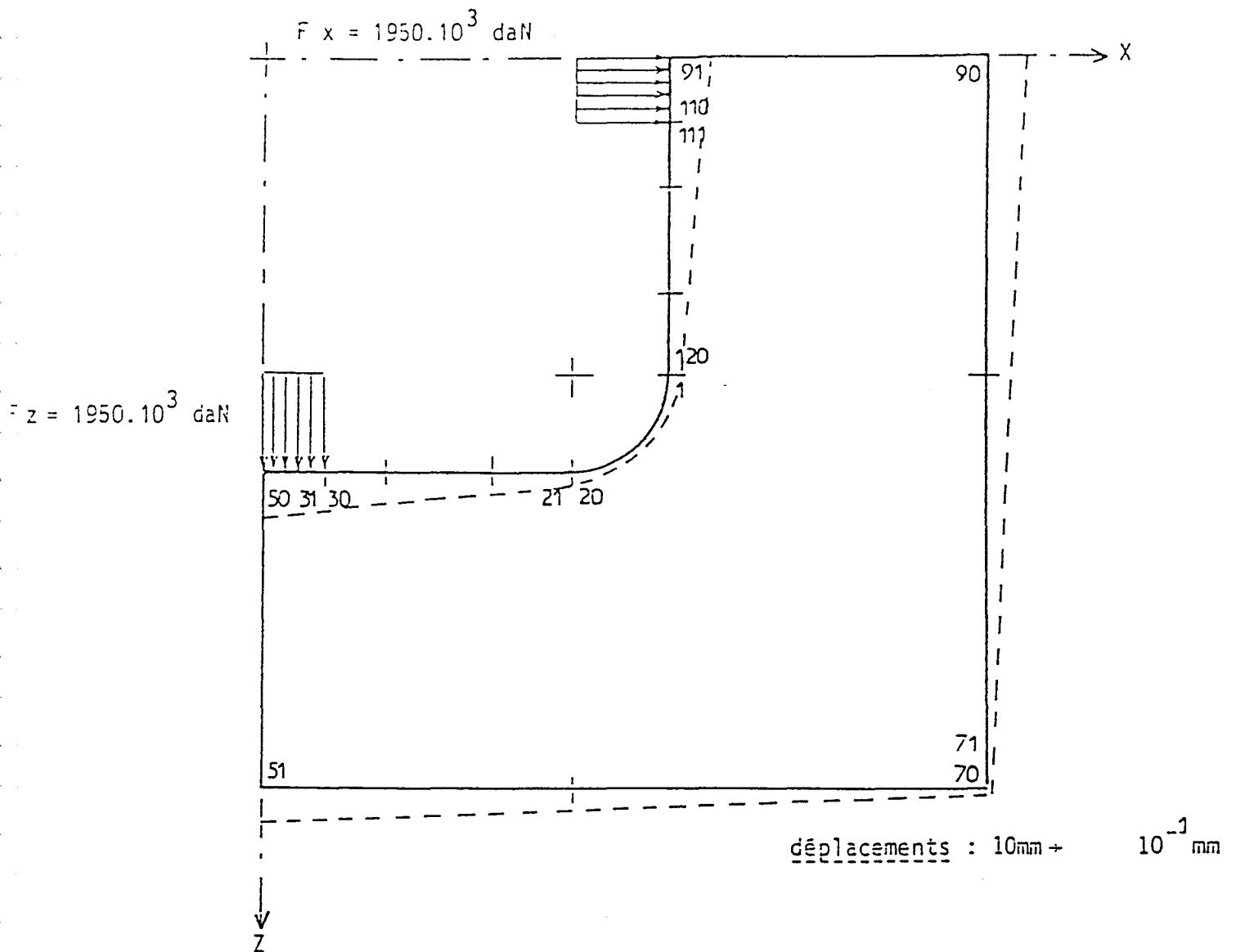


$$R = 0$$

$$L1 = 0,1$$

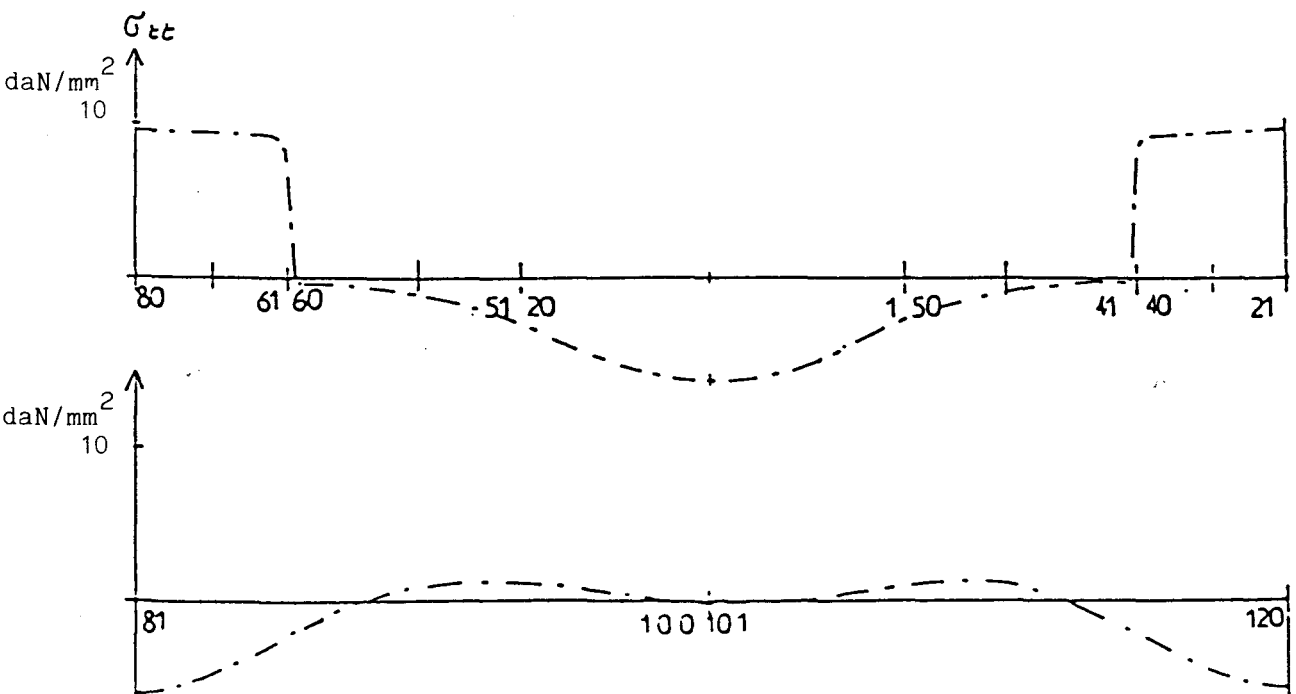
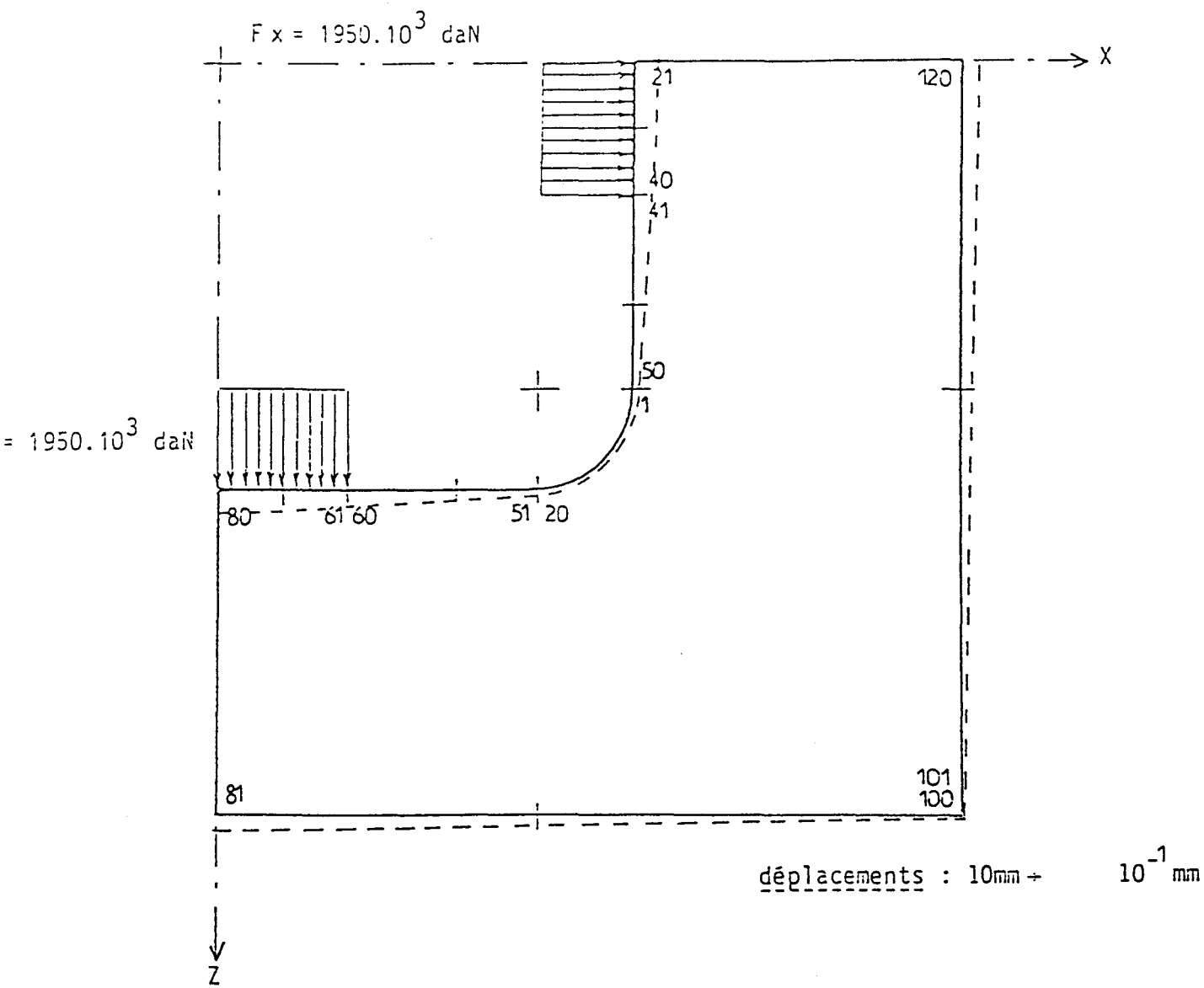
$$L2 = 0,1$$

10



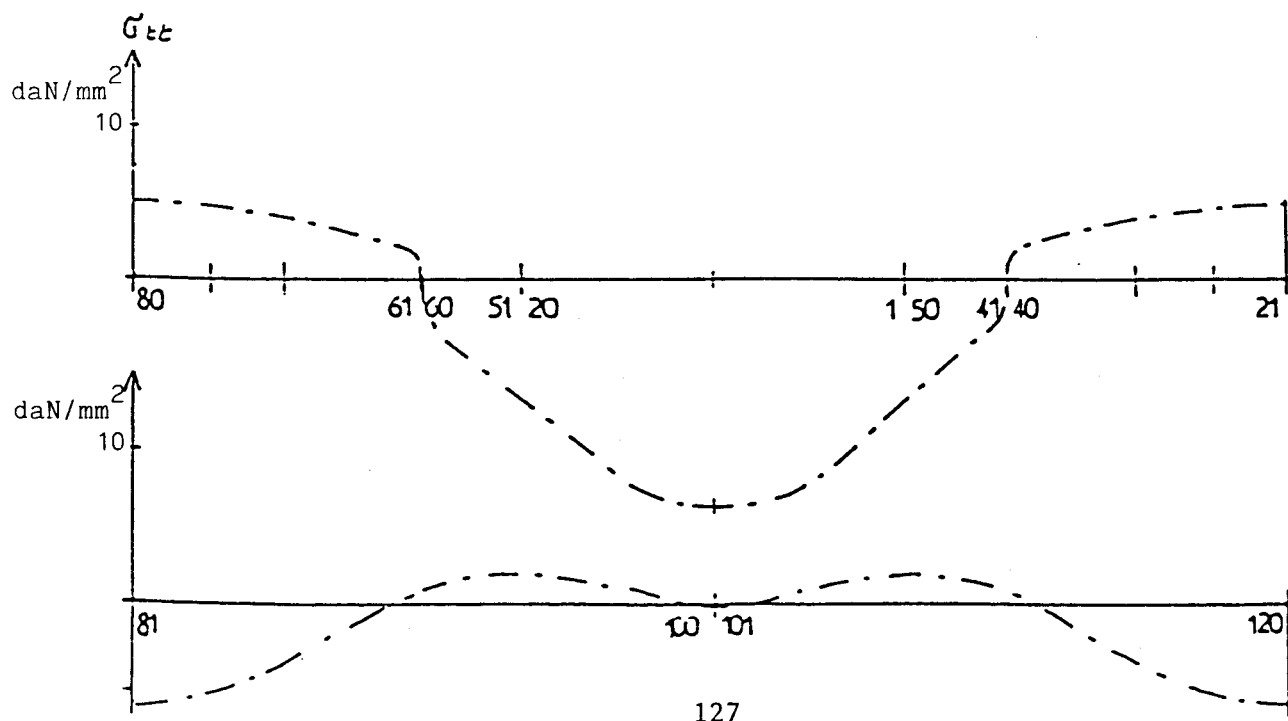
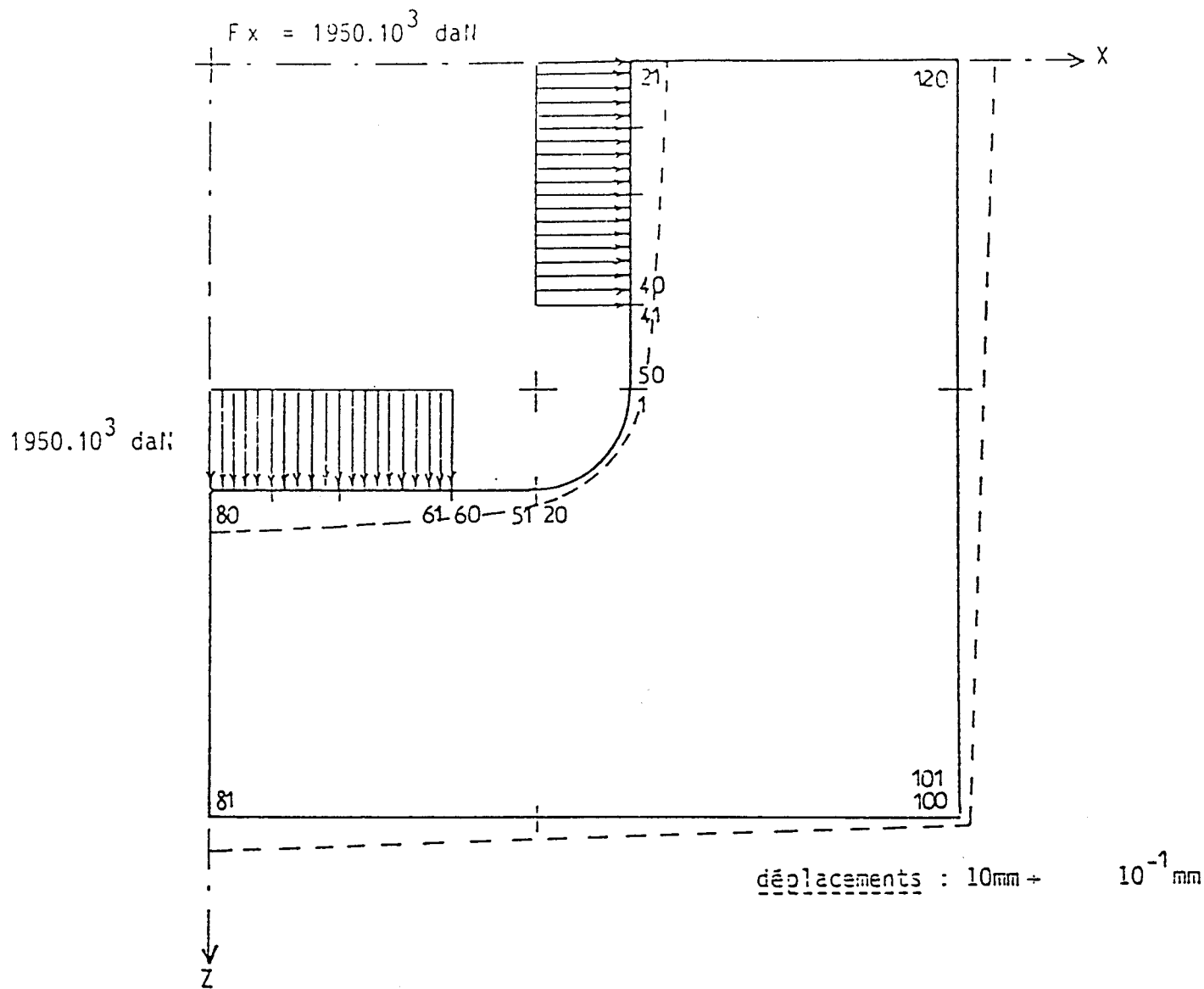
$R = 0 \quad L1 = 0,2 \quad L2 = 0,1$

11



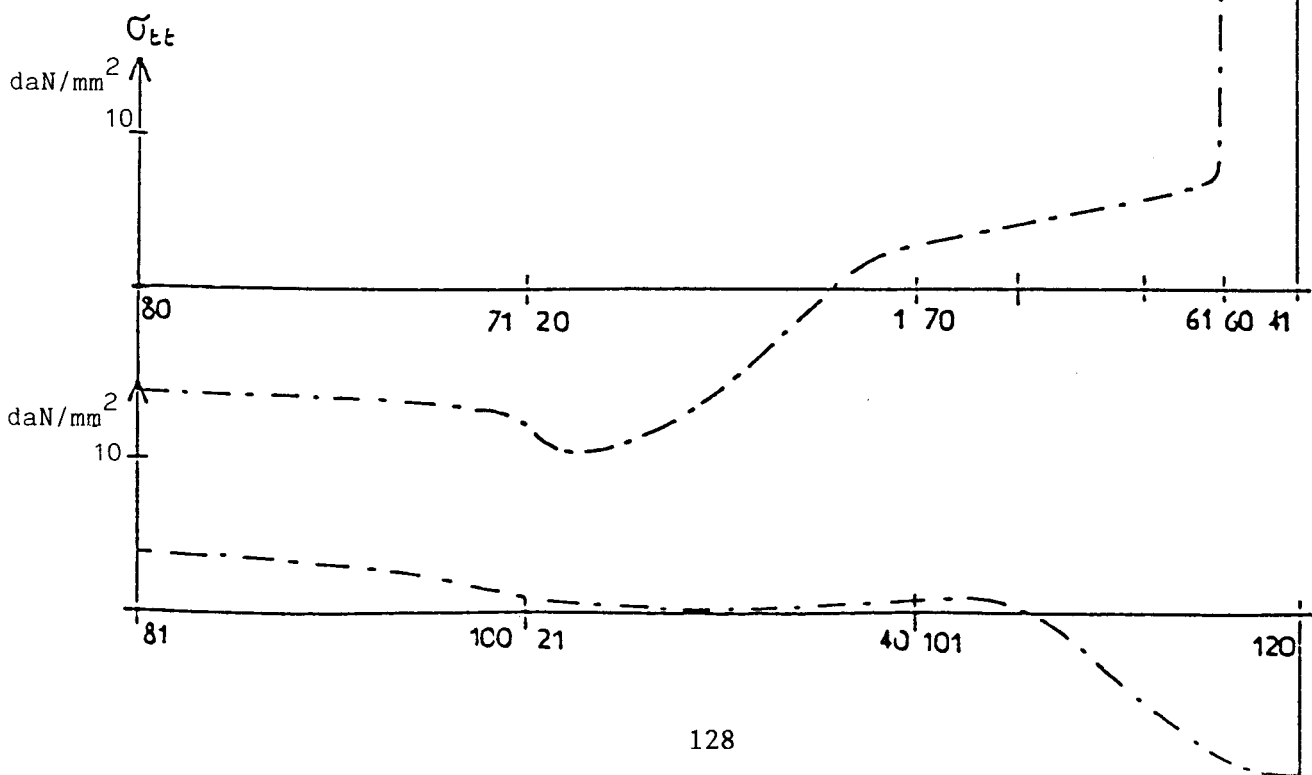
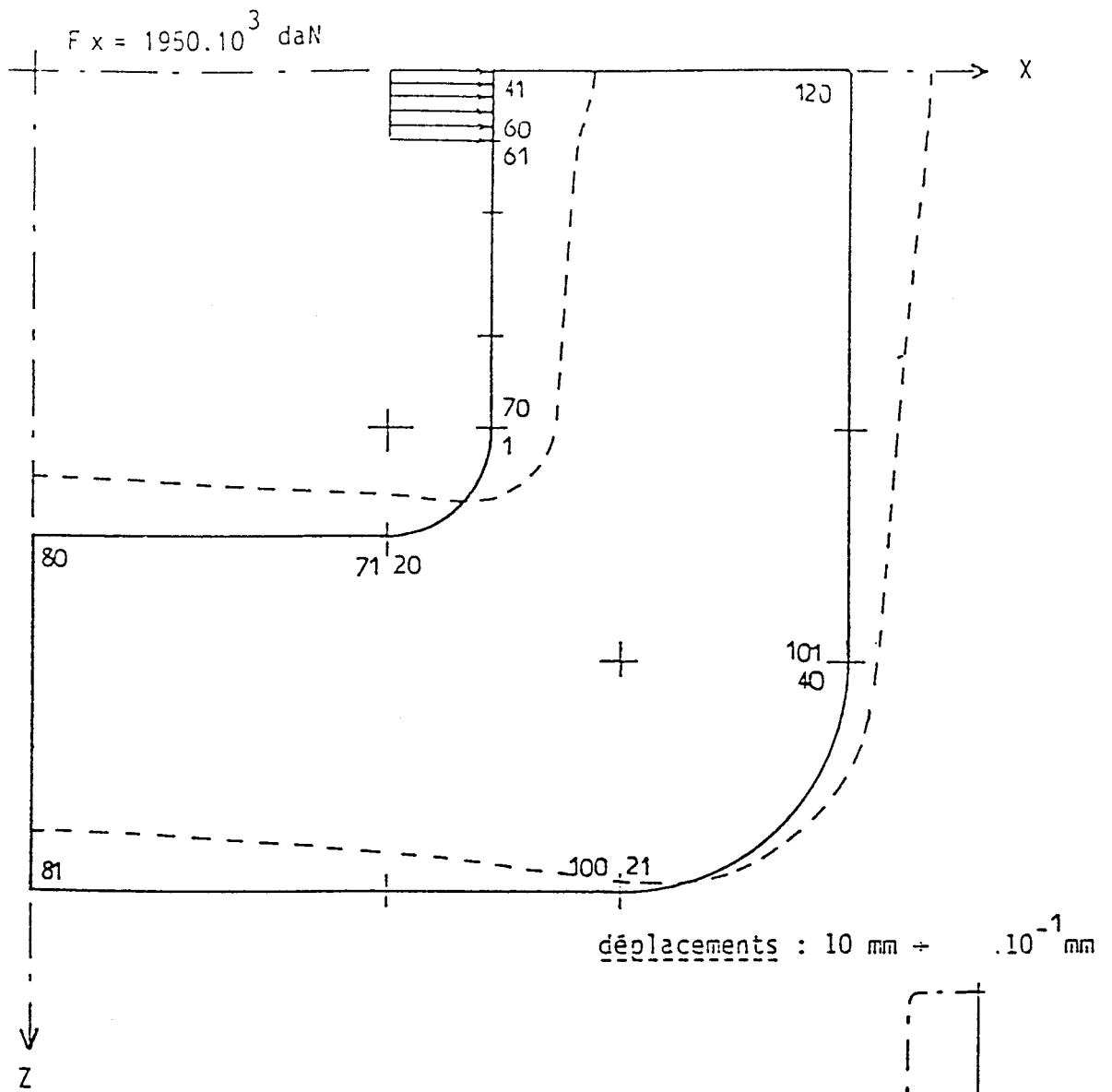
$R = 0$ $L1 = 0,37$ $L2 = 0,37$

12



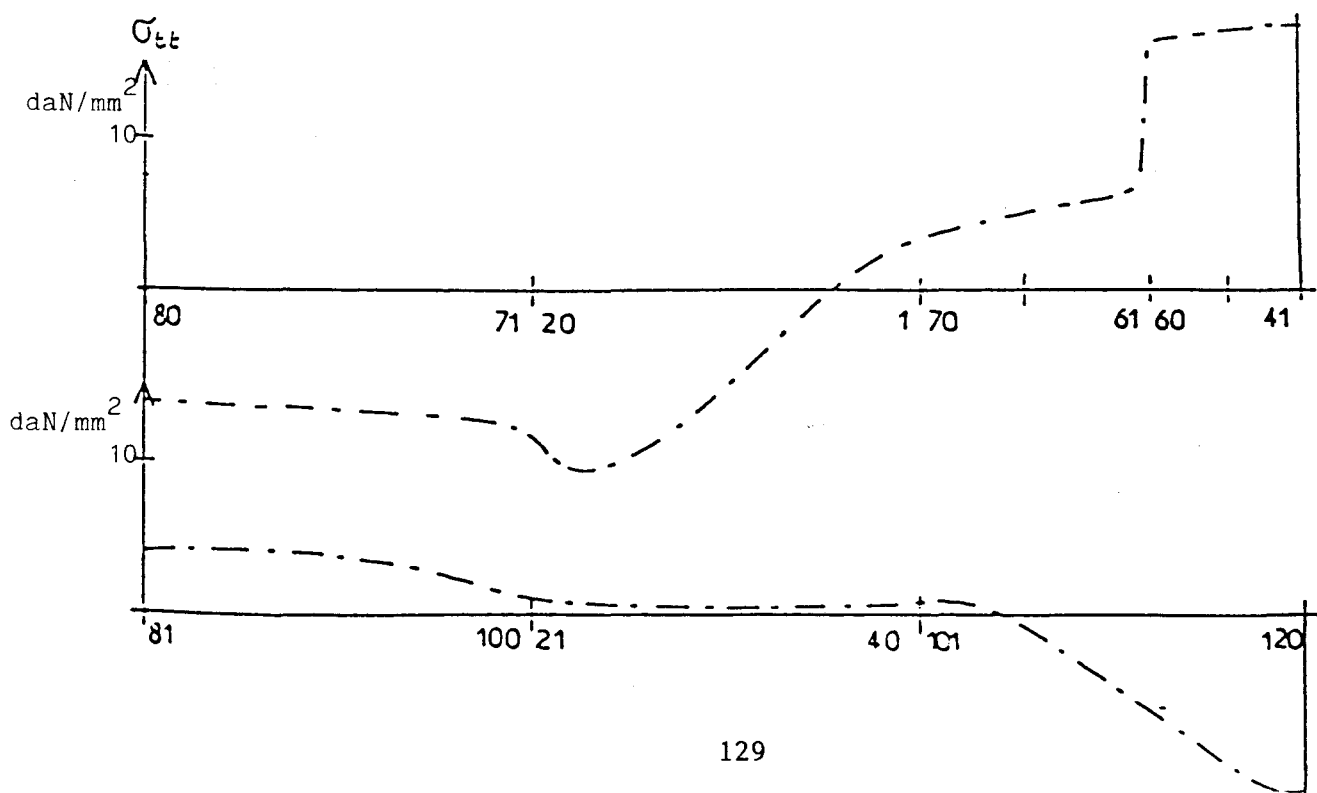
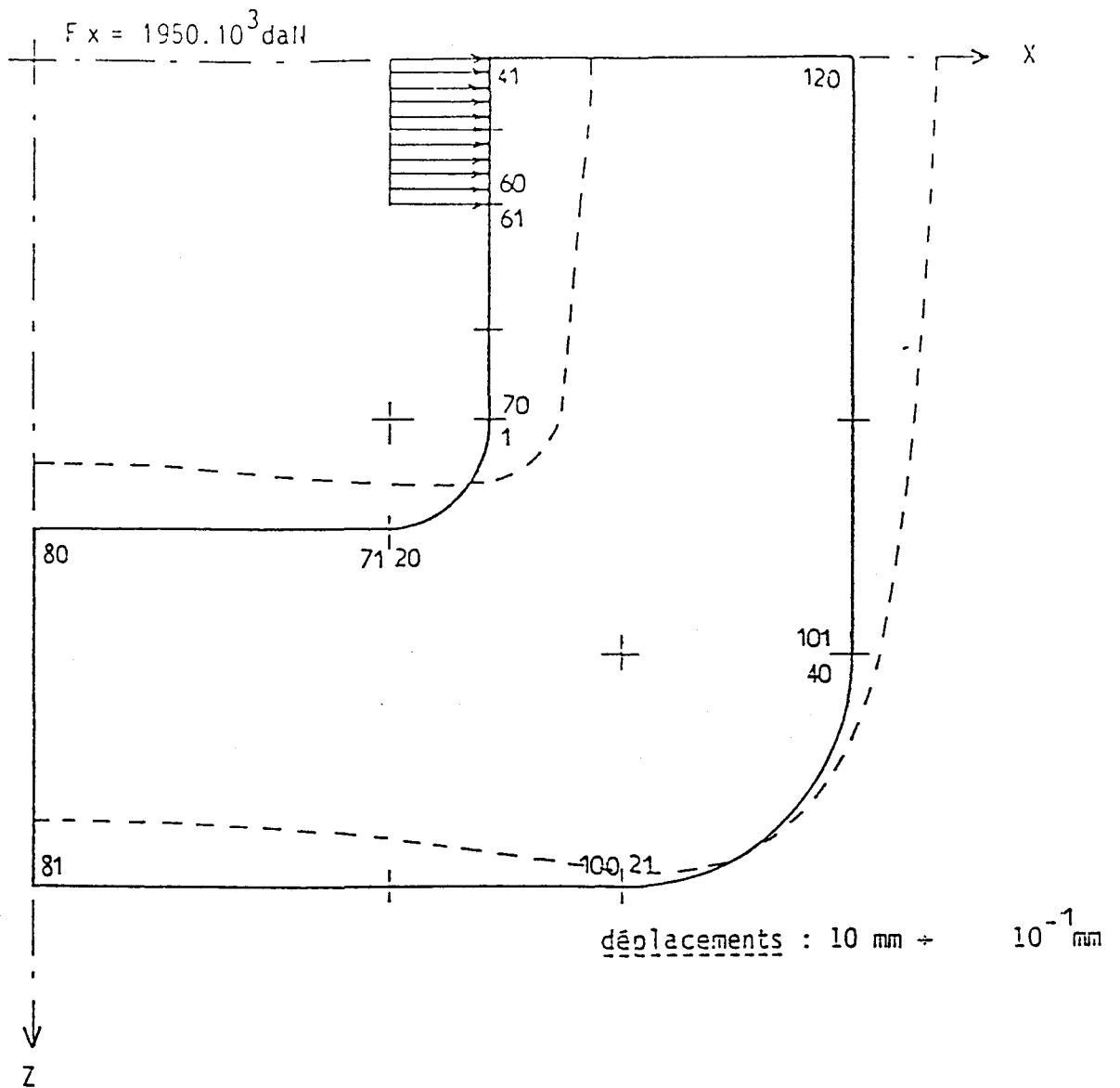
$R = 0,325$ $L1 = 0$ $L2 = 0,1$

13



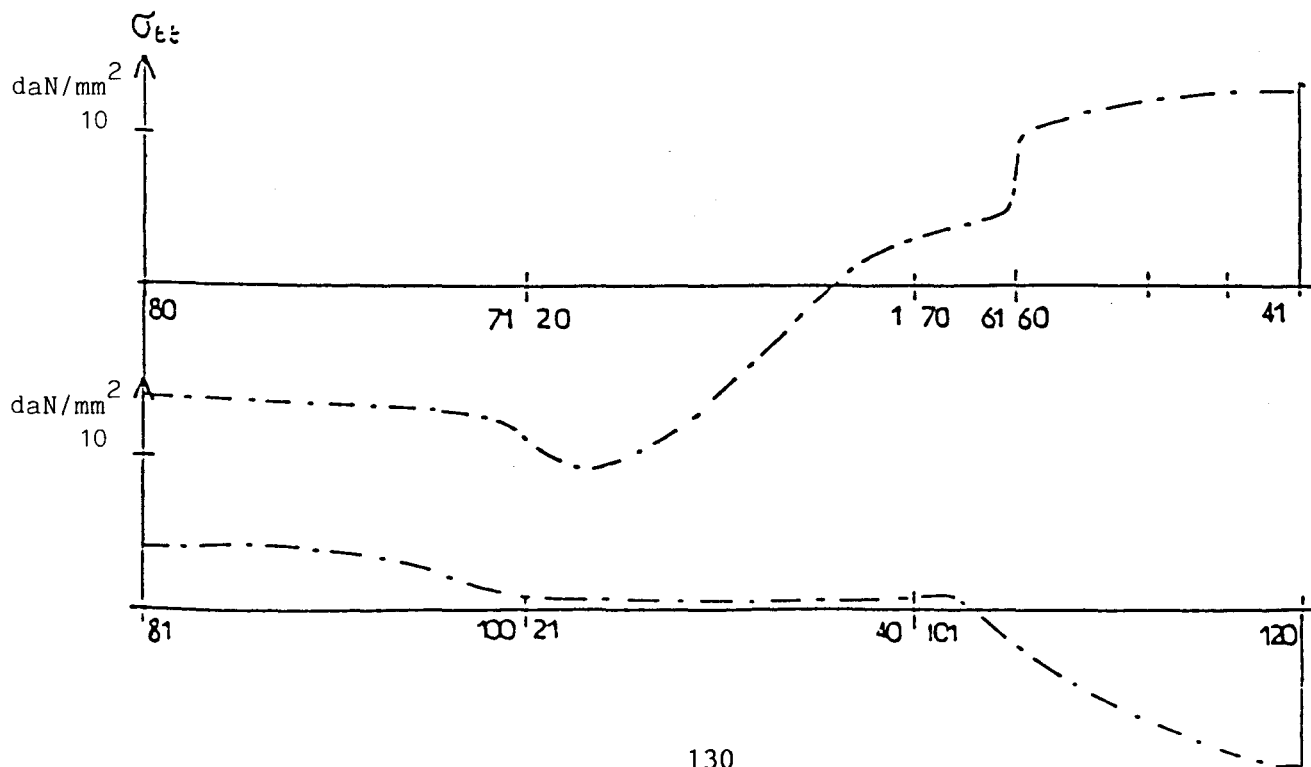
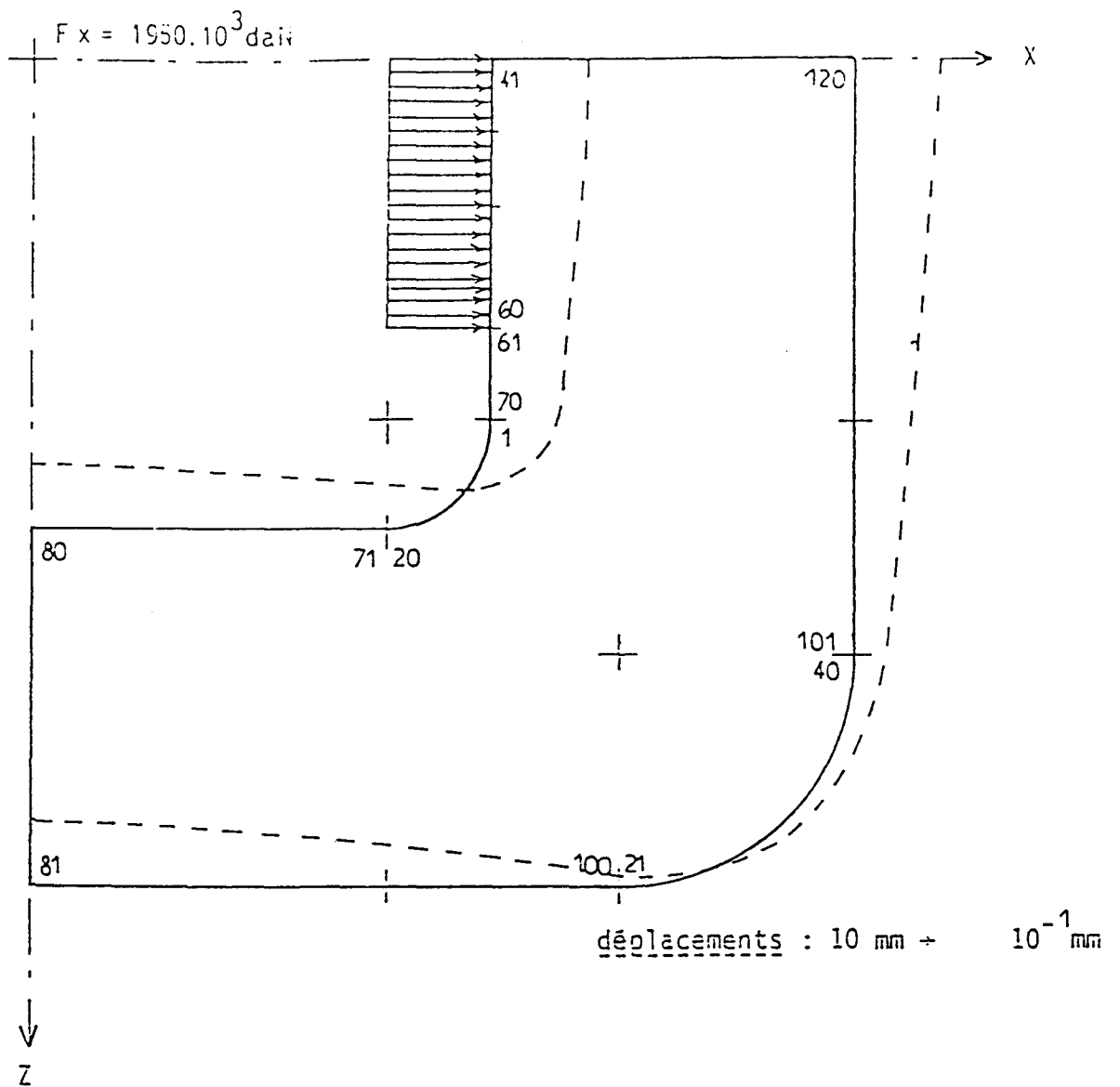
$R = 0,325$ $L1 = 0$ $L2 = 0,1$

14



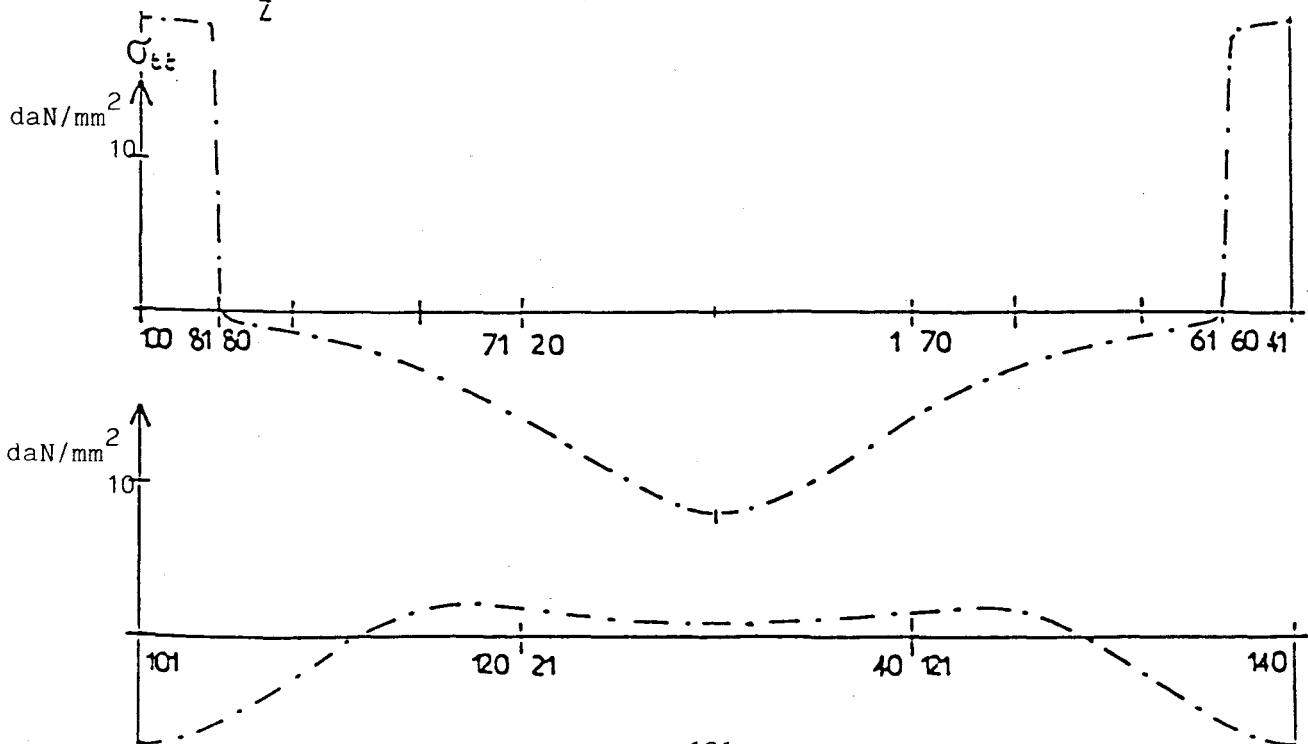
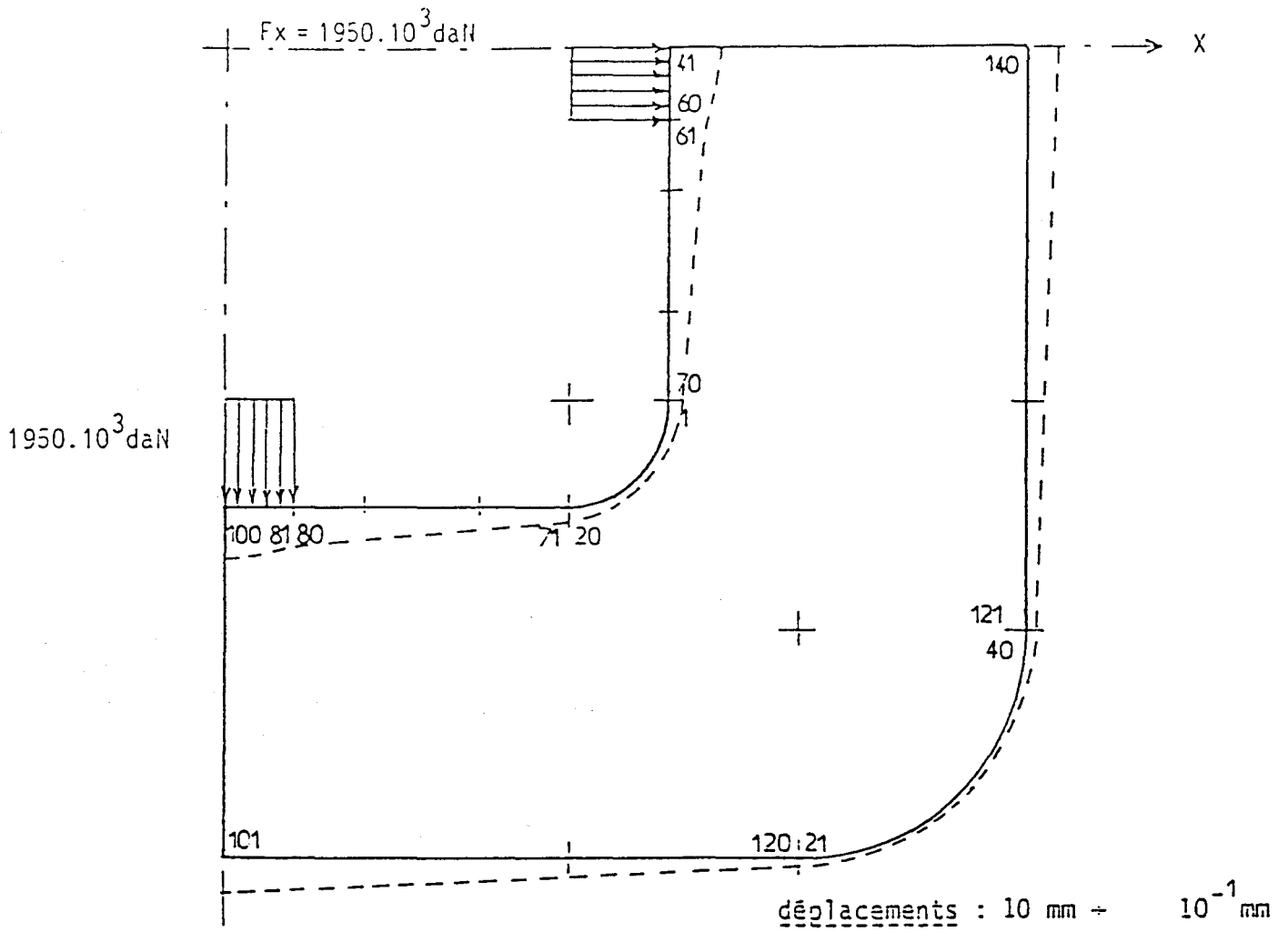
$R = 0,325$ $L1 = 0$ $L2 = 0,37$

15



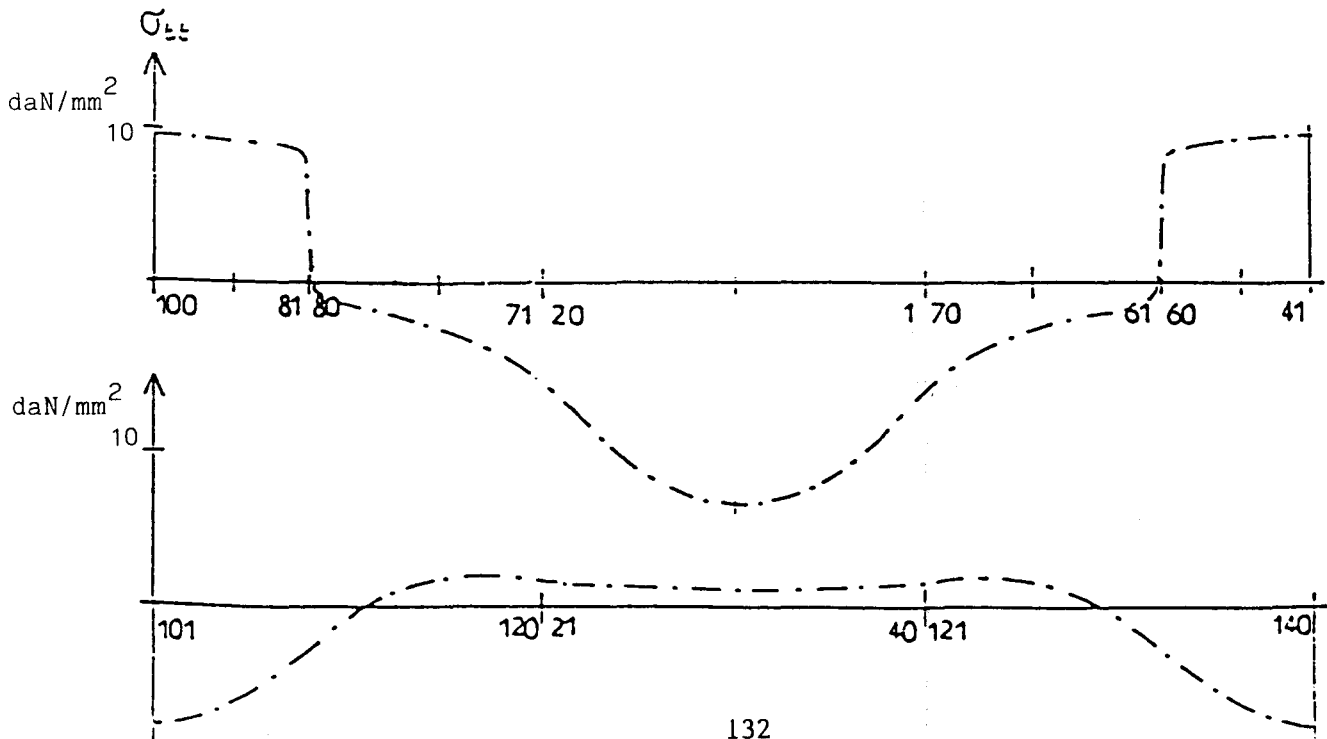
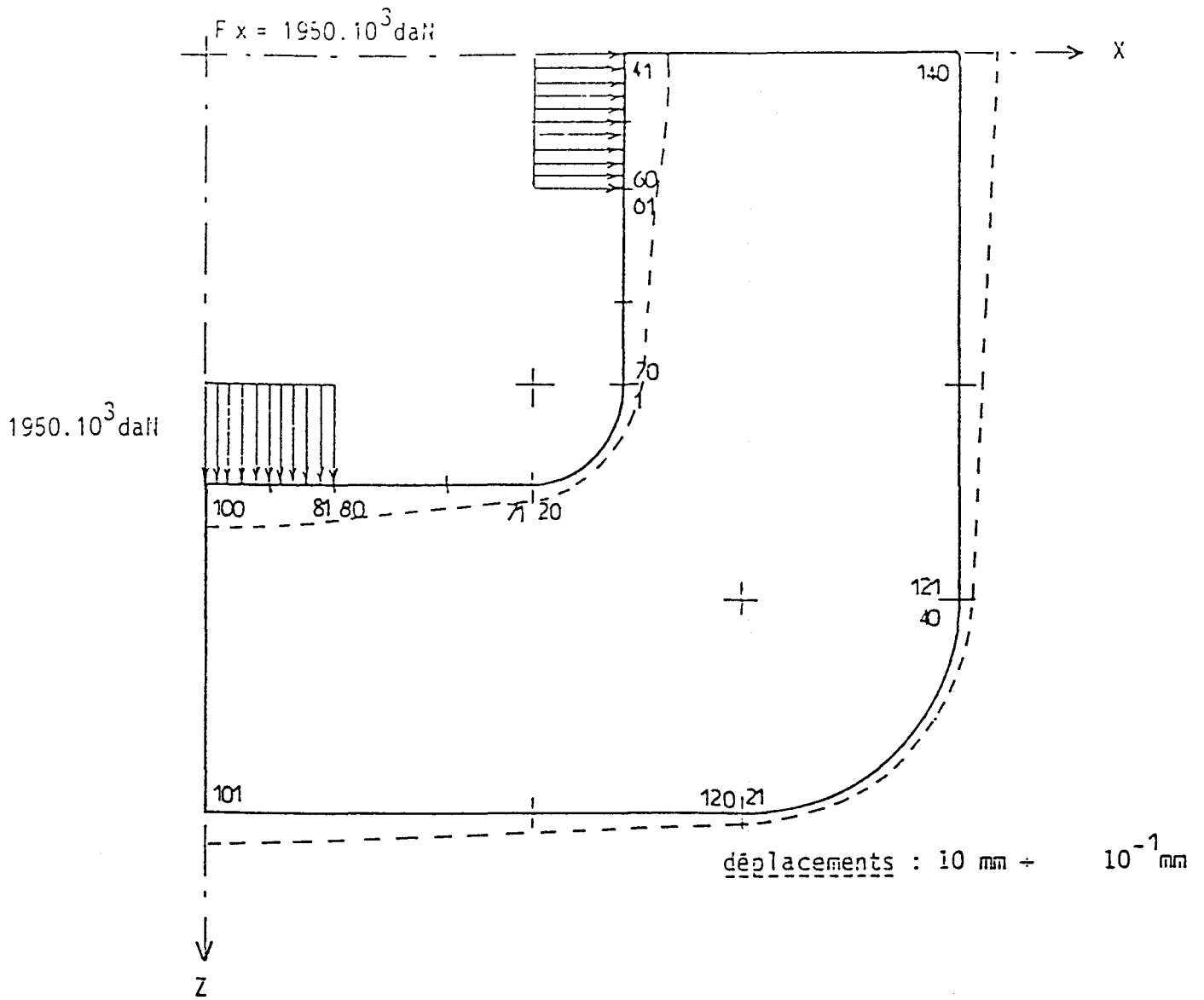
$$R = 0,325 \quad L1 = 0,1 \quad L2 = 0,1$$

16



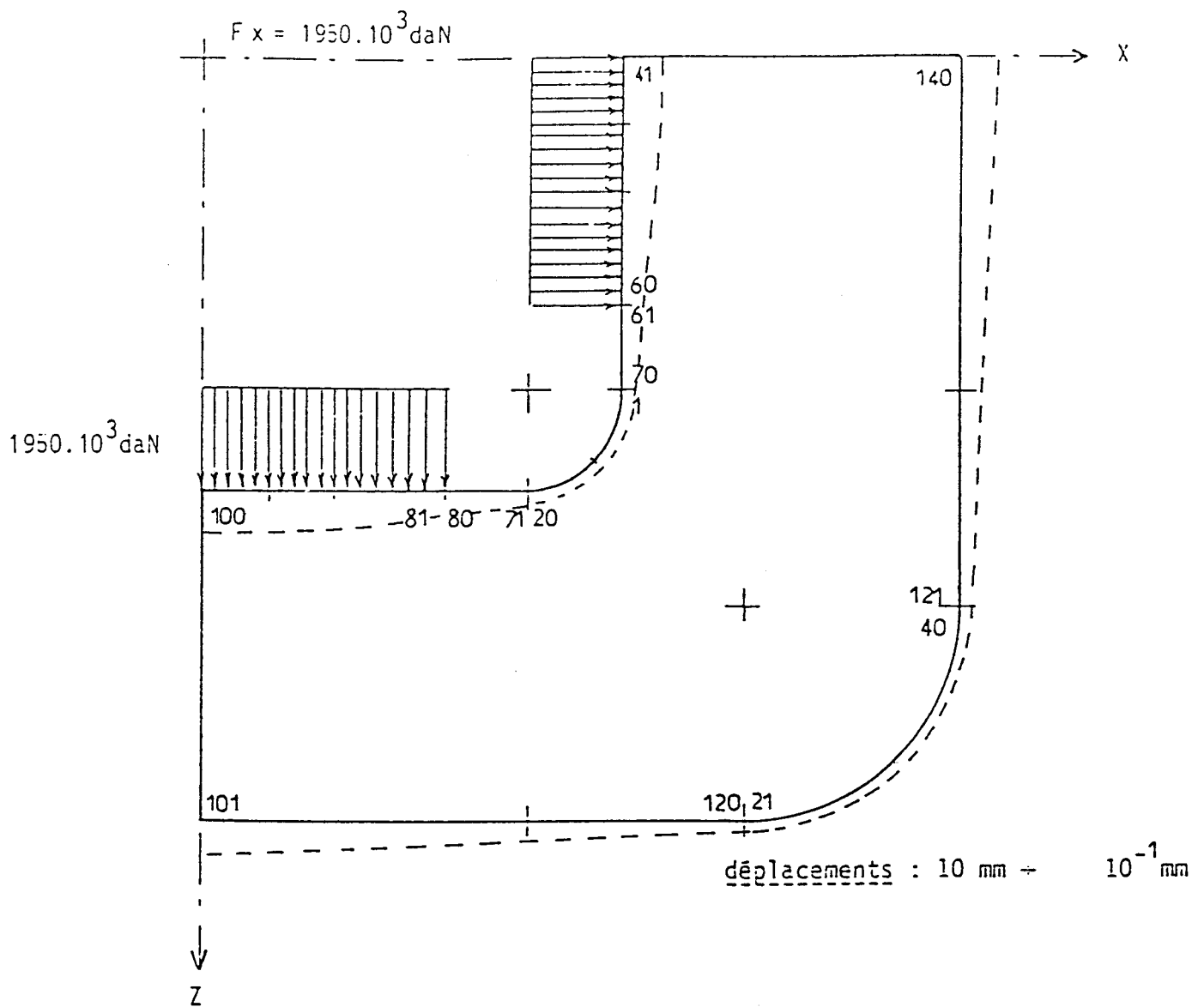
$$R = 0,325 \quad L1 = 0,2 \quad L2 = 0,2$$

17

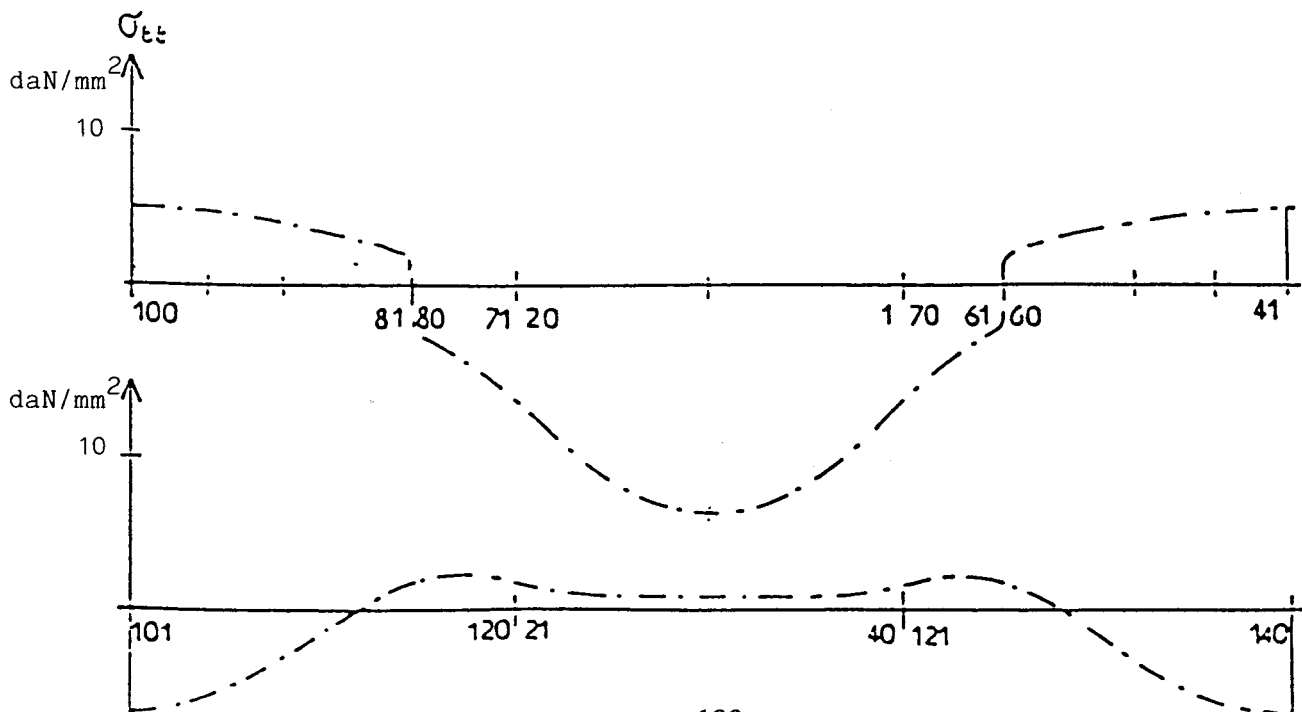


$$R = 0,325 \quad L1 = 0,37 \quad L2 = 0,37$$

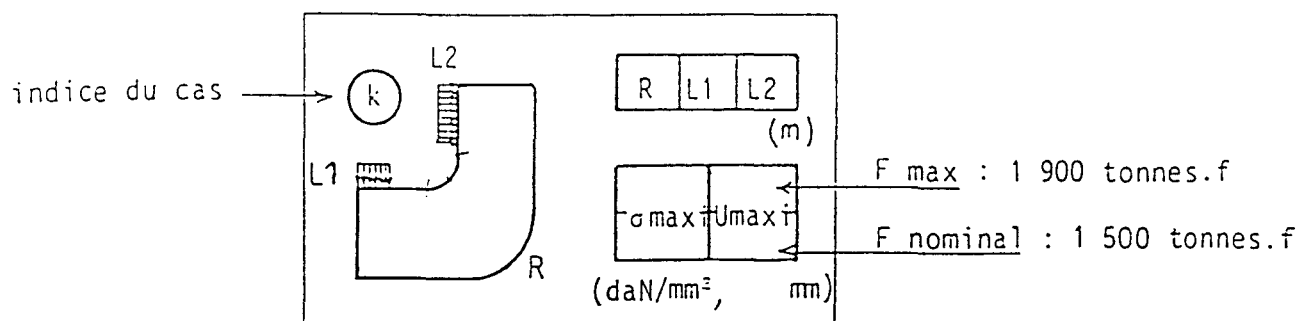
18



déplacements : $10 \text{ mm} \rightarrow 10^{-1} \text{ mm}$



III - RÉCAPITULATIF



1 <table> <tr><td>0,65</td><td>0</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>25,5</td><td>0,138</td><td></td></tr> <tr><td>19,4</td><td>0,106</td><td></td></tr> </table>	0,65	0	0,1	25,5	0,138		19,4	0,106		2 <table> <tr><td>0,65</td><td>0</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>17,0</td><td>0,143</td><td></td></tr> <tr><td>12,7</td><td>0,107</td><td></td></tr> </table>	0,65	0	0,2	17,0	0,143		12,7	0,107		3 <table> <tr><td>0,65</td><td>0</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>0,138</td><td></td></tr> <tr><td>9,5</td><td>0,105</td><td></td></tr> </table>	0,65	0	0,37	12,5	0,138		9,5	0,105	
0,65	0	0,1																											
25,5	0,138																												
19,4	0,106																												
0,65	0	0,2																											
17,0	0,143																												
12,7	0,107																												
0,65	0	0,37																											
12,5	0,138																												
9,5	0,105																												
4 <table> <tr><td>0,65</td><td>0,1</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>18,7</td><td>0,063</td><td></td></tr> <tr><td>14,2</td><td>0,052</td><td></td></tr> </table>	0,65	0,1	0,1	18,7	0,063		14,2	0,052		5 <table> <tr><td>0,65</td><td>0,2</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>14,5</td><td>0,067</td><td></td></tr> <tr><td>11,0</td><td>0,050</td><td></td></tr> </table>	0,65	0,2	0,2	14,5	0,067		11,0	0,050		6 <table> <tr><td>0,65</td><td>0,37</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>15,0</td><td>0,063</td><td></td></tr> <tr><td>11,4</td><td>0,045</td><td></td></tr> </table>	0,65	0,37	0,37	15,0	0,063		11,4	0,045	
0,65	0,1	0,1																											
18,7	0,063																												
14,2	0,052																												
0,65	0,2	0,2																											
14,5	0,067																												
11,0	0,050																												
0,65	0,37	0,37																											
15,0	0,063																												
11,4	0,045																												
7 <table> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>25,4</td><td>0,138</td><td></td></tr> <tr><td>19,2</td><td>0,104</td><td></td></tr> </table>	0	0	0,1	25,4	0,138		19,2	0,104		8 <table> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>16,7</td><td>0,142</td><td></td></tr> <tr><td>12,5</td><td>0,106</td><td></td></tr> </table>	0	0	0,2	16,7	0,142		12,5	0,106		9 <table> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>12,3</td><td>0,137</td><td></td></tr> <tr><td>9,2</td><td>0,104</td><td></td></tr> </table>	0	0	0,37	12,3	0,137		9,2	0,104	
0	0	0,1																											
25,4	0,138																												
19,2	0,104																												
0	0	0,2																											
16,7	0,142																												
12,5	0,106																												
0	0	0,37																											
12,3	0,137																												
9,2	0,104																												
10 <table> <tr><td>0</td><td>0,1</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>13,5</td><td>0,063</td><td></td></tr> <tr><td>14,1</td><td>0,052</td><td></td></tr> </table>	0	0,1	0,1	13,5	0,063		14,1	0,052		11 <table> <tr><td>0</td><td>0,2</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>9,3</td><td>0,034</td><td></td></tr> <tr><td>7,0</td><td>0,025</td><td></td></tr> </table>	0	0,2	0,2	9,3	0,034		7,0	0,025		12 <table> <tr><td>0</td><td>0,37</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>14,5</td><td>0,059</td><td></td></tr> <tr><td>11,1</td><td>0,045</td><td></td></tr> </table>	0	0,37	0,37	14,5	0,059		11,1	0,045	
0	0,1	0,1																											
13,5	0,063																												
14,1	0,052																												
0	0,2	0,2																											
9,3	0,034																												
7,0	0,025																												
0	0,37	0,37																											
14,5	0,059																												
11,1	0,045																												
13 <table> <tr><td>0,325</td><td>0</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>25,4</td><td>0,138</td><td></td></tr> <tr><td>19,3</td><td>0,105</td><td></td></tr> </table>	0,325	0	0,1	25,4	0,138		19,3	0,105		14 <table> <tr><td>0,325</td><td>0</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>16,9</td><td>0,143</td><td></td></tr> <tr><td>12,7</td><td>0,107</td><td></td></tr> </table>	0,325	0	0,2	16,9	0,143		12,7	0,107		15 <table> <tr><td>0,325</td><td>0</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>12,3</td><td>0,138</td><td></td></tr> <tr><td>9,4</td><td>0,105</td><td></td></tr> </table>	0,325	0	0,37	12,3	0,138		9,4	0,105	
0,325	0	0,1																											
25,4	0,138																												
19,3	0,105																												
0,325	0	0,2																											
16,9	0,143																												
12,7	0,107																												
0,325	0	0,37																											
12,3	0,138																												
9,4	0,105																												
16 <table> <tr><td>0,325</td><td>0,1</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>18,5</td><td>0,063</td><td></td></tr> <tr><td>14,1</td><td>0,052</td><td></td></tr> </table>	0,325	0,1	0,1	18,5	0,063		14,1	0,052		17 <table> <tr><td>0,325</td><td>0,2</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>14,2</td><td>0,066</td><td></td></tr> <tr><td>10,5</td><td>0,050</td><td></td></tr> </table>	0,325	0,2	0,2	14,2	0,066		10,5	0,050		18 <table> <tr><td>0,325</td><td>0,37</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>14,5</td><td>0,053</td><td></td></tr> <tr><td>11,1</td><td>0,045</td><td></td></tr> </table>	0,325	0,37	0,37	14,5	0,053		11,1	0,045	
0,325	0,1	0,1																											
18,5	0,063																												
14,1	0,052																												
0,325	0,2	0,2																											
14,2	0,066																												
10,5	0,050																												
0,325	0,37	0,37																											
14,5	0,053																												
11,1	0,045																												

ANNEXE 2

MESURE DES DEFORMATIONS ET CALCUL DES CONTRAINTES MAXI DANS LES CERCES

On va s'intéresser à la cerce D et à la cerce A . La cerce D a subi plus de déformations que les autres, alors que la cerce A a subi moins de déformations.

Calcul de $\sigma_{\max}$ dans la cerce D.

$$E_D = 6\,800 \text{ daN/mm}^2$$

$$\sigma'_{\max \text{ app}} = 70 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma'_{\max \text{ app}}}{E_D}$$

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_{\max} \times E (\text{acier})$$

$$\epsilon_{\max} = 1\,029 \mu \epsilon$$

$$\sigma_{\max} = 1\,029 \cdot 10^{-6} \times 2 \times 10^4$$

$$\sigma_{\max} = 21,6 \text{ daN/mm}^2$$

l'acier des cerces a une limite élastique $R_e = 28 \text{ daN/mm}^2$, ce qui nous laisse un coefficient de sécurité de $s = 1.3$

Calcul de $\sigma_{\max}$ dans la cerce A

$$E_A = 9\,700$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max \text{ app}}}{E_A}$$

$$\epsilon_{\max} = 721 \mu \epsilon$$

$$\sigma_{\max} = \epsilon_{\max} \times E (\text{acier})$$

$$\sigma_{\max} = 721 \cdot 10^{-6} \times 2.1 \cdot 10^4$$

$$\sigma_{\max} = 15.2$$

Les contraintes maximales dans les cerces sont comprises entre $15,2 \text{ daN/mm}^2$ et $21,6 \text{ daN/mm}^2$.

ANNEXE 3

DIMENSIONNEMENT DES PATINS A BILLES

Le poids du cadre biaxial (cerces + cales de réception + chargement) est de 20 tonnes, supporté par quatre vérins, chaque vérin récupère 5 tonnes, alors chaque patin supporte 5 tonnes. Supposons que l'on ait dans chaque patin un nombre N de billes, chaque bille supporte une charge :

$$P = \frac{510^3}{N} \text{ kg}$$

Pour des raisons d'encombrement, on a choisi des billes de diamètre 10 mm, il faut donc trouver un acier qui résistera aux pressions de contact entre les billes et les surfaces planes (A, B).

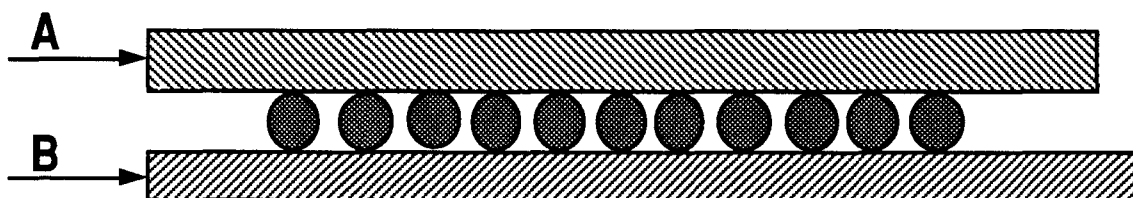


Figure a
Principe de base

• Pression de contact

Lorsque deux corps élastiques, deux billes pour fixer les idées, exercent une pression, l'un sur l'autre, une petite surface de contact se forme qui est le résultat de la déformation locale. Les pressions réparties sur cette surface sont appelées pressions de contact. Les valeurs de ces pressions et celles des contraintes qu'elles produisent dans les solides peuvent être calculées au moyen des relations de la théorie de l'élasticité [50]. Nous ne donnons ici que le résultat final d'une telle étude. Dans le cas de deux billes comprimées par les forces P (figure b), les pressions sont réparties sur le petit cercle de contact MN dont le rayon est donné par la relation :

$$a = 0,88^3 \sqrt{\frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{2 \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}}$$

dans laquelle E_1 et E_2 désignent les modules des deux billes et d_1 et d_2 les diamètres correspondants.

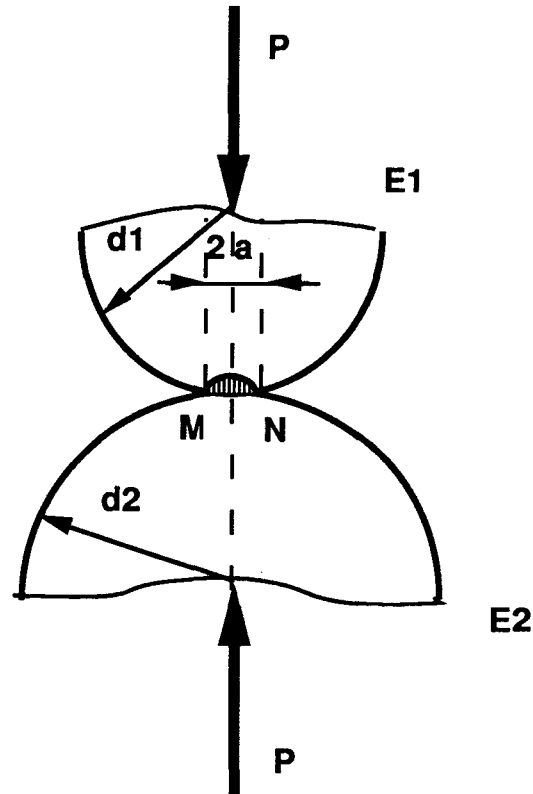


Figure b
Contraintes de contact entre 2 billes

La pression est maximum au centre du cercle de contact où sa valeur est :

$$P_{\max} = 1,5 \frac{P}{\pi a^2}$$

Le rapprochement des centres des billes dû à la déformation locale a pour expression :

$$\lambda = 0,77 \sqrt[3]{2 P^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2 \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

Lorsqu'une bille de diamètre d est pressée contre la surface plane d'un solide élastique, les formules cherchées se déduisent des relations (i), (ii) en y faisant $d_1 = d$, $d_2 = \infty$. En supposant $E_1 = E_2 = E$, nous trouvons dans ce cas :

$$a = 0,88 \sqrt[3]{\frac{P d}{E}} \quad ; \quad P_{\max} = 0,62 \sqrt[3]{\frac{P E^2}{d^2}} \quad ; \quad \lambda = 1,54 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2 d}}$$

- Calcul des pressions de contact

$$E = 21\,000 \text{ kg/mm}^2$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

$$P_{\max} = 0,62 \sqrt[3]{\frac{P E^2}{d^2}}$$

$$\text{On a choisi } N = 32 \implies P = \frac{5 \cdot 10^3}{32} = 156 \text{ kg}$$

$$P_{\max} = 0,62 \sqrt[3]{\frac{156 (21\,000)^2}{100}}$$

$$\implies P_{\max} = 547 \text{ kg/mm}^2$$

On a choisi un acier fortement allié avec 2 % de carbone et 12 % de chrome :

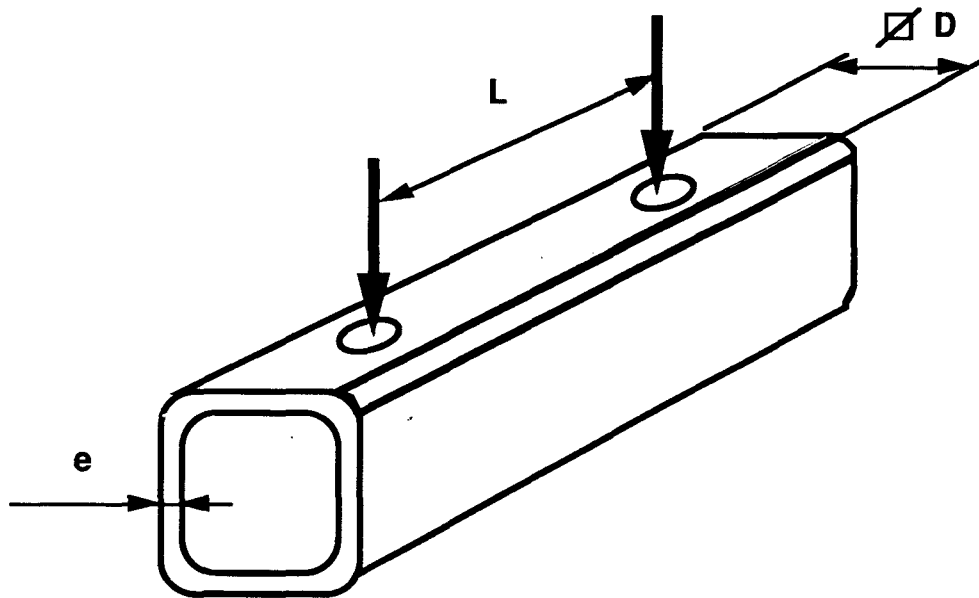
Z 200 C 12 trempé et revenu, ce qui donne une dureté de 62 HRC (780 kg f/mm²). On a un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,4.

ANNEXE 4

PREDETERMINATION DES CONTRAINTES ET DEFORMATION DE LA POUTRE-SOMMIER DU 3^{EME} AXE

Le sommier supérieur, constitué de deux poutres tubulaires de section carrée, transmet aux quatre tirants l'effort vertical F_z .

Considérons une seule poutre tubulaire de section carrée de dimensions identiques équilibrant un effort $F = F_z/2$ par deux tirants. Hypothèse des charges ponctuelles



Caractéristiques

$$F = 875 \cdot 10^3 \text{ daN} \quad L = 1\,450 \text{ mm} \quad D = 560 \text{ M} \quad e = 80 \text{ mm}$$

- Moment d'inertie : $I_{xx} = 6,06 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$
- Moment maxi : $M_{f_{\max}}$

$$\begin{aligned} M_f &= FL/4 \\ M_f &= 875 \cdot 10^3 \times 1.45/4 = 317 \cdot 10^3 \text{ daN/m} \end{aligned}$$

- Contrainte maxi : $\sigma_{\max}$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= M_f \cdot D / 2 I_{xx} \\ \sigma &= 317 \cdot 10^6 \cdot 0,210^3 \cdot 6,06 \cdot 10^9 \\ \sigma &= 14,8 \text{ daN/mm}^2 \end{aligned}$$

- Déplacement maxi : $U_{\max} = f$

$$\begin{aligned} f &= FL^3 / 48 E I_{xx} \\ f &= 875 \cdot 10^3 \times (1,45)^3 \cdot 10^9 / (2,110^4 \times 6,06 \cdot 10^9 \times 48) \\ U_{\max} &= 0,43 \text{ mm} \end{aligned}$$

Conclusion :

Pour un acier du type E24, la poutre est convenablement dimensionnée.

ANNEXE 5

DIMENSIONNEMENT DES TIRANTS

Le matériau des tiges est un 35 CND8 traité :

$$\sigma_e = 95 \text{ daN/mm}^2$$

$$\sigma_u = \sigma \text{ d'utilisation} = \frac{\sigma_e}{s}$$

s : coefficient de sécurité

Effort vertical à reprendre : $F_t = 1\,750\,103 \text{ daN}$

L'effort repris par un seul tirant :

$$F = 1750/4 = 437,5 \cdot 10^3 \text{ daN}$$

$$S : \text{Section de la tige, } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

On a :

$$\sigma_u = \frac{F}{S}$$

$$\sigma_u = \frac{4 F}{\pi d^2}$$

$$\Rightarrow d = \sqrt{\frac{4F}{\pi \sigma_u}} = 2 \sqrt{\frac{F}{\pi \sigma_e}}$$

$$d = 2 (S)^{1/2} \left(\frac{F}{\pi \sigma_e} \right)^{1/2}$$

$$d = 70,9 (s)^{1/2}$$

Pour un coefficient de sécurité de 2 ($s = 2$) $d_{\min} = 100 \text{ mm}$